

Володимир Галян, Андрій Кевшин, Аліна Третяк

СЕНСОРНІ СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

Волинський національний університет імені Лесі Українки
Кафедра експериментальної фізики,
інформаційних та освітніх технологій

Володимир Галян, Андрій Кевшин, Аліна Третяк

СЕНСОРНІ СИСТЕМИ В ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Луцьк – 2025

УДК 537.621.3

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол № 10 від 18 червня 2025 р.)

Рецензент:

П. П. Шигорін – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики ім. А.В. Свідзинського Волинський національний університет імені Лесі Українки.

Галян В.В., Кевшин А.Г., Третяк А. П.

Сенсорні системи в електронних пристроях : методичні рекомендації до лабораторних робіт / В.В. Галян, А.Г. Кевшин, А.П. Третяк. Луцьк : Вежа-Друк, 2025. 57 с.

Методичні рекомендації складено відповідно до силябусу дисципліни «Сенсорні системи в електронних пристроях» Навчально-наукового фізико-технологічного інституту. Рекомендовано студентам фізичних та технічних спеціальностей, а також фахівцям в галузі електронної інженерії.

УДК 537.621.3

©Галян В.В., Кевшин А.Г., Третяк А. П., 2025

ЗМІСТ

Вступ	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1	6
Вивчення сенсорів магнітного поля, побудованих на основі ефекту Холла	
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2	12
Вимірювання температури за допомогою сенсорів та їх градування	
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3.	21
Використання фоточутливих напівпровідників, як сенсорів освітлення	
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4.	28
Дослідження спектральної характеристики напівпровідникового фотосенсора	
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5.	38
Будова, принцип дії та вплив температури на статичні характеристики тензосенсорів	
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6.	45
Вплив чинників оточуючого середовища на статичні характеристики сенсорів	
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7.	50
Моніторинг CO ₂ -сенсором та оцінка ступеня забрудненості атмосферного повітря	

ВСТУП

Сенсорні системи є невід’ємною складовою більшості сучасних електронних пристроїв. Вони забезпечують функціональність «розумного» середовища – від простих вимірювальних приладів до складних автоматизованих систем керування, робототехніки, біомедичних пристроїв, мобільної техніки та інтернету речей (IoT). Саме сенсори дозволяють електроніці «відчувати» навколишній світ, трансформуючи фізичні величини (температуру, тиск, освітленість, прискорення, магнітне поле, концентрацію газів тощо) в електричні сигнали, які можуть бути оброблені цифровими або аналоговими мікросхемами.

Метою лабораторного курсу є надання студентам практичних знань і навичок щодо побудови, підключення та дослідження сенсорних елементів і систем у складі електронних пристроїв. Курс структуровано таким чином, щоб кожна лабораторна робота мала чітко сформульовану мету, короткий теоретичний огляд, методику виконання експерименту, приклади практичної реалізації та питання для самоконтролю. Це сприяє формуванню системного мислення та міждисциплінарного підходу у студентів, оскільки сенсорні технології перебувають на межі фізики, електроніки, комп’ютерних наук та інженерії.

Загалом, засвоєння лабораторного курсу «Сенсорні системи в електронних пристроях» дозволяє здобувачам освіт:

зрозуміти принципи побудови сенсорних систем; навчитись інтерпретувати фізичні сигнали у цифровій формі; отримати базові навички інтеграції сенсорів до електронної апаратури; розвивати технічне мислення, здатність до аналізу, конструювання та вдосконалення сенсорних пристроїв.

Лабораторний практикум є важливим етапом підготовки майбутніх фахівців у галузі електроніки, автоматизації, комп’ютерної інженерії та суміжних технологічних напрямів. Його результати можуть бути безпосередньо застосовані у курсових і дипломних проєктах, а також у стартапах і практичних інженерних рішеннях.

Лабораторна робота 1

Вивчення сенсорів магнітного поля, побудованих на основі ефекту Холла

Мета роботи – вивчення конструкції сенсорів Холла, вимірювання індукції магнітних полів та обчислення чутливості.

Теоретичні відомості

Ефектом Холла називають явище виникнення в металі або напівпровіднику, по якому проходить струм, поперечного електричного поля під дією магнітного поля, лінії індукції $\vec{B}$ якого перпендикулярні до напрямку струму (рис. 1а).

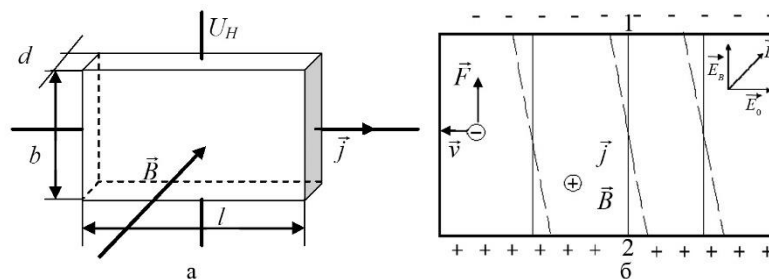


Рисунок 1 – Схема експерименту з вимірювання ЕРС Холла

Ефект Холла пояснюється електронною теорією провідності. Розглянемо проходження струму через металеву пластину у вигляді паралелепіпеда. За відсутності магнітного поля струм у ній обумовлений лише електричним полем з напруженістю $\vec{E}_0$. Оскільки носії заряду – електрони – мають від'ємний заряд, їх швидкість напрямленого руху $\vec{v}$ протилежна вектору густини струму $\vec{j}$. Еквіпотенціальні поверхні цього поля утворюють систему перпендикулярних до вектора $\vec{E}_0$ площин (рис. 1б). Потенціал в усіх точках еквіпотенціальної поверхні, а отже, і в точках 1 і 2 однаковий. При увімкненні магнітного поля на кожний носій струму починає діяти сила Лоренца $\vec{F}$, що напрямлена вздовж сторони пластинки b , яка дорівнює

$$F = e\nu B, \quad (1)$$

де e – заряд електрона; ν – швидкість руху носіїв заряду; B – модуль вектора індукції магнітного поля.

Унаслідок цього електрони відхиляються від прямолінійної траєкторії до верхнього краю пластини. Біля цього краю утворюється надлишок від'ємних, відповідно біля нижнього краю – надлишок позитивних зарядів. Отже, виникає додаткове поперечне електричне поле $\vec{E}_B$. Якщо напруженість цього поля досягне такого значення, що його дія на заряди зрівноважить силу Лоренца, то встановиться стаціонарний розподіл зарядів у поперечному напрямі пластинки. Відповідне значення $\vec{E}_B$ визначається умовою

$$eE_B = e\nu B, \quad (2)$$

звідки

$$E_B = \nu B. \quad (3)$$

Поля $\vec{E}_B$ та $\vec{E}_0$ додаються і утворюють результуюче поле з напруженістю $\vec{E}$, яка тепер буде спрямована під деяким кутом до напрямку проходження струму (рис. 1б). Еквіпотенціальні поверхні завжди перпендикулярні до силових ліній і, отже, до вектора напруженості поля $\vec{E}$. Тому ці поверхні повернуться і займуть положення, зображене на рис. 1б пунктиром. Точки 1 та 2, що раніше лежали на одній і тій самій еквіпотенціальній поверхні, тепер мають різні потенціали. Щоб знайти напругу між цими точками, яка є напругою Холла, треба помножити відстань між ними b на напруженість поля $\vec{E}_B$:

$$U_H = bE_B = b\nu B. \quad (4)$$

Оскільки $j = en\nu$, після підстановки у співвідношення (4) отримаємо

$$U_H = bE_B = \frac{1}{en}bjB, \quad (5)$$

де j – густина струму; n – концентрація носіїв заряду.

Введемо позначення $R_H = \frac{1}{en}$, тоді рівняння (5) можна звести до вигляду

$$U_H = bE_B = R_H bjB, \quad (6)$$

де константу R_H називають сталою Холла.

Для реальних вимірювань використовують дещо іншу форму цього виразу.

Врахувавши, що густина струму дорівнює

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{bd}, \quad (7)$$

отримаємо

$$U_H = R_H B \frac{I}{d}. \quad (8)$$

З цього виразу видно, що вимірявши напругу Холла та знаючи струм, що проходить крізь пластину, можна знайти магнітну індукцію зовнішнього поля. Зауважимо, що відстань d визначає довжину ребра прямокутного паралелепіпеда в напрямку дії магнітного поля. Таким чином, металеві або напівпровідникові пластини можуть бути використані для детектування магнітного поля. Звичайно, як активний матеріал перетворювача (датчика) використовують напівпровідники.

Конструктивно сенсор Холла являє собою прямокутну напівпровідникову пластину, до бокових граней якої приєднані дві пари електродів, одна з них призначена для підведення електричного струму, інша - для вимірювання різниці потенціалів Холла. Вся конструкція розміщується в магнітному полі, яке потрібно виміряти.

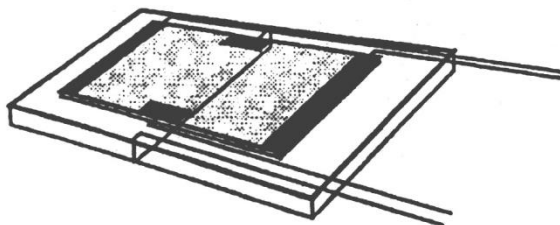


Рисунок 2 – Конструкція перетворювача Холла на ізолюючій підкладці

Відношення $\frac{R_H}{d} = \gamma_0$ у співвідношенні (8) називають питомою чутливістю ненавантаженого ідеального перетворювача Холла. Під ідеальним розуміють

прямокутний перетворювач Холла, який має нескінченно велику довжину в повздовжньому напрямку і точкові холлівські електроди. Реальний перетворювач Холла, який має довільні геометричні розміри, також характеризується питомою чутливістю

$$\gamma = \gamma_0 \varphi \quad (9)$$

Коефіцієнт φ залежить від співвідношення геометричних розмірів і значення магнітної індукції. Отже, напругу Холла реального перетворювача Холла можна знайти з рівняння

$$U_H = \gamma B \quad (10)$$

Відстань між керуючими і холлівськими електродними у перетворювачах Холла, зображених на рис.1, як правило, становить кілька міліметрів.

При нерівномірному нагріванні напівпровідника між кожною парою електродів може виникнути термоЕРС, що зумовлює похибки при вимірюваннях магнітного поля. Щоб зменшити відстань між електродами, використовують форму пластин, показану на рис. 3.

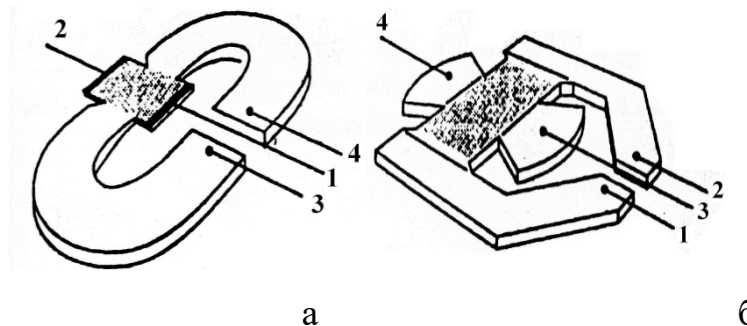


Рисунок 3 – Перетворювач Холла без впливу паразитної термоЕРС:

а – для сенсорів магнітного поля;

б – для модуляторів;

1, 2 – електроди для керуючого струму;

3, 4 – електроди для зняття напруги Холла

Порядок виконання роботи

1. Під'єднати джерело струму до поздовжніх холлівських електродів, запропонованого викладачем перетворювача. Поперечні холлівські контакти підключити до вольтметра та ввести перетворювач Холла у магнітне поле.

1.1 Подати на поздовжні контакти перетворювача струм I_1 і виміряти значення ЕРС.

1.2 Змінюючи магнітне поле за допомогою блока живлення, побудувати залежність $U(B)$ при $I_1 = \text{const}$.

1.3 Змінюючи струм I на поздовжніх електродах та повторюючи пункти 1.1 і 1.2, отримати дві залежності $U(B)$.

2. Підключивши джерело струму I до поперечних контактів, а вольтметр - до поздовжніх, визначити значення ЕРС та провести послідовно вимірювання аналогічно пунктам 1.1, 1.2, 1.3.

3. Обчислити питому чутливість сенсорів γ_0 при поздовжньому і поперечному підключенні. Розрахувати експериментальне значення чутливості сенсора, як відношення зміни вихідної величини до зміни вхідної величини (при поздовжньому і поперечному підключенні):

$$S = \Delta U_x / \Delta B.$$

3. Зробити висновки щодо використання перетворювачів Холла як сенсорів магнітного поля.

Зауваження. Концентрація носіїв струму в зразку рівна $n = 1,519 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Геометричні розміри зразка (при поздовжньому включенні): $a = 11,5 \text{ мм}$; $b = 1,6 \text{ мм}$; $d = 2,45 \text{ мм}$.

Контрольні запитання

1. У чому полягає ефект Холла?
2. Конструкція та принцип роботи датчика Холла.
3. Недоліки та переваги сенсорів магнітного поля на ефекті Холла.
4. При якому підключенні живлення до перетворювача Холла (поздовжньому чи поперечному) чутливість сенсора буде більшою?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: науково-навчальне видання: у 3 томах / за ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.1. 595 с.
2. Решетняк С. О., Захарченко Р. В., Захарченко В. Н., Скирта Ю. Б. Фізика твердого тіла. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 189 с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48304>
3. Галушак М. О., Мокляк В. В. Фізика. Спеціальний курс : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 430 с.
4. Пастушенко С. Фізика. Модуль 5, 6. Фізика твердого тіла. Ядерна фізика : навч. посіб. Київ : Літера ЛТД, 2020. 224 с.
5. Попель О. М. Фізика твердого тіла : текст лекцій. Львів : Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, 2020. 104 с.
6. Ільченко В. І., Обухова Т. Ю. Фізика твердого тіла. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 56 с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37592>

У термоелектричних термометрах для вимірювання температури використовується відкрите у 1821 р. Зеебеком явище термоелектрики (ефект Зеебека). Якщо два провідники з різних металевих матеріалів А і В з'єднати кінцями в замкнутий контур і місця з'єднання (спаї) розмістити при різних температурах T_1 і T_2 , то в контурі виникне електричний струм (рис. 1). Зміна знака різниці температур спаїв супроводжується зміною напрямку струму.

Провідники, що утворюють спаї, називають *термоелектродами*, а сам пристрій – *термопарою*. Один із спаїв, що розміщують у середовищі, температура якого вимірюється, є робочим кінцем термопари, а другий, що знаходиться при постійній температурі, є вільним кінцем термопари. Як правило, вільний спай термопари підтримують при температурі 0 °С. Важливим є те, що термоелектричний контур можна розімкнути у будь-якому місці і включити в нього один або декілька однакових чи різнорідних провідників. Якщо їх місця з'єднання знаходяться при однаковій температурі, то паразитної термоелектрорушійної сили (ЕРС) не виникає. Це дозволяє, наприклад, подовжувати вільні кінці термопари за допомогою матеріалів, що мають добру провідність.

Термоелектрорушійна сила, що виникає у контакті двох металів (скорочено термоЕРС), обумовлена трьома причинами:

- 1) залежністю рівня Фермі від температури;
- 2) дифузією електронів;
- 3) захопленням електронів фононами.

Положення рівня Фермі E_F у металі залежить від його температури. Тому стрибок потенціалу при переході з одного металу в інший (тобто внутрішня контактна різниця потенціалів) для спаїв, що знаходяться при різних температурах, неоднаковий. Відповідно сума стрибків потенціалу не дорівнює нулю. Одного цього достатньо для виникнення ЕРС в електричному колі (рис. 1).

Щоб зрозуміти другу причину виникнення термоЕРС, розглянемо однорідний металевий провідник, уздовж якого створено градієнт температури

ніж енергія Ферм, у нагрітого кінця буде більшою, ніж у холодного; концентрація ж електронів з енергією, що менша, ніж енергія Фермі, буде, навпаки, у нагрітого кінця меншою. У результаті вздовж провідника виникає градієнт концентрації електронів із заданим значенням енергії. Це спричиняє дифузію швидших електронів до холодного кінця, а повільніших – до гарячого. При цьому дифузійний потік швидких електронів буде більшим, ніж потік повільних електронів. Тому поблизу холодного кінця утворюється надлишок електронів, а поблизу теплого – їх нестача. Це приводить до виникнення дифузійного доданка термоЕРС.

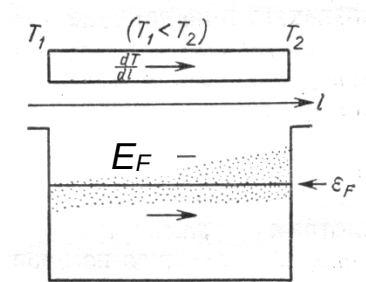


Рис. 2. Дифузія електронів уздовж неоднорідного нагрітого стрижня. Верхня стрілка вказує напрям дифузії швидших електронів, нижня стрілка – напрям дифузії повільніших електронів

Третя причина виникнення термоЕРС полягає в захопленні електронів фононами. За наявності градієнта температури вздовж провідника виникає дрейф фононів. Стикаючись з електронами, фонони надають їм направлений рух від більш нагрітого кінця провідника до менш нагрітого. У результаті відбувається накопичення електронів на холодному кінці і збіднення електронами гарячого кінця. Це приводить до виникнення «фононного» доданка термоЕРС.

Обидва процеси – дифузія електронів і захоплення електронів фононами – приводять до утворення надлишку електронів поблизу холодного кінця провідника і нестачі їх поблизу гарячого кінця. В результаті всередині провідника виникає стороннє (неелектростатичне) поле E_{cm}^* , направлене назустріч градієнту температури.

ТермоЕРС, що виникає у електричному колі (рис. 1), яке складається з двох провідників можна подати у вигляді

$$\varepsilon_{\text{термо}} = \alpha T + \beta T^2$$

Величину α називають диференціальною, або питомою, термоелектрорушійною силою даної пари матеріалів. Для більшості пар металів α має порядок 10^{-5} - 10^{-4} В/К, в той час як для напівпровідників вона може сягати значно більших значень (до $1,5 \times 10^{-3}$ В/К).

В окремих випадках питома термоЕРС слабо залежить від температури. Тоді формулу (1) можна приблизно подати у вигляді

$$\varepsilon_{\text{термо}} = \alpha(T_2 - T_1)$$

У більшості випадків при збільшенні різниці температур спайв термо ЕРС змінюється складно, аж до того, що вона може змінювати знак. Так, наприклад, якщо один спай пари металів залізо - мідь підтримувати при 0°C , то при температурі другого спаю, що дорівнює приблизно 540°C , термо-ЕРС обертається на нуль; при нижчій температурі спаю термоЕРС має один знак, при вищій – інший. Для виготовлення термопар вибирають пари металів, зміна термо-ЕРС яких при зміні температури є близькою до лінійної. Про значення температури можна судити за силою виникаючого термоструму, що вимірюється гальванометром, більш точний результат можна отримати, якщо вимірювати термоЕРС методом компенсації. Перед вимірюванням температури термопару обов'язково градуують.

Вимоги до матеріалів термопар

Для зручності вимірювань температури за допомогою термопари бажано, щоб її термоЕРС була значною, а електроопір не дуже високим. У цьому випадку можна вимірювати температуру без особливих додаткових пристроїв, таких, наприклад, як підсилювач, а також на значній відстані між термопарою і вимірювальним приладом.

Для підбору пар матеріалів термопари користуються рядом термоелектричних потенціалів (рис. 3). Оскільки виміряти потенціал окремого термоелектрода залежно від температури важко, він вимірюється відносно

платини, для якої вважається, що $\Delta\varepsilon_{Pt}/\Delta T = 0$. Термоелектрод, розміщений у цьому ряду вище, завжди позитивний по відношенню до розміщеного нижче. Чим далі лежать матеріали у термоелектричному ряду один стосовно одного, тим більше термоЕРС генерує термопара. Слід також враховувати, що термоелектрична характеристика термопари повинна бути лінійною у як можна ширшому діапазоні температур.

Матеріали для термопар повинні мати як можна вищу точку плавлення, щоб термопара працювала стабільно у робочому інтервалі температур, та бути доступними. Вони повинні легко оброблятися для отримання потрібної форми сенсора (дріт, стрічка). У матеріалі термоелектродів у робочому діапазоні температур не повинно відбуватися алотропічних перетворень, що викликають стрибкоподібні зміни термоЕРС. Термоелектроди повинні мати достатню корозійну стійкість як в окиснювальному, так і відновному середовищі. У процесі експлуатації в результаті окалиноутворення або окрихчування їх термоелектричні властивості не повинні змінюватися.

Легуючі елементи, що входять до складу сплаву, в результаті селективного окиснення або випаровування при високій температурі не повинні дифундувати назовні. Якщо ці умови виконуються впродовж тривалого терміну експлуатації, то отримують рівномірну і стабільну залежність термоЕРС від температури. Крім того, необхідно звертати увагу на те, щоб термоЕРС як можна менше змінювалася при механічному навантаженні термопари, такому, як розтягування, вигин, скручування і зминання. Вищенаведеним вимогам відповідають такі термопари: Cu-константан, хромель (NiCr)-константан, Fe-константан, хромель–алюмель (NiCr-Ni), палаплат (PtRh₅-AuPd₄₆Pt₂), платинель (PdPt₃₁Au₂₄-AuPd₃₅),

Загальні відомості про терморезистори

Найпростішим датчиком температури є напівпровідниковий резистор, виготовлений у вигляді стержня з двома омичними контактами на кінцях. При температурах поблизу кімнатної концентрація носіїв струму змінюється, в основному, за рахунок власних носіїв заряду. Для збільшення відносної зміни

концентрації при зміні температури необхідно використовувати напівпровідники з провідністю близькою до власної.

Залежно від призначення терморезистори працюють в двох основних режимах. При малих напругах струм, що протікає через терморезистор, не викликає його помітного розігрівання і визначається за законом Ома: $I = U / R$, де R залежить від температури та навколишнього середовища. Цей режим використовується в пристроях датчиків температури і схемах температурної компенсації. В іншому режимі істотним є вплив зовнішніх факторів, наприклад, підвищення температури, тоді вольт-амперна характеристика терморезистора змінюється. На цій основі можуть бути побудовані реле, що реагують на зміну температури, вологості, швидкості потоку, рівня рідини і т.д.

Основною функціональною залежністю терморезистора є залежність опору напівпровідника від температури і називається температурною характеристикою:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{kT}} = R_0 e^{\frac{B}{T}} \quad (3)$$

де: R_0 – опір напівпровідника, який визначається з умови $\Delta E \ll kT$; ΔE – енергія активації; $B = \frac{\Delta E}{k}$ – коефіцієнт температурної чутливості.

При дослідженні напівпровідника в області власної електропровідності $\Delta E = E_g$ (E_g – ширина забороненої зони). Для зняття температурної характеристики терморезистор поміщують в термостат. Вимірюють опір і температуру через кожні 5 °С. Будують графік $R = f(T)$ (T – за шкалою Кельвіна), $\ln(R) = 1/T$.

Коефіцієнт температурної чутливості B може бути визначений із вимірювань опору при T_1 і T_2 :

$$R_1 = R_0 e^{\frac{B}{T_1}}; R_2 = R_0 e^{\frac{B}{T_2}} \quad (4)$$

Поділивши почленно, отримаємо:

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (5)$$

Зауваження. Для обчислення B вибирають такі T_1 та T_2 , які відрізняються між собою не менш як на 20К. Значення B дозволить обчислити енергію активації: $\Delta E = kV$. За формулою:

$$\alpha = \frac{dR}{RdT}; \quad \alpha = \frac{B}{T^2}. \quad (6)$$

обчислюють температурний коефіцієнт опору, який показує відносну зміну абсолютної величини опору при зміні температури на 1 К

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути нагрівний елемент кнопкою «Нагрів».
2. Починаючи від кімнатної температури до 80 °С з кроком 5 °С фіксувати:
 - а) температуру еталонного термометра;
 - б) значення термо-ерс термопар;
 - в) опір терморезистора.
3. Проградувати термопару та терморезистор за шкалою Кельвіна. Для цього при одночасному нагріванні термопар та терморезистора отримати залежність $U(T)$, $R(T)$ відповідно.
4. Результати вимірювань занести в таблицю. Побудувати графіки залежностей $U(T)$, $R(T)$, $\ln(R) = 1/T$.

Таблиця 1.

Результати вимірювань термо-ерс та опору від температури.

T, К								
U, мВ								
R, Ом								

5. Обчислити питому термоелектрорушійну силу для досліджених матеріалів термопар: $\alpha = \Delta \varepsilon_{\text{термо}} / \Delta T$.

6. Визначити коефіцієнт температурної чутливості B , температурний коефіцієнт опору α та енергію активації.
7. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які пристрої називаються термометрами?
2. Пояснити суть ефекту Зеебека.
3. Пояснити причини виникнення термоЕРС в термопарі.
4. Сформулювати вимоги до матеріалів термопар.
5. Які термопари найчастіше використовуються для вимірювання температури і чому?
6. Користуючись рядом термоелектричних потенціалів, підібрати пари матеріалів, які дають максимальну термоЕРС. Розрахувати це значення.
7. Пояснити, як проводиться градування термопари та терморезистора.
8. Назвіть причини залежності опору напівпровідника від температури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: науково-навчальне видання: у 3 томах / за ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліґа-Прес, 2003. Т.1. 595 с.
2. Галуцак М. О., Мокляк В. В. Фізика. Спеціальний курс : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 430 с.
3. Пастушенко С. Фізика. Модуль 5, 6. Фізика твердого тіла. Ядерна фізика : навч. посіб. Київ : Літера ЛТД, 2020. 224 с.
4. Попель О. М. Фізика твердого тіла : текст лекцій. Львів : Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, 2020. 104 с.

Лабораторна робота 3

Використання фоточутливих напівпровідників, як сенсорів освітлення

Мета роботи – вивчення принципу роботи напівпровідникових оптоелектронних приладів (фотодіода і фоторезистора) як сенсорів освітлення. Дослідження залежностей робочих характеристик приладів від інтенсивності світла і визначення чутливості сенсорів.

Теоретичні відомості

Фоторезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від освітлення. Існують різні види поглинання світла. При поглинанні напівпровідником квантів світла – фотонів – їх енергія передається електронам у валентній зоні, які під дією цієї енергії можуть переходити у зону провідності, змінюючи опір матеріалу. Тобто енергія квантів іде на іонізацію атомів. Чим більше квантів світла падає на напівпровідник, тим більша кількість електронів переходить з валентної зони у зону провідності, а провідність напівпровідника зростає.

Основним елементом фоторезистора є напівпровідниковий світлочутливий шар, який може бути виконаний у вигляді монокристалічної або полікристалічної пластини напівпровідника або у вигляді полікристалічної плівки, нанесеної на діелектричну підкладку. Як напівпровідниковий матеріал фоторезисторів найчастіше використовують сульфід кадмію, селенід кадмію або сульфід свинцю. На поверхню світлочутливого шару наносять металеві електроди. Іноді електроди наносять безпосередньо на діелектричну підкладку перед осадженням напівпровідникового шару.

Поверхню напівпровідникового світлочутливого шару, що розміщений між електродами, називають робочою площиною. Фоторезистори виготовляють з робочими площадками у вигляді прямокутників, міандра та кільця. Площа

робочих площадок різних фоторезисторів найчастіше становить від десятих частин до десятків квадратних міліметрів.

Пластину з нанесеним на неї напівпровідниковим світлочутливим шаром або пластину напівпровідника поміщають у пластмасовий чи металевий корпус. Напроти робочої площадки роблять вікно з прозорого матеріалу.

Залежно від призначення фоторезистори можуть бути одно- та багатоелементними, з охолодженням та без, відкриті та герметичні, виконані у вигляді окремих елементів або входити до складу інтегральних схем. Для розширення функцій їх доповнюють фільтрами, лінзами, підсилювачами, системами охолодження та ін. На рис.1, для прикладу, наведено конструкцію фоторезистора, що охолоджується.

Вольт-амперні характеристики фоторезистора являють собою залежність струму через прилад (фотострум) від прикладеної напруги при постійній освітленості. Розрізняють два види струмів: світловий (при освітленні фоторезистора) і темновий (у темряві). В робочому діапазоні напруг вольт-амперні характеристики фоторезисторів при різних значеннях світлового потоку практично лінійні. Але у більшості плівкових фоторезисторів лінійність

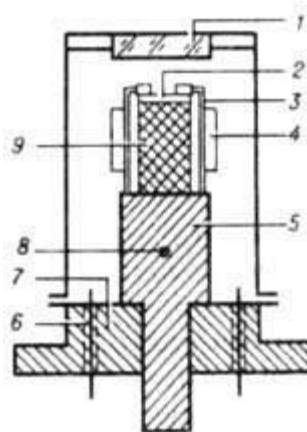


Рис. 1. Фоторезистор, що охолоджується: 1 – вхідне вікно; 2 – фоточутливий елемент; 3 – контактна колодка; 4 – підсилювач; 5 – теплохід; 6 – електричні виводи; 7 – основа; 8 – терморезистор; 9 – термоелектричний охолоджувач

вольт-амперної характеристики порушується при малих напругах. Ця нелінійність пов'язана з контактними явищами між окремими зернами або кристалітами напівпровідника.

Світлова або люкс-амперна характеристика фоторезистора являє собою залежність фотоструму $I_f = I_{св} - I_{тем}$ від освітленості. Фоторезистори мають сублінійну світлову характеристику.

Спектральна характеристика фоторезистора – це залежність фотоструму від довжини хвилі падаючого світла на робочу площадку фоторезистора. Тому при виготовленні фоторезисторів враховується довжина хвилі, при якій буде працювати фоторезистор. Наприклад, інфрачервоні фоторезистори мають найбільшу чутливість у інфрачервоному спектрі світла.

Стала часу, або інерціальність, – це швидкість зміни опору фоторезистора при зміні освітленості.

Для визначення цієї швидкості спочатку фоторезистор на деякий час розміщують під джерелом світла, потім повністю затемнюють і вимірюють час, за який він відновить свій опір на 63% (у e раз).

Звичайні фоторезистори мають порівняно велику інерціальність, і тому можуть сприймати світлові імпульси з частотою декілька кілогерц.

Темновий опір – це опір фоторезистора за відсутності світла. Темновий опір прийнято вимірювати через 30 секунд після затемнення фоторезистора.

Питома чутливість – це відношення фотоструму до світлового потоку і прикладеної напруги.

Чутливість називають інтегральною, оскільки її вимірюють при освітленні фоторезистора світлом складного спектрального складу. Питомі інтегральні чутливості різних фоторезисторів набирають значення від 1 до 600 мА/(В·лм).

Фотодіод – фотогоальванічний приймач випромінювання без внутрішнього підсилення, його фоточутливим елементом є напівпровідниковий діод. Фотодіод поєднує у собі переваги напівпровідникових приладів (малі маса і розміри, великий термін служби, низькі напруги живлення, економічність) з більш

високою чутливістю порівняно з електровакуумними фотоелементами і фоторезисторами.

Будова фотодіода аналогічна будові звичайного площинного напівпровідникового діода. Фотодіод виконаний так, що його p-n – перехід однією стороною повернений до скляного вікна, через яке відбувається освітлення, і захищений від впливів світла з інших боків.

Напруга джерела живлення прикладена до фотодіода у зворотному напрямку. Коли фотодіод не освітлено, у колі проходить зворотний (темновий) струм невеликої величини (10 – 20 мкА для германієвих і 1 – 2 мкА для кремнієвих діодів).

При освітленні фотодіода з'являється додаткова кількість електронів і дірок, внаслідок чого збільшується перехід неосновних носіїв заряду: електронів з p-області в n-область і дірок у зворотному напрямку. Це приводить до збільшення струму в електричному колі. При правильно підібраному опорі навантаження R_n і напрузі джерела живлення цей струм буде залежати лише від освітленості приладу, а спадання напруги на опорі можна розглядати як корисний сигнал, що впливає на інші елементи схеми.

Слід зазначити, що фотодіод можна включати у схеми як із зовнішнім джерелом живлення, так і без нього. Режим роботи фотодіода із зовнішнім джерелом живлення називають фотодіодним, а без зовнішнього джерела – вентильним.

У вентильному режимі у фотодіоді під дією світлового потоку виникає ЕРС, тому він не має потреби у зовнішньому джерелі напруги. В такому режимі фотоеlement працює як генератор, що перетворює енергію електромагнітних хвиль в енергію електричного струму.

Розглянемо основні характеристики фотодіодів.

Вольт-амперна характеристика $I_\partial = f(U_\partial)$ при $\Phi = \text{const}$ визначає залежність струму фотодіода від напруги на ньому при сталій величині світлового потоку. При повному затемненні через фотодіод проходить темновий струм, який дорівнює сумі зворотного струму насичення p-n - переходу і струму витоку. Із

зростанням світлового потоку I_d збільшується. Характерною ознакою робочої області вольт-амперних характеристик є практично повна незалежність струму фотодіода від прикладеної напруги. Такий режим настає при зворотних напругах на діоді порядку 1 В. Оскільки темновий струм малий, то відношення струму при освітленні до темнового струму велике, що дуже важливо при індикації освітлення. Якщо зворотна напруга перевищить деяке допустиме значення, то в р-п - переході виникає ефект лавиноподібного розмноження носіїв заряду, що може призвести до виходу фотодіода з ладу.

Оскільки залежності опору фоторезистора і струму чи напруги короткозамкненого фотодіода від освітленості мають характер, близький до лінійного, то цими приладами користуються як сенсорами освітленості.

Порядок виконання роботи та методичні вказівки

1. Одержати допуск до виконання роботи.
2. Скласти електричне коло за схемою Рис. 2.
3. Використовуючи як джерело світла природне освітлення, визначити темновий струм фотодіода, що накоротко включений з мікроамперметром.

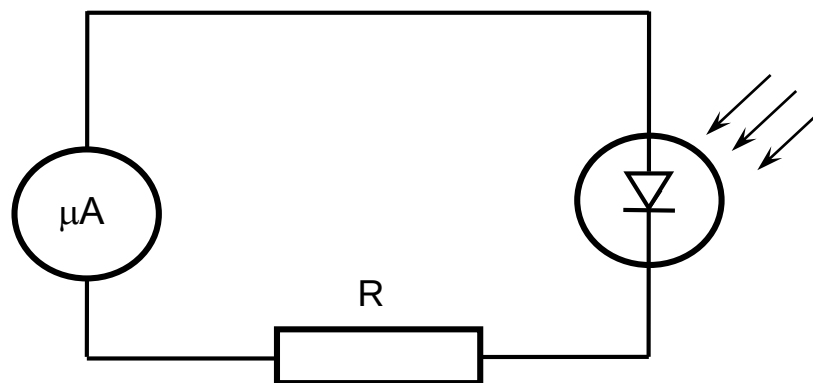


Рис. 2. Схема включення фотосенсора при вентильному режимі.

4. Змінюючи освітлення фотоелемента записати покази мікроамперметра (Провести 6-8 вимірів).

5. В місці розташування фотодіода встановити люксометр. Виміряти люксометром освітленість при тому ж значенні напруги блока живлення (2, 4, 6, 7, 8, 9, 10 В), яку подавали на лампу розжарення при освітленні фотодіода.

6. Відносну чутливість сенсора, що працює у вентильному режимі визначити за формулою:

$$S_{\text{від}} = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta I / I}$$

де Y – вихідна величина; I – інтенсивність світла.

7. Використовуючи як джерело світла природне освітлення, визначити сталу часу фоторезистора та його темновий опір.

8. Побудувати люкс-амперну характеристику фотосенсора.

9. Скласти електричне коло за схемою Рис. 3.

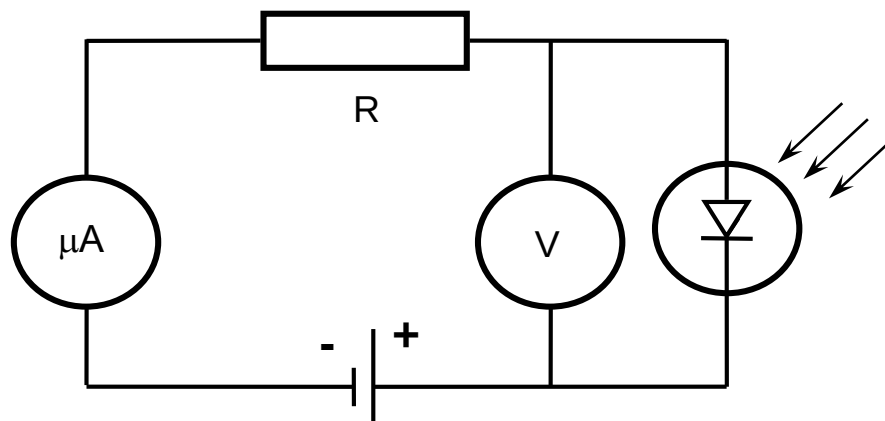


Рис. 3. Схема включення фотосенсора при фотодіодному режимі.

10. Змінюючи напругу на джерелі живлення знімаємо вольт-амперні характеристики при двох відомих (після виконання п. 5) значеннях освітленості фотосенсора.

Зауваження. Вольт-амперні характеристики фотодіода необхідно зняти в прямому і заперному режимі ввімкнення (В заперному режимі ввімкнення полярність блока живлення не співпадає із полярністю фотодіода).

11. Обчислити чутливість фотосенсора для двох значень напруги для кожного із двох значень освітленості в фотодіодному режимі роботи:

де: I_{ϕ} – значення фотоструму; A – освітленість; $S = 1,5 \text{ см}^2$ – площа вікна фотодіода.

12. Використовуючи як джерело світла природне освітлення, а також освітлення від лампи розжарення, визначити сталу часу фотосенсора.

Контрольні запитання

1. Принцип роботи фоторезистора.
2. Перелічити основні характеристики фоторезистора.
3. Пояснити принцип роботи фотодіода.
4. Перелічити основні характеристики фотодіода.
5. Викласти методику використання напівпровідникових мікроелектронних приладів як сенсорів освітлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: науково-навчальне видання: у 3 томах / за ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.1. 595 с.
2. Решетняк С. О., Захарченко Р. В., Захарченко В. Н., Скирта Ю. Б. Фізика твердого тіла. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 189 с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48304>
3. Галушак М. О., Мокляк В. В. Фізика. Спеціальний курс : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 430 с.
4. Ільченко В. І., Обухова Т. Ю. Фізика твердого тіла. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 56 с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37592>

Лабораторна робота 4

Дослідження спектральної характеристики напівпровідникового фотосенсора

Мета роботи: ознайомитись із роботою напівпровідникового фотосенсора; дослідити його спектральну характеристику та чутливість.

Завдання: побудувати графік залежності спектральної чутливості фотодіода від довжини світлової хвилі, визначити червону межу фотоефекту і оцінити ширину забороненої зони.

Прилади і матеріали: монохроматор з фотодіодом, мікроамперметр, лампа з блоком живлення.

Теоретичні відомості

Поряд із зовнішнім фотоефектом існує внутрішній фотоефект, який спостерігається в діелектриках та напівпровідниках і призводить до виникнення фотопровідності або ЕРС. З точки зору зонної теорії твердих тіл внутрішній фотоефект в чистих напівпровідниках пояснюється наступним чином. Квант світла, якщо його енергія $h\nu$ перевищує ширину забороненої зони ΔE , поглинається одним з атомних електронів, який в результаті переходить з валентної зони в зону провідності (рис. 1, а). Виникає додаткова пара носіїв струму – електрон і дірка, внаслідок чого провідність напівпровідника збільшується, а опір зменшується. Це явище називається фотопровідністю, і саме воно лежить в основі дії фотоопорів.

У домішкових напівпровідниках фотопровідність виникає і при $h\nu < \Delta E$. Для напівпровідників n-типу фотон повинен мати енергію $h\nu > \Delta E_n$ (ΔE_n – енергетична щілина між рівнями донорної домішки і зоною провідності), а для напівпровідників р-типу – $h\nu > \Delta E_p$ (ΔE_p – енергетична щілина між валентною зоною і рівнями акцепторної домішки). При поглинанні світла домішковими центрами відбувається перехід електронів з донорних рівнів в зону провідності

у випадку напівпровідника n-типу (рис. 4 1, б) або з валентної зони на акцепторні рівні у випадку напівпровідника p-типу (рис. 1, в). При цьому дірки, що утворилися на донорних рівнях, і електрони, що перейшли на акцепторні рівні, виявляються локалізованими на домішкових атомах і в провідності брати участі не можуть. В результаті виникає домішкова фотопровідність, яка є чисто електронною для напівпровідників n-типу і чисто дірковою для напівпровідників p-типу.

Одним з найбільш корисних з точки зору різновидів внутрішнього фотоефекту є так званий вентильний фотоефект, який полягає в тому, що в області p-n переходу (або на межі металу з напівпровідником) під дією світла виникає електрорушійна сила. В цьому випадку можна говорити про безпосереднє перетворення світлової енергії в електричну.

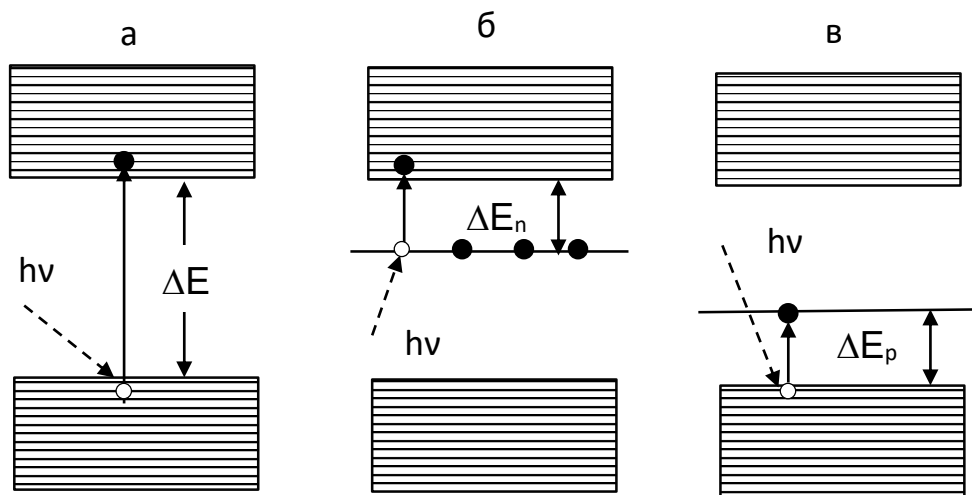


Рис. 1. Механізм внутрішнього фотоефекту: а – хімічно чистий напівпровідник; б – напівпровідник n-типу; в – напівпровідник p-типу

Вентильний фотоелемент (фотодіод) зазвичай складається з двох напівпровідників з електронною і дірковою провідністю. Конструктивно фотодіод виготовляється так, що область контакту n і p областей провідності може опромінюватись світлом. Для цього напівпровідник n-типу наноситься тонким, практично прозорим шаром на пластинку з p-провідністю. У приконтатній області p-n переходу внаслідок рекомбінації основних носіїв утворюється подвійний запірний шар, збіднений електронами з боку

напівпровідника n-типу і дірками з боку напівпровідника p-типу. Іони домішок цього шару створюють позитивний об'ємний заряд в n-області і негативний - в p-області.

При опроміненні світлом поглинання квантів викликає поява додаткових електронів і дірок в області p-n переходу. Ці електрони і дірки під дією електричного поля запірного шару починають рухатися в різні боки, в результаті в замкнутому колі виникає електричний струм.

Величина фотоструму істотно залежить від довжини хвилі λ падаючого світла. Якщо фотодіод освітлювати за допомогою ідеального монохроматичного джерела, що випромінює однакову кількість енергії у вузькому діапазоні довжин хвиль, величина фотоструму буде змінюватися в залежності від довжини хвилі. Для кількісного опису цієї залежності вводять характеристику, яку називають спектральною чутливістю фотоелемента (позначають S). Питомою спектральною чутливістю $S(\lambda)$ називають відношення сили фотоструму I_ϕ (де $I_\phi = I_{\text{св}} - I_{\text{т}}$, $I_{\text{св}}$ – сила струму при освітленні фотоприймача, $I_{\text{т}}$ – сила струму, коли фотоприймач неосвітлений) до величини світлового потоку Φ_λ при даній довжині хвилі і прикладеної напруги:

$$S(\lambda) = I_\phi / \Phi_\lambda \quad (1)$$

Світловий потік визначається із відомої формули: $\Phi_\lambda = A_\lambda \cdot S$, де A_λ - освітленість поверхні фотосенсора при заданій довжині хвилі, S – площа поверхні фоточутливого зразка.

Для різних напівпровідникових матеріалів вигляд функції $S(\lambda)$ різний, проте спостерігається і ряд загальних закономірностей. На рис. 2 наведено типовий вигляд графіків спектральної чутливості для напівпровідників (для порівняння на рис. 2 показана також залежність спектральної чутливості людського ока). Як видно, функція $S(\lambda)$ відмінна від 0 до певному діапазоні довжин хвиль і має вигляд плавної кривої з вираженим максимумом. Крутий спад кривих в області великих довжин хвиль пояснюється досить просто. Як і у випадку зовнішнього фотоефекту, для внутрішнього фотоефекту також існує

червона межа. Очевидно, внутрішній фотоефект не буде спостерігатися, якщо енергія фотона менше ширини забороненої зони. Таким чином, червона межа фотоефекту визначається співвідношенням:

$$\frac{h \cdot c}{\lambda_0} = \Delta E \quad (2)$$

де h – стала Планка; c – швидкість поширення світла у вакуумі; λ_0 – максимальна довжина хвилі, при якій ще можливий фотоефект (червона межа фотоефекту); ΔE – ширина забороненої зони. У випадку домішкових напівпровідників в праву частину рівняння (2) необхідно поставити ΔE_n (енергія активації донорної домішки) або ΔE_p (енергія активації акцепторної домішки). Для вентильного фотоефекту червона межа також визначається відношенням (2), але в цьому випадку в праву частину потрібно підставити мінімальне із значень (ΔE_n , ΔE_p), що характеризують даний р-п перехід.

Падіння фотоструму в області малих довжин хвиль обумовлено декількома факторами. По-перше, при $h\nu > \Delta E$ різко збільшується поглинання світла. В результаті фактично все падаюче світло поглинається в дуже тонкому поверхневому шарі напівпровідника, причому чим більша енергія $h\nu$, тим тонший шар, в якому відбувається поглинання. Отже, утворення додаткових електронів і дірок відбувається вже не по всьому об'єму подвійного запірного шару, а лише в цій обмеженій області, що, в свою чергу, призводить до зменшення фотоструму. По-друге, концентрація вільних носіїв в цьому тонкому "активному" шарі стає дуже великою (інтенсивність світла, тобто. число квантів, не змінюється, а об'єм, в якому відбувається поглинання, зменшується), що обумовлює різке зростання швидкості рекомбінації носіїв заряду i , отже, зменшення їх часу життя. По-третє, зростання швидкості рекомбінації сприяє наявності в поверхневому шарі більшого в порівнянні з внутрішньою областю напівпровідника числа різних домішок і дефектів, що сильно знижує рухливість вільних зарядів. Цей факт підтверджується тим, що в області коротких довжин хвиль спектральна чутливість фотоелемента згасає повільніше при більш якісній обробці поверхні кристала. Таким чином, різке зменшення "активної" області

вентильного фотоефекту, а також інтенсивна рекомбінація і сильне розсіювання носіїв заряду на поверхневих дефектах зводять нанівець процес утворення електронів і дірок при поглинанні світла.

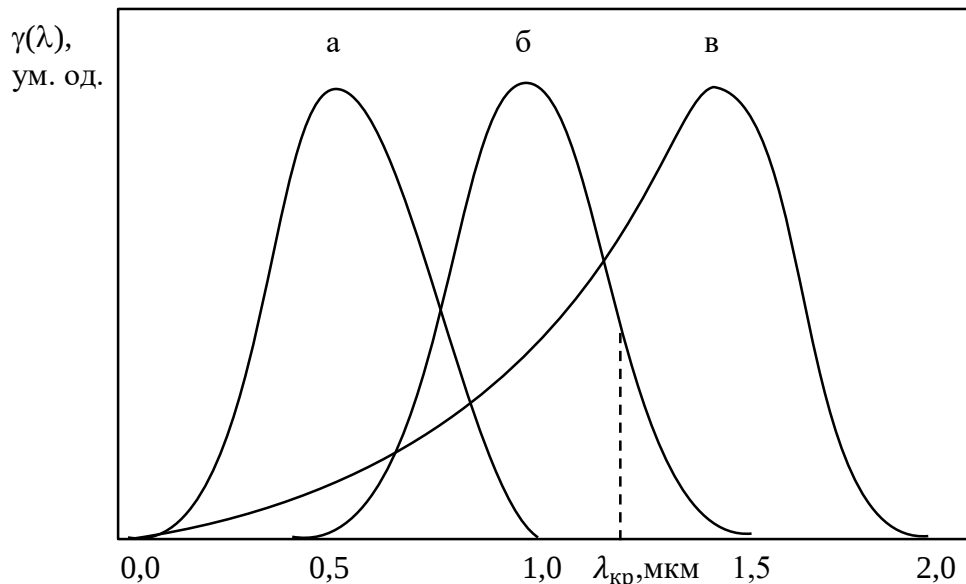


Рис. 2. Спектральна чутливість $S(\lambda)$: а – людське око; б – кремнієвий напівпровідник; в – германієвий напівпровідник

Напівпровідникові фотоелементи в даний час широко використовуються в пристроях зчитування даних і розпізнавання образів (наприклад, у всіх сучасних ЕОМ зчитування інформації, телекомунікаційних системах передачі і розпізнавання інформації), а також в різній вимірювальній апаратурі (фотодатчики, що працюють як в області видимого світла, так і в інфрачервоному діапазоні). Напівпровідникові фотоелементи використовуються і як джерела електроенергії, але в силу їх дорожнечі і низького коефіцієнта корисної дії їх застосування виправдане тільки в умовах, коли постачання електроенергією стандартним чином неможливе або утруднене, найчастіше на віддалених автоматичних метеостанціях, на космічних кораблях тощо.

Опис установки і методу вимірювання

Вимірювання спектральної чутливості фотодіода проводиться за допомогою монохроматора УМ-2. Монохроматор використовується для розкладання світла лампи розжарювання в неперервний спектр. Вузька ділянка спектра направляється на фотодіод (використовується кремнієвий фотодіод або фоторезистор CdS). Струм, що при цьому виникає вимірюється мікроамперметром (рис. 3).

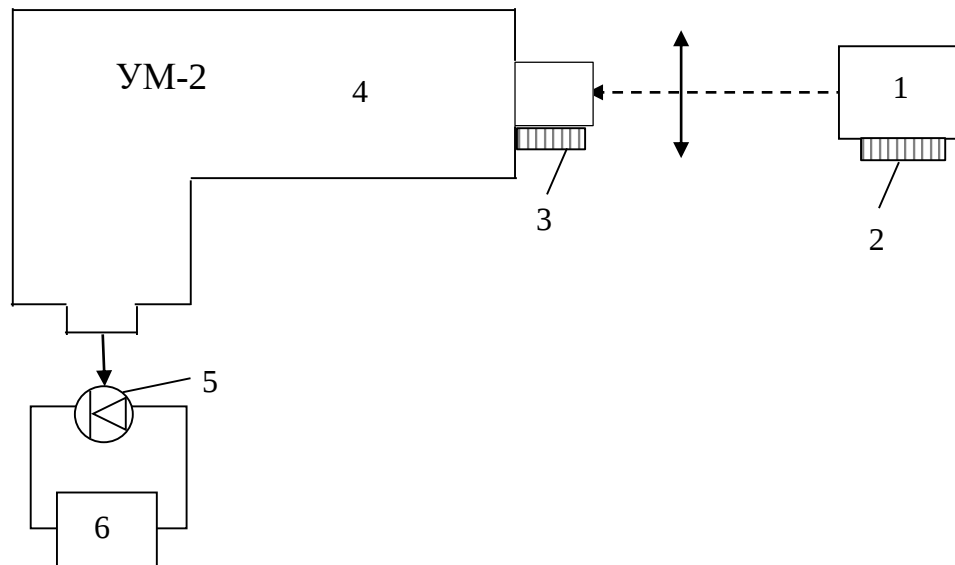


Рис. 3. Схема установки: 1 – лампа; 2 – поворотні гвинти лампи; 3 – регулювальний гвинт вхідної щілини монохроматора; 4 – монохроматор; 5 – фотодіод або фоторезистор; 6 – мікроамперметр.

Найпростіший спосіб отримання спектральної характеристики фотодіода полягає в тому, що на нього направляють за допомогою монохроматора світло однакової інтенсивності, але різної довжини хвилі і вимірюють відповідну величину фотоструму. На практиці ж інтенсивність джерел світла різна для різних довжин хвиль: якщо перед монохроматором встановити лампочку розжарювання і обертати барабан, то інтенсивність вихідного світла буде неоднаковою. Однак спектр випромінювання лампи (залежність випромінюваної енергії ϵ від довжини хвилі λ) може бути визначено експериментально або розраховано на основі випромінювальних властивостей матеріалу спіралі лампи відповідно до законів теплового випромінювання. Явний вигляд функції

випромінюваної енергії ϵ дозволяє зробити перерахунок сили струму від реального джерела до ідеального джерела світла з постійною інтенсивністю в будь-якому спектральному інтервалі. Значення корегуючого коефіцієнта K для лампи з вольфрамовою спіраллю і температурою $T = 2800 \text{ K}$ наведені в таблиці. Спектральна чутливість фотодіода $S(\lambda)$ пропорційна добутку сили фотоструму $I_{\text{ф}}$ а на відповідний коефіцієнт K .

З метою спрощення обчислювальної частини лабораторної роботи спектральна чутливість $S(\lambda)$ обчислюється в довільних одиницях. Для отримання правильних чисельних значень необхідно помножити значення $S(\lambda)$ на константу, що залежить від яскравості лампи, відстані до неї та інших характеристик.

Порядок виконання роботи

1. Включити блок живлення лампи розжарювання в мережу.
2. Перевірити, чи потрапляє світло від лампи у вхідну щілину монохроматора. Якщо промінь лампи зміщений в сторону, домогтися потрапляння центру світлового променя у вхідну щілину монохроматора.
3. Обертанням барабана монохроматора 5 (рис. 3) визначити місце розташування, при якому мікроамперметр показує максимальне значення фотоструму.
Вказівка: максимальне значення фотоструму знаходиться в інтервалі 2700 - 3000 поділок барабана монохроматора, що відповідає інфрачервоному випромінюванню; тому на вихідній щілині монохроматора видима частина спектра лампи не буде потрапляти в центр напівпровідникового фотоелемента.
4. Обертанням гвинта 2 (рис. 3) встановити таку ширину щілини вхідної щілини монохроматора, щоб покази фотоструму відповідали найбільшому значенню шкали мікроамперметра.
5. Провести вимірювання сили фотоструму $I_{\text{ф}}$ для показів барабана монохроматора, наведених у таблиці. Значення сили фотоструму записати в четвертий стовпець таблиці.

6. Розрахувати чутливість фотодіода $S(\lambda)$ у відносних одиницях. Значення корегуючого коефіцієнта K наведені в третій колонці таблиці.

7. Побудувати графік залежності спектральної чутливості $S(\lambda)$ напівпровідникового фотоелемента від довжини світлової хвилі.

8. За графіком визначити червону межу внутрішнього фотоефекту для даного, фотодіода. Положення червоної межі збігається з серединою кривої швидкого спаду спектральної чутливості при великих довжинах хвиль (приклад знаходження червоної межі за графіком показано штриховою лінією на рис. 2 для кривої б).

9. По знайденому значенню червоної межі розрахувати ширину забороненої зони напівпровідника в електрон-вольтах.

10. Розрахувати за формулою (1) питому спектральну чутливість фотосенсора на довжині хвилі із максимальним фотострумом.

Таблиця 1.

Визначення наближеного значення спектральної чутливості фотосенсора

Покази барабана монохроматора	Довжина хвилі λ , нм	Корегуючий коефіцієнт K	Величина фотоструму I_ϕ	Чутливість $S(\lambda)$
1000	465	18,52		
1200	483	15,87		
1400	515	11,36		
1600	552	7,75		
1800	598	5,81		
2000	661	4,25		
2200	750	3,25		
2400	862	3,05		
2600	1010	2,94		
2700	1115	3,09		
2800	1240	3,47		

2900	1380	4,02		
3000	1540	4,50		
3050	1630	5,22		
2100	1720	5,95		

Контрольні питання

1. Що таке внутрішній фотоефект?
2. Поясніть механізм появи ЕРС в напівпровідниковому фотоелементі з точки зору зонної теорії.
3. У чому полягає фізичний зміст спектральної чутливості напівпровідникового фотоелемента?
4. Поясніть сенс корегуючого коефіцієнта К.
5. Чому чутливість фотоелемента залежить від довжини хвилі падаючого світла? Поясніть вигляд залежності $S(\lambda)$ при більших і малих довжинах хвиль.
6. Чим визначається червона межа внутрішнього (вентильного) фотоефекту?
7. Визначте по рис. 2 у якого напівпровідника ширина забороненої зони більша.
8. Якщо освітити звичайний транзистор зі знятою верхньою кришкою, то на переходах база-колектор або емітер-база виникає ЕРС порядку декількох десятків мілівольт, а при замиканні електричного кола – струм в десятки мікроампер. Поясніть, чому?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Решетняк С. О., Захарченко Р. В., Захарченко В. Н., Скирта Ю. Б. Фізика твердого тіла. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 189 с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48304>

2. Галушак М. О., Мокляк В. В. Фізика. Спеціальний курс : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 430 с.
3. Пастушенко С. Фізика. Модуль 5, 6. Фізика твердого тіла. Ядерна фізика : навч. посіб. Київ : Літера ЛТД, 2020. 224 с.
4. Попель О. М. Фізика твердого тіла : текст лекцій. Львів : Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, 2020. 104 с.

Лабораторна робота 5

Будова, принцип дії та вплив температури на статичні характеристики тензосенсорів

Мета роботи – ознайомитися з конструкцією сенсорів перетворення вимірюваних величин. Набути навичок побудови градувальних кривих тензорезистивних датчиків, встановити залежність робочих характеристик сенсора при зміні температури.

Прилади і матеріали: тензосенсори, джерело живлення сенсора, нагрівний елемент, джерело живлення для нагрівного елемента, вольтметри, набір тягарців, столик.

Теоретичні відомості

Тензосенсори – пристрої для вимірювання деформації різних конструкцій, заснований на визначенні зсуву (або переміщення) пружного елемента. Робота тензосенсорів ґрунтується на тензоефекті.

Тензоефект – це зміна електричного опору провідників і напівпровідників при їх пружній механічній деформації.

Опір резистора R :

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

де ρ – питомий опір матеріалу; l – довжина; S – площа поперечного перетину.

При наданні механічного навантаження змінюється довжина і площа поперечного перетину провідника. Відносна зміна опору R при деформації його дорівнює $\frac{\Delta R}{R}$, де ΔR – приріст величини опору. Зміна електричного опору ΔR тензосенсора пов'язана з його відносною деформацією: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ лінійною залежністю:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k\varepsilon \quad (2)$$

де k – коефіцієнт чутливості датчика до деформації (для константану $k = 1,9...2,1$, для ніхрому $k = 2,0$).

Лінійність та стабільність характеристики тензодатчиків є їх важливою перевагою порівняно з іншими типами датчиків, що зумовило їх більш широке використання. До недоліків тензодатчиків можна віднести вплив температури, магнітного поля на їх електричний опір та порівняно низьку чутливість (набагато меншу ніж у вугільних датчиків). Тому підключення тензодатчиків у вимірювальні схеми передбачає температурну компенсацію.

Чутливість сенсора S можна визначити експериментально за кінцевими приростами вхідної (ΔX) та вихідної (ΔY) величин при невеликих змінах вхідної величини:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (3)$$

В перетворювачів з лінійною функцією перетворення чутливість буде сталою. Якщо ж функція перетворення нелінійна, то чутливість є функцією вхідної величини. Для характеристики сенсорів з нелінійними номінальними функціями перетворення часто користуються також поняттям середньої чутливості:

$$S_{\text{ср}} = \frac{Y_{\text{к}} - Y_{\text{п}}}{X_{\text{к}} - X_{\text{п}}} \quad (4)$$

де $Y_{\text{к}} - Y_{\text{п}}$ та $X_{\text{к}} - X_{\text{п}}$ – діапазон перетворень вихідної і вхідної величин відповідно, а $Y_{\text{к}}$, $X_{\text{к}}$ і $Y_{\text{п}}$, $X_{\text{п}}$ – кінцеві та початкові межі перетворення.

Існує безліч способів вимірювання деформацій відповідно до використовуваних принципів перетворення:

- 1) тензорезистивний,
- 2) оптико–поляризаційний,
- 3) п'єзорезистивний,
- 4) волоконно–оптичний,
- 5) механічний.

Серед електронних тензодатчиків, найбільшого поширення набули тензорезистивні датчики. Залежно від сфери застосування існують різні типи тензодатчиків:

- а) тензодатчики зусилля і навантаження;
- б) тензодатчики ваговимірювальні (вимірює вагу);
- в) тензодатчики тиску (вимірювання тиску в різних середовищах);
- г) акселерометри (датчики прискорення);
- д) тензодатчики переміщення;
- е) тензодатчики крутного моменту.

Найбільш типовим застосуванням тензодатчиків є ваги. В залежності від конструкції платформи, що приймає вантаж, вагові тензодатчики різного типу: тензодатчики консольні (балочні тензодатчики), тензодатчики s-подібні, тензодатчики мембранного типу, тензодатчики колонного типу (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд тензосенсора.

На його бічні поверхні нанесені тонкоплівкові резистори, з'єднані по мостовій схемі, тому резистивний датчик має 4 гнучких виведення. Всі елементи датчика залиті епоксидним компаундом. На бруську передбачені отвори для кріплення його до основи і для установки пластини під вимірюваний вантаж.

На практиці використовуються різні способи підключення тензосенсорів до мережі. Найпростішим варіантом є чотирипровідна схема підключення

(рис. 2). У цьому випадку схема підключення вимагає суворого дотримання кольорового маркування проводів: червоний і білий для живлення, чорний і

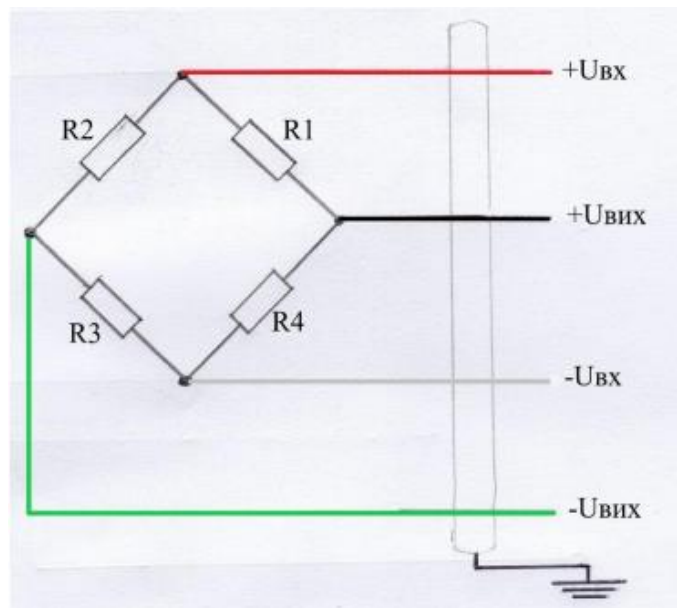


Рис. 2. Чотирипровідна схема підключення тензосенсора.

зелений для прийому сигналу. П'ятий провід (може бути відсутнім) призначений для заземлення корпусу пристрою, а в деяких моделях для усунення шумів використовується екран. Коли блок живлення знаходиться далеко від чутливих компонентів, використовується шестипровідна схема підключення, щоб уникнути впливу опору самого провідника джерела живлення на результати вимірювань.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись із будовою та принципом дії сенсорів ваги.
2. Підключити сенсор до джерела живлення (червоний (+) і білий (-) провідники) та встановити напругу 5 В (стабілізація струму 150 мА).
3. Виміряти початкове значення його вихідної величини U_0 без навантаження сенсора.

4. Побудувати тарувальну криву для визначення напруги згину. Для цього поступово завантажувати гирями тензосенсор (починаючи від 100 гр до 1 кг з кроком 100 гр).

5. Записати виміряні та розраховані параметри сенсора у таблицю 1.

6. Виконати п. 2-4 для сенсорів із максимумом навантаження 1 та 2 кг.

7. Для сенсора із максимумом навантаження 1 кг провести вимірювання описані в п 2-4 при температурі 20 та 40°C.

Зауваження. Для встановлення температури $\sim 40^\circ\text{C}$ на терморезистор подати напругу 10 В. Контролювати температуру за допомогою термодатчика та тестера.

8. Розрахувати чутливість трьох сенсорів за формулою (3) на початку, всередині та вкінці діапазону вхідної величини. (Вхідною величиною вважати вагу прикладену до сенсора, а вихідною – вимірювану напругу).

9. Розрахувати середню чутливість трьох сенсорів за формулою (4).

10. Зробити висновки про нелінійність функції перетворення сенсора та вплив на нього температури.

Таблиця 1.

Параметри тензосенсора 1

	U_0 (В)	$U_{\text{вим}}$ (В)	$U = U_{\text{вим}} - U_0$ (В)	m (кг)	P (Н)	$S_{1,2,3}$	$S_{\text{ср}}$
Сенсор 1 (до 1 кг)							

Таблиця 2.

Параметри тензосенсора 2

	U_0 (В)	$U_{\text{вим}}$ (В)	$U = U_{\text{вим}} - U_0$ (В)	m (кг)	P (Н)	$S_{1,2,3}$	$S_{\text{ср}}$
Сенсор 2 (до 2 кг)							

Таблиця 3.

Параметри тензосенсора 3

	U_0 (В)	$U_{\text{вим}}$ (В)	$U = U_{\text{вим}} - U_0$ (В)	m (кг)	P (Н)	$S_{1,2,3}$	$S_{\text{ср}}$
Сенсор 3 (до 1 кг, $T=20^{\circ}\text{C}$)							

Таблиця 4.

Параметри тензосенсора 3

	U_0 (В)	$U_{\text{вим}}$ (В)	$U = U_{\text{вим}} - U_0$ (В)	m (кг)	P (Н)	$S_{1,2,3}$	$S_{\text{ср}}$
Сенсор 3 (до 1 кг, $T=40^{\circ}\text{C}$)							

Контрольні запитання

1. Що називають тензосенсором та тензоефектом?
2. Які переваги та недоліки тензосенсорів?
3. Які зовнішні чинники можуть впливати на стабільність сенсора?
4. Записати формулу для визначення чутливості сенсора.
5. Як можна компенсувати вплив температури на робочі характеристики сенсорів?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково-навчальне видання: у 3 томах / за ред. З.Ю. Готри. – Львів : Ліга-Прес, 2003. Т.1. 595 с.
2. Фідровська Н. М., Пономаренко Р. В., Слепужніков Є. Д., Козодой Д. С. Обґрунтування проведення тарировкитензорезисторів у комплексі з

вимірювальним обладнанням / Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. УкрДУЗТ. 2020. №194. С. 75-83

3. Тензометричний датчик: види, принцип роботи і пристрій

[

Еалушак М. О., Мокляк В. В. Фізика. Спеціальний курс : навч. посіб. Івано-Франківськ : Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу, 2023. 430 с.

е

к

т

р

о

н

н

и

й

р

е

с

у

р

с

Р

е

ж

и

м

Д

о

с

т

Лабораторна робота 6

Вплив чинників оточуючого середовища на статичні характеристики сенсорів

Мета роботи – встановити залежність робочих характеристик сенсора від впливу факторів довкілля (температури, магнітного поля).

Теоретичні відомості

Умови зберігання – це характеристики середовища, в яких сенсор за нормальних умов роботи може зберігатися впродовж визначеного часу без зміни експлуатаційних характеристик. Саме тому умови зберігання приладу повинні містити вказівки про найвищу і найнижчу температуру зберігання і максимальну відносну вологість при цих температурах. Залежно від природи сенсора необхідно враховувати також деякі додаткові умови зберігання. Наприклад, максимальний тиск, наявність газів або забруднюючої пари та ін.

Коротко- і довготривала стабільність є складовими такої характеристики, як точність. Короткотривала стабільність – це зміни в експлуатаційних характеристиках сенсора за хвилини, години або навіть дні. Довготривала стабільність – це стабільність впродовж років. Вона може визначатися, наприклад, старінням матеріалу сенсора, що призводить до незворотної зміни його електричних, механічних, хімічних та термічних властивостей. Цей довготривалий дрейф в основному однонаправлений. Він відбувається після відносно довгого часу експлуатації (місяці, роки). Довготривала стабільність є дуже важливою для сенсорів, що використовуються для точних вимірювань. Старіння значною мірою залежить від умов зберігання та умов експлуатації. Покращити довготривалу стабільність можна шляхом прискореного старіння компонентів у екстремальних умовах. Наприклад, для сенсора можна періодично змінювати температуру з температури замерзання води до високої температури. Це прискорене старіння не лише підвищує стабільність характеристик сенсора,

але й покращує його надійність, оскільки процес попереднього старіння виявляє багато прихованих дефектів.

Умови середовища, в яких знаходиться сенсор, як уже зазначалося, здійснюють істотний вплив на його характеристики. Наприклад, сенсор тиску повітря в більшості випадків зазнає не лише тиску повітря, але й інших впливів, таких як температура повітря і оточуючих елементів, вологість, вібрації, іонізуюча радіація, електромагнітні поля, гравітаційні сили тощо. Усі ці фактори можуть впливати на експлуатаційні характеристики сенсора, при цьому повинні враховуватись і статичні, і динамічні їх зміни. Вплив умов середовища іноді має складний характер, тобто вони змінюють функцію перетворення сенсора, наприклад, змінюють його підсилення. Прикладом може бути резистивний сенсор для вимірювання деформацій, чутливість якого зростає з температурою.

Стабільність середовища є дуже важливою вимогою. І конструктор, і інженер після впровадження повинні враховувати всі можливі зовнішні фактори, котрі можуть вплинути на експлуатаційну характеристику сенсора. Наприклад, піроелектричний сенсор для виявлення руху людей може генерувати помилкові сигнали викликані раптовою зміною температури довкілля, електростатичним розрядом, утворенням електричних зарядів (трибоелектричний ефект), вітром, шумом, вібрацією опорних конструкцій, електромагнітною інтерференцією тощо. Якщо фактори довкілля погіршують експлуатаційну характеристику сенсора, то необхідні додаткові міри для корекції, наприклад, поміщення сенсора у захисний кожух, використання електричного захисту, теплової ізоляції або термостатування.

Температурні фактори дуже важливі для більшості експлуатаційних характеристик сенсора, їх необхідно знати і враховувати. Робочий температурний діапазон задається найвищим і найнижчим значеннями температури (наприклад, від -20°C до $+100^{\circ}\text{C}$), у межах яких зберігається визначена точність. Багато сенсорів зазнають змін на фізичному рівні при зміні температури, у результаті чого їхні характеристики можуть значно змінюватися. Саме тому часто використовують спеціальні елементи для компенсації температурних похибок.

Температура також може впливати на динамічні характеристики сенсорів. Відносно швидка зміна температури може призвести до генерації сенсором помилкових вихідних сигналів.

У ряді випадків температуру сенсора може змінювати сам вихідний сигнал. Наприклад, сенсор температури на основі термістора вимагає проходження електричного струму, який зумовлює розсіювання тепла в приладі. Це призводить до похибок вимірювання температури.

Зміну температури сенсора відносно температури навколишнього середовища можна знайти за формулою

=

де ρ – густина матеріалу сенсора; c – питома теплоємність; V – об'єм сенсора; α – коефіцієнт термічного контакту сенсора з оточенням (питома теплопровідність); R – електричний опір; U – ефективна напруга вздовж опору. 2

Під надійністю розуміють здатність сенсора виконувати необхідні функції впродовж заданого періоду часу при встановлених умовах експлуатації. Надійність можна розглядати як імовірність того, що пристрій буде функціонувати безвідмовно встановлений час або певну кількість разів.

Необхідно відзначити, що надійність не є характеристикою дрейфової або шумової стабільності. Вона встановлює тимчасову чи неперервну відмову в роботі, тобто вихід за межі експлуатаційних характеристик сенсора за нормальних умов роботи.

Випробування під час приймання сенсорів в експлуатацію проводяться при комбінації найгірших можливих умов. Найефективнішим є метод прискореного випробування, який повторює роботу сенсора, забезпечуючи реальні навантаження, але стискаючи роки у тижні.

Один з можливих шляхів «стиснення часу» – використовувати ту саму характеристику, що й при дійсному робочому циклі, включаючи максимальне навантаження, але з розширеним діапазоном факторів довкілля (температури, вологості і тиску). Відповідно найвища і найнижча межі повинні бути значно ширшими, ніж за нормальних робочих умов.

Механічні удари і вібрації можуть використовуватися для відтворення несприятливих умов довкілля, особливо при оцінці надійності з'єднань, адгезії епоксидів тощо. Сенсор можуть піддавати прискоренню високого рівня за різними осями. Проводять також дослідження впливу гармонічних вібрацій в діапазоні, що містить його власну частоту.

Екстремальні умови зберігання сенсора можуть становити, наприклад, при $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, впродовж 1000 годин за цих умов. Однак верхня і нижня межі температур повинні узгоджуватися з фізичною природою сенсора.

Вплив екстремальних умов можна досліджувати, піддаючи сенсор термічним ударам або періодичній зміні температури. Можна, наприклад, витримувати сенсор впродовж 30 хвилин при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, потім швидко переносити на 30 хвилин у температуру $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а після цього повертати його назад до низької температури. При цьому методі використовується певна кількість циклів, наприклад, 100 або 1000.

Для відтворення морських умов сенсори піддають дії атмосфери розпиленої солі на певний час, наприклад, на 24 години. Це допомагає виявити стійкість до корозії та структурні дефекти.

Порядок виконання роботи

1. Взяти сенсор, запропонований викладачем, та виміряти номінальне значення його робочої характеристики. Наприклад, для тензорезистора – номінальне значення опору. Для цього зробити 5 незалежних вимірювань та розрахувати середнє значення, визначити абсолютну похибку вимірювання.

2. Дослідити характеристики сенсора під впливом магнітного поля.

3. Дослідити характеристики сенсора під впливом температури. Отримати температурну залежність електричного опору $R(T)$ за 3 цикли. Побудувати залежність $\Delta R(T)$ та розрахувати коефіцієнт термостабільності, що дозволить усунути вплив температури на характеристики сенсора.

4. Зробити висновки про вплив температури та магнітного поля на сенсор.

Контрольні запитання

1. Що називають стабільністю приладу?
2. Які зовнішні фактори можуть впливати на стабільність сенсора?
3. Назвати методи тестування сенсорів в екстремальних умовах?
4. Як можна компенсувати вплив температури на робочі характеристики сенсорів?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково-навчальне видання: у 3 томах / за ред. З.Ю. Готри. Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.1. 595 с.
2. Галушак М. О., Мокляк В. В. Фізика. Спеціальний курс : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 430 с.
3. Пастушенко С. Фізика. Модуль 5, 6. Фізика твердого тіла. Ядерна фізика : навч. посіб. Київ : Літера ЛТД, 2020. 224 с.
4. Попель О. М. Фізика твердого тіла : текст лекцій. Львів : Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, 2020. 104 с.
5. Фізика твердого тіла : навч. посіб. / [уклад. О. В. Говорун, І. Ю. Кириленко, С. В. Сікорський] ; Запоріз. нац. ун-т. Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 118 с.
Режим доступу: <https://dspace.znu.edu.ua/xmlui/handle/12345/1060>

Лабораторна робота 7

Моніторинг CO₂-сенсором та оцінка ступеня забрудненості атмосферного повітря

Мета роботи: Оцінити ступінь забрудненості атмосферного повітря CO₂-газами на ділянці магістральної вулиці та в аудиторіях університету. Запропонувати заходи щодо зменшення викидів шкідливих речовин.

Основні поняття

Автотранспорт, чисельність якого на вулицях міст і сіл України постійно зростає, негативно впливає на самопочуття їх мешканців, чинячи як пряму, так і опосередковану дію: шум, забруднення повітря й ґрунтів, ущільнення ґрунтів тощо. Викиди автотранспорту, що містять вуглеводні, оксиди нітрогену, сульфур, карбону, сажу, надзвичайно небезпечний бензопірен тощо, зумовлюють появу смогів та кислотних дощів, почастищення респіраторних захворювань населення. Особливо значне забруднення спостерігається поблизу перехресть вулиць, де автомобілі змінюють швидкість або мотори працюють на шостому ходу.

На транспорт припадає до 70% хімічного і 90% шумового забруднення (особливо в містах). На автомобільний транспорт припадає 94% викидів оксиду вуглецю, 44% оксиду азоту. Майже на 60% забруднення атмосфери у великих містах залежить від роботи пересувних транспортних засобів.

На 15 тис. км пробігу автомобіль споживає у середньому 4350 кг кисню, водночас викидаючи 3250 кг вуглекислого газу, 530 кг оксиду вуглецю, 93 кг отруйних вуглеводнів, 27 кг оксиду азоту. У процесі експлуатації одного автомобіля витрачається 10 кг гумових матеріалів, а спрацювання шляхів із твердим покриттям становить 1 мм, що на відстані 1000 км спричиняє викид 100 т пилу. Цей пил містить майже 200 елементів забруднюючих речовин, у тому числі канцерогенний бензопірен, свинець, хлор тощо.

Викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах автотранспорту регламентуються стандартами; вміст свинцю і оксидів сульфуру обмежуються стандартами на пальне. Останнім часом з метою зменшення негативного впливу автотранспорту на довкілля і здоров'я людей вживають заходи, серед яких і заборона на використання домішок тетраетилплумбуму (тетраетилсвинцю) в пальне, перехід на природний газ.

1. Визначення завантаженості вулиць автотранспортом

Оцінку завантаженості вулиць автотранспортом визначають за інтенсивністю руху:

- низька інтенсивність руху – 2,7-3,6 тис. автомобілів за добу;
- середньо-низька інтенсивність руху – 4-7 тис. автомобілів за добу;
- середня інтенсивність руху – 8-17 тис. автомобілів за добу;
- висока інтенсивність руху – 18-27 тис. автомобілів за добу.

Хід роботи

Студенти розподіляються на групи по 2-3 особи (один підраховує, другий записує, третій оцінює ситуацію), які після інструктажу займають спостережні пункти по обидва боки вулиць з поживавленим рухом автотранспорту – в центрі міста; з незначним рухом; на ділянках, де багато транспортних розв'язок і світлофорів тощо). Збирати матеріал можна як упродовж одного практичного заняття, так і в різні години доби (тривалість підрахунку 20 хв). Спостережний пункт із поживавленим рухом – кільцева розв'язка біля ТРЦ «Промінь».

Для цього спостережного пункту провести розрахунки вмісту у повітрі CO₂ (порядок їх проведення подано нижче). Крім того, за допомогою приладу Air CO₂ ntrol 5000 провести моніторинг забрудненості повітря у пункті спостереження (розв'язка біля ТРЦ «Промінь») та в 2 аудиторіях інституту ННФТІ. Вимірювання проводити протягом 20 хв, протягом цього часу здійснити не менше 5 вимірів та обчислити середнє значення забрудненості повітря CO₂.

Інтенсивність руху автотранспорту визначають методом підрахунку автомобілів різних типів – 3 рази по 20 хвилин під час кожного терміну вимірювань (о 8-й 13-й і 18-й год.). Записи заносять у таблицю 1.

Автомобілі поділяють на категорії: з карбюраторним двигуном, дизельні, автобуси, маршрутні таксі і т.п.

Здійснюють оцінку руху транспорту на окремих вулицях, будують графіки, обговорюють способи зменшення негативного впливу транспорту на стан довкілля. Результати можна подати у вигляді графіків (рис. 1).

Таблиця 1

Інтенсивність руху автомобілів

Тип автомобіля	Кількість автомобілів в різний період доби, шт.		
	8 год	13 год	18 год
Легкої вантажності			
Середньої вантажності			
Важкої вантажності			
Автобус			
Легковий			

Знаючи види викидів і концентрацію окремих забруднювачів у відпрацьованих газах автотранспорту, можна розрахувати ступінь забруднення повітря на висоті людського зросту чи іншій висоті.

2. Оцінка ступеня забрудненості атмосферного повітря відпрацьованими газами на ділянці магістральної вулиці (за концентрацією CO_2).

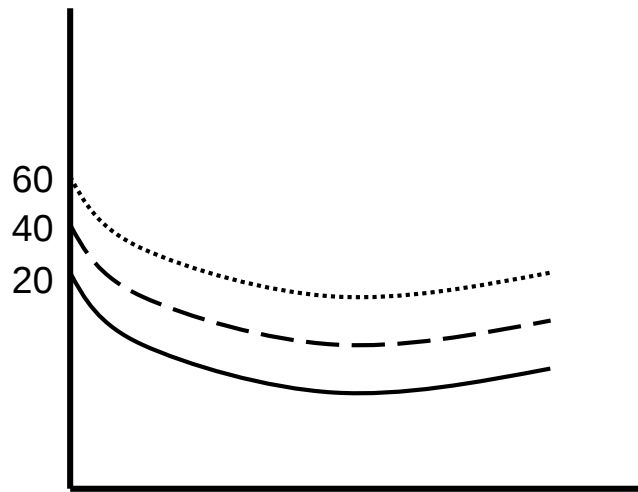


Рис. 1. Інтенсивність руху автотранспорту у різні години доби

Ступінь забрудненості повітря автотранспортом залежить не лише від інтенсивності руху, вантажності машин, кількості та характеру викидів, а й типу забудови, рельєфу; місцевості, напрямку вітру, вологості й температури повітря. Тому всі ці особливості слід зазначати.

Ухил визначають візуально чи з допомогою екліметра, швидкість вітру – анеометром, вологість повітря – психрометром, вміст CO_2 , пилу, оксидів нітрогену і сульфору вуглеводнів визначають за стандартними методиками.

Зазначають наявність насаджень, які поглинають пил та інші забрудники, зменшують шумове навантаження, регулюють мікроклімат (вміст вологи, кисню, CO_2 , йонів, фітонцидів).

Усі ці впливи різних чинників під час визначення концентрації CO_2 враховує формула

$$K_{co} = (A + 0,01N \times K_m) \times K_a \times K_H \times K_C \times K_B \times K_n \quad (1)$$

де A – фонове забруднення атмосферного повітря ($A = 0,5 \text{ мг/м}^3$), N – сумарна інтенсивність руху автомобілів на ділянці вулиці (шт\год); K_m – коефіцієнт токсичності автомобілів за викидами в повітря CO_2 ; K_a – коефіцієнт, що враховує аерацію місцевості; K_H – коефіцієнт, що враховує зміну забруднення атмосферного повітря оксидом карбону, залежно від величини поздовжнього нахилу; K_C – те саме відносно швидкості вітру; K_B – те саме відносно вологості

повітря; K_n - коефіцієнт збільшення забрудненості атмосферного повітря оксидом карбону біля перехресть.

Коефіцієнт токсичності автомобілів K_m визначають як середньозважений для потоку автомобілів за формулою:

$$K_m = \sum P_i K'_m \quad (2)$$

де P_i - склад руху автомобілів, частка від загальної кількості;

Значення K'_m визначають за таблицею 2.

Таблиця 2

Тип автомобіля	Коефіцієнт K'_m
Легкої вантажності	2,3
Середньої вантажності	2,9
Важкої вантажності	0,2
Автобус	3,7
Легковий	1,0

Значення коефіцієнта K_a , що враховує аерацію місцевості, визначають за таблицею 3.

Таблиця 3.

Тип місцевості за ступенем аерації	Коефіцієнт K_a
Транспортні тунелі	2,7
Транспортні галереї	1,5
Магістральні вулиці і дороги з багатоповерховою забудовою з обох боків	1,0
Вулиці та дороги з одноповерховою забудовою	0,6

Міські вулиці та дороги з однобічною забудовою, набережні, естакади, високі насипи	0,4
Пішохідні тунелі	0,3

Значення коефіцієнта K_H , що враховує зміни забруднення повітря CO_2 відповідно величини повздовжнього нахилу вулиці, визначають за таблицею 4.

Таблиця 4

Повздовжній ухил, град	Коефіцієнт K_H
0	1,00
2	1,06
4	1,07
6	1,18
8	1,55

Коефіцієнт K_C , що враховує вплив швидкості вітру на вміст CO_2 в повітрі, визначають таблицею 5

Таблиця 5

Швидкість вітру, м/с	Коефіцієнт K_C
1	2,70
2	2,00
3	1,50
4	1,20
5	1,05
6	1,00

Коефіцієнт K_B (враховує вплив відносної вологості повітря на концентрацію CO_2) даний у таблиці 6

Таблиця 6.

Відносна вологість повітря, %	Коефіцієнт K_B
100	1,45
90	1,30
80	1,15
70	1,00
60	0,85
50	0,75
40	0,60

Значення коефіцієнта K_n для різних типів перехресть наведені в таблиці 7.

Таблиця 7.

Тип перехрестя	Коефіцієнт K_n
Регульоване перехрестя: світлофорами звичайне	1,8
світлофорами регульоване	2,1
саморегульоване	2,0
Нерегульоване: зі зниженою швидкістю	1,9
кільцеве	2,2
з обов'язковою зупинкою	3,0

Підставивши значення наведених коефіцієнтів, обчислити концентрацію оксиду карбону на певній ділянці магістралі за різних метеорологічних умов або на ділянках з різною забудовою. Відповідно до вихідних даних з додатка Б необхідно провести обрахунки ступеня забрудненості атмосферного повітря. Зробити висновок, які чинники більше, які менше впливають на забрудненість повітрям оксидом карбону, що міститься у викидах автотранспорту. Порівняти

розраховану величину концентрації CO₂ з ГДК (ГДК_{CO2} = 5 мг/м³) і запропонувати заходи по зниженню рівня викидів автотранспортом.

Пропонуються такі заходи по зниженню рівня викидів автотранспортом:

- оптимізація перевезень, удосконалення системи транспортних потоків за допомогою планувально-архітектурних та інших рішень;
- поліпшення експлуатації транспортних заходів та встановлення контролю за вмістом шкідливих речовин у вихлопних газах;
- економія паливно-мастильних матеріалів;
- організація виробництва та використання для перевезення вантажів і пасажирів у містах екологічно чистого виду транспорту – електромобілів;
- розробка, дослідно-промислове опрацювання та впровадження методу спалювання водню в автомобільних двигунах;
- підвищення відповідальності інженерно-технічних працівників автопідприємств за додержанням норм і нормативів у галузі охорони навколишнього середовища і раціонального використання природних ресурсів;
- за результатами досліджень написати висновки.

Зауваження.

- 1) Швидкість вітру та вологість повітря знаходять за посиланням <https://meteofor.com.ua/weather-lutsk-4928/> для даної місцевості у час, протягом якого проводять дослідження.
- 2) Для спостережного пункту повздовжній ухил взяти – 0 град.
- 3) Підрахунок кількості автотранспорту проводити протягом 20 хв. Записати час проведення у спостережному пункті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галян В.В., Третяк А. П., Кевшин А.Г. Фізика твердого тіла : методичні рекомендації до лабораторних робіт. Видання друге, перероблене і доповнене. 2021. 52 с. Рекомендовано НМР ВНУ імені Лесі Українки (протокол № 4 від 14.12.2021 р.).

2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: науково-навчальне видання: у 3 томах / за ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.1. 595 с.
3. Галушак М. О., Мокляк В. В. Фізика. Спеціальний курс : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 430 с.
4. Попель О. М. Фізика твердого тіла : текст лекцій. Львів : Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, 2020. 104 с.