

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Факультет Електроніки
Кафедра мікроелектроніки

ЗВІТ
Про виконання лабораторної роботи №1
з дисципліни: «Фізичні основи сенсорики»

Резистивні сенсори температури

Виконавець:
Студент 4-го курсу

(підпис)

А. С. Мнацаканов

Перевірив:

(підпис)

ас. Коваль В. М.

Мета роботи – визначити залежність опору резистивного сенсора температури від відстані до джерела тепла.

Короткі теоретичні відомості

Сенсори температури є одними з найпоширеніших класів сенсорів у промисловості (приблизно 50% від загальної кількості первинних перетворювачів), що обумовлює існування великої кількості їх різновидів: металеві терморезистори, термістори, позистори, болометри, термопарні сенсори, термодіоди, термотранзистори, піроелектричні сенсори, теплові та фотонні сенсори.

Терморезистори – це резистивні елементи, виготовлені з провідникового або напівпровідникового матеріалу, в яких використовується залежність електричного опору матеріалу від температури. Відповідно до виду застосовуваного матеріалу розрізняють металеві та напівпровідникові терморезистори (термістори, позистори).

Температурна залежність питомого опору металу визначається, головним чином, довжиною вільного пробігу електронів:

$$\rho = \frac{h}{K \cdot q^2 \cdot n^{2/3} \cdot l_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

де $l_{\text{ср}}$ – середня довжина вільного пробігу електрону, n – концентрація електронів, q – елементарний заряд, h – постійна Планка, K – стала.

Зі зростанням температури збільшується амплітуда коливання вузлів кристалічної ґратки, що призводить до зменшення довжини вільного пробігу електронів та зростання опору провідника. Тому для металів температурний коефіцієнт опору (ТКО) завжди приймає додатне значення. Для виготовлення металевих терморезисторів використовують платину, мідь, нікель, вольфрам, пермалой тощо.

Температурна залежність електропровідності напівпровідників має складніший характер і визначається температурними залежностями концентрації та рухливості носіїв заряду:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (2)$$

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta E_d}{2kT}} \quad (3)$$

$$p = p_0 e^{-\frac{\Delta E_a}{2kT}} \quad (4)$$

де σ – питома електропровідність,

q – елементарний заряд,

n, p – концентрація

електронів та дірок, μ_n, μ_p – рухливість електронів та дірок, $\Delta E_d, \Delta E_a$ – глибина залягання донорних та акцепторних домішок, k – стала Больцмана, T – температура.

В області низьких температур зі збільшенням температури зростає концентрація вільних носіїв заряду за рахунок іонізації домішок. При подальшому збільшенні температури концентрація вільних носіїв заряду практично не змінюється,

оскільки всі домішки вже іонізовані, а ймовірність іонізації власних атомів ще дуже низька. Ця ділянка називається ділянкою виснаження домішок. При подальшому зростанні температури концентрація вільних носіїв заряду зростає за рахунок іонізації власних атомів.

Рухливість носіїв заряду обумовлюється процесами розсіювання носіїв заряду у напівпровідниках. При цьому розглядають 2 механізми розсіювання: розсіювання на теплових коливаннях ґратки та на іонізованих домішках:

$$\mu \approx T^{-\frac{3}{2}} \quad (5)$$

$$\mu \approx T^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

При зростанні температури амплітуда теплових коливань атомів ґратки зростає, при цьому зростає розсіювання носіїв заряду на них, тому рухливість носіїв заряду падає. Даний механізм розсіювання переважає за високих температур, а за низьких має нехтовно малий вплив.

За низьких температур домінуючий вплив здійснює розсіювання на іонізованих домішках, оскільки навіть за низьких температур більша частина домішкових атомів знаходиться в іонізованому стані. Кожний іон створює навколо себе електричне поле, яке притягує або відштовхує носії заряду, тобто відхиляє траєкторію їх руху. Чим вища температура, тим більша швидкість носія заряду, а, отже, меншим є час його перебування під впливом відхиляючого поля іонізованих домішків, а тому рухливість носіїв заряду зростає.

Однак рухливість носіїв заряду визначається також і концентрацією домішків: чим вища концентрація домішків, тим рухливість носіїв заряду менша. Слід зауважити, що в області високих температур вплив концентрації є незначним. Оскільки температурна залежність рухливості описується більш слабкою степеневою функцією, а температурна залежність концентрації – експоненціальною функцією, то в загальному підсумку температурна залежність питомої електропровідності описується температурною залежністю концентрації, а залежність рухливості від температури вносить свій вклад лише в області виснаження домішків.

Напівпровідникові терморезистори в залежності від того зростає чи зменшується їх опір при нагріванні поділяються відповідно на позистори та термістори.

Термістор – це напівпровідниковий терморезистор з від’ємним ТКО. Фізичні явища, які лежать в основі роботи термісторів: збільшення концентрації носіїв зарядів, збільшення інтенсивності обміну електронами між іонами зі змінною валентністю, фазові перетворення напівпровідникового матеріалу. Перше явище лежить в основі роботи термісторів, виготовлених з монокристалів ковалентних напівпровідників (кремнію, германію, карбиду кремнію, з’єднань АЗВ5). Такі терморезистори працюють в області температур, що відповідає домішковій або власній електропровідності напівпровідника. Найбільш поширені термістори виготовляються з порошків оксидів Mn, Fe, Ni, Cu, Zn та Co. Електропровідність таких матеріалів пов’язана з обміном електронів між сусідніми іонами.

В оксидах ванадію за температур фазового переходу (68 та – 110 °С) спостерігається зменшення питомого опору на декілька порядків, що також використо-

вується в термісторах.

Позистор – це напівпровідниковий терморезистор з додатнім ТКО. Позистори виготовляють на основі кераміки з титанату барію з домішками La, Ce, Ta, Nb, Sb. Крім титаната барія, використовують також кремнієві позистори, які працюють в області виснаження домішків.

Напівпровідникові терморезистивні перетворювачі мають такі переваги порівняно з металевими терморезисторами: малі габарити, мала інерційність та висока чутливість. Однак напівпровідникові перетворювачі поступаються металевим в точності.

Термопарні сенсори температури працюють на основі ефекту Зеебека, який полягає у виникненні термоЕРС в колі з двох різнорідних провідників чи напівпровідників, які називаються термоелектродами, якщо температура місця з'єднання електродів (так званий робочий або гарячий спай) та температура вільних (або холодних) кінців є різною. Як правило, термопара складається з двох послідовно з'єднаних пайкою або зварюванням металевих різнорідних провідників. У поєднанні з електровимірювальними приладами термопара утворює термоелектричний термометр, шкала якого градується безпосередньо в К або °С. Принцип дії таких термометрів оснований на вимірюванні термоЕРС термопари, один кінець якої термостатований (як правило, при 0°C), та співставленні цієї величини з табличними даними для даної пари термоелектродів з метою визначення досліджуваної температури. Для виготовлення металевих термопарних сенсорів використовують наступні матеріали: хромель – алюмель, мідь – константан, залізо – константан тощо. Напівпровідникові термопарні сенсори температури також набувають значного поширення. Так, широко використовується термопара кремній – алюміній. Переваги кремнієвих термопар – це застосування традиційної інтегральної технології для виготовлення такого сенсору.

ІЧ-фотоприймачі можна поділити на два класи: теплові та фотонні. В теплових приймачах ІЧ випромінювання, яке поглинається, викликає нагрівання чутливого елементу, що в свою чергу викликає зміну певних характеристик детектора. В фотонних приймачах поглинуте ІЧ випромінювання призводить до переходів між енергетичними станами кристалу. Теплові приймачі характеризуються рівномірною чутливістю у досить широкому діапазоні ІЧ- спектру, однак мають невелику чутливість та швидкодію. Для фотонних приймачів характерним є селективність по спектру, однак високий рівень чутливості в цьому діапазоні та швидкодія.

Принцип дії ІЧ-фотоприймачів базується на основі основних законів поглинання та випромінювання твердих тіл, сформульованих для так званого абсолютно чорного тіла. Абсолютно чорне тіло (АЧТ) – це тіло, що поглинає все падаюче на нього електромагнітне випромінювання. Перший закон випромінювання Віна:

$$u_v = v^3 \cdot f\left(\frac{v}{T}\right) \quad (7)$$

де u_v – густина енергії випромінювання, T – температура тіла, що випромінює, f – функція, що залежить лише від частоти та температури.

Перший закон Віна є загальною формулою, з якої може бути виведений будь-

який інший закон випромінювання, наприклад, закон Стефана-Больцмана, другий закон Віна, закон Планка, закон Релея-Джинса і т.д. Другий закон Віна – частковий випадок першого закону Віна, справедливий лише в області високих частот:

$$u_v = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot v^3}{c^3} \cdot e^{\frac{hv}{kT}}, \quad (8)$$

де h – стала Планка, c – швидкість світла.

Закон Релея-Джинса справедливий в області низьких частот:

$$E(v, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T \cdot v^3}{c^3} \quad (9)$$

Цей закон передбачає квадратичну залежність спектральної густини випромінювання від частоти. При прямуванні частоти до нуля даний закон переходить в закон Планка:

$$I = \frac{2 \cdot h \cdot v^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} \quad (10)$$

де $E(v, T)$ – спектральна густина випромінювання, I – інтенсивність випромінювання АЧТ.

Закон Планка визначає спектр випромінювання АЧТ. А закон Релея-Джинса та другий закон Віна є його крайніми випадками, які історично стали відомими раніше.

Загальна енергія теплового випромінювання визначається законом Стефана-Больцмана:

$$j = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (11)$$

Із закону Планка шляхом диференціювання впливає закон зміщення Віна, який полягає в тому, що довжина хвилі, за якої енергія випромінювання АЧТ є максимальною, визначається формулою:

$$\lambda = \frac{0,0028999}{T} \quad (12)$$

За цією формулою визначають співвідношення між температурою АЧТ та кольором його випромінювання. Оптична пірометрія – це метод вимірювання температури, який базується на співвідношенні між температурою тіла та оптичним випромінюванням, яке це тіло випромінює. Звідси пірометр – це прилад для безконтактного вимірювання температури тіла, принцип дії якого ґрунтується на вимірюванні потужності теплового випромінювання досліджуваного об'єкту. Болومتر – це терморезистор з зачорненою поверхнею, яка здатна ефективно поглинати ІЧ-випромінювання. Безконтактний метод вимірювання є необхідним для:

- високих вимірюваних температур (більше 2000°C),

- дуже агресивного оточуючого середовища (хімічна промисловість),
- матеріалів, що погано проводять тепло (скло, дерево, пластмаси),
- частин, що знаходяться під високою напругою,
- рухомих тіл (наприклад, листовий матеріал в прокатному виробництві металу).

Піроелектричний сенсор температури працює на основі піроелектричного ефекту, який полягає у зміні поляризованості діелектрика при зміні температури. В найпростішому вигляді даний клас сенсорів являє собою конденсатор – діелектрична пластина виготовлена з піроелектрику і розміщена між металевими обгортками. На одну з металевих обгортки наноситься зачорнений шар. В результаті поглинання теплової енергії температура пластини конденсатора збільшується і між обгортками з'являється напруга, що реєструється. Матеріали піроелектричних датчиків: тригліцинсульфат, титанат барія, титанат свинця тощо. Основна відмінність піроелектричних сенсорів температури від термодатчиків полягає в тому, що в піродатчиках некомпенсований електричний заряд виникає лише в моменти швидкої появи/зникнення випромінювання. При тривалому опроміненні піродатчиків, електричний сигнал на виході сенсора буде рівний нулю. До переваг піроелектричних сенсорів температури відносять їх високу швидкодію та відсутність нагріву активного елементу сенсору.

Порядок виконання роботи

1. Встановити тепловий екран на штатив між джерелом та приймачем ІЧ випромінювання.
2. Ввімкнути блок живлення ЛІПС-35, виставити на ньому вихідну напругу 25 В та вихідний струм 1...2 А.
3. Ввімкнути ампервольтметр Р386 та виставити на ньому початковий вимірювальний діапазон опорів до 1МОм.
4. Коли лампа розжарювання досягне стаціонарного режиму (ІЧ випромінювання постійної густини), зняти тепловий екран та розпочати вимірювання.
5. За допомогою ампервольтметра Р386 виміряти початковий опір болометра (рівноважне значення), який знаходиться на відстані 20 см від лампи розжарювання.
6. Перемістити джерело ІЧ випромінювання вздовж штативу на 1 см в напрямку приймача ІЧ випромінювання.
7. За допомогою ампервольтметра Р386 виміряти опір болометра (рівноважне значення), який знаходиться на відстані 19 см від лампи розжарювання.

8. Повторювати два попередні пункти до тих пір, поки відстань між лампою розжарювання та болометром досягне 1 см.
9. Під час проведення вимірювань врахувати, що теплові приймачі є досить чутливими до конвекційних потоків та характеризуються тепловою інерцією, тому потребують захисту від протягів і встановленню рівноважних значень опору при кожному дослідженні.
10. Вимкнути блок живлення ЛІПС-35 та ампервольтметр Р386.

Обробка результатів вимірювання

1. Побудувати графічну залежність опору резистивного сенсора температури від відстані до джерела теплового випромінювання.
2. Апроксимувати побудовану графічну залежність однією з відомих математичних функцій.
3. На основі побудованого графіку встановити знак ТКО болометра. При цьому слід врахувати закон обернених квадратів для теплового випромінювання.
4. Зробити висновок про тип терморезистора та характер залежності опору болометра від відстані до джерела ІЧ випромінювання.

Виконання

Побудуємо графічну залежність опору резистивного сенсора температури від відстані до джерела теплового випромінювання використовуючи таб 1.

Табл. 1: Залежність опору резистивного сенсора температури від відстані до джерела теплового випромінювання

$l, \text{см}$	$R, \text{Ом}$
20	0,842
19	0,819
18	0,8
17	0,775
16	0,729
15	0,713
14	0,708
13	0,702
12	0,689
11	0,679
10	0,667
9	0,643
8	0,634
7	0,581
6	0,579
5	0,572
4	0,541
3	0,527
2	0,497
1	0,421

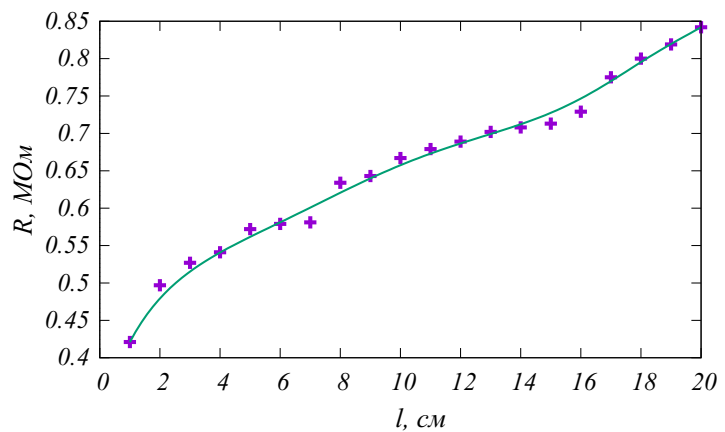


Рис. 1: Залежність опору резистивного сенсора температури від відстані до джерела теплового випромінювання.

Висновок

Виходячи з даних з рис. 1 видно, що при зменшенні відстані до джерела випромінювання і збільшенні температури опір зменшується, тобто можна сказати, що ТКО - від'ємний \Rightarrow тип терморезистору - термістор. На рис. 1 видно деяку нелінійність, проте вона наближається до прямолінійної залежності, про що свідчить симетричність графіку відносно деякої точки перегину, через те, що є паралельно під'єднаний опір, номінал якого рівний термістору за кімнатної температури.

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип дії металевого терморезистора?
2. Що собою являє температурна залежність концентрації носіїв заряду в напівпровідниках?
3. Якою є температурна залежність рухливості носіїв заряду в напівпровідниках?
4. Поясніть принцип дії позистора та термістора на основі температурної залежності електропровідності в напівпровідниках.
5. Порівняйте напівпровідникові та металеві терморезистори.
6. Що таке ефект Зеєбека та його застосування в термометрії?
7. Перелічіть сенсори, які використовуються для контактного та безконтактного вимірювання температури.
8. Що собою являє болометр?
9. Які особливості теплових та фотонних ІЧ-приймачів? 10. Які закони поглинання та випромінювання, сформульовані для АЧТ, Ви знаєте?
11. Поясніть фізичну суть роботи піроелектричних сенсорів температури.
12. Наведіть особливості піроелектричних сенсорів температури.