

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Тема: дослідження температурної залежності термоелектрорушійної сили у напівпровідниках.

Мета: дослідити температурну залежність термо-ЕРС.

Прилади і матеріали: установка для вимірювання коефіцієнта термо-ЕРС.

Література

1. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников: учебное пособие. – 2 изд. – М.: Высш. шк., 1984. – 352 с.
2. Бонч-Бруевич В.Л. Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1977.
3. Фізичні основи електронної техніки: підручник / З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Б.А. Лук'янець та ін. Львів: Бескид Біт, 2004. – 880 с.
4. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки: курс лекцій: навчальний посібник / Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, З. Ю. Готра та ін. – Івано-Франківськ : Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. – 263 с.

Теоретичні відомості

В 1823 р. Т. Зеєбек встановив, що в електричному колі, яке складається з двох різномірних провідників 1 і 2, виникає електрорушійна сила U_T , якщо контакти цих провідників А і В



підтримуються при різних температурах T_r і T_x (рис. 1). Ця ЕРС називається термоелектрорушійною силою. Як показує експеримент вона пропорційна різниці температур контактів А і В:

$$U_T = \alpha(T_r - T_x). \quad (1)$$

Коефіцієнт пропорційності

$$\alpha = \frac{dU_T}{dT} \quad (2)$$

називають диференційною або питомою термо-ЕРС. Він залежить від природи провідників, які дотикаються, і від температури. За наявності різниць температур спаїв у колі з термоелементом з'являється термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС), яка складається з трьох складових.

Перша складова термо-ЕРС зумовлена дифузією носіїв заряду від нагрітого спаю, температура якого внаслідок підведеної до нього теплової потужності від будь-якого джерела вища від температури тепловидільного спаю. Дифузія носіїв заряду в гілках термоелемента може виникати з двох причин. По-перше, у гілках термоелемента біля нагрітого спаю виявляється більша кількість іонізованих атомів. При додатковій іонізації збільшується концентрація основних носіїв заряду на нагрітих кінцях гілок термоелемента. У цьому випадку виникає дифузія основних носіїв у кожній гілці термоелемента внаслідок градієнта концентрації (рис. 4.2). По-друге, якщо в гілках термоелемента всі атоми були іонізовані вже при низькій температурі (ця температура вища від температури виснаження атомів), то концентрація основних носіїв заряду під час нагрівання практично не збільшиться. Однак на нагрітих кінцях гілок термоелемента носії заряду набувають більшої енергії. Тому знову відбувається дифузія

основних носіїв заряду від нагрітого кінця у кожній гілці термоелемента, зв'язана з вирівнюванням середньої енергії, що припадає на один носій визначеного знака.

Дифузія, наприклад, електронів у від'ємній гілці може відбуватися тільки від нагрітого кінця цієї гілки вздовж неї і не може переходити у додатну гілку, тому що перешкоджає потенціальний бар'єр нагрітого спаю термоелемента. Аналогічно, дірки у додатній гілці можуть дифундувати вздовж неї від нагрітого кінця.

Переміщення носіїв заряду, пов'язане з їх дифузією, порушує електричну нейтральність у гілках термоелемента – на нагрітих кінцях гілок термоелемента залишаються некомпенсовані іонізовані домішкові атоми, а на протилежних кінцях утворюється надлишок основних носіїв заряду. У результаті виникає перша складова термо-ЕРС, яку можна назвати дифузійною, оскільки вона зумовлена процесами дифузії.

Друга складова термо-ЕРС – це наслідок температурної залежності контактної різниці потенціалів. Якщо обидва спаї термоелемента мають однакову температуру, то контактні різниці потенціалів на цих спаях рівнонаправлені в протилежні боки при обході контура з термоелементом і не дають результуючої ЕРС. Якщо ж температура спаїв термоелемента різна, то значення контактної різниці потенціалів на спаях буде також різне. Тоді у колі термоелемента виникає друга складова термо-ЕРС з тією ж полярністю, що і перша складова.

Третя складова термо-ЕРС виникає у термоелементі внаслідок захоплення носіїв заряду квантами теплової енергії – фононами. Якщо у гілках термоелемента є градієнт температури, виникає направлений рух фононів від нагрітих кінців гілок. У результаті зіткнень фононів з носіями заряду фонони тягнуть за собою електрони у від'ємній гілці і дірки у додатній гілці. Цей ефект може виявитися переважаючим за низьких температур.

Результуюча термо-ЕРС, що складається з трьох розглянутих складових, залежить від різниці температур спаїв термоелемента і від електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів, що утворюють гілки термоелемента.

Підсумовуючи, отримуємо результуючу питому термо-ЕРС напівпровідника n -типу:

$$\alpha_n = -\frac{k}{q} \left(r + 2 - \frac{E_{Fc}}{kT} \right), \quad (3)$$

де E_{Fc} – відстань від рівня Фермі до зони провідності. Аналогічно для напівпровідника p -типу:

$$\alpha_p = -\frac{k}{q} \left(r + 2 - \frac{E_{Fp}}{kT} \right), \quad (4)$$

де через E_{Fp} відстань від рівня Фермі до валентної зони.

У металів термодифузійна складова термо-ЕРС також не дорівнює нулю. Врахування її і контактної складової призводить до наступного виразу для питомої термо-ЕРС металу з параболічною залежністю енергії від хвильового вектора:

$$\alpha_m = -\frac{\pi^2 k}{3q} (r+1) \frac{kT}{E_F}. \quad (5)$$

Для електричного кола, яке складається з напівпровідника і металу, внеском металу в термо-ЕРС можна знехтувати і вважати, що вся термо-ЕРС зумовлена напівпровідником.

Необхідно відзначити, що r може бути і від'ємною величиною. У цьому випадку зі збільшенням температури довжина вільного пробігу не зростає, а, навпаки, спадає, внаслідок чого термодифузійний потік направлений не від гарячого до холодного, а від холодного до гарячого кінця провідника і зумовлена ним різниця потенціалів направлена протилежно до контактної складової термо-ЕРС. У цьому випадку результуюча термо-ЕРС може виявитися такою, яка дорівнює нулю або навіть змінити свій напрямок. Така картина спостерігається, зокрема, в ряді перехідних металів і сплавів (ніхром, хромель та ін.).

Для напівпровідників зі змішаною провідністю, в яких електричний струм переноситься одночасно електронами і дірками, термо-ЕРС визначається таким співвідношенням:

$$\alpha_{np} = \frac{\alpha_n \mu_n n + \alpha_p \mu_p p}{n \mu_n + p \mu_p}. \quad (6)$$

Для власних напівпровідників $n = p = n_i$

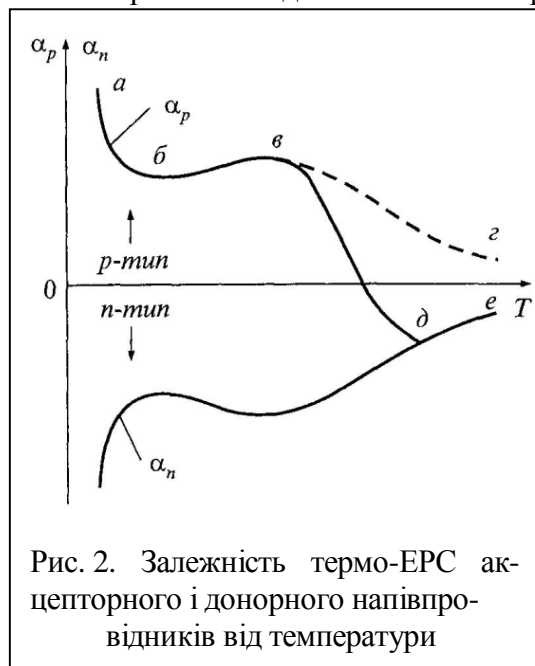
$$\alpha_i = \frac{\alpha_n \mu_n + \alpha_p \mu_p}{\mu_n + \mu_p}. \quad (7)$$

Нехтуючи у виразах (3) і (4) доданком $(r + 2)$ в порівнянні з E_F/kT і пам'ятаючи, що у власному напівпровіднику $E_{Fi} \approx E_g / 2$, отримуємо:

$$\alpha_i \approx \frac{E_g}{2qT} \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}. \quad (8)$$

Оскільки переважно $\mu_n > \mu_p$, то α_i у власному напівпровіднику є величиною від'ємною. В акцепторному напівпровіднику при переході до власної провідності відбувається зміна додатного знака термо-ЕРС на від'ємний.

На рис. 2 наведено залежність термо-ЕРС акцепторного напівпровідника від температури.



В області низьких температур, в якій рівень Фермі порівняно слабо міняється з температурою, величина $- E_{Fp}/kT$ буде приблизно обернено пропорційна температурі T . Тому і питома термо-ЕРС $\alpha_p \sim 1/T$ (ділянка $a-b$ кривої на рис. 2). В області виснаження домішки $- E_{Fp}/kT = \ln(N_v/N_a) = \ln N_v - \ln N_a$. Оскільки $N_v \sim T^{3/2}$, то в цій області α_p незначно росте при підвищенні температури (ділянка $b-c$). В області переходу до власної провідності μ стає величиною практично постійною і такою, яка дорівнює μ_i тому α_p знову зменшується при зростанні температури і крива повинна би поводити себе так, як показано на відрізку $c-d$ на рис. 2. Насправді ж внаслідок того, що в цій області концентрації електронів і дірок практично зрівнюються, термо-ЕРС різко спадаючи, переходить через нуль і стає від'ємною (відрізок $d-e$).

При подальшому зростанні температури абсолютна величина термо-ЕРС, згідно з (3.25), зменшується (крива $d-e$ для власного

напівпровідника).

У нижній частині рис. 2 наведено криву зміни термо-ЕРС донорного напівпровідника з температурою. В області власної провідності вона зливається з кривою для напівпровідника p -типу.

Термоелектричний ефект отримав широке практичне застосування, в тому числі і в радіоелектроніці. Він дає змогу безпосередньо перетворювати теплову енергію в електричну, що використовується в термогенераторах. ККД перетворення теплової енергії в електричну визначається величиною $\alpha^2 \sigma / K$, де K – коефіцієнт теплопровідності напівпровідника; σ – питома електропровідність.

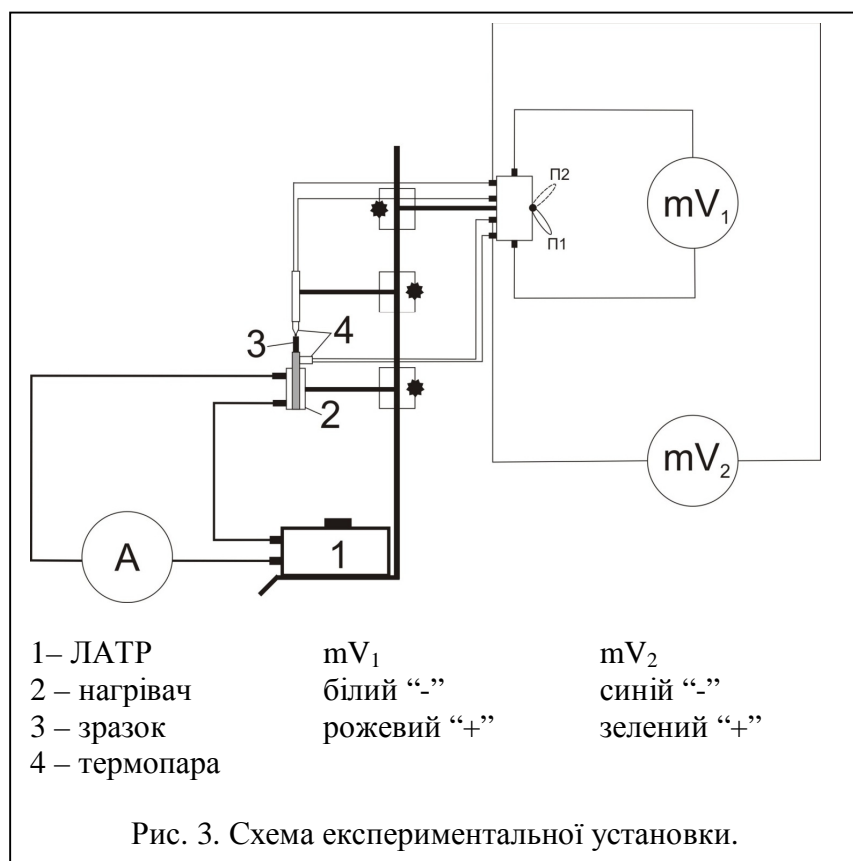
Якісно це стає зрозумілим з таких міркувань. У термогенераторах прагнуть отримати найбільший перепад температур між гарячим і холодним кінцями провідника при якомога

меншій затраті теплової енергії. Чим нижча теплопровідність провідника, тим більша, відповідно, термо-ЕРС. При цьому зменшувати теплопередачу від гарячого кінця до холодного за рахунок видовження провідника не можна, оскільки при цьому буде зростати внутрішній опір термогенератора і ККД буде спадати. З цієї ж причини вигідно мати максимальну електропровідність σ напівпровідника. Оскільки при зростанні ступеня легування напівпровідника α спадає, а K і σ зростають, то для кожного напівпровідника існує оптимальний ступінь легування, який забезпечує максимальну величину $\alpha^2\sigma/K$, а відповідно і ККД.

Термоелектричний ефект використовується також для вимірювання температур (термопари) і при інших вимірюваннях, які можуть бути зведені до вимірювання температури. У теплових фотоприймачах (термоелементах) світло поглинається зачорненою приймальною площиною, до якої приєднано спай термопари, і світло нагріває їх. За значенням термо-ЕРС, яка виникає, визначається сила струму. У вакууметрах через металевий провідник, до середини якого приєднано спай термопари, пропускається фіксований струм. Температура спаю буде різною залежно від теплопровідності газу, який оточує провідник. Теплопровідність, в свою чергу, визначається тиском газу. Тому, вимірюючи термо-ЕРС, що виникає, можна визначити тиск газу. Цим методом зручно вимірювати тиски в діапазоні 10^{-1} – 10 Па.

У техніці вимірювань електрофізичних параметрів напівпровідників термоелектричний ефект використовується для визначення переважного типу провідності (за знаком термо-ЕРС) і ширини забороненої зони.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ



Визначення диференціальної термо-ЕРС напівпровідника зводиться до одночасного вимірювання величини термо-ЕРС U_T і різниці температур між двома контактами напівпровідника з металом ($T_2 - T_1$). Оскільки диференціальна термо-ЕРС металів багато менша диференціальної термо-ЕРС невідроджених напівпровідників, виміряна величина U_T цілком визначається властивостями напівпровідника. Різниця температур повинна бути по можливості малою. α_T визначається як $U_T / (T_2 - T_1)$ і відповідає температурі $T = (T_1 + T_2) / 2$. Для вирішення цієї проблеми використовується схема, подана на рис. 3.

Порядок встановлення зразка в установку

1. Відкрити утримуючий гвинт і підняти лапку штатива.

2. Встановити зразок на мідний стержень і притиснути його лапкою штатива в якій встановлена термопара.

Хід роботи

1. Увімкніть установку. Встановіть за допомогою ЛАТРа струм через нагрівач. (**Увага максимальний струм через нагрівач 2А !**).
2. Після стабілізації температури (приблизно через 10 хв визначте значення температури холоднішого кінця напівпровідника T_x .
Переведіть перемикач в положення П2 і визначте значення температури гарячого кінця напівпровідника T_2 .
Визначте значення термо-ЕРС для цих температур.
3. Змініть значення струму за допомогою ЛАТРа і повторіть пункт 2.
4. Проведіть вимірювання для чотирьох різних значень струму через нагрівач.
5. Поміняйте в установці напівпровідник і проведіть аналогічні вимірювання для цього зразка.
6. Проведіть необхідні обчислення і побудуйте графіки залежності диференційної термо-ЕРС від температури $\alpha_T(T_c)$ для обох напівпровідників.
7. Користуючись отриманими значеннями диференційної термо-ЕРС і даними таблиці 2 визначте склад напівпровідників.
Величини необхідні для розрахунків знаходяться в додатку.

Таблиця 1

№ зразка	№ п/п	U_x , мВ	t_x , °С	T_x , К	U_2 , мВ	t_2 , °С	T_2 , К	T_c , К	ΔT , К	U_T , В	α_T , В/К
1	1										
1	2										
1	3										
1	4										
2	1										
2	2										
2	3										
2	4										

$$T_c \approx \frac{T_2 - T_x}{2}; \quad \Delta T = T_2 - T_x; \quad \alpha_T = \frac{U_T}{\Delta T}.$$

ЕРС в мВ при температурі вільного кінця 0°C										
t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0,063	0,127	0,19	0,254	0,318	0,382	0,446	0,51	0,575
10	0,639	0,704	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,159	1,224
20	1,29	1,355	1,421	1,487	1,553	1,619	1,685	1,752	1,818	1,885
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,219	2,286	2,354	2,421	2,488	2,556
40	2,624	2,692	2,759	2,828	2,896	2,964	3,032	3,101	3,169	3,238
50	3,306	3,375	3,444	3,513	3,582	3,652	3,721	3,79	3,86	3,929
60	3,999	4,069	4,139	4,209	4,279	4,349	4,419	4,49	4,56	4,631
70	4,701	4,772	4,843	4,914	4,985	5,056	5,127	5,198	5,27	5,341
80	5,413	5,484	5,556	5,628	5,7	5,772	5,844	5,916	5,988	6,06
90	6,133	6,205	6,278	6,351	6,423	6,496	6,569	6,642	6,715	6,788
100	6,862	6,935	7,008	7,082	7,155	7,229	7,303	7,377	7,451	7,525
110	7,599	7,673	7,747	7,821	7,896	7,97	8,045	8,119	8,194	8,269
120	8,344	8,419	8,494	8,569	8,644	8,719	8,794	8,87	8,945	9,021
130	9,096	9,172	9,248	9,324	9,4	9,476	9,552	9,628	9,704	9,78
140	9,857	9,933	10,01	10,086	10,163	10,239	10,316	10,393	10,47	10,547
150	10,624	10,701	10,778	10,856	10,933	11,01	11,088	11,165	11,243	11,321
160	11,398	11,476	11,554	11,632	11,71	11,788	11,866	11,944	12,023	12,101
170	12,179	12,258	12,336	12,415	12,494	12,572	12,651	12,73	12,809	12,888
180	12,967	13,046	13,125	13,204	13,284	13,363	13,442	13,522	13,601	13,681
190	13,761	13,84	13,92	14	14,08	14,16	14,24	14,32	14,4	14,48
200	14,56	14,641	14,721	14,802	14,882	14,963	15,043	15,124	15,204	15,285
210	15,366	15,447	15,528	15,609	15,69	15,771	15,852	15,933	16,015	16,096
220	16,177	16,259	16,34	16,422	16,503	16,585	16,667	16,748	16,83	16,912
230	16,994	17,076	17,158	17,24	17,322	17,404	17,486	17,569	17,651	17,733
240	17,816	17,898	17,981	18,063	18,146	18,228	18,311	18,394	18,477	18,559
250	18,642	18,725	18,808	18,891	18,974	19,057	19,141	19,224	19,307	19,39
260	19,474	19,557	19,641	19,724	19,808	19,891	19,975	20,059	20,142	20,226
270	20,31	20,394	20,478	20,561	20,645	20,729	20,813	20,898	20,982	21,066
280	21,15	21,234	21,319	21,403	21,487	21,572	21,656	21,741	21,825	21,91
290	21,995	22,079	22,164	22,249	22,333	22,418	22,503	22,588	22,673	22,758
300	22,843	22,928	23,013	23,098	23,183	23,268	23,354	23,439	23,524	23,609
310	23,695	23,78	23,866	23,951	24,037	24,122	24,208	24,293	24,379	24,465
320	24,55	24,636	24,722	24,807	24,893	24,979	25,065	25,151	25,237	25,323
330	25,409	25,495	25,581	25,667	25,753	25,839	25,926	26,012	26,098	26,184
340	26,271	26,357	26,443	26,53	26,616	26,702	26,789	26,875	26,962	27,048
350	27,135	27,222	27,308	27,395	27,482	27,568	27,655	27,742	27,828	27,915
360	28,002	28,089	28,176	28,263	28,35	28,437	28,523	28,61	28,697	28,784
370	28,872	28,959	29,046	29,133	29,22	29,307	29,394	29,481	29,569	29,656
380	29,743	29,83	29,918	30,005	30,092	30,18	30,267	30,354	30,442	30,529
390	30,617	30,704	30,792	30,879	30,967	31,054	31,142	31,229	31,317	31,404
400	31,492	31,58	31,667	31,755	31,843	31,93	32,018	32,106	32,193	32,281