

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЗАДАЧА

Теоретична част

Според зонната теория електроните, изграждащи твърдите тела, имат различна енергия, което формира енергетични зони – валентна зона, забранена зона и зона на проводимост. Характерно за забранената зона е, че в нея няма разположени енергетични нива. В зависимост от ширината на забранената зона, телата се делят на метали, полупроводници и диелектрици. Това е най-важният параметър за полупроводниците. Един начин за неговото определяне е използването на температурната зависимост на пада на напрежение върху PN преход. Такъв преход се осъществява при контакт на две области с различен тип проводимост P и N. Характерно за PN прехода е неговата еднопосочна проводимост. Когато се включи в права посока преходът има пренебрежимо съпротивление, а в обратна посока то е много голямо.

В права посока токът през прехода се определя от:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{\eta kT}} - 1 \right), \quad (1)$$

където e е заряд на електрона, $k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ - константа на Болцман, η - фактор на идеалност, чиято стойност е между 1 и 2, U - пад на напрежението върху прехода, T - температура на прехода в градуси по Келвин, I_0 - обратен ток на насищане.

Обратният ток се дава от:

$$I_0 = A e^{-\frac{E_g}{\eta kT}}, \quad (2)$$

където A е константа, чиято зависимост от температурата може да се пренебрегне, а E_g е ширината на забранената зона на полупроводника, която се измерва в eV (електронволти).

Ширината на забранената зона също е температурно зависима:

$$E_g(T) = E_{g0} + \alpha T, \quad (3)$$

където E_{g0} е ширината на забранената зона при 0 K, а α е константа.

За температурния диапазон, в който ще работите $\alpha = -2.7 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$.

В настоящата експериментална задача като полупроводников елемент се използва силициев транзистор, като се работи само с единия му PN преход.

Уреди и материали

- o Силициев транзистор с две съпротивления от 1 MΩ и 15 kΩ1 бр.
- o Бехерова чаша с гореща вода1 бр.
- o Цифров термометър1 бр.
- o Мултицет1 бр.
- o Батерия 9 V1 бр.

- o Съединителен кабел за батерия.....1 бр.
- o Предпазни очила1 бр.
- o Съд за изхвърляне на вода1 бр.
- o Милиметрова хартия.1 л.
- o Попивателна гъба1 бр.

Указания

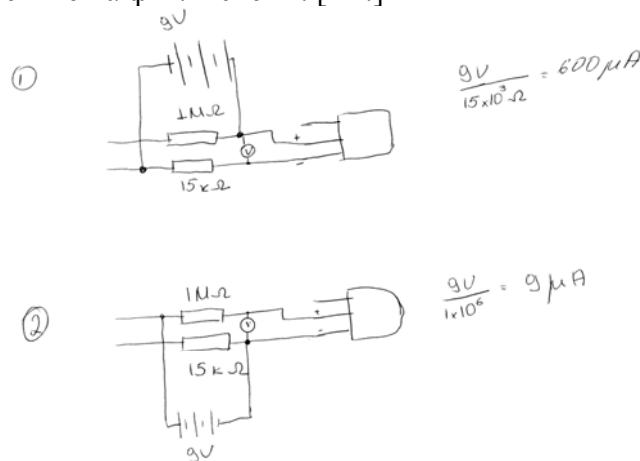
- o Винаги включвайте транзистора през съпротивление към батерията.
- o Права посока на свързване на транзистора е когато положителният полюс на батерията е съединен с червения кабел, идващ от транзистора.
- o Изключвайте мултицетата и батерията, когато не ги използвате продължително време.
- o Работете винаги с предпазни очила.
- o 1eV е енергията, която получава един електрон, преминал през потенциална разлика от 1V , $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$.

Задачи

1. **Определяне на температурна зависимост на пада на напрежение върху PN преход при две различни стойности на тока.**

- 1.1. **Преценете как трябва да се включи преходът през съпротивление в права посока, така че да се получат две различни стойности на тока във веригата $9\text{ }\mu\text{A}$ и $600\text{ }\mu\text{A}$. Начертайте двете схеми на свързване като обозначите и мястото на измерителния прибор. [2 т.]**

За получаване на двете стойности на тока е необходимо транзисторът да се свърже в посочените на фиг. 1 схеми. [2 т.]



Фигура 1. Схеми на свързване на транзистора.

- 1.2. **Изследвайте експериментално зависимостта $U(T)$ при двете стойности на тока от т. 1.1, представете данните таблично и оценете грешките на единичното измерване. Отбележете режима на работа и обхвата на мултицетата, който използвате. Опишете какви мерки трябва да се вземат за коректно отчитане на температурата. [4 т.]**

I=9 μ A		
t, °C	T, K	U, mV
80.6	353.75	399
78.1	351.25	409
76	349.15	414
72.5	345.65	423
71.1	344.25	425
68.5	341.65	431
66	339.15	438
64.2	337.35	443
61.5	334.65	449
59.1	332.25	454
56.7	329.85	461
53.9	327.05	467
51.6	324.75	472
49.1	322.25	478
47.3	320.45	483
45.3	318.45	487
43.1	316.25	492
42.1	315.25	494
40.5	313.65	498

I=600 μ A		
t, °C	T, K	U, mV
84.5	357.65	562
80.7	353.85	570
79.3	352.45	573
75.3	348.45	580
72.7	345.85	585
68.1	341.25	593
64.5	337.65	600
61.6	334.75	606
58.6	331.75	611
56.6	329.75	615
54.8	327.95	619
51.5	324.65	625
49.4	322.55	629
45.3	318.45	637
43.4	316.55	640
41.8	314.95	644
40	313.15	647
39.3	312.45	648

Минимум 10 измервания при дадена стойност на тока **[2 т.]**

Абсолютни грешки на единичните измервания **[0.5 т.]**: $\Delta t = \pm 0.1^\circ \text{C}$;
 $\Delta U = \pm 1 \text{ mV}$.

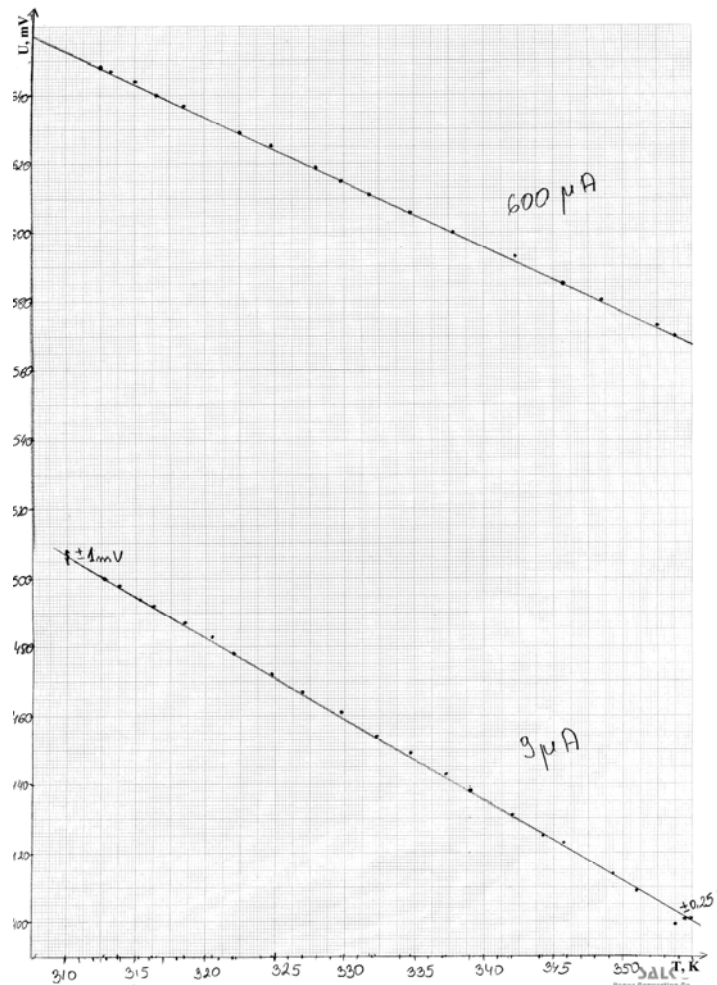
Най-подходящ обхват на мултицета **[0.5 т.]**: измерване на постоянно напрежение с обхват 2V.

За коректно отчитане на температурата трябва:

- 1) Сондата на термометъра и транзисторът да са максимално близо един до друг при отчитане на температурата и напрежението; **[0.5 т.]**
- 2) Водата да се разбърква постоянно, за да се осигури еднаква температура в целия обем. **[0.5 т.]**

1.3. **Представете графично получените експериментални данни за $U(T)$.** **[2 т.]**

Подходящ избор на диапазон по двете оси. **[0.5 т.]**



2. Определяне на ширината на забранената зона на силициев полупроводник.

2.1. Получете израз за температурната зависимост на пада на напрежение върху прехода на транзистора. В настоящата задача можете да пренебрегнете 1-цата в ур. 1. Задължително се обосновае защо. [3 т.]

От експерименталните данни може да се направи оценка на големината на члена $e^{\frac{eU}{\eta kT}}$ спрямо 1. В най-лошия случай $U=0.4$ V; $\eta=2$; $T=350$ K, което води до стойност около 1000. Грешката при пренебрегване на 1-цата е около 0.1%, което е допустимо. [1.5 т.]

Замествайки уравнения (2) и (3) в ур. (1) и изразявайки напрежението като функция на температурата се получава [1.5 т.]:

$$U = \left(\eta \frac{k}{e} \ln \frac{I}{A} + \frac{\alpha}{e} \right) T + \frac{E_{g0}}{e}$$

2.2. Преценете с каква функционална зависимост могат да се опишат получените от вас експериментални данни за $U(T)$. Определете параметрите на тази зависимост. Оценете грешките в получените от вас параметри на тази зависимост. [4 т.]

Получената функционална зависимост за $U(T)$ е линейна, т.е. $U = AT + B$. Нейните параметри са наклон A и отрез B . Тяхното определяне става от графиките, получени в т. 1.3.

Наклонът на графиката се определя като $A = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$, където $y_2 - y_1$ и $x_2 - x_1$

са изменението на напрежението и температурата за дадена графика съответно. Отрезът B се определя при $T=0$ K от $B=U$ или при произволна друга стойност на температурата от $B = U - AT$.

За $I=9 \mu A$ $A_1=-2.378$ mV/K с относителна грешка:

$$\frac{\Delta A_1}{A_1} = \frac{\Delta y_1}{y_1} + \frac{\Delta x_1}{x_1} = \frac{1}{107} + \frac{0.25}{45} = 0.015; \frac{\Delta A_1}{A_1} = 1.5\%$$

Абсолютна грешка: $\Delta A_1 = \pm 0.03$ mV / K [0.5 т.]

$$A_1 = (-2.38 \pm 0.03) \text{ mV / K } [0.5 \text{ т.}]$$

Свободният член се пресмята в дадена точка от графиката:

$$B_1 = U - A_1 T = 1244 \text{ mV} = 1.244 \text{ V}$$

Абсолютна грешка: $\Delta B_1 = \Delta U + \Delta A_1 * T + \Delta T * A_1 = 0.012 \text{ V}$

Относителна грешка: $\frac{\Delta B_1}{B_1} \approx 1\%$ [0.5 т.]

$$B_1 = 1.24 \pm 0.01 \text{ V } [0.5 \text{ т.}]$$

За ток $I=600 \mu A$: $A_2=-1.889$ mV/K с относителна грешка:

$$\frac{\Delta A_2}{A_2} = \frac{\Delta y_2}{y_2} + \frac{\Delta x_2}{x_2} = \frac{1}{85} + \frac{0.25}{45} = 0.017; \frac{\Delta A_2}{A_2} = 1.7\%$$

Абсолютна грешка: $\Delta A_2 = \pm 0.03$ mV / K [0.5 т.]

$$A_2 = (-1.89 \pm 0.03) \text{ mV / K } [0.5 \text{ т.}]$$

Свободният член се пресмята в дадена точка от графиката:

$$B_2 = U - A_2 T = 1238 \text{ mV} = 1.238 \text{ V}$$

Абсолютна грешка: $\Delta B_2 = \Delta U + \Delta A_2 * T + \Delta T * A_2 = 0.012 \text{ V}$

Относителна грешка: $\frac{\Delta B_2}{B_2} \approx 1\%$ [0.5 т.]

$$B_2 = 1.24 \pm 0.01 \text{ V } [0.5 \text{ т.}]$$

2.3. От определените параметри на зависимостта, получена в т. 2.2. при ток $9 \mu A$, определете ширината на забранената зона при 0K. Оценете абсолютната и относителна грешки във вашия резултат. [2 т.]

Свободният член в зависимостта $U(T)$ съдържа ширината на забранената зона, която може да се изрази като: $E_{g0} = B * e$. Т.к B се измерва в mV, то произведението $B * e$ е в meV. Ширината на забранената зона се получава директно от свободния член: $E_{g0} = 1.24 \text{ eV}$ [1 т.]

Абсолютна грешка $\Delta E_{g0} = 0.01 \text{ eV}$ [0.5 т.]; относителна грешка $\Delta E_{g0} / E_{g0} \approx 1\%$ [0.5 т.].

3. Използвайки резултатите, получени в предните две точки, определете фактора на идеалност на PN прехода. Оценете абсолютната и относителна грешки на резултата. [3 т.]

За определяне на фактора на идеалност се използват наклоните на получените две експериментални зависимости:

$$A_i = \eta \frac{k}{e} \ln \frac{I_i}{A} + \frac{\alpha}{e}, \text{ където с } i \text{ е означена различната стойност на тока.}$$

Ако се направи разликата между двете стойности се получава:

$$A_1 - A_2 = \eta \frac{k}{e} \ln \frac{I_1}{A} + \frac{\alpha}{e} - \left(\eta \frac{k}{e} \ln \frac{I_2}{A} + \frac{\alpha}{e} \right) = \eta \frac{k}{e} (\ln I_1 - \ln I_2),$$

откъдето:

$$\eta = \frac{A_1 - A_2}{\frac{k}{e} (\ln I_1 - \ln I_2)} = \frac{-0.49 \times 10^{-3}}{8.617 \times 10^{-5} \times (-4.2)} = 1.35 \text{ [2 т.]}$$

Приемайки, че стойностите на токовете и константата k се знаят с голяма точност и биха внесли пренебрежима грешка в резултата.

За абсолютната грешка се получава:

$$\Delta \eta = \frac{1}{\frac{k}{e} (\ln I_1 - \ln I_2)} (\Delta A_1 + \Delta A_2) = 0.16. \text{ [0.5 т.]}$$

$$\text{Относителна грешка: } \frac{\Delta \eta}{\eta} \approx 12 \% . \text{ [0.5 т.]}$$

При липса на размерности на величините, включително в таблици, графики и др. се отнемат по ~ 0.25 т.