



**Сумський
державний
університет**

Провідність напівпровідників. Залежність питомої електропровідності від температури

Практичне заняття № 16



Відскануйте QR-код
за допомогою
смартфона:



або
перейдіть за посиланням:
<https://vseosvita.ua/test/start/tnq841>

Короткі теоретичні відомості

Температурна залежність питомої електропровідності

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

σ – питома провідність;

ρ – питомий опір;

ΔE – ширина забороненої зони;

k – стала Больцмана;

T – температура.

Температурна залежність питомого опору

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$

Зв'язок питомого опору з питомою електропровідністю

$$\rho = \frac{1}{\sigma}.$$

Короткі теоретичні відомості

Температурний коефіцієнт опору

Температурним коефіцієнтом опору називають відношення відносної зміни опору до зміни температури:

$$\alpha = dR/(RdT).$$

Задачі, в яких розглядаються електричні властивості напівпровідників, можна умовно розділити на наступні типи:

- **1. Розрахунок характеристик напівпровідників: питомої провідності, ширини забороненої зони, рухливості носіїв заряду.**

При розрахунку питомої провідності домішкових напівпровідників необхідно за вказаним елементом домішки визначити її тип: донорна або акцепторна.

Наприклад: в якості домішки в германії використаний індій (In). За таблицею Менделєєва визначаємо, що індій є елементом третьої групи. На зовнішньому електронному рівні у індію 3 електрона. Це на 1 менше, ніж у германію, отже, індій є акцепторною домішкою. Концентрація p дірок дорівнюватиме концентрації атомів індію, так як кожен атом акцепторній домішки дає одну дірку.

- **2. Розрахунок сили струму, що тече через р-n-перехід, опору р-n-переходу при прямому і зворотному включенні.**

Задачі такого типу розв'язують із застосуванням формули (1). При розрахунку зворотного струму врахуйте, що зворотну напругу треба підставляти зі знаком «мінус».

- **3. Задачі на знаходження температурного коефіцієнта опору.**

- Знайти ширину забороненої зони напівпровідника, якщо відомо, що при температурах 300 К і 350 К його опори рівні відповідно 700 Ом та 100 Ом

Розв'язання

$$\begin{array}{l} \Delta E - ? \\ T_1 = 300 \text{ K} \\ T_2 = 350 \text{ K} \\ R_1 = 700 \text{ Ом} \\ R_2 = 100 \text{ Ом} \\ k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \end{array}$$

$$\rho_1 = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_1}} \quad \rho_2 = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_2}} \quad | \quad 1:2$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_1}}}{\rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_2}}} = e^{\frac{\Delta E}{2kT_1} - \frac{\Delta E}{2kT_2}} = e^{\frac{\Delta E (T_2 - T_1)}{2kT_1 T_2}}$$

$$\Delta E = \frac{2kT_1 T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

$$\Delta E = \frac{2kT_1 T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_1 = \rho_1 \frac{l}{S}$$

$$R_2 = \rho_2 \frac{l}{S}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\Delta E = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 350}{350 - 300} \cdot \ln \frac{700}{100} \approx 1,1 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}$$

Приклад 8.3.4. При вимірюванні опору власного напівпровідника було встановлено, що при температурі $t_1=27^\circ\text{C}$ його опір дорівнює $R_1=11940$ Ом, при температурі $t_2=77^\circ\text{C}$ опір дорівнює $R_2=2000$ Ом. Визначити ширину забороненої зони даного напівпровідника.

Розв'язання

$$\begin{array}{l} \Delta E - ? \\ T_1 = 300 \text{ K} \\ T_2 = 350 \text{ K} \\ R_1 = 11940 \text{ Ом} \\ R_2 = 2000 \text{ Ом} \end{array}$$

$$\rho_1 = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_1}} ;$$

$$\rho_2 = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_2}} ;$$

$$R = \rho \frac{l}{S} \Rightarrow$$

$$R_1 = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_1}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 1; 2$$

$$R_2 = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_2}}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_1}}}{R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT_2}}} = e^{\frac{\Delta E}{2kT_1} - \frac{\Delta E}{2kT_2}} = e^{\frac{\Delta E(T_2 - T_1)}{2kT_1 T_2}}$$

$$\ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{\Delta E(T_2 - T_1)}{2kT_1 T_2} = \frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

електрон-
вольт

$$\Delta E = \frac{2k \ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} ;$$

$$\Delta E = 1,05 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}$$

$$\Delta E = 1,05 \cdot 10^{-19} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,66 \text{ (eВ)}$$

Приклад 8.3.6. Визначити питому провідність кремнію в наступних випадках:
 1) в якості домішки використовується бор з концентрацією $1 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; 2) в якості домішки використовується сурма з концентрацією $3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Рухливість електронів і дірок для кремнію відповідно дорівнює $0,13$ і $0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Розв'язання

$$\begin{array}{l} \sigma_1 - ? \quad \sigma_2 - ? \\ \hline n_1 = 1 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3} \\ n_2 = 3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \\ \mu_1 = 0,13 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \\ \mu_2 = 0,05 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \\ e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \end{array}$$

$$\sigma = e (n \mu_n + p \mu_p)$$

1) $\sigma_1 = e p \mu_p$; $\sigma_1 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22} \cdot 0,13 = 20,8$

2) $\sigma_2 = e n \mu_n$; $\sigma = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{21} \cdot 0,05 = 8$

$$[\sigma] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3} \neq$$

$$[\sigma] = 1 \frac{\text{См} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = 1 \frac{\text{См}}{\text{м}^2}$$

↓
„сименс“

$$\text{Кл} = \text{А} \cdot \text{с}$$

$$\text{В} = \text{Кл} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$$

Періодична система хімічних елементів Д.І. Менделєєва

Період	Ряд	Група																													
		I A			II A			III A			IV A			V A			VI A			VII A			VIII A								
1	1	H Гідроген $\chi = 2,20$ Ar = 1,0079															(H)			He Гелій $\chi = 4,5$ Ar = 4,0026											
2	2	Li Літій $\chi = 0,98$ Ar = 6,941			Be Берилій $\chi = 1,57$ Ar = 9,012			B Бор $\chi = 2,04$ Ar = 10,811			C Карбон $\chi = 2,55$ Ar = 12,011			N Нітроген $\chi = 3,04$ Ar = 14,007			O Оксиген $\chi = 3,44$ Ar = 15,999			F Флуор $\chi = 3,98$ Ar = 18,998			Ne Неон $\chi = 4,4$ Ar = 20,18								
3	3	Na Натрій $\chi = 0,93$ Ar = 22,99			Mg Магній $\chi = 1,31$ Ar = 24,305			Al Алюміній $\chi = 1,61$ Ar = 26,982			Si Силіцій $\chi = 1,90$ Ar = 28,086			P Фосфор $\chi = 2,19$ Ar = 30,974			S Сульфур $\chi = 2,58$ Ar = 32,065			Cl Хлор $\chi = 3,16$ Ar = 35,453			Ar Аргон $\chi = 4,3$ Ar = 39,948								
4	4	K Калій $\chi = 0,82$ Ar = 39,098			Ca Кальцій $\chi = 1,00$ Ar = 40,078			Sc Скандій			Ti Титан $\chi = 1,54$ Ar = 47,867			V Ванадій $\chi = 1,63$ Ar = 50,942			Cr Хром $\chi = 1,66$ Ar = 51,996			Mn Манган $\chi = 1,55$ Ar = 54,938			Fe Ферум $\chi = 1,83$ Ar = 55,845			Co Кобальт $\chi = 1,88$ Ar = 58,933			Ni Нікель $\chi = 1,91$ Ar = 58,693		
	5	Zn Цинк $\chi = 1,90$ Ar = 63,546			Ga Галій $\chi = 1,81$ Ar = 69,723			Ge Германій $\chi = 2,01$ Ar = 72,64			As Арсен $\chi = 2,18$ Ar = 74,922			Se Селен $\chi = 2,55$ Ar = 78,96			Br Бром $\chi = 2,96$ Ar = 79,904			Kr Криптон $\chi = 3,00$ Ar = 83,798											
5	6	Rb Рубідій $\chi = 0,82$ Ar = 85,468			Sr Стронцій $\chi = 0,95$ Ar = 87,62			Y Ітрій $\chi = 1,22$ Ar = 88,906			Zr Цирконій $\chi = 1,33$ Ar = 91,224			Nb Ніобій $\chi = 1,6$ Ar = 92,906			Mo Молибден $\chi = 2,16$ Ar = 95,94			Tc Технецій $\chi = 1,9$ Ar = [98,906]			Ru Рутеній $\chi = 2,2$ Ar = 101,07			Rh Родій $\chi = 2,28$ Ar = 102,906			Pd Паладій $\chi = 2,20$ Ar = 106,42		
	7	Ag Аргентум $\chi = 1,93$ Ar = 107,868			Cd Кадмій $\chi = 1,69$ Ar = 112,411			In Індій $\chi = 1,78$ Ar = 114,818			Sn Станум $\chi = 1,96$ Ar = 118,71			Sb Стибій $\chi = 2,05$ Ar = 121,76			Te Телур $\chi = 2,1$ Ar = 127,60			I Йод $\chi = 2,66$ Ar = 126,904			Xe Ксенон $\chi = 2,60$ Ar = 131,293								
6	8	Cs Цезій $\chi = 0,79$ Ar = 132,905			Ba Барій $\chi = 0,89$ Ar = 137,327			La* Лантан			Hf Гафній $\chi = 1,3$ Ar = 178,49			Ta Тантал $\chi = 1,5$ Ar = 180,948			W Вольфрам $\chi = 2,36$ Ar = 183,84			Re Реній $\chi = 1,9$ Ar = 186,207			Os Осмій $\chi = 2,2$ Ar = 190,23			Ir Іридій $\chi = 2,20$ Ar = 192,217			Pt Платина $\chi = 2,28$ Ar = 195,084		
	9	Au Аурум $\chi = 2,54$ Ar = 196,967			Hg Меркурій $\chi = 2,00$ Ar = 200,59			Tl Талій $\chi = 1,62$ Ar = 204,383			Pb Плюмбум $\chi = 2,33$ Ar = 207,2			Bi Бісмут $\chi = 2,02$ Ar = 208,98			Po Полоній $\chi = 2,0$ Ar = [208,98]			At Астат $\chi = 2,2$ Ar = [209,98]			Rn Радон $\chi = 2,2$ Ar = [222,02]								
7	10	Fr Францій $\chi = 0,7$ Ar = [223,02]			Ra Радій $\chi = 0,9$ Ar = [226,03]			Ac** Актиній			Rf Резерфордій Ar = [261,1087]			Db Дубній Ar = [262,1138]			Sg Сиборгій Ar = [263,1182]			Bh Борій Ar = [262,1229]			Hs Гасій Ar = [265]			Mt Майтнерій Ar = [266]			Ds Дармштадтій Ar = [269]		
	11	Rg Рентгеній Ar = [272]			Cn Коперніцій Ar = [285]			Uut Унунтрій Ar = [284]			Uuq Унунквадій Ar = [289]			Uup Унунпентій Ar = [288]			Uuh Унунгексій Ar = [292]			Uus Унунсептій Ar = [295]			Uuo Унуноктій Ar = [294]								
Винні оксиди		R₂O			RO			R₂O₃			RO₂			R₂O₅			RO₃			R₂O₇			RO₄								
Леткі сполуки з воднем								RH₄			RH₃			H₂R			HR														



*Лантаноїди

58 [Xe]4f ⁶ 6s ² Ce Церій $\chi = 1,12$ Ar = 140,12	59 [Xe]4f ⁷ 6s ² Pr Прозеодим $\chi = 1,3$ Ar = 140,91	60 [Xe]4f ⁶ 6s ² Nd Неодим $\chi = 1,14$ Ar = 144,24	61 [Xe]4f ⁷ 6s ² Pm Прометій	62 [Xe]4f ⁶ 6s ² Sm Самарій $\chi = 1,17$ Ar = 150,36	63 [Xe]4f ⁷ 6s ² Eu Європій $\chi = 1,2$ Ar = 151,96	64 [Xe]4f ⁵ 6s ² Gd Гадоліній $\chi = 1,2$ Ar = 157,25	65 [Xe]4f ⁷ 6s ² Tb Тербій $\chi = 1,1$ Ar = 158,93	66 [Xe]4f ⁹ 6s ² Dy Диспрозій $\chi = 1,22$ Ar = 162,50	67 [Xe]4f ⁷ 6s ² Ho Гольмій $\chi = 1,23$ Ar = 164,93	68 [Xe]4f ⁶ 6s ² Er Ербій $\chi = 1,24$ Ar = 167,26	69 [Xe]4f ⁶ 6s ² Tm Тулій $\chi = 1,25$ Ar = 168,93	70 [Xe]4f ⁶ 6s ² Yb Ітербій $\chi = 1,1$ Ar = 173,04	71 [Xe]4f ⁵ 6s ² Lu Лютецій $\chi = 1,27$ Ar = 174,97
--	---	---	--	--	---	---	--	--	--	--	--	---	--

**Актиноїди

90 [Rn]6d ² 7s ² Th Торій $\chi = 1,3$ Ar = 232,04	91 [Rn]5f ⁶ 6d ¹ 7s ² Pa Протактиній $\chi = 1,5$ Ar = 231,04	92 [Rn]5f ⁶ 6d ¹ 7s ² U Уран $\chi = 1,38$ Ar = 238,03	93 [Rn]5f ⁶ 6d ¹ 7s ² Np Нептуній $\chi = 1,36$ Ar = [237,05]	94 [Rn]5f ⁷ 7s ² Pu Плутоній $\chi = 1,28$ Ar = [244,06]	95 [Rn]5f ⁷ 7s ² Am Америцій $\chi = 1,13$ Ar = [243,06]	96 [Rn]5f ⁶ 7s ² Cm Кюрій $\chi = 1,28$ Ar = [247,07]	97 [Rn]5f ⁷ 7s ² Bk Берклій $\chi = 1,3$ Ar = [247,07]	98 [Rn]5f ⁷ 7s ² Cf Каліфорній $\chi = 1,3$ Ar = [251,08]	99 [Rn]5f ⁷ 7s ² Es Ейнштейній $\chi = 1,3$ Ar = [252,08]	100 [Rn]5f ⁶ 7s ² Fm Фермій $\chi = 1,3$ Ar = [257,1]	101 [Rn]5f ⁷ 7s ² Md Менделєєвій $\chi = 1,3$ Ar = [258,1]	102 [Rn]5f ⁷ 7s ² No Нобелій $\chi = 1,3$ Ar = [259,1]	103 [Rn]5f ⁷ 7s ² Lr Лоуренсій $\chi = 1,3$ Ar = [260,11]
---	---	--	---	---	---	--	---	--	--	--	---	---	--

Задача для самостійного розв'язання

- У скільки разів зміниться опір напівпровідника при зменшенні температури вдвічі, якщо його початкова температура $T = 400$ К, ширина забороненої зони $\Delta E = 0,7$ еВ?

$$\begin{aligned} \text{eВ} &\rightarrow \text{Дж} \\ &\times 1,6 \cdot 10^{-19} \end{aligned}$$