

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять та самостійної роботи
з дисципліни

„ТВЕРДОТІЛА ЕЛЕКТРОНІКА“

152 „Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка“
(освітня програма: „Якість, стандартизація та сертифікація“);
153 „Мікро- та наносистемна техніка“
(освітня програма: „Мікро- та нанoeлектронні прилади і пристрої“)
денної й заочної форм навчання

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни „Твердотіла електроніка” 152 „Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка“ (освітня програма: „Якість, стандартизація та сертифікація“); 153 „Мікро- та наносистемна техніка“ (освітня програма: „Мікро- та нанoeлектронні прилади і пристрої“) денної й заочної форм навчання / Укл.: А. В. Коротун, Н. А. Смирнова, Н. М. Нагорна. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 112 с.

Укладачі: А. В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук,
Н. А. Смирнова, ст. викладач,
Н. М. Нагорна, ст. викладач

Рецензент: В. В. Погосов, проф., д-р фіз.-мат. наук

Відповідальний за випуск: А. В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
мікро- та нанoeлектроніки
Протокол №8
від “ 26 ” лютого 2020 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол №7
від “ 27 ” лютого 2020 р.

ЗМІСТ

1 Фізичні явища на контакті та поверхні твердих тіл . .	4
1.1 Основні формули і визначення	4
1.2 Приклади розв'язування задач	13
1.3 Задачі для самостійного розв'язування	25
2 Діоди	33
2.1 Основні формули і визначення	33
2.2 Приклади розв'язування задач	44
2.3 Задачі для самостійного розв'язування	66
3 Біполярний транзистор	71
3.1 Основні формули і визначення	71
3.2 Приклади розв'язування задач	83
3.3 Задачі для самостійного розв'язування	105
 Додаток А Одиниці вимірювання фізичних величин.	 109
Додаток Б Фундаментальні фізичні сталі.	109
Додаток В Властивості напівпровідників	110

1 ФІЗИЧНІ ЯВИЩА НА КОНТАКТІ ТА ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ТІЛ

1.1 Основні формули і визначення

В основі контактних явищ лежать фізичні процеси, що протікають у напівпровідниках під дією електричного поля на контакті. Найбільш поширеними контактами є:

- контакт метал – напівпровідник;
- p - n – перехід;
- n^+ - n – перехід (p^+ - p) – це перехід між напівпровідниками з одним типом провідності і різними концентраціями домішок;
- гетеропереходи – це переходи між напівпровідниками з різною шириною забороненої зони, що бувають *ізотипові* (n - n , p - p) і *неізотипові* (p - n).

При розгляді вищезазначених переходів використовують роботу виходу електронів з металу A_m , роботу виходу електронів із напівпровідника A_n , що визначаються як енергетична відстань між рівнем Фермі E_F та нульовим рівнем у вакуумі; *струм термоелектронної емісії електронів*

$$j = AT^2 e^{-\frac{A_n}{k_B T}}, \quad (1.1)$$

де $A \equiv \frac{em_n^* k_B^2}{2\pi^2 h^3}$ – стала Річардсона – Дешмена.

Контакт метал – напівпровідник може бути *запірним* ($A_m > A_n$ для напівпровідника n -типу; $A_m < A_n$ для напівпровідника p -типу) чи *антизапірним* в залежності від співвідношення між роботами виходу електронів із напівпровідника і металу. Запірний контакт метал – напівпровідник n -типу має *ширину об'ємного заряду* в напівпровіднику:

$$d = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 (A_m - e\phi_k)}{e^2 N_d}}, \quad (1.2)$$

де ε – діелектрична проникність напівпровідника; $A_m - A_n$ – висота потенціального бар'єру на межі метал – напівпровідник; N_d – концентрація донорів у напівпровіднику n -типу.

Запірний контакт метал – напівпровідник можна вважати плоским конденсатором, тоді його ємність:

$$C = S \sqrt{\frac{e^2 N_d}{\varepsilon \varepsilon_0 (A_m - e\phi_k)}}. \quad (1.3)$$

Запірний контакт має випрямляючі властивості, його *вольт-амперна характеристика* має вигляд:

$$j = j_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) = AT^2 e^{-\frac{A_m}{k_B T}} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right), \quad (1.4)$$

де U – напруга, прикладена до переходу; при прямому включенні позитивна, при зворотному – негативна.

Параметри електронно-діркового переходу залежать від параметрів p - і n -областей (рис. 1.1).

Для *невироджених* напівпровідників, виходячи з *закону діючих мас* ($n_n p_n = n_i^2$ (для n -типу), $p_p n_p = n_i^2$ (для p -типу)):

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_a} \text{ – концентрація електронів у } p\text{-області}; \quad (1.5 \text{ а})$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_d} \text{ – концентрація дірок у } n\text{-області}. \quad (1.5 \text{ б})$$

Питома провідність квазінейтральної p -області

$$\sigma_p = e p_p \mu_p, \quad (1.6)$$

і квазінейтральної n -області

$$\sigma_n = e n_n \mu_n, \quad (1.7)$$

набагато більші за провідність збіднілої області p - n -переходу (ОПЗ). Тому падінням напруги на квазінейтральних областях можна знехтувати.

Висота потенціального бар'єру переходу φ_k (або контактна різниця потенціалів) (рис. 1.2, а) дорівнює

$$\varphi_k = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad \text{або} \quad \varphi_k = \varphi_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}, \quad (1.8)$$

де n_n , n_p – концентрації електронів у n - та p -області, розподіл яких зображений на рис. 1.1, б;

N_d , N_a – концентрації домішок у n - та p -області, розподіл яких зображений на рис. 1.1, в (при кімнатній температурі вся домішка йонізована, тому концентрація основних носіїв дорівнює концентрації домішок);

$$\varphi_T - \text{тепловий потенціал} \left(\varphi_T = \frac{k_B T}{e} \right).$$

Ширина різкого p - n -переходу (або області просторового заряду (ОПЗ)) d у кожній з областей залежить від концентрації основних носіїв в областях та прикладеної напруги U (при прямих напругах ОПЗ звужується, при зворотних – розширюється):

$$p_p d_p = n_n d_n; \quad d = d_n + d_p;$$

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e}(\varphi_k - U) \left(\frac{1}{n_n} + \frac{1}{p_p} \right)} \quad \text{або} \quad d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e}(\varphi_k - U) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}, \quad (1.9, a)$$

де d_n і d_p – товщини областей просторового заряду в n - і p -областях (рис. 1.1, а).

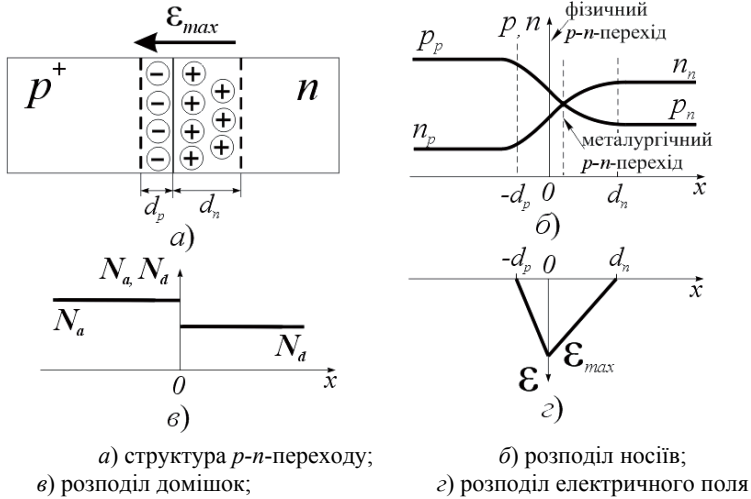


Рисунок 1.1 – Електронно-дірковий перехід у рівноважному стані

Для *плавних* p - n -переходів з лінійним розподілом домішок біля границі розділу напівпровідників ширина переходу дорівнює:

$$d = \sqrt[3]{\frac{3\varepsilon_0\varepsilon}{e} \left(\frac{1}{N'_a} + \frac{1}{N'_d} \right)^2 (\varphi_k - U)}, \quad (1.9, б)$$

де N'_a та N'_d – градієнти концентрації донорних і акцепторних домішок.

Оскільки всередині p - n -переходу загальний негативний заряд йонізованих акцепторів дорівнює загальному позитивному заряду йонізованих донорів, то

$$d_n N_d S = d_p N_a S, \quad (1.10)$$

тут S – площа поперечного перерізу p - n -переходу.

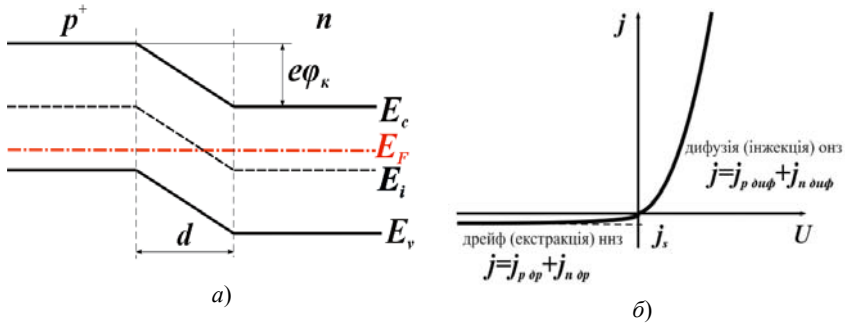


Рисунок 1.2 – Зонна діаграма електронно–діркового переходу в рівноважному стані (а) та ВАХ p - n -переходу (б)

Звідси випливає, що

$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{N_a}{N_d} = \frac{p_p}{n_p}. \quad (1.11)$$

Напруженість електричного поля в p - n -переході максимальна на металургійній межі (рис. 1.1, з) і дорівнює

$$\mathcal{E}_{\max} = -\frac{2\varphi_k}{d} \quad \text{або} \quad \mathcal{E}_{\max} = -\frac{eN_a d_p}{\varepsilon \varepsilon_0} = -\frac{eN_d d_n}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (1.12, a)$$

Залежність напруженості електричного поля від координати x $\mathcal{E}(x)$ в напівпровіднику n - і p -типу відповідно:

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{eN_d}{\varepsilon \varepsilon_0} (d_n - x), \quad x > 0; \quad (1.12, б)$$

та

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon \varepsilon_0} (d_p + x), \quad x < 0. \quad (1.12, в)$$

Залежність потенціалу від координати x $\varphi(x)$ в напівпровіднику n - і p -типу відповідно:

$$\varphi(x) = \frac{eN_a}{2\varepsilon\varepsilon_0} (x + d_p)^2, \quad x < 0; \quad (1.13 \text{ а})$$

та

$$\varphi(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon\varepsilon_0} (x - d_n)^2, \quad x > 0. \quad (1.13 \text{ б})$$

Позитивний та негативний заряд по обидві боки від межі поділу p та n областей для східчастого переходу дорівнює:

$$Q = eN_d d_n S = eN_a d_p S, \quad (1.14)$$

Бар'єрна ємність p - n -переходу – це ємність при зворотному зміщенні, обумовлена зміною заряду іонізованих носіїв в області просторового заряду, і визначається виразом:

$$C_6 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2e(\varphi_k - U)} \frac{n_n p_p}{(n_n + p_p)}}. \quad (1.15)$$

Дифузійна ємність – це ємність p - n -переходу при прямому зміщенні, обумовлена зміною заряду інжектованих носіїв у базу з емітера:

$$C_d = \frac{e^2 S}{k_B T} (p_n L_p + n_p L_n) e^{\frac{eU}{k_B T}} = \frac{e^2 S}{k_B T} (p_n L_p + n_p L_n) \left(\frac{j}{j_s} + 1 \right). \quad (1.16)$$

При прямо- і зворотнозміщеному p - n -переході спостерігаються *інжекція й екстракція* неосновних носіїв заряду відповідно. При інжекції концентрації неосновних носіїв на межах переходу зростають (*надлишкові*) у n - і p -області відповідно:

$$\Delta p_n(0) = p_n \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right); \quad \Delta n_p(0) = n_p \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) \quad (1.17, \text{ а})$$

При зворотному зміщенні – зменшуються:

$$\Delta p_n(0) = p_n \left(e^{-\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right); \quad \Delta n_p(0) = n_p \left(e^{-\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right). \quad (1.17, \text{ б})$$

Ці значення концентрацій використовуються як граничні умови на p - n -переході.

Вольт-амперна характеристика p - n -переходу (рис. 1.2, б) виражає залежність між струмом I (або густиною струму j) через p - n -перехід і прикладеною напругою U :

$$j = e \left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right) \left(e^{\pm \frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) = j_s \left(e^{\pm \frac{eU}{k_B T}} - 1 \right), \quad (1.18, a)$$

де

$$j_s \equiv e \left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right), \quad (1.18, б)$$

j_s – густина зворотного струму насичення (рис. 1.2, б);

D_n і D_p – коефіцієнти дифузії, відповідно, електронів і дірок;

L_n і L_p – відповідні дифузійні довжини.

Для p - n -переходу з тонкими нейтральними областями ($W_n \ll L_p$ і $W_p \ll L_n$) і зворотним зміщенням густина струму насичення знаходиться за формулою:

$$j_s = e \left(\frac{D_n n_p}{L_n} \operatorname{cth} \frac{W_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \operatorname{cth} \frac{W_n}{L_p} \right), \quad (1.18, в)$$

Струм складається з діркової й електронної складових, вони визначають коефіцієнт інжекції p - n -переходу:

$$\gamma_p = \frac{j_p}{j_n + j_p}. \quad (1.19)$$

За відсутності зовнішньої змішувальної напруги через p - n -перехід протікають такі складові струму (рис. 1.2, б):

$$- \text{дифузійний струм дірок} \quad j_{p_{\text{диф}}} = -e D_p \frac{dp}{dx}; \quad (1.20)$$

$$- \text{дрейфовий струм дірок} \quad j_{p_{\text{др}}} = e \mu_p p_n \mathcal{E}_{\text{max}}; \quad (1.21)$$

$$- \text{ дифузійний струм електронів } j_{n_{\text{диф}}} = eD_n \frac{dn}{dx}; \quad (1.22)$$

$$- \text{ дрейфовий струм електронів } j_{n_{\text{др}}} = e\mu_n n_p \mathcal{E}_{\text{max}}. \quad (1.23)$$

Наявність поверхневих станів на поверхні напівпровідника призводить до утворення подвійного шару електричного заряду. В залежності від його типу (акцептори або донори), поверхня заряджається негативно або позитивно. При цьому в приповерхневій області виникає шар об'ємного заряду. Електричне поле, що виникає при цьому, викликає вигин енергетичних зон (рис. 1.3):

$$E_c(\mathbf{r}) = E_c^0 - e\varphi(\mathbf{r}), \quad E_v(\mathbf{r}) = E_v^0 - e\varphi(\mathbf{r}). \quad (1.24)$$

Величину вигину зон на поверхні напівпровідника, тобто різницю між значеннями електростатичного потенціалу на поверхні й в об'ємі, називають *поверхневим потенціалом* φ_s .

В області об'ємного заряду концентрації електронів і дірок залежать від координат. Для невідроджених напівпровідників ці залежності мають вигляд

$$\begin{aligned} n(\mathbf{r}) &= N_c e^{\frac{E_F - E_c^0 + e\varphi(\mathbf{r})}{k_B T}} = n e^{\frac{e\varphi(\mathbf{r})}{k_B T}}, \\ p(\mathbf{r}) &= N_v e^{\frac{E_v^0 - e\varphi(\mathbf{r}) - E_F}{k_B T}} = n e^{\frac{e\varphi(\mathbf{r})}{k_B T}}. \end{aligned} \quad (1.25)$$

При вигині зон вгору (вниз) у напівпровіднику p -типу (n -типу) концентрація основних носіїв заряду – дірок (електронів) поблизу поверхні збільшується, утворюється *збагачений* дірками (електронами) шар. При вигині зон униз (вгору) в напівпровіднику p -типу (n -типу) відбувається зменшення концентрації основних носіїв заряду – утворення *збіднілого* шару. В останньому випадку, якщо вигин зон достатньо великий (як правило, більший за $\frac{\Delta E_g}{2}$, де ΔE_g – ширина забороненої зони напівпровідника), поблизу поверхні виникає шар, концентрація електронів (дірок) в якому може стати помітною. Шар поблизу поверхні, провідність якого порівняна з провідністю в об'ємі напів-

провідника чи перевищує її й створюється електронами (дірками) в напівпровідниках *p*-типу (*n*-типу), називається *інверсійним*.

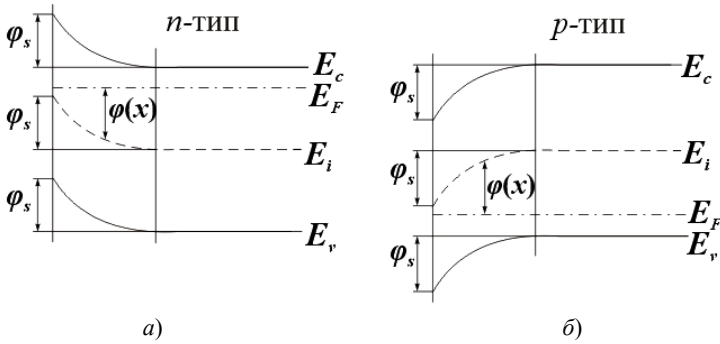


Рисунок 1.3 – Енергетичні діаграми на поверхні напівпровідника *n*-типу (а) та *p*-типу (б), режим збіднення

Ширина області просторового заряду характеризується *довжиною екранування*, або *дебайівською довжиною* L_D . Для електронного напівпровідника вона дорівнює

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 k_B T}{e^2 N_c \Phi'_{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_F - E_c}{k_B T} \right)}}, \quad (1.26)$$

де $\Phi'_{\frac{1}{2}}(\eta)$ – похідна інтегралу Фермі. В невідродженому випадку

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 k_B T}{e^2 n}}, \quad (1.27)$$

де n – концентрація електронів, а в умовах виродження

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 k_B T}{e^2 N(E_F)}}, \quad (1.28)$$

де $N(E_F)$ – густина станів на рівні Фермі.

Для власного напівпровідника за відсутності виродження маємо

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 k_B T}{2e^2 n_i}}. \quad (1.29)$$

Залежність концентрації власних носіїв заряду від температури виражається формулою

$$n_i^2 = A^* e^{-\frac{\Delta E_g}{\Phi_T}}, \quad (1.30)$$

$$\text{де } A^* = 0,5 \cdot 10^{16} \left(\frac{m_{dn}^* m_{dp}^*}{m_e^2} \right)^{\frac{3}{4}} T^{\frac{3}{2}}.$$

Залежність концентрації носіїв заряду з рівнем Фермі E_F для невороджених напівпровідників визначається формулами:

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T}}, \quad (1.31)$$

$$\text{де } N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_{dn}^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} - \text{ефективна густина станів в зоні провідності;}$$

$$p = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{k_B T}}, \quad (1.32)$$

$$\text{де } N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_{dp}^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} - \text{ефективна густина станів у валентній зоні.}$$

1.2 Приклади розв'язування задач

Приклад 1.2.1. Питомий опір p -області германієвого p - n -переходу: $\rho_p = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а питомий опір n -області $\rho_n = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Обчисліть контактну різницю потенціалів (висоту потенціального бар'єру) при $T = 300 \text{ К}$.

Розв'язок

Відомо, що питомий опір p -області напівпровідника

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} = \frac{1}{eN_a\mu_p},$$

де N_a – концентрація акцепторів; e – заряд електрона; μ_p – рухливість дірок. Звідси

$$N_a = \frac{1}{e\rho_p\mu_p} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,19} = 1,65 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

Аналогічно знайдемо концентрацію донорів в n -області напівпровідника

$$N_d = \frac{1}{e\rho_n\mu_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot 0,39} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

Контактна різниця потенціалів

$$\varphi_k = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \frac{1,65 \cdot 10^{15} \cdot 1,6 \cdot 10^{15}}{(2,5 \cdot 10^{19})^2} = 0,215 \text{ В}.$$

Відповідь: $\varphi_k = 0,215 \text{ В}$.

Приклад 1.2.2. В германієвому p - n -переході питома провідність p -області $\sigma_p = 10^4 \text{ См/м}$, а питома провідність n -області $\sigma_n = 10^2 \text{ См/м}$. Рухливості електронів μ_n і дірок μ_p у германії відповідно дорівнюють 0,39 і 0,19 $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Концентрація власних носіїв в германії при $T = 300 \text{ К}$ $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Обчисліть:

- а) густину зворотного струму насичення, а також відношення діркової складової зворотного струму насичення до електронної, якщо дифузійна довжина електронів і дірок

$$L_n = L_p = 10^{-3} \text{ м};$$

- б) напругу, за якої густина прямого струму $j = 10^6 \text{ A/m}^2$.

Розв'язок

- а) Густина зворотного струму насичення знайдемо з виразу (1.18 б)

$$j_s = e \left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right).$$

Аналогічно попередній задачі та користуючись законом дії мас знаходимо

$$p_n = 3,91 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}; \quad n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = 1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

Відомо, що $D_p = \frac{k_B T}{e} \mu_p$ та $D_n = \frac{k_B T}{e} \mu_n$ (рівняння Ейнштейна).

Відповідно,

$$j_s = 1,6 \cdot 10^{-19} \left(\frac{3,91 \cdot 10^{17} \cdot 0,19}{10^{-3}} + \frac{1,9 \cdot 10^{15} \cdot 0,39}{10^{-3}} \right) = 0,31 \frac{\text{A}}{\text{м}^2}.$$

Відношення діркової складової зворотного струму насичення до електронної

$$\frac{I_{s_p}}{I_{s_n}} = \frac{\mu_p p_n L_p}{\mu_n n_p L_n} = \frac{0,19 \cdot 3,91 \cdot 10^{17}}{0,39 \cdot 1,9 \cdot 10^{15}} = 100.$$

- б) Напругу, яку необхідно прикласти до p - n -переходу для отримання струму густиною 10^6 A/m^2 , знайдемо з рівняння ВАХ p - n -переходу:

$$j = j_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right), \quad \text{звідки} \quad U = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{j}{j_s} + 1 \right).$$

Тоді

$$U = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{10^6}{0,31} + 1 \right) = 0,328 \text{ В}.$$

Відповідь: $U = 0,328 \text{ В}$.

Приклад 1.2.3. Маємо германієвий p - n -перехід з концентрацією домішок $N_d = 10^3 N_a$, причому на кожні 10^8 атомів германію приходить один атом акцепторної домішки. Визначте контактну різницю потенціалів за температури $T = 300 \text{ К}$. Концентрації атомів германію N та іонізованих атомів n_i прийміть такими:
 $N = 4,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Розв'язок

Концентрація акцепторних атомів

$$N_a = \frac{N}{10^8} = \frac{4,4 \cdot 10^{28}}{10^8} = 4,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрація атомів донорів

$$N_d = 10^3 N_a = 10^3 \cdot 4,4 \cdot 10^{20} = 4,4 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Якщо домішки йонізовано, то контактна різниця потенціалів

$$\varphi_k = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{4,4 \cdot 10^{20} \cdot 4,4 \cdot 10^{23}}{(2,5 \cdot 10^{19})^2} = 0,326 \text{ В}.$$

Відповідь: $\varphi_k = 0,326 \text{ В}$.

Приклад 1.2.4. Визначте, як зміниться густина зворотного струму j_s через ідеальний кремнієвий p - n -перехід при зменшенні температури від $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 250 \text{ К}$. Ширина забороненої зони кремнію при 300 К $\Delta E_g = 1,12 \text{ еВ}$.

Розв'язок

Ширина забороненої зони кремнію при 300 К $\Delta E_g = 1,12 \text{ еВ}$.

При зміні температури ширина забороненої зони змінюється за законом:

$$\Delta E_g(T) = \Delta E_g(300) - \xi(T - 300),$$

де ξ – температурний коефіцієнт ширини забороненої зони, який для кремнію дорівнює $\xi_{Si} = 2,84 \cdot 10^{-4}$ еВ/К.

Використаємо формулу залежності власної концентрації носіїв заряду від температури:

$$n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{\Delta E_g}{k_B T}},$$

де N_c , N_v – густини станіву зоні провідності і в валентній зоні.

Тоді густина зворотного струму (1.18 б) дорівнюватиме:

$$j_s = e N_c N_v \left(\frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) e^{-\frac{\Delta E_g}{k_B T}}.$$

Параметри N_c , N_v , D_n , D_p , L_n і L_p слабко залежать від температури. Тому основна температурна залежність зворотного струму визначається експоненційним множником

$$e^{-\frac{\Delta E_g}{k_B T}}.$$

При $T_1 = 300$ К він дорівнює

$$e^{-\frac{\Delta E_g}{k_B T}} = e^{-\frac{1,12}{0,0256}} = 1,96 \cdot 10^{-19}.$$

При $T_2 = 250$ К ширина забороненої зони

$$\Delta E_g(250) = \Delta E_g(300) - \xi \cdot (250 - 300) = 1,1342 \text{ еВ}.$$

Тоді

$$e^{-\frac{\Delta E_g}{k_B T}} = e^{-\frac{1,1342}{0,0216}} = 1,84 \cdot 10^{-23}.$$

$$e^{-\frac{\Delta E_g}{k_B T}} = e^{-\frac{1,1342}{0,0216}} = 1,84 \cdot 10^{-23}.$$

Відношення зворотних струмів в основному визначається відношенням цих експонент:

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{1,96 \cdot 10^{-19}}{1,84 \cdot 10^{-23}} \approx 10^4.$$

Відповідь: $\frac{j_1}{j_2} \approx 10^4$.

Приклад 1.2.5. Відомо, що діелектрична проникність кремнію $\varepsilon = 12$, концентрація власних носіїв заряду $n_i = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, температура $T = 300 \text{ К}$, власні провідності в n - і p -областях $\sigma_n = 800 \frac{\text{См}}{\text{м}}$ і $\sigma_p = 240 \frac{\text{См}}{\text{м}}$ відповідно, а рухливості електронів і дірок $\mu_n = 0,05 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$, $\mu_p = 0,03 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Визначте:

- 1) контактну різницю потенціалів ϕ_k ;
- 2) ширину p - n -переходу з боку n - і p -областей d_n і d_p , а також повну ширину переходу d ;
- 3) максимальну величину напруженості контактного поля $\mathcal{E}_{\max}$.

Як зміниться висота потенціального бар'єру ϕ , якщо до p - n -переходу прикласти зовнішню напругу:

- а) $U_1 = +0,5 \text{ В}$; б) $U_2 = -5,0 \text{ В}$?

Розв'язок

Визначимо концентрації основних носіїв заряду

$$n_n = \frac{\sigma_n}{e\mu_n} = \frac{800}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,05} = 10^{23} \text{ м}^{-3};$$

$$p_p = \frac{\sigma_p}{e\mu_p} = \frac{240}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,03} = 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}.$$

Висота потенціального бар'єру за відсутності зовнішньої напру-

ги

$$\varphi_k = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \frac{10^{23} \cdot 5 \cdot 10^{22}}{(1,4 \cdot 10^{16})^2} = 0,688 \text{ В}.$$

Ширина p - n -переходу:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \varphi_k (N_d + N_a)}{e N_d N_a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 0,688 \cdot (10^{23} + 5 \cdot 10^{22})}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{23} \cdot 5 \cdot 10^{22}}} =$$

$$= 1,66 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,166 \text{ мкм}.$$

Використовуючи співвідношення (1.11), можна записати

$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{p_p}{n_p} = \frac{5 \cdot 10^{22}}{10^{23}} = 0,5,$$

тому

$$d_p = \frac{d}{1 + d_n} = \frac{0,166}{1 + 0,5} \approx 0,111 \text{ мкм};$$

тоді

$$d_n = d - d_p = 0,166 - 0,111 = 0,055 \text{ мкм}.$$

Максимальну напруженість електричного поля знайдемо з виразу (1.12, а)

$$\varepsilon_{\max} = \frac{2\varphi_k}{d} = \frac{2 \cdot 0,688}{1,66 \cdot 10^{-7}} = 8,29 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Якщо до p - n -переходу прикладена пряма напруга $U_1 = 0,5 \text{ В}$, то потенціальний бар'єр зменшиться на $0,5 \text{ В}$:

$$\varphi_1 = \varphi_k - U_1 = 0,688 - 0,5 = 0,188 \text{ В}.$$

Якщо до p - n -переходу прикладена зворотна напруга $U_2 = -5 \text{ В}$, то потенціальний бар'єр збільшиться на 5 В :

$$\varphi_2 = \varphi_k - U_2 = 0,688 + 5 = 5,688 \text{ В}.$$

Відповідь: $\varphi_k = 0,688 \text{ В}; \quad d = 0,166 \text{ мкм}; \quad d_p = 0,111 \text{ мкм};$
 $d_n = 0,055 \text{ мкм}; \quad \mathcal{E}_{\max} = 8,29 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}; \quad \varphi_1 = 0,188 \text{ В};$
 $\varphi_2 = 5,688 \text{ В}.$

Приклад 1.2.6. Зворотний струм насичення p - n -переходу за температури $T_1 = 293 \text{ К}$ $I_0 = 10^{-14} \text{ А}$. При зростанні температури до $T_2 = 398 \text{ К}$ зворотний струм збільшився у 10^5 разів. Визначити напругу на переході за кімнатної температури і температури $T_2 = 398 \text{ К}$, якщо прямий струм через нього $I = 1 \text{ мА}$.

Розв'язок

З вольт-амперної характеристики p - n -переходу

$$I = I_0 \left[e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right]$$

маємо

$$e^{\frac{eU}{k_B T}} = \frac{I}{I_0} + 1.$$

Розв'язуючи це рівняння відносно U , отримуємо

$$U = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right).$$

За $T_1 = 293 \text{ К}$:

$$U_1 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{10^{-3}}{10^{-14}} + 1 \right) = 0,66 \text{ В}.$$

За $T_2 = 398 \text{ К}$:

$$U_2 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 398}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{10^{-3}}{10^{-14} \cdot 10^5} + 1 \right) = 0,5 \text{ В}.$$

Відповідь: $U_1 = 0,66 \text{ В}$; $U_2 = 0,5 \text{ В}$.

Приклад 1.2.7. Германієвий p - n -перехід має зворотний струм насичення 1 мкА , а кремнієвий діод таких же розмірів – 10^{-8} А . Розрахуйте і порівняйте прямі напруги U на переходах за температури $T = 293 \text{ К}$ і значенні струму 100 мА .

Розв'язок

Струм крізь p - n -перехід

$$I = I_0 \left[e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right],$$

тоді пряма напруга

$$U = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right).$$

Для германієвого p - n -переходу

$$U = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{0,1}{10^{-6}} + 1 \right) = 0,288 \text{ В}.$$

Для кремнієвого p - n -переходу

$$U = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{0,1}{10^{-8}} + 1 \right) = 0,407 \text{ В}.$$

Відповідь: для Ge : $U = 0,288 \text{ В}$; для Si : $U = 0,407 \text{ В}$.

Приклад 1.2.8. Визначте густину струму насичення в ідеальному кремнієвому переході, якщо $n_i = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$;

$$D_n = 0,004 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad D_p = 0,0015 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad L_n = 100 \text{ мкм};$$

$$L_p = 60 \text{ мкм}; \quad N_d = 10^{21} \text{ м}^{-3}; \quad N_a = 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Розв'язок

Визначимо концентрацію неосновних носіїв заряду в n - і p -областях

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_d} = \frac{(1,4 \cdot 10^{16})^2}{10^{21}} = 1,96 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3};$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_a} = \frac{(1,4 \cdot 10^{16})^2}{10^{23}} = 1,96 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}.$$

Тоді густина струму

$$j_s = e \left(\frac{D_n}{L_n} n_p + \frac{D_p}{L_p} p_n \right) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^{-3}}{10^{-4}} \cdot 1,96 \cdot 10^9 + \right. \\ \left. + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-5}} \cdot 1,96 \cdot 10^{11} \right) = 7,96 \cdot 10^{-7} \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Відповідь: $j_s = 7,96 \cdot 10^{-7} \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$

Приклад 1.2.9. Відомо, що контактна різниця потенціалів у різкому

$$p\text{-}n\text{-переході } \phi_k = \frac{e}{2\varepsilon_0\varepsilon} (n_n d_n^2 + p_p d_p^2), \text{ де } \varepsilon - \text{діелектрична}$$

проникність напівпровідника; d_n і d_p – ширина області об'ємного заряду з обох боків межі поділу електронного і діркового напівпровідників відповідно. Використовуючи цей вираз, визначити ширину області об'ємного заряду d симетричного й несиметричного $p\text{-}n\text{-переходів}$ за відсутності та наявності зовнішньої напруги. Отримайте вираз для бар'єрної ємності симетричного та несиметричного $p\text{-}n\text{-переходів}$.

Розв'язок

Об'ємні заряди в обох областях співпадають, тому $n_n d_n = p_p d_p$, крім того $d = d_n + d_p$ і тоді

$$\varphi_{\kappa} = \frac{e}{2\varepsilon_0\varepsilon} d^2 \frac{n_n p_p}{n_n + p_p}.$$

Вважаючи домішки іонізованими ($n_n = N_d$, $p_p = N_a$), знаходимо вираз для ширини області об'ємного заряду за відсутності зовнішньої напруги для симетричного різкого p – n –переходу:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{e} \varphi_{\kappa} \frac{N_d + N_a}{N_d N_a}}.$$

При подачі зовнішньої напруги U висота потенціального бар'єру змінюється й ширина області об'ємного заряду

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(N_d + N_a)}{eN_d N_a} (\varphi_{\kappa} - U)}.$$

Цей вираз має сенс при $|\varphi_{\kappa} - U| > 0$, тому при зворотних напругах $U < 0$ (зазвичай $\varphi_{\kappa} \ll |U|$), при прямих напругах $0 < U < \varphi_{\kappa}$.

У несиметричному p – n –переході концентрація домішок в одній області набагато більше, ніж в іншій. Тому, наприклад, у випадку $N_d \ll N_a$, маємо

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{eN_d} (\varphi_{\kappa} - U)}.$$

Використовуючи формулу плоского конденсатора $C_{\phi} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}$, де S – площа переходу, знайдемо бар'єрну ємність симетричного та несиметричного p – n –переходів

$$C_{\phi \text{ сим}} = S \sqrt{\frac{e\varepsilon_0\varepsilon N_d N_a}{2(N_d + N_a)(\varphi_{\kappa} - U)}}, \quad C_{\phi \text{ несим}} = S \sqrt{\frac{e\varepsilon_0\varepsilon N}{2(\varphi_{\kappa} - U)}},$$

де N – концентрація домішок у слабо легованій області.

Відповідь: для несиметричного p - n -переходу: $d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{eN_d}}(\varphi_K - U)$;

$$C_{\text{б несим}} = S \sqrt{\frac{e\varepsilon_0\varepsilon N}{2(\varphi_K - U)}};$$

для симетричного p - n -переходу: $d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(N_d + N_a)}{eN_d N_a}}(\varphi_K - U)$,

$$C_{\text{б сим}} = S \sqrt{\frac{e\varepsilon_0\varepsilon N_d N_a}{2(N_d + N_a)(\varphi_K - U)}}.$$

Приклад 1.2.10. На поверхні зразка кремнію n -типу існує сильний вигин зон вгору, який відповідає утворенню збідненого шару. При якому значенні потенціалу в приповерхневій області концентрація дірок зрівнюється з концентрацією електронів? Оцінити товщину приповерхневого шару, в якому $p(x) > n(x)$, якщо $e\varphi_s = 0,5$ еВ, концентрація електронів в об'ємі $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $T = 300 \text{ К}$, $b = \frac{\mu_n}{\mu_p} = 2,9$.

Розв'язок

Рівняння Пуассона з урахуванням носіїв заряду обох знаків:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{k_B T}{eL_D^2} \left[1 - e^{-\frac{e\varphi}{k_B T}} + \frac{p}{n} \left(e^{\frac{e\varphi}{k_B T}} - 1 \right) \right],$$

де $L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 k_B T}{ne^2}}$, а n і p – концентрації електронів і дірок в об'ємі напівпровідника. Звідси

$$\int_{\frac{e\varphi}{k_B T}}^{\frac{e\varphi_s}{k_B T}} \sqrt{y + e^{-y} - 1 + \frac{p}{n}(e^y - y - 1)} dy = \frac{x\sqrt{2}}{L_D}.$$

Точка $x = x_i$, в якій $n(x_i) = p(x_i)$, визначається умовою

$$\varphi(x_i) = \frac{k_B T}{2e} \ln \frac{n}{p} \approx 0,3 \text{ В}.$$

Отже,
$$x_i = \frac{L_D}{\sqrt{2}} \int_{y_i}^{y_s} \frac{dy}{\sqrt{y - 1 + e^{-y} + \frac{p}{n}(e^y - y - 1)}},$$

де $y_s \equiv \frac{e\varphi_s}{k_B T}$, $y_i = \frac{1}{2} \ln \frac{n}{p}$, причому область, де $p(x) > n(x)$, виникає

лише при $y_s > y_i$, тобто при $\varphi_s > \frac{k_B T}{2e} \ln \frac{n}{p}$. Оскільки в наших умовах

$y_i \gg 1$ і $p \gg n$, маємо

$$x_i \approx L_D \left\{ \sqrt{\frac{2e\varphi_s}{k_B T}} - \sqrt{\ln \frac{n}{p}} \right\} = 1,4 L_D.$$

Беручи до уваги, що $p = \frac{n_i^2}{n}$, де $n_i = 1,03 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, звідси знахо-

ДИМО

$$x_i \approx 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ см}.$$

Відповідь: $x_i \approx 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ см}.$

1.3 Задачі для самостійного розв'язування

- 1.3.1 Визначте контактну різницю потенціалів φ_k кремнієвого p - n -переходу при $T = 300 \text{ К}$, якщо $N_a = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ та $N_d = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.
- 1.3.2 Знайдіть висоту потенціального бар'єра германієвого p - n -переходу з об'ємними питомими опорами $\rho_n = \rho_p = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Як зміниться висота потенціального бар'єра при зміні напруги від $+0,15\text{ В}$ до -5 В ? Намалювати зонні діаграми.

1.3.3 Задані питомі опори p - та n -областей p - n -переходу:

Варіант	1	2	3	4	5	6
матеріал	кремній			германій		
$\rho_p, \text{Ом} \cdot \text{см}$	2	10^{-3}	1	10^{-2}	10^{-3}	1
$\rho_n, \text{Ом} \cdot \text{см}$	1	10^{-4}	10	1	10^{-4}	10

Відомо, що дифузійна довжина електронів і дірок дорівнює 10^{-3} м . Обчисліть:

а) контактну різницю потенціалів (висоту потенціального бар'єру) при $T = 300\text{ К}$;

б) густину зворотного струму насичення;

в) відношення діркової складової зворотного струму насичення до електронної;

г) напругу, що забезпечує густину прямого струму 10^5 мА/см^2 .

1.3.4 В германієвому p - n -переході питома провідність p -області $\sigma_p = 10^4\text{ См/м}$, а питома провідність n -області $\sigma_n = 10^2\text{ См/м}$.

Рухливості електронів μ_n і дірок μ_p у германії відповідно дорівнюють $0,39$ і $0,19 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Концентрація власних носіїв в германії при $T = 300\text{ К}$ $n_i = 2,5 \cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$. Обчисліть контактну різницю потенціалів (висоту потенціального бар'єру) при $T = 300\text{ К}$.

1.3.5 В кремнії створено p - n -перехід. Питомий опір області p -типу $\rho_p = 5 \cdot 10^{-3}\text{ Ом} \cdot \text{м}$, питомий опір області n -типу

$\rho_n = 4 \cdot 10^{-4}\text{ Ом} \cdot \text{м}$. Рухливість електронів $\mu_n = 0,045 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$, ді-

рок $\mu_p = 0,03 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. При $T = 300 \text{ К}$ розрахуйте висоту потенціального бар'єра і товщину області просторового заряду.

- 1.3.6 *p-n*-перехід, виконаний з власного германію з концентрацією $n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, легований акцепторною домішкою з концентрацією $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та донорною домішкою з концентрацією $N_d = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Коефіцієнти дифузії для неосновних електронів та дірок відповідно дорівнюють 100 та $50 \text{ см}^2/\text{с}$, дифузійна довжина $L_n = L_p = 0,8 \text{ см}$. Визначте:

- а) контактну різницю потенціалів ϕ_k ;
- б) густину зворотного струму насичення j_s при $T = 300 \text{ К}$.

- 1.3.7 Ідеальний різкий *p-n*-перехід має наступні параметри: концентрація акцепторної домішки в *p*-області $N_a = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, концентрація донорної домішки в *n*-області $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Площа поперечного перерізу *p-n*-переходу $S = 10^{-6} \text{ м}^2$. Рухливість електронів $\mu_n = 0,4 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ та дірок $\mu_p = 0,2 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, дифузійні довжини неосновних носіїв заряду $L_p = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $L_n = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, відносна діелектрична проникність зразка $\epsilon = 16$, концентрація власних носіїв заряду $n_i = 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Знайдіть при $T = 300 \text{ К}$ значення наступних величин:

- а) концентрацію основних та неосновних носіїв заряду;
- б) питомі провідності *p*- та *n*-областей;
- в) контактну різницю потенціалів ϕ_k ;
- г) коефіцієнти дифузії для носіїв заряду обох типів;
- д) зворотний струм насичення діоду I_s ;
- е) струм діода при прямій напрузі $0,25 \text{ В}$;
- ж) струм діода при великій зворотній напрузі;
- з) ширину *p-n*-переходу при зворотній напрузі 10 В ;
- і) бар'єрну ємність *p-n*-переходу при зворотній напрузі 10 В .

1.3.8 Визначте ширину областей просторового заряду в кожній із областей p - n -переходу, загальну ширину ОПЗ переходу і ємність p - n -переходу при $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\varepsilon = 12,5$, $\phi_k = 0,6 \text{ eV}$, $S = 10^{-4} \text{ см}^2$.

1.3.9 Для p - n -переходу з наступними параметрами:

Варіант	1	2	3	4	5	6
$\sigma_n, (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$	8	3,2	3,2	1,6	8	0,024
$\sigma_p, (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$	2,4	4,8	0,64	2,4	0,008	4,8
$\mu_n, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	500	800	800	1 000	500	1 500
$\mu_p, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	300	250	400	300	500	250
$U_{np}, \text{В}$	0,5	0,3	0,4	0,1	0,3	0,6
$U_{зв}, \text{В}$	5	2	4	1,5	3	7

власна концентрація носіїв заряду $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $\varepsilon = 12$.

Знайдіть:

- контактну різницю потенціалів ϕ_k ;
- як зміниться висота потенціального бар'єра ϕ , якщо до p - n -переходу прикласти зовнішню напругу U_{np} та $U_{зв}$;
- ширину p - n -переходу зі сторони n - і p -областей d_n і d_p , а також повну ширину переходу d ;
- максимальну величину напруженості контактного поля $\mathcal{E}_{\max}$.

1.3.10 Як зміняться величина і напрямок електричного поля в кремнієвому p - n -переході з питомими опорами $\rho_n = \rho_p = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при зміні зовнішньої напруги з прямої $+0,4 \text{ В}$ на зворотну -2 В на відстані $+0,2 \text{ мкм}$ від фізичної границі розділу.

1.3.11 Знайдіть зміну потенціального бар'єра вглиб напівпровідників кремнієвого p - n^+ -переходу при напрузі -1 В з шагом

0,1 мкм, якщо $\rho_n = 0,001 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\rho_p = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Намалюйте зонну діаграму.

- 1.3.12 Кремнієвий p - n -перехід база–емітер біполярного $n^+ - p - n$ -транзистора ступінчатий. Концентрація домішки в області емітера $N_d = 10^{25} \text{ м}^{-3}$, в області бази $N_a = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Розрахуйте максимальну напруженість електричного поля в ОПЗ переходу і напруженість електричного поля в середній точці збідненої області напівпровідника p -типу.
- 1.3.13 Кремнієвий p - n -перехід база–колектор біполярного транзистора плавний. Концентрація домішки поблизу переходу змінюється від $N_a = 10^{24} \text{ м}^{-3}$ до $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ на відстані $\Delta x = 10^{-6} \text{ м}$. Концентрація змінюється лінійно з градієнтом $\frac{\Delta N}{\Delta x} \approx 1 \cdot 10^3 \text{ м}^{-4}$. Розрахуйте товщину області просторового заряду; висоту потенціального бар'єра прийміть рівною 0,7 В. Розрахуйте максимальну напруженість електричного поля в ОПЗ. Побудуйте графік залежності напруженості електричного поля в ОПЗ від координати x .
- 1.3.14 Розрахуйте висоту потенціального бар'єра, товщину області просторового заряду, заряд у збіднених областях p - n -переходу, сформованого в кремнії. Концентрація домішок $N_a = 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $N_d = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Знайдіть питому ємність переходу ($T = 300 \text{ К}$, $\epsilon_{\text{Si}} = 12$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$) за умов відсутності зовнішнього зміщення.
- 1.3.15 Визначте дифузійну ємність p - n -переходу при $p_p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $n_n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $L_p = 0,1 \text{ см}$, $L_n = 0,01 \text{ см}$, $S = 10^{-4} \text{ см}^2$, $j_s = 100 \text{ мкА}$.
- 1.3.16 В кремнієвому p - n -переході концентрація домішки в області p -типу дорівнює $N_a = 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, в області n -типу дорівнює

$N_d = 3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, площа p - n -переходу $S = 1 \text{ мм}^2$, зворотна напруга $U = 10 \text{ В}$. Визначте:

- а) ширину p - n -переходу;
- б) максимальну напруженість електричного поля в p - n -переході;
- в) бар'єрну ємність p - n -переходу.

1.3.17 Побудуйте вольт-амперну характеристику p - n -переходу на основі германію при 300 К , $p_p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $n_n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $D_p = 50 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_n = 100 \text{ см}^2/\text{с}$, $L_p = 0,1 \text{ см}$, $L_n = 0,01 \text{ см}$. Визначте коефіцієнт інжекції p - n -переходу.

1.3.18 Розрахуйте концентрації надлишкових неосновних носіїв, інжектованих крізь кремнієвий p - n -перехід на границі ОПЗ за умов прямого зміщення, що дорівнює $0,8 \text{ В}$. Концентрація домішок в областях $N_a = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_d = 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $T = 300 \text{ К}$, $\epsilon_{\text{Si}} = 12$.

1.3.19 Усі три області кремнієвого $n^+ - p - n$ -транзистора рівномірно леговані: концентрація домішки в емітері 10^{26} м^{-3} , в базі – 10^{22} м^{-3} , в колекторі – $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Товщина бази $1,5 \text{ мкм}$. Напруга зміщення p - n -переходу база – емітер позитивна і дорівнює $0,6 \text{ В}$. Розрахуйте зворотне зміщення на p - n -переході база – колектор, при якому ОПЗ цього переходу досягне величини ОПЗ переходу база – емітер.

1.3.20 У германієвому p - n -переході питомі опори областей дорівнюють: $\rho_p = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ та $\rho_n = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Рухливість електронів $\mu_n = 0,3 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ та дірок $\mu_p = 0,15 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, концентрація власних носіїв заряду дорівнює $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Час життя неосновних носіїв заряду $\tau_n = 75 \text{ мкс}$ та $\tau_p = 150 \text{ мкс}$. Площа поперечного перерізу p - n -переходу $S = 10^{-6} \text{ м}^2$ ($T = 300 \text{ К}$).

Знайдіть:

- а) контактну різницю потенціалів ϕ_k ;
- б) зворотний струм насичення;
- в) частку струму, що створюють дірки.
- г) концентрацію дірок на границі збідненого носіями заряду шару та матеріалу n -типу, якщо на перехід подаються прямі та зворотні напруги 25, 50 та 100 мВ ;
- д) пряму напругу, при якій концентрація інжекттованих дірок складає 10 % рівноважної концентрації електронів;
- є) питому провідність на границі збідненого носіями шару у випадку д).

- 1.3.21 Кремнієвий планарний p - n -перехід має питому провідність p -області $\sigma_p = 10^3$ См/м та n -області $\sigma_n = 20$ См/м. Час життя неосновних носіїв заряду 5 та 1 мкс у p - та n -областях відповідно. Температура $T = 300$ К, концентрація власних носіїв заряду $n_i = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, рухливість електронів $\mu_n = 0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухливість дірок $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Знайдіть:

- а) відношення діркової складової струму до електронної в p - n -переході;
- б) густину зворотного струму насичення;
- в) густину струму, який проходить через p - n -перехід при прямій напрузі, що дорівнює 0,3 В.

- 1.3.22 Кремнієвий інтегрований $n^+ - p - n$ -транзистор має рівномірно леговані області: концентрація домішки в емітері 10^{25} м^{-3} , в базі – 10^{22} м^{-3} , в колекторі – 10^{20} м^{-3} . Дифузійна довжина дірок в емітері – $L_{pE} = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, електронів у базі – $L_{nB} = 10^{-5} \text{ м}$, дірок у колекторі – $L_{pK} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$; коефіцієнти дифузії електронів у базі $D_{nB} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, дірок в емітері – $D_{pE} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, електронів у колекторі – $D_{nK} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Площа емітерного переходу 81 мкм^2 ,

площа колекторного переходу 400 мкм^2 . Розрахуйте зворотні струми насичення p - n -переходів база – емітер і база – колектор.

- 1.3.23 Германієвий сплавний p - n -перехід має зворотний струм насичення $I_s = 1 \text{ мкА}$, а кремнієвий з такими ж розмірами – $I_s = 10^{-8} \text{ А}$. Знайдіть та порівняйте прямі напруги на переходах при $T = 293 \text{ К}$, якщо через кожний діод протікає струм 100 мА .
- 1.3.24 Визначте, як зміниться густина зворотного струму j_s через ідеальний p - n -перехід з арсеніду галію при зменшенні температури від $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 250 \text{ К}$. Ширина забороненої зони GaAs змінюється за законом

$$\Delta E_g = \Delta E_g^{300} - \xi(T - 300),$$

де ξ – температурний коефіцієнт, який для арсеніду галію дорівнює $\xi_{\text{GaAs}} = 2,84 \cdot 10^{-4} \frac{\text{еВ}}{\text{К}}$. При $T = 300 \text{ К}$ $\Delta E_g^{300} = 1,42 \text{ еВ}$.

2. ДІОДИ

2.1 Основні формули та визначення

Основою напівпровідникових випрямляючих діодів є плоский електронно-дірковий перехід, тому формули з попереднього розділу для p - n -переходу справедливі і для діода.

Випрямні властивості діода можна охарактеризувати *опором* у прямому та зворотному напрямках його зміщення.

Опір постійному струму (для діода з ідеальною експоненційною ВАХ):

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_s \left(e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right)}. \quad (2.1)$$

Звідси виходить, що зі збільшенням прямої напруги на діоді опір p - n -переходу зменшується, а зворотної – збільшується, і при

$|U_{зв}| > \Phi_T$ він стає прямо пропорційним зворотній напрузі ($e^{\frac{U_{зв}}{\Phi_T}} \approx 0$):

$$R_{зв} = \frac{|U_{зв}|}{I_s}. \quad (2.2)$$

Диференціальний опір представляє собою похідну $\frac{dU}{dI}$ і характеризує нахил дотичної до кривої ВАХ при даній напрузі на діоді до вісі абсцис:

$$r = \frac{\Phi_T}{I + I_s}. \quad (2.3)$$

При прямому зміщенні, коли $I_{пр} \gg I_s$,

$$r_{пр} = \frac{\Phi_T}{I}, \quad (2.4)$$

а при зворотному зміщенні $I = I_s$ і

$$r_{зв} = \frac{\Phi_T}{I_s}. \quad (2.5)$$

У прямому напрямку диференціальний опір діода завжди менший за опір постійному струму ($r_{пр} < R_{пр}$), а в зворотному – $r_{зв} > R_{зв}$.

ВАХ реального діода з урахуванням опору базової області R_ϕ має вигляд:

$$I = I_s \left[e^{\frac{U - IR_\phi}{\Phi_T}} - 1 \right]. \quad (2.6)$$

Історично першими напівпровідниковими приладами стали діоди на основі контакту „метал – напівпровідник“. В залежності від співвідношень термодинамічних робіт виходу з металу і напівпровідника, а також типу напівпровідника можливі три стани. Перший стан відповідає умові плоских зон в напівпровіднику, в цьому випадку реалізується *нейтральний контакт*.

Якщо робота виходу електрона із металу A_m більше роботи виходу електрона з напівпровідника A_n , то електрони з більшою ймовірністю будуть переходити з напівпровідника у метал. Це приводить до утворення збідненого електронами (або *інверсного*, якщо $A_m \gg A_n$) приконттактного шару в напівпровіднику *n*-типу (рис. 2.1, *а*). При умові $A_n > A_m$ у напівпровіднику *p*-типу утворюється збагачений дірками шар (рис. 2.1, *в*).

Якщо ж співвідношення робіт виходу протилежне ($A_n < A_m$), то електрони переходять з металу в напівпровідник. В результаті в напівпровіднику *n*-типу електропровідності утворюється збагачений електронами шар (рис. 2.1, *б*), а в напівпровіднику *p*-типу – збіднений дірками шар (рис. 2.1, *г*).

Отже, просторовий заряд формується при контакті метала з напівпровідником будь-якого типу провідності, незважаючи на співвідношення робіт виходу. Але в збіднених шарах просторовий заряд сформований йонізованими атомами домішки, і самі шари через збіднення основними носіями заряду мають великий порівняно з об'ємом напівпровідника електричний опір. Такий контакт має випрямляючі властивості (рис. 2.1, *а, г*), тому що зовнішня напруга, падаючи, в ос-

новному, на високоомному переході, буде змінювати висоту потенціального бар'єра, змінюючи тим самим умови проходження носіїв через контакт. Такий контакт називається *блокуючим* або *бар'єром Шотткі*.

Приконтактний шар, збагачений основними носіями заряду, має малий опір (порівняно з об'ємом напівпровідника) і не здатен випрямляти змінний електричний струм.

Контакт називається *омічним*, якщо струм і різниця потенціалів від зовнішнього джерела на контакті відповідають закону Ома.

Для контакту, зображеного на рис. 2.1, а ($A_n < A_m$) різниця потенціалів дорівнює величині згину енергетичних зон:

$$\varphi_k = \frac{A_m - A_n}{e}. \quad (2.7)$$

При цьому **ефективна характерна глибина проникнення** електричного контактного поля в напівпровідник (товщина ОПЗ) дорівнюватиме:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_k}{eN_d}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(A_m - A_n)}{e^2N_d}}. \quad (2.8)$$

Розподіл електричного поля описується формулою:

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{eN_d}{\varepsilon\varepsilon_0}(d - x), \quad (2.9)$$

яка показує, що напруженість електричного поля максимальна на границі метал – напівпровідник ($\mathcal{E}_{\max}$ при $x = 0$), лінійно спадає в ОПЗ і дорівнює нулю на межі ОПЗ ($x = d$).

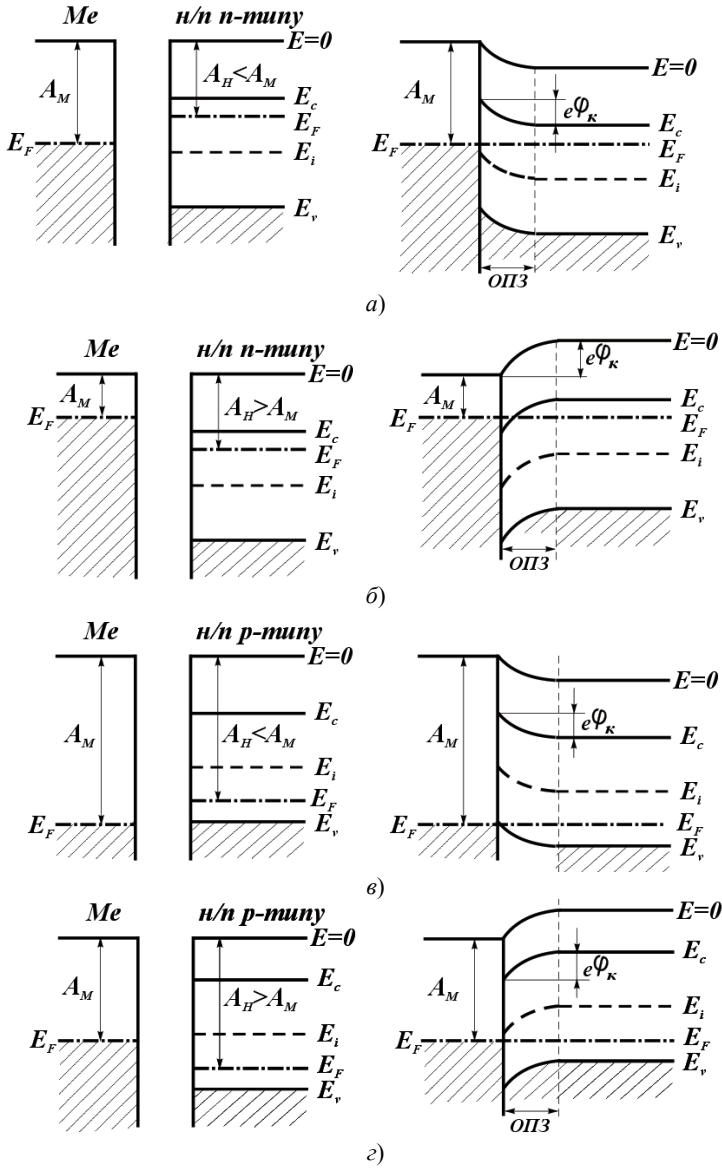


Рисунок 2.1 – Зонна діаграма метала, напівпровідника та їх контакту

Розподіл потенціалу описується формулою:

$$\varphi(x) = -\frac{eN_d}{2\epsilon\epsilon_0}(d-x)^2. \quad (2.11)$$

Вольт-амперна характеристика бар'єра Шотткі має вигляд:

$$I = I_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right), \quad \text{де} \quad I_s = \frac{1}{4} e n_s v_0, \quad (2.12)$$

n_s – поверхнева концентрація носіїв заряду в напівпровіднику на межі з металом

$$n_s = n_0 e^{-\frac{e\varphi_s^0}{k_B T}} = n_0 e^{-\frac{\varphi_s^0}{\Phi_T}}, \quad (2.13)$$

n_0 – рівноважна концентрація основних носіїв у напівпровіднику

$$n_0 = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T}}, \quad (2.14)$$

v_0 – теплова швидкість електронів

$$v_0 = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_n^*}}. \quad (2.15)$$

Діод Шотткі – це напівпровідниковий прилад на основі контакту метал – напівпровідник, принцип дії якого ґрунтується на явищі термоелектронної емісії.

У наведених на рис. 2.2 (а і б) структур діода Шотткі є два контакти метал ($M1$, $M2$) – напівпровідник. *Випрямляючим* контактом є контакт $M1$ – напівпровідник n -типу. Контакт $M2$ – напівпровідник n^+ -типу є *омічним*. Система, що складається з n^+ – n -шарів, називається *базою* діода. Шар n^+ -типу вводиться для зменшення опору бази.

Еквівалентна схема діода Шотткі наведена на рис. 2.2, в, де R_ϕ – *омічний опір бази*, який відображає падіння напруги на базі при протіканні струму через прилад.

Чисельне значення R_6 при найпростішій геометрії діода визначається виразом:

$$R_6 = \rho_6 \frac{W}{S}, \quad (2.16)$$

де ρ_6 – питомий опір напівпровідника n -типу; W – товщина n -шару; S – площа контакту.

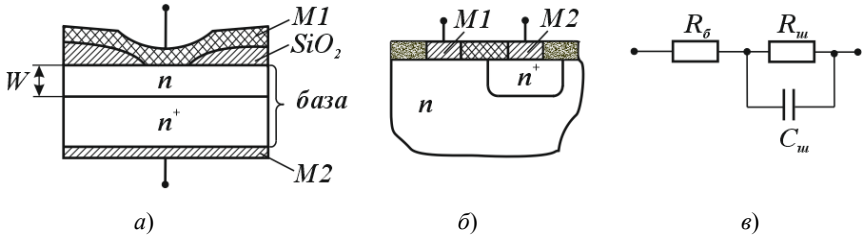


Рисунок 2.2 – Структура дискретного (а) та інтегрального (б) діодів Шотткі, еквівалентна схема діода Шотткі (в)

Вважається, що опір системи $M2 - n^+$ малий і на величину R_6 впливає мало.

Для точкового контакту Шотткі **опір розтікання** R_6 визначається формулою:

$$R_6 = \rho_6 \frac{1}{\pi a}, \quad (2.17)$$

де a – радіус точкового контакту.

Ефект однобічної провідності діода Шотткі відображений на еквівалентній схемі **диференціальним опором** $R_{ш}$. За визначенням,

$R_{ш} = \frac{dU}{dI}$. Продиференціюємо вираз для струму через діод за напругою:

$$\frac{dI}{dU} = I_s \frac{e}{k_B T} e^{\frac{eU}{k_B T}}. \quad (2.18)$$

Тоді з урахуванням того, що $I = I_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$, даний вираз можна представити як $I + I_s = I_s e^{\frac{eU}{k_B T}}$ і, взявши обернену величину від (2.18), отримаємо

$$R_{\text{ш}} = \frac{k_B T}{e(I + I_s)}. \quad (2.19)$$

З формули (2.19) видно, що при прямих включеннях діода, коли через нього протікає значний струм, $R_{\text{ш}}$ малий, а при зворотних – $R_{\text{ш}}$ великий.

Діод Шотткі володіє *ємнісними властивостями*, що відображені на еквівалентній схемі ємністю $C_{\text{ш}}$. Це ємність плоского конденсатора, однією з обкладок якого є метал, а іншою (уявною) обкладкою є границя ОПЗ, що змінює своє положення за координатою x в залежності від напруги на діоді U (рис. 2.3). Функцію діелектрика в такому плоскому конденсаторі відіграє ОПЗ. Тоді

$$C_{\text{ш}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{L} = S \sqrt{\frac{e \varepsilon \varepsilon_0 N_{\text{дом}}}{2(\varphi_s^0 \pm U)}}. \quad (2.20)$$

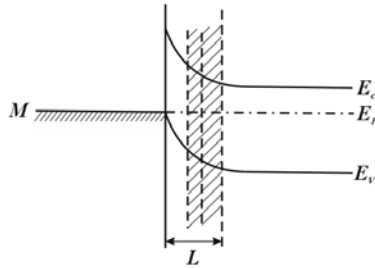


Рисунок 2.3 – Структура контакту метал – напівпровідник, що пояснює сенс $C_{\text{ш}}$

З формули (2.20) видно, що ємність $C_{\text{ш}}$ залежить від концентрації легуючої домішки N_d в напівпровіднику і прикладеної напруги U на діоді. При прямих зміщеннях ширина ОПЗ L зменшується, що

викликає збільшення $C_{\text{ш}}$, а при зворотних $-L$ збільшується і $C_{\text{ш}}$ зменшується. Ємність $C_{\text{ш}}$ відображає наявність струмів зміщення на контакті метал – напівпровідник.

Повна величина змінного струму через діод i_d дорівнює сумі змінного струму i , пов'язаного з рухом зарядів через ОПЗ, та струму зміщення $i_{\text{зм}}$. Отже, для протікання змінного струму крізь діод Шотткі існує два паралельних канали: через $R_{\text{ш}}$ і $C_{\text{ш}}$. Причому і опір $R_{\text{ш}}$ і ємність $C_{\text{ш}}$ залежать від величини і полярності напруги, що подається на діод. При зворотному зміщенні діода $R_{\text{ш}}$ різко зростає, і основна частина змінного струму протікає через $C_{\text{ш}}$, а еквівалентну схему для змінного сигналу можна представити як послідовне з'єднання опору R_6 та ємності $C_{\text{ш}}$.

Математична модель діода Шотткі має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{ш}} &= C_{\text{ш}} \frac{dU}{dt} + \frac{U_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}} + I'_{\text{ш}}; \\ I'_{\text{ш}} &= I_s \left(e^{\frac{eU}{mk_B T}} - 1 \right); \\ C_{\text{ш}} &= \frac{C_{\text{ш}}^0}{\sqrt{1 + \frac{U_{\text{ш}}}{\Phi_s^0}}}; \\ R_6 &= \rho_6 \frac{W}{S}; \\ U_6 &= I_{\text{ш}} R_6, \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

де m – коефіцієнт неідеальності діода Шотткі. Визначається експериментально.

Отже, схема заміщення (рис. 2.4) і система рівнянь (2.21) представляють собою **модель діода Шотткі**.

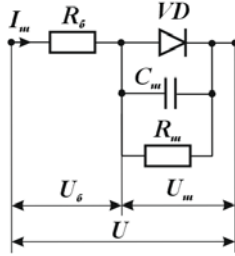


Рисунок 2.4 – Схема заміщення для моделі діода Шотткі

Головна перевага діодів Шотткі – висока швидкодія, що пов'язано з відсутністю ефекту накопичення неосновних носіїв у базі діода, тому не потрібний час для їх розсмоктування, що визначає тривалість перехідних процесів, а також більш низькі робочі напруги при прямому змщенні, особливо для великих струмів.

До недоліків діодів Шотткі слід віднести дуже низькі зворотні напруги і більші, ніж у діодів на основі p - n -переходів, зворотні струми. Низькі пробивні напруги пов'язані з ефектом збільшення напруженості електричного поля на краях контакту метал – напівпровідник (рис. 2.5, *a* і *б*). Цей ефект зникає, якщо в шарі SiO_2 вікно має пологі краї (як показано на рис. 2.2, *a*) або при застосуванні охоронного p - n -переходу (рис. 2.5, *в*). Більш високі струми обумовлені малою висотою реальних бар'єрів Шотткі, а також наявністю ефекту тунелювання електронів крізь бар'єр при великих зворотних напругах.

Діоди Шотткі використовують для виготовлення дискретних приладів НВЧ-діапазона, а також у інтегральних схемах.

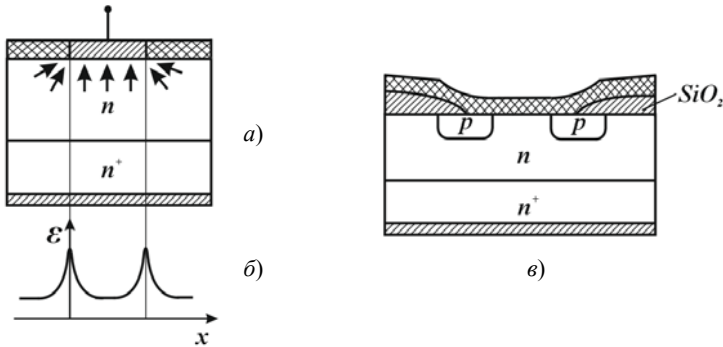


Рисунок 2.5 – Структура діода Шотткі (а), розподіл напруженості електричного поля на контакті (б) та конструкція діода Шотткі з охоронним p - n -переходом (в)

Деякі характеристики діодів Шотткі:

Залежність концентрації носіїв у збідненому шарі напівпровідника від значення потенціалу:

$$n_s = n_0 e^{\frac{e\varphi_s^0}{k_B T}};$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{e}(A_m - \chi) - \text{бар'єр Шотткі};$$

$$\varphi_s^0 = \frac{1}{e}(A_m - A_n) - \text{поверхневий потенціал};$$

$$L = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{eN_d}(\varphi_s^0 \pm U)} - \text{ширина області просторового заряду};$$

$$C_{\text{ш}} = S \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon e N_d}{2(\varphi_s^0 \pm U)}} - \text{ємність діода Шотткі};$$

$$I_s = SA^*T^2 e^{\frac{e\varphi_B}{k_B T}} - \text{струм насичення ідеального діода};$$

$$I_s = SA^*T^2 e^{\frac{e\varphi_B - \Delta\varphi}{k_B T}} - \text{зворотній струм реального діода Шотткі};$$

$$\Delta\varphi = \beta_{\text{ш}} \sqrt[4]{\varphi_s^0 \pm U} - \text{зниження бар'єра Шотткі за рахунок ефекту Шотткі};$$

$\beta_{\text{III}} = \sqrt[4]{\frac{e^3 N_d}{8\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon^3}}$ - значення коефіцієнту Шотткі;

$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{e N_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} L$ - максимальна напруженість електричного поля на бар'єрі Шотткі;

$f_{\text{гр}} = \frac{1}{2\pi R_b C_{\text{и}}}$ - гранична частота діода Шотткі.

Максимальна добротність діода Шотткі:

$$Q_{\text{max}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_{\text{III}}}{R_6}},$$

де R_6 – опір бази діода.

Частота, при якій добротність максимальна:

$$\omega_{Q_{\text{max}}} = \frac{1}{C_{\text{III}} \sqrt{R_6 R_{\text{III}}}};$$

Частота, при якій добротність мінімальна:

$$\omega_{\text{min}} = \frac{1}{Q_{\text{min}} C_{\text{III}} R_{\text{III}}},$$

де мінімальна добротність пов'язана з максимальною:

$$Q_{\text{min}} = \frac{Q_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

2.3 Приклади розв'язування задач

Приклад 2.3.1. Германієвий напівпровідниковий діод, який має зворотний струм насичення $I_s = 25$ мкА, працює при прямій напрузі, що дорівнює 0,1 В при $T = 300$ К. Визначити:

- а) опір діода постійному струму R_0 ;
- б) диференціальний опір $r_{\text{диф}}$.

Розв'язок

Знайдемо струм діода при прямій напрузі $U = 0,1$ В за формулою

$$I = I_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) = 25 \cdot 10^{-6} \cdot \left(e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} - 1 \right) = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 1,17 \text{ мА}.$$

Тоді опір діода постійному струму

$$R_0 = \frac{U}{I} = \frac{0,1}{1,17 \cdot 10^{-3}} = 85 \text{ Ом}.$$

Знайдемо диференційний опір

$$\frac{1}{r_{\text{диф}}} = \frac{dI}{dU} = I_s \frac{e}{k_B T} e^{\frac{eU}{k_B T}} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 38,6 \cdot 48 = 46 \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

звідки $r_{\text{диф}} = \frac{1}{46 \cdot 10^{-3}} = 21,6 \text{ Ом}$, або наближено, з урахуванням того,

що $I \gg I_s$, $\frac{1}{r_{\text{диф}}} = \frac{dI}{dU} = \frac{e}{k_B T} (I + I_s) \approx \frac{e}{k_B T} I$, звідки

$$r_{\text{диф}} = \frac{k_B T}{eI} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,17 \cdot 10^{-3}} = 22 \text{ Ом}.$$

Відповідь: $R_0 = 85 \text{ Ом}$; $r_{\text{диф}} = 22 \text{ Ом}$.

Приклад 2.2.2. У напівпровідниковому ідеальному діоді $D_n \approx D_p$, $L_n \approx L_p$, $N_a \approx 20N_d$. Визначити співвідношення між дірковою та електронною складовою струму крізь p - n -перехід.

Розв'язок

Електронна та діркова компоненти струму відповідно дорівнюють:

$$j_n = en_i^2 \frac{D_n}{L_n N_a} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right), \quad j_p = en_i^2 \frac{D_p}{L_p N_d} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right).$$

Враховуючи, що $D_n \approx D_p$ і $L_n \approx L_p$, маємо

$$\frac{j_p}{j_n} = \frac{N_a}{N_d} = 20.$$

Відповідь: $\frac{j_p}{j_n} = 20$.

Приклад 2.2.3. Два діода з ідеальними p - n -переходами мають однако-ву геометрію й зроблені з одного матеріалу. Але в першому діоді концентрація домішок N_a і N_d в 10 разів менша, ніж у другому діоді. Визначити відношення густини струмів $\frac{j_1}{j_2}$ при однаковій зовнішній напрузі U . Вважати, що коефіцієнти дифузії носіїв D_n і D_p , а також дифузійні довжини L_n і L_p однакові для обох діодів.

Розв'язок

Поєднуючи співвідношення

$$j = e \left(\frac{D_n}{L_n} n_p + \frac{D_p}{L_p} p_n \right) \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) \quad \text{та} \quad n_p = \frac{n_i^2}{N_a}; \quad p_n = \frac{n_i^2}{N_d},$$

маємо

$$j = en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right);$$

звідси

$$j_1 = en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_{a1}} + \frac{D_p}{L_p N_{d1}} \right) \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right),$$

$$j_2 = en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_{a2}} + \frac{D_p}{L_p N_{d2}} \right) \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right).$$

Враховуючи, що $N_{a2} = 10N_{a1}$, $N_{d2} = 10N_{d1}$, маємо

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_{a1}} + \frac{D_p}{L_p N_{d1}} \right) \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)}{en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n 10N_{a1}} + \frac{D_p}{L_p 10N_{d1}} \right) \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)} = 10.$$

Відповідь: $\frac{j_1}{j_2} = 10$.

Приклад 2.2.4. Бар'єрна ємність діода дорівнює 200 пФ при зворотній напрузі 2 В. Яка знадобиться зворотна напруга, щоб зменшити ємність до 50 пФ, якщо контактна різниця потенціалів $\phi_K = 0,82$ В?

Розв'язок

Бар'єрна ємність різкого p - n -переходу визначається за формулою (1.15):

$$C_6 = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 N_a N_d}{2(N_a + N_d)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} \quad \text{або} \quad C_6 = \frac{K}{\sqrt{(U_{3B} + \phi_K)}},$$

де K – деякий коефіцієнт, рівний

$$K = C_6 \sqrt{(U_{3B} + \phi_K)} = 200 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{(2 + 0,82)} = 3,35 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \sqrt{\text{В}}.$$

Знаходимо зворотну напругу, при якій $C_o=50$ пФ:

$$50 \cdot 10^{-12} = \frac{3,35 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{(U_{зв} + 0,082)}},$$

звідки $U_{зв} = 44,1$ В.

Відповідь: $U_{зв} = 44,1$ В.

Приклад 2.2.5. Пояснити якісно роботу p - n -переходу, що використовується у випрямлячі. Довести, що якщо розглядати рух носіїв заряду через потенційний бар'єр на переході, тоді вольт-амперна характеристика ідеального p - n -

переходу має вигляд $I = I_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$ (формула (1.18 а)).

Побудувати вольт-амперну характеристику, що відповідає цьому рівнянню. На тому ж графіку привести типову ВАХ реального переходу та визначити причини розходження між цими кривими.

Розв'язок

За відсутності напруги зміщення й струму (умова рівноваги) в p - n -переході концентрація акцепторів N_a в p -області зазвичай більша концентрації донорів N_d . В p -області висока концентрація дірок p_p , а в n -області – висока концентрація електронів n_n і низька концентрація дірок p_n (рис. 1.1, б). Електрони і дірки рекомбінують в області металургічної границі, що приводить до виникнення збідненого шару товщиною d . Кількості йонізованих атомів домішки по обидві сторони переходу однакові. Якщо p -область сильнолегована, тоді $d_n \gg d_p$ (рис. 1.1, а).

При прямому зміщенні $U_{пр}$ n -область знаходиться під негативним потенціалом відносно p -області і потенціальний бар'єр зменшується до величини $e(\phi_k - U_{пр})$. Отже, дифундувати може більша кількість дірок з p -області в n -області і більша кількість електронів з n -

області в p -область. Напруга зміщення не впливає на рух неосновних носіїв n_p і p_n (тобто на дрейфові струми). Товщина збідненого шару зменшується, і через перехід проходить великий струм.

При зворотному зміщенні $U_{зв}$ (n -область знаходиться під додатнім потенціалом відносно p -області) і потенціальний бар'єр збільшується до величини $e(\varphi_k + U_{зв})$. Товщина збідненого шару зростає, і через перехід проходить невеликий струм. Отже, p - n -перехід виявляє випрямляючі властивості.

При нульовій напрузі зміщення (в рівновазі) концентрації неосновних носіїв визначаються залежностями:

$$p_n(0) = p_p e^{-\frac{e\varphi_k}{k_B T}}; \quad n_p(0) = n_n e^{-\frac{e\varphi_k}{k_B T}}.$$

Позначимо p_n загальну кількість дірок в n -області при прямому зміщенні $U_{пр}$, тоді за аналогією

$$p_n = p_p e^{-\frac{e(\varphi_k - U_{пр})}{k_B T}}.$$

Надлишкова концентрація дірок в n -області $\Delta p = p_n - p_n(0)$:

$$\Delta p = p_p e^{-\frac{e(\varphi_k - U_{пр})}{k_B T}} - p_p e^{-\frac{e\varphi_k}{k_B T}} = p_p e^{-\frac{e\varphi_k}{k_B T}} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right),$$

Тобто

$$\Delta p = p_n \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right).$$

Наявність цієї надлишкової концентрації дірок в області переходу приводить до дифузії дірок вглиб n -області. Густина струму через перехід, обумовлена цими дірками, дорівнює

$$j_p(0) = eD_p \frac{d\Delta p}{dx} \quad \text{при } x = 0.$$

В p -області відповідно виникає надлишкова концентрація електронів Δn :

$$\Delta n = n_p \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right).$$

В процесі дифузії концентрація носіїв змінюється за законом:

$$\Delta p(x) = \Delta p e^{-\frac{x}{L_p}}.$$

Якщо продиференціювати це рівняння за x , знайдемо

$$\frac{d(\Delta p(x))}{dx} = -\frac{\Delta p}{L_p} e^{-\frac{x}{L_p}},$$

звідки при $x=0$ отримаємо
$$\frac{d(\Delta p(x))}{dx} = -\frac{\Delta p}{L_p}.$$

Відповідна густина діркового струму визначається виразом:

$$j_p = -eD_p \left(-\frac{\Delta p}{L_p} \right) = eD_p \frac{\Delta p}{L_p}.$$

Звідки
$$\Delta p = j_p \frac{L_p}{eD_p}.$$

Якщо цей вираз підставити в попередній для Δp , тоді:

$$j_p = \frac{eD_p p_n}{L_p} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right).$$

Аналогічно отримуємо вираз для густини електронного струму:

$$j_n = \frac{eD_n n_p}{L_n} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right).$$

Тоді загальна густина струму:

$$j = j_p + j_n = e \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) \left[e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right]$$

Повний струм враховує площу переходу S :

$$I = eS \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) \left[e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right].$$

У випадку прямого зміщення U додатна, а у випадку зворотного – від’ємна. За кімнатної температури $\frac{e}{k_B T} = 40 \text{ В}^{-1}$, тому в останньому

виразі $e^{\frac{eU}{k_B T}} \rightarrow 0$, тоді зворотний струм насичення j_s дорівнює:

$$I_s = -eS \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right).$$

Отже, вираз для вольт-амперної характеристики має вигляд:

$$I = I_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right).$$

Графічно вольт-амперні характеристики ідеального і реального переходів представлені на рис. 2.6. В реальних переходах через забруднення поверхні зворотний опір може бути порядку 100 МОм, в результаті чого ВАХ відхиляється від ідеальної.

При прямому зміщенні наявність опору матеріалу діода за межами області об’ємного заряду (збідненого шару) приводить до того, що в реальних діодах для отримання того ж значення струму необхідно прикласти більшу напругу.

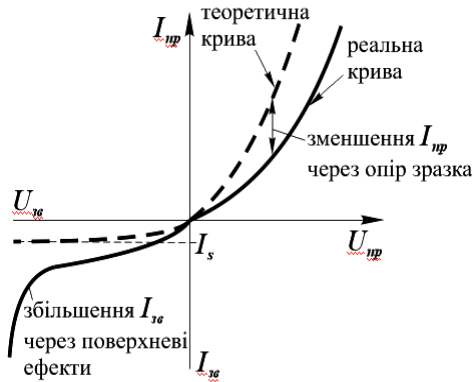


Рисунок 2.6 – Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діоду

Приклад 2.2.6. Визначити вихідну змінну напругу схеми на рис. 2.7, якщо вона працює за кімнатної температури.

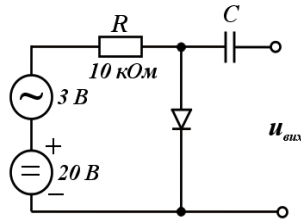


Рисунок 2.7 – Електрична схема для задачі 2.2.6

Розв'язок

Вихідна змінна напруга дорівнює змінній складовій напруги на діоді. Положення робочої точки визначається постійною складовою струму діода

$$I \approx \frac{U}{R} = \frac{20}{10 \cdot 10^3} = 2 \text{ мА} .$$

Прямий диференціальний опір діода

$$r_{\text{пр}} = \frac{k_B T}{eI} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 13 \text{ Ом} .$$

Тому
$$u_{\text{вих}} = \frac{Ur_{\text{пр}}}{R + r_{\text{пр}}} = \frac{3 \cdot 13}{13 + 10 \cdot 10^3} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 3,9 \text{ мВ}.$$

Відповідь: $u_{\text{вих}} = 3,9 \text{ мВ}.$

Приклад 2.2.7. Визначити вихідну змінну напругу в схемі, зображеній на рис. 2.8, якщо за кімнатної температури використовується кремнієвий діод, що має зворотний струм насичення $I_s = 10 \text{ мкА}.$

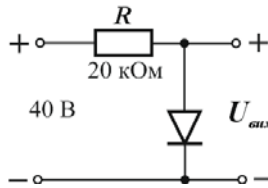


Рисунок 2.8 – Електрична схема для задачі 2.2.7

Розв'язок

Оскільки на діод подається пряма напруга, то опір кремнієвих діодів приблизно дорівнюватиме 200 Ом або менше, і струм у схемі визначатиметься в основному струмом резистора $R = 20 \text{ кОм}.$

Тому,

$$I = \frac{U}{R} = \frac{40}{20 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 2 \text{ мА}.$$

Підставляючи це значення у вираз для струму напівпровідникового діода та розв'язуючи його відносно U , отримаємо

$$I = I_s \left(e^{\frac{eu_{\text{вих}}}{k_B T}} - 1 \right),$$

$$u_{\text{вих}} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right);$$

$$u_{\text{вих}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{10^{-5}} + 1 \right) \approx 0,14 \text{ В}.$$

Відповідь: $u_{\text{вих}} = 0,14 \text{ В}$.

Приклад 2.2.8. У напівпровідникового діода $R_{\text{пр}} = 40 \text{ Ом}$, $R_{\text{зв}} = 400 \text{ кОм}$, $C = 80 \text{ пФ}$. Визначити:

- а) на якій частоті ємнісний опір $X_C = R_{\text{зв}}$ і внаслідок цього відбудеться помітне збільшення зворотного струму (але він ще буде малим);
- б) на якій частоті ємнісний опір дорівнюватиме $R_{\text{пр}}$ і відбудеться різке погіршення випрямляючих властивостей діода.

Розв'язок

а) Оскільки

$$X_C = R_{\text{зв}} = \frac{1}{2\pi f_1 C},$$

то

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_{\text{зв}} C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} = 5 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 5 \text{ кГц}.$$

б) Внаслідок того, що

$$X_C = R_{\text{пр}} = \frac{1}{2\pi f_2 C},$$

маємо

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_{\text{пр}} C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} = 5 \cdot 10^7 \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}.$$

Відповідь: $f_1 = 5 \text{ кГц}$; $f_2 = 50 \text{ МГц}$.

Приклад 2.2.9. Сплавний діод працює в найпростішій схемі випрямлення з опором навантаження $R_{\text{н}} = 10 \text{ кОм}$ (рис. 2.9). Діод має параметри $R_{\text{пр}} = 40 \text{ Ом}$, $R_{\text{зв}} = 400 \text{ кОм}$ і $C = 80 \text{ пФ}$. Знайти, на якій частоті випрямлений струм за рахунок впливу ємності діода зменшується вдвічі.

Розв'язання

Враховуючи, що $R_{\text{н}} \gg R_{\text{пр}}$ і $R_{\text{н}} \ll R_{\text{зв}}$, можна вважати, що на низьких частотах

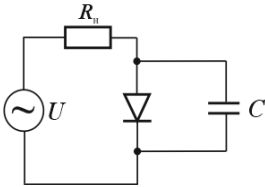


Рисунок 2.9 – Електрична схема для задачі 2.2.9

$$I_{\text{пр. max}} \approx \frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{пр}}} \approx \frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{н}}},$$

і

$$I_{\text{зв. max}} \approx \frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{зв}}} \approx \frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{зв}}} < I_{\text{пр. max}}.$$

На високій частоті як і раніше

$$I_{\text{пр}} \approx \frac{U}{R_{\text{н}}}, \quad \text{а} \quad I_{\text{зв}} \approx \frac{U}{Z_{\text{зв}}}.$$

При зменшенні $I_{\text{випр}}$ вдвічі повинно бути $I_{\text{зв}} \approx 0,5 I_{\text{пр}}$, тому $Z_{\text{зв}} = 2R_{\text{н}}$. Можна вважати, що $Z = \sqrt{R_{\text{н}}^2 + X_C^2}$, і звідси

$$X_C = \sqrt{Z^2 - R_{\text{н}}^2} = \sqrt{4R_{\text{н}}^2 - R_{\text{н}}^2} = \sqrt{3}R_{\text{н}} = 1,73 \cdot 10^4 \text{ Ом}.$$

Внаслідок того, що $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$, маємо

$$f = \frac{1}{2\pi X_C C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,73 \cdot 10^4 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

Відповідь: $f = 1,15 \cdot 10^3 \text{ Гц}$.

Приклад 2.2.10. Зворотний струм насичення діода з бар'єром Шоттки $I_s = 2$ мкА. Діод з'єднано послідовно з резистором та джерелом постійної напруги зміщення $E = 0,2$ В, так що на діод подається пряма напруга. Визначити опір резистора, якщо падіння напруги на ньому $U_R = 0,1$ В. Діод працює при $T = 300$ К.

Розв'язок

На діоді $U = E - U_R = 0,2 - 0,1 = 0,1$ В.

Струм діода

$$I = I_s \left[e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right] = 2 \cdot 10^{-6} \cdot \left[e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} - 1 \right] = 9,3 \cdot 10^{-5} \text{ А}.$$

Опір резистора

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,1}{9,3 \cdot 10^{-5}} = 1,08 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 1,08 \text{ кОм}.$$

Відповідь: $R = 1,08$ кОм.

Приклад 2.2.11. Визначити величину поверхневого потенціалу ϕ_s^0 на контакті метала з напівпровідником, якщо концентрація електронів на поверхні напівпровідника дорівнює $n_s = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а в об'ємі $n_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Температура $T = 300$ К.

Розв'язок

Залежність концентрації носіїв у збідненому шарі напівпровідника від значення потенціалу має вигляд:

$$n_s = n_0 e^{-\frac{e\phi_s^0}{k_B T}},$$

звідки

$$\phi_s^0 = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_0}{n_s} = 0,0258 \cdot \ln \frac{10^{17}}{10^{15}} = 0,12 \text{ В}.$$

Відповідь: $\varphi_s^0 = 0,12 \text{ В}$.

Приклад 2.2.12. Визначити густину струму насичення діода Шотткі за кімнатної температури, якщо контактує напівпровідник n -типу провідності, який має спорідненість до електрона $\chi = 3,1 \text{ еВ}$ і метал із роботою виходу $A_m = 4,0 \text{ еВ}$. Значення приведеної сталої Річардсона

$$A^* = 140 \frac{\text{А}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^2}.$$

Розв'язок

Струм насичення діоду Шотткі

$$I_s = A^* T^2 S e^{\frac{e\varphi_0}{k_B T}}.$$

Густина струму насичення

$$j_s = \frac{I_s}{S} = A^* T^2 e^{\frac{-e\varphi_0}{k_B T}},$$

де бар'єр Шотткі

$$\varphi_0 = A_m - \chi = 4 - 3,1 = 0,9 \text{ еВ}.$$

Остаточно маємо:

$$j_s = 1,4 \cdot 10^6 \cdot 300^2 \cdot e^{\frac{-1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,9}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} = 10^{-8} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$$

Відповідь: $j_s = 10^{-8} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$.

Приклад 2.2.13. Визначити напруженість поля і потенціал на поверхні напівпровідника при утворенні запірного контакту, якщо розмір області просторового заряду $L = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, концентрація електронів у об'ємі на-

півпровідника $n_0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а температура $T = 300 \text{ К}$.

Розв'язок

Напруженість електричного поля на поверхні напівпровідника

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{eN_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} L = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{21}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12} \cdot 5 \cdot 10^{-7} = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Ширина області просторового заряду на поверхні напівпровідника

$$L = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon}{eN_d} \varphi_s^0},$$

тому потенціал на поверхні напівпровідника

$$\varphi_s^0 = \frac{eN_d L^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{21} \cdot (5 \cdot 10^{-7})^2}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12} = 0,38 \text{ В}.$$

Відповідь: $\mathcal{E}_{\max} = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$; $\varphi_s^0 = 0,38 \text{ В}$.

Приклад 2.2.14. Визначте напруженість електричного поля на межі контакту метал – напівпровідник за температури $T = 300 \text{ К}$, якщо на відстані $x = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ від межі контакту напруженість поля $\mathcal{E} = 8,5 \cdot 10^2 \frac{\text{В}}{\text{см}}$. Концентрація електронів у об'ємі напівпровідника $n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а діелектрична проникність напівпровідника $\varepsilon = 16$.

Розв'язок

Напруженість електричного поля на межі контакту визначається виразом:

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{eN_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} L.$$

Для знаходження ширини області просторового заряду L скористаємось виразом для напруженості поля на відстані x від поверхні напівпровідника:

$$\mathcal{E} = \frac{eN_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} (L - x),$$

звідки

$$L = x + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{eN_d} \mathcal{E}.$$

Тоді для напруженості поля на межі контакту матимемо

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\max} &= \frac{eN_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{eN_d} \mathcal{E} + x \right) = \mathcal{E} + \frac{eN_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} x = 8,5 \cdot 10^4 + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 16} \times \\ &\times 5 \cdot 10^{-7} = 5,7 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Відповідь: $\mathcal{E}_{\max} = 5,7 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$

Приклад 2.2.15. Визначте ємність діода Шотткі на основі кремнію n -типу з площею $S = 10^{-4} \text{ см}^2$ при зворотній та прямій напрузі ($U_{\text{зв}} = 20 \text{ В}$, $U_{\text{пр}} = +0,5 \text{ В}$), якщо поверхневий потенціал напівпровідника $\varphi_s^0 = 0,8 \text{ В}$ і концентрація дірок у n -базі складає 10^5 см^{-3} . Концентрація власних носіїв заряду $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, діелектрична проникність кремнію $\varepsilon = 12$.

Розв'язок

Відповідно до закону „діючих мас“ $n_i^2 = n_{n0} p_{n0}$. Тому

$$n_{n0} = N_d = \frac{n_i^2}{p_{n0}} = \frac{10^{20}}{10^5} = 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Ємність діода Шотткі визначається за формулою:

$$C_{\text{ш}} = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e N_d}{2(\varphi_s^0 \pm U)}}.$$

Тоді ємність при зворотній і прямій напрузі:

$$C_{\text{ш зб}} = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e N_d}{2(\varphi_s^0 + U_{\text{зб}})}} = 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{21}}{2 \cdot (0,8 + 20)}} =$$

$$= 2 \cdot 10^{-13} \text{ Ф} = 0,2 \text{ пФ};$$

$$C_{\text{ш пр}} = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e N_d}{2(\varphi_s^0 - U_{\text{пр}})}} = 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{21}}{2 \cdot (0,8 - 0,5)}} =$$

$$= 1,68 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 1,68 \text{ пФ}.$$

Відповідь: $C_{\text{ш зб}} = 0,2 \text{ пФ}$; $C_{\text{ш пр}} = 1,68 \text{ пФ}$.

Приклад 2.2.16. Діод Шотткі виготовлено на основі контакту кремнію n -типу провідності з питомим опором $\rho_{\text{б}} = 3,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ та електронною спорідненістю $\chi = 3,5 \text{ еВ}$ і металу, що має роботу виходу $A_{\text{м}} = 4,5 \text{ еВ}$. У кремнії $E_{\text{с}} - E_{\text{ф}} = 0,2 \text{ еВ}$. Площа контакту $S = 10^{-4} \text{ см}^2$. Рухливість електронів $\mu_n = 1400 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Визначте ємність діода Шотткі.

Розв'язок

Для знаходження ємності діода Шотткі скористаємось формулою (2.20):

$$C_{\text{ш}} = S \sqrt{\frac{e \varepsilon \varepsilon_0 N_{\text{дом}}}{2(\varphi_s^0 \pm U)}}.$$

Враховуючи, що поверхневий потенціал

$$\varphi_s^0 = \frac{1}{e}(A_m - A_n) = \frac{1}{e}A_m - \frac{1}{e}(\chi + (E_c - E_F)),$$

маємо

$$\varphi_s^0 = 4,5 - (3,5 + 0,2) = 0,8 \text{ В}.$$

Концентрація домішки в базі за умови, що всі донори йонізовані

$$N_d = \frac{1}{e\mu_n\rho_0} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,14 \cdot 0,035} = 1,28 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

За умовою задачі $U = 0$, тому

$$\begin{aligned} C_{\text{ш}} &= S \sqrt{\frac{e\epsilon\epsilon_0 N_d}{2\varphi_s^0}} = 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,28 \cdot 10^{21}}{2 \cdot 0,8}} = \\ &= 1,17 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 1,17 \text{ пФ}. \end{aligned}$$

Відповідь: $C_{\text{ш}} = 1,17 \text{ пФ}$.

Приклад 2.2.17. Розмір області просторового заряду на контакті металу з електронним напівпровідником $L = 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. Визначити концентрацію електронів на поверхні напівпровідника за $T = 300 \text{ К}$, за умови, що рівень Фермі лежить нижче дна зони провідності на $0,2 \text{ еВ}$ і ефективна маса дорівнює масі вільного електрона, а діелектрична проникність $\epsilon = 16$.

Розв'язок

Концентрація електронів на поверхні напівпровідника має вигляд:

$$n_s = n_0 e^{\frac{e\varphi_s^0}{k_B T}},$$

Поверхневий потенціал φ_s^0 знайдемо з рівняння для ширини області просторового заряду

$$L = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon}{eN_d}\varphi_s^0},$$

звідки

$$\varphi_s^0 = \frac{en_0 L^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

Внаслідок того, що концентрація електронів у об'ємі напівпровідника

$$n_0 = N_c e^{-\frac{E_F - E_c}{k_B T}},$$

отримуємо для поверхневого потенціалу

$$\begin{aligned} \varphi_s^0 &= \frac{eL^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon} N_c e^{-\frac{E_F - E_c}{k_B T}} = \frac{eL^2}{\varepsilon_0 \varepsilon} \left(\frac{2\pi m_{dn}^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_F - E_c}{k_B T}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (2 \cdot 10^{-7})^2}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 16} \times \\ &\times \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{(6,62 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{0,2}{8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300}} = 0,25 \text{ В}. \end{aligned}$$

Тепер розрахуємо концентрацію електронів на поверхні напівпровідника

$$\begin{aligned} n_s &= N_c e^{-\frac{(E_F - E_c) + e\varphi_s^0}{k_B T}} = \left(\frac{2\pi m_{dn}^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{(E_F - E_c) + e\varphi_s^0}{k_B T}} = \\ &= 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{(6,62 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{(0,2 + 0,25) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} = \\ &= 7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}. \end{aligned}$$

Відповідь: $n_s = 7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

Приклад 2.2.18. При зворотному зміщенні $U_{зв} = 20 \text{ В}$ крізь діод Шотткі тече струм $2 \cdot 10^{-7} \text{ А}$. За цих умов на частоті $f = 750 \text{ кГц}$ діод має максимальну добротність $Q_{\max} = 2 \cdot 10^3$. Площа контакту $S = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. Ви-

значте: ємність діода при $U_{зв} = 20 \text{ В}$; опір бази діода R_6 ; опір контакту Шотткі $R_{ш}$; частотний діапазон діода при $U_{зв} = 20 \text{ В}$; питомий опір бази ρ_6 .

Розв'язок

Опір контакту Шотткі знаходимо за формулою (2.19):

$$R_{ш} = \frac{k_B T}{e(I + I_s)} \approx \frac{k_B T}{eI} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-7}} = 1,29 \cdot 10^5 \text{ Ом}.$$

З виразу для максимальної добротності

$$Q_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_{ш}}{R_6}}$$

знаходимо опір бази діода:

$$R_6 = \frac{R_{ш}}{4Q_{\max}^2} = \frac{1,29 \cdot 10^5}{4 \cdot (2 \cdot 10^3)^2} = 0,008 \text{ Ом} = 8 \text{ мОм}.$$

Ємність діода знайдемо, скориставшись виразом для частоти, при якій добротність максимальна:

$$\omega_{Q_{\max}} = \frac{1}{C_{ш} \sqrt{R_6 R_{ш}}};$$

звідки

$$\begin{aligned} C_{ш} &= \frac{1}{\omega_{Q_{\max}} \sqrt{R_6 R_{ш}}} = \frac{1}{2\pi f \sqrt{R_6 R_{ш}}} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,29 \cdot 10^5}} = 6,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 6,6 \text{ нФ}. \end{aligned}$$

Визначаємо робочий діапазон частот за формулою:

$$\omega_{\min} = \frac{1}{Q_{\min} C_{ш} R_{ш}}; \quad Q_{\min} = \frac{Q_{\max}}{\sqrt{2}};$$

$$f_{\min} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi Q_{\max} C_{\text{ш}} R_{\text{ш}}} = \frac{1,41}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-9} \cdot 1,29 \cdot 10^5} =$$

$$= 0,13 \text{ Гц};$$

$$\omega_{\max} = \frac{1}{Q_{\min} C_{\text{ш}} R_6},$$

$$f_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi Q_{\max} C_{\text{ш}} R_6} = \frac{1,41}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-9} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 2,12 \cdot 10^6 \text{ Гц}.$$

Питомий опір бази знайдемо з виразу:

$$\rho_6 = \frac{R_6 S}{W},$$

при цьому приймемо товщину бази $W = 350 \text{ мкм}$,

$$\rho_6 = \frac{8 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-9}}{3,5 \cdot 10^{-5}} = 0,11 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Відповідь: $C_{\text{ш}} = 6,6 \text{ нФ}$; $R_6 = 8 \text{ мОм}$; $R_{\text{ш}} = 1,29 \cdot 10^5 \text{ Ом}$;
 $f_{\min} = 0,13 \text{ Гц}$; $f_{\max} = 2,12 \cdot 10^6 \text{ Гц}$; $\rho_6 = 0,11 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Приклад 2.2.19. За температури $T = 300 \text{ К}$ і зворотному зміщенні $U_{\text{зв}} = 9 \text{ В}$ максимальна добротність діода Шотткі складає $Q_{\max} = 10^3$. Діод виготовлений із кремнію з концентрацією донорів $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ і має опір бази $R_6 = 100 \text{ Ом}$. Напруженість поля в області просторового заряду $\mathcal{E} = 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}}$. Площа контакту $S = 10^{-4} \text{ см}^2$. Розрахувати: зміну бар'єра $\Delta\phi$ за рахунок сил дзеркального зображення; опір діода $R_{\text{ш}}$ за напруги

$U_{зв} = 9$ В ; величину бар'єра Шотткі; вольт-амперну характеристику. Для розрахунку ВАХ прийняти різницю робіт виходу $\Delta A = 0,5$ еВ .

Розв'язок

Розрахуємо значення коефіцієнта Шотткі:

$$\beta_{ш} = \sqrt[4]{\frac{e^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_0^3 \epsilon^3}} = \sqrt[4]{\frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^3 \cdot 10^{22}}{8 \cdot 3,14^2 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^3 \cdot 12^3}} \approx 0,026 .$$

Ширина області просторового заряду і напруженість поля в області просторового заряду визначаються співвідношенням:

$$L = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon}{e N_d} (\varphi_s^0 + U_{зв})}; \quad \epsilon_{\max} = \frac{e N_d}{\epsilon_0 \epsilon} L .$$

Звідси

$$L^2 = \frac{2\epsilon_0 \epsilon}{e N_d} (\varphi_s^0 + U_{зв}) = \frac{\epsilon_0^2 \epsilon^2}{e^2 N_d^2} \epsilon^2 ,$$

і

$$\varphi_s^0 + U_{зв} = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{2e N_d} \epsilon^2 = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22}} \cdot (10^7)^2 = 3,32 \text{ В} .$$

Тоді зміна бар'єра $\Delta \varphi$ за рахунок сил дзеркального зображення

$$\Delta \varphi = \beta_{ш} \sqrt[4]{\varphi_s^0 + U_{зв}} = 0,026 \cdot \sqrt[4]{3,32} \approx 0,035 \text{ В} .$$

Максимальна добротність діода Шотткі:

$$Q_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_{ш}}{R_0}} ,$$

звідки опір діода Шотткі

$$R_{ш} = 4Q_{\max}^2 R_0 = 4 \cdot (10^3)^2 \cdot 10^2 = 4 \cdot 10^8 \text{ Ом} .$$

Зворотний струм реального діода Шотткі

$$I_{\text{зв}} = \frac{U_{\text{зв}}}{R_{\text{ш}}} = A^* T^2 S e^{-\frac{e(\varphi_6 - \Delta\varphi)}{k_B T}},$$

де приведена стала Річардсона $A^* = 140 \frac{\text{А}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^2}$. Тоді

$$\ln \frac{U_{\text{зв}}}{A^* R_{\text{ш}} T^2 S} = -\frac{e(\varphi_6 - \Delta\varphi)}{k_B T},$$

звідки величина бар'єру Шотткі

$$\begin{aligned} \varphi_6 = \Delta\varphi - \frac{k_B T}{e} \ln \frac{U_{\text{зв}}}{A^* R_{\text{ш}} T^2 S} &= 0,035 - \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \times \\ &\times \ln \frac{9}{140 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 10^8 \cdot 300^2 \cdot 10^{-4}} = 0,975 \text{ В}. \end{aligned}$$

Вольт-амперна характеристика реального діода Шотткі

$$I(U) = I_s \left(e^{\frac{eU}{mk_B T}} - 1 \right),$$

де струм насичення

$$I_s = A^* T^2 S e^{-\frac{e\varphi_6}{k_B T}} = 140 \cdot 10^4 \cdot 300^2 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,975}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} = 1,4 \cdot 10^{-14} \text{ А};$$

і тоді $I(U) = 1,4 \cdot 10^{-14} \left(e^{\frac{38,65U}{m}} - 1 \right)$, $m = 2 \div 3$ – коефіцієнт неідеальності реального діода Шотткі.

Відповідь: $\Delta\varphi = 0,035 \text{ В}; \quad R_{\text{ш}} = 4 \cdot 10^8 \text{ Ом}; \quad \varphi_6 = 0,975 \text{ В};$

$$I(U) = 1,4 \cdot 10^{-14} \left(e^{\frac{38,65U}{m}} - 1 \right).$$

2.3 Задачі для самостійного розв'язування

Напівпровідникові діоди

- 2.3.1 Струм насичення германієвого діода дорівнює 10 мкА . Визначити відношення струмів діода при напругах $U = -0,1$ В та $U = -\infty$.
- 2.3.2 Струм насичення германієвого діода дорівнює 5 мкА . Визначити коефіцієнт випрямлення¹ струму діодом при напругах:
а) 0,1 В та $-0,1$ В ; б) 0,2 В та $-0,2$ В ; в) 0,3 В та $-0,3$ В .
- 2.3.3 Визначити струм насичення діода, якщо при прямій напрузі $U_{пр} = 0,1$ В струм $I_{пр} = 1,4$ мА . Температура кімнатна.
- 2.3.4 Діод з p - n -переходом створено методом дифузії акцепторної домішки p -типу (бор) у рівномірно леговану кремнієву пластину n -типу провідності з концентрацією домішки $1,1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Виник лінійний перехід з градієнтом концентрації 10^{28} м^{-4} . Товщина областей у напрямку проходження носіїв заряду $I_n = 1,5$ мкА , $I_p = 2$ мкА . Дифузійна довжина дірок в n -області $L_p = 30$ мкА , електронів в p -області $L_n = 20$ мкА . Коефіцієнт дифузії дірок $D_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, електронів – $D_n = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Площа p - n -переходу діода $S = 300 \text{ мкм}^2$.
- Розрахувати:
- а) висоту потенціального бар'єру;
 - б) товщину ОПЗ за умов рівноваги;
 - в) максимальну напруженість внутрішнього електричного поля в ОПЗ;
 - г) товщину ОПЗ за умов зворотного зміщення переходу 5 В ;
 - д) питому ємність переходу за умов відсутності зовнішнього зміщення та за умов зворотного зміщення 5 В ;
 - е) концентрації надлишкових неосновних носіїв, інжектованих у кожену область переходу за умов прямого зміщення 0,6 В ;

¹ Відношення прямого і зворотного струмів – за модулем

ж) повний струм, що проходить крізь діод за умов прямого зміщення 0,6 В ;

з) зворотний струм насичення діода.

2.3.5 Розрахувати струм дифузії електронів і струм дифузії дірок у діоді зі ступінчастим p - n -переходом. Області леговані рівномірно: $N_a = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_d = 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Дифузійна довжина дірок $L_p = 10^{-5} \text{ м}$, електронів – $L_n = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Товщина нейтральних областей $W_n = 2 \text{ мкм}$, $W_p = 5 \text{ мкм}$. Площа переходу $S = 100 \text{ мкм}^2$, напруга прямого зміщення 0,5 В ; $T = 300 \text{ К}$.

2.3.6 Концентрація донорів у n -області діода з ідеальним p - n -переходом дорівнює концентрації акцепторів у p -області. Як зміниться густина струму крізь такий перехід, якщо концентрацію донорів збільшити в 5 разів? Вважайте, що відношення $\frac{D_n}{D_p} = 3$,

$\frac{L_n}{L_p} = 1,5$ не змінюється при зміні рівня легування.

2.3.7 Для кремнієвого діода з різким p - n -переходом намалювати в напівлогарифмічному масштабі розподіл концентрації носіїв заряду в переході, якщо $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Визначити чисельні значення ординат, вказати n - і p -області, а також область, збіднену носіями заряду. Для цих умов намалювати також розподіл густини об'ємного заряду та потенціалу в переході.

2.3.8 Розрахувати і побудувати вольт-амперну характеристику ідеального напівпровідникового діода при $T = 300 \text{ К}$, якщо зворотний струм насичення $I_s = 10 \text{ мкА}$. Розрахунок провести в інтервалі напруг від 0 до -10 В (через 1 В) і від 0 до 0,2 В (через 0,05 В).

2.3.9 Для умов, сформульованих в попередньому завданні, розрахувати і побудувати вольт-амперну характеристику діода, припустивши, що діод має омичний опір p - і n -областей, рівний 25 Ом.

- 2.3.10 Яка область діода (n або p) має більш високий питомий опір, якщо відомо, що кількість дірок, що інжектуються через p - n -перехід в одиницю часу, на декілька порядків перевищує кількість електронів?
- 2.3.11 Зворотний струм насичення напівпровідникового діода $I_s = 1$ мкА при 27°C та $I_s = 10$ мкА при 65°C . Побудувати вольт-амперні характеристики цього діода при температурах, що дорівнюють 27°C і 65°C , при зміні напруги від -2 до $0,5$ В.
- 2.3.12 При $T = 300$ К зворотний струм насичення ідеального германієвого діода $I_s = 30$ мкА. Знайти диференційний опір діода при прямій та зворотній напругах, що дорівнюють $0,2$ В.
- 2.3.13 Визначити, у скільки разів збільшується зворотний струм насичення сплавного p - n -переходу діода, якщо температура збільшується:
- від 20 до 80°C для германієвого діода;
 - від 20 до 150°C для кремнієвого діода.

Діоди Шотткі

- 2.3.14 Нарисувати зонну енергетичну діаграму контакту метал – напівпровідник у стані термодинамічної рівноваги (при $U = 0$) і при прикладенні прямої ($U > 0$) і зворотної ($U < 0$) напруги. Показати потоки носіїв через контакт.
- 2.3.15 Визначити ширину області просторового заряду й ємність контакту метал – напівпровідник, якщо $N_d = 10^{16}$ см $^{-3}$, $\epsilon = 12,5$, робота виходу з металу $A_m = 4,6$ еВ, робота виходу з напівпровідника $A_n = 4,3$ еВ, площа контакту $S = 10^{-4}$ см ^{2} . Побудувати залежності ширини області просторового заряду й ємності від прикладеної напруги.
- 2.3.16 Побудувати вольт-амперну характеристику контакту метал – напівпровідник при прямому і зворотному зміщеннях при 300 К, роботі виходу з металу $A_m = 4,6$ еВ і роботі виходу з напівпрові-

дника $A_n = 4,3 \text{ eВ}$ відповідно до діодної теорії при $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

- 2.3.17 Визначити опір бази діода Шотткі R_ϕ на основі електронного кремнію з концентрацією домішки $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Площа контакту $S = 10^{-5} \text{ см}^2$, товщина бази $W = 10 \text{ мкм}$.
- 2.3.18 Визначити диференціальний опір діода Шотткі при прямому зміщенні $0,3 \text{ В}$ за температури $T = 300 \text{ К}$, якщо струм насичення дорівнює 10^{-8} А .
- 2.3.19 Визначити густину струму насичення діода Шотткі за температури $T = 300 \text{ К}$, якщо контактує напівпровідник n -типу провідності, що має електронну спорідненість $\chi = 3,1 \text{ eВ}$ і метал з роботою виходу $A_m = 4,0 \text{ eВ}$. Значення приведеної сталої Річардсона прийміть рівною $A^* = 140 \frac{\text{А}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^2}$.
- 2.3.20 Знайти висоту потенційного бар'єра в діоді Шотткі германій n -типу – золото ($n\text{-Ge} - \text{Au}$), якщо питомий опір напівпровідника $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Намалювати зонну діаграму контакту в умовах термодинамічної рівноваги.
- 2.3.21 Знайти ширину області збіднення при зовнішніх напругах $U_1 = +0,4 \text{ В}$, $U_2 = -2 \text{ В}$ і в рівноважних умовах в діоді $n\text{-Si} - \text{Pt}$. Намалювати зонну діаграму контакту в умовах термодинамічної рівноваги.
- 2.3.22 Визначити граничну частоту діода Шотткі, якщо товщина бази з кремнію $W = 10 \text{ мкм}$, концентрація домішки в базі 10^{15} см^{-3} і поверхневий потенціал $0,6 \text{ В}$.
- 2.3.23 Визначити ємність $C_{\text{ш}}$ контакту золото – кремній ($\epsilon = 12$), якщо концентрація електронів у об'ємі напівпровідника $n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, висота потенціального бар'єру $\phi_s^0 = 0,5 \text{ В}$. До кон-

такту прикладено зворотнє зміщення $U = 0,4 \text{ В}$. Площа контакту $S = 10^{-4} \text{ см}^2$.

2.3.24 Крізь контакт метал – напівпровідник n -типу при $T = 300 \text{ К}$ під дією прямого зміщення $U = 0,3 \text{ В}$ протікає струм $I = 100 \text{ мА}$. Площа контакту $S = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$. Ємність контакту при нульовому зміщенні $1,38 \text{ пФ}$. Ефективна стала $A^* = 110 \frac{\text{А}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^2}$. Визначити:

- а) висоту потенціального бар'єру;
- б) густину струму насичення;
- в) розмір області просторового заряду при $U = 0$;
- г) концентрацію електронів у об'ємі напівпровідника.

2.3.25 Діод Шотткі створено на кремнії n -типу. Металевий контакт вольфрамовий з площею $S = 100 \text{ мкм}^2$. Напруга прямого зміщення діода $U = 0,4 \text{ В}$. Розрахувати:

- а) товщину ОПЗ;
- б) питому ємність;
- в) висоту потенціального бар'єра;
- г) густину струму насичення;
- д) диференціальний опір діода Шотткі;
- е) бар'єрну ємність;
- ж) струм діода;
- з) граничну частоту;
- к) густину струму через діод Шотткі, якщо висота потенціального бар'єра дорівнюватиме нулю.

3 БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР

3.1 Основні формули та визначення

Транзистор – це напівпровідниковий прилад з двома $p-n$ -переходами, призначений для підсилення і генерування електричних сигналів. Структура транзистора типу $p-n-p$ представлена на рис. 3.1, а, а умовні позначення обох типів транзисторів з робочими полярностями напруг і напрямками струмів – на рис. 3.1, б.

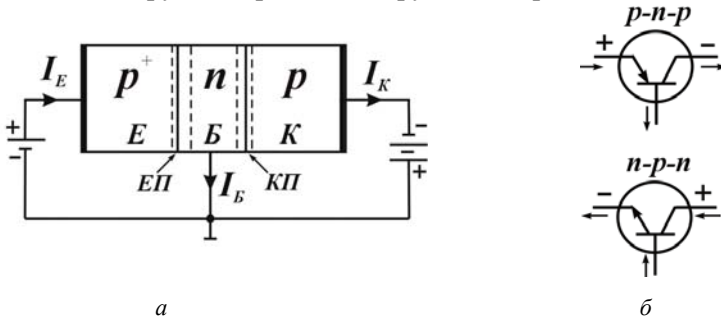


Рисунок 3.1 – Транзистор типу p^+-n-p :

а – структура транзистора;

б – умовне позначення.

Конструктивно біполярний транзистор (БТ) є сукупністю двох взаємодіючих $p-n$ -переходів, ввімкнених назустріч один одному. Кожний з переходів транзистора можна ввімкнути або в прямому, або в зворотному напрямку, в залежності від чого розрізняють три режими роботи транзистора:

- ❖ *режим відсічки* – обидва переходи обернено зміщені, при цьому через транзистор протікає порівняно невеликий струм;
- ❖ *режим насичення* – обидва переходи відкриті (прямозмщені);
- ❖ *активний режим* – один з $p-n$ -переходів відкритий, інший закритий (якщо на емітерному переході (ЕП) напруга пряма, а на колекторному (КП) – зворотна, то вмикання транзистора

називають *нормальним*; при протилежній полярності – *інверсним*).

В режимі відсікання і режимі насичення керування транзистором неможливе. В активному режимі таке керування здійснюється найбільш ефективно, при цьому транзистор може виконувати функції активного елемента електричної схеми (підсилення, генерування, тощо).

Розрізняють різні способи вмикання транзистора як чотириполюсника: зі спільною базою (СБ), спільним емітером (СЕ), спільним колектором (СК). Схеми вмикання наведені в таблиці 3.1.

Формули Еберса – Молла є універсальними співвідношеннями, які описують характеристики біполярних транзисторів у всіх режимах роботи.

Відповідно моделі Еберса – Молла представимо біполярний транзистор у вигляді еквівалентної схеми (рис. 3.3). При нормальному вмиканні через ЕП протікає струм I_1 , через КП протікає струм $\alpha_N I_1$ менший, ніж I_1 , внаслідок рекомбінації частини інжектованих носіїв у базі. На рис. 3.3 цей процес відображається як генератор струму $\alpha_N I_1$, де α_N – *коефіцієнт передачі емітерного струму*. При інверсному вмиканні транзистора прямому колекторному струму I_2 буде відповідати емітерний струм $\alpha_I I_2$, де α_I – *коефіцієнт передачі в інверсному вмиканні*. Отже, струми емітера I_E та колектора I_K в загальному випадку складаються з інжектуємого (I_1 або I_2) і екстрагуємого ($\alpha_N I_1$ або $\alpha_I I_2$) струмів:

$$I_E = I_1 - \alpha_I I_2, \quad (3.1)$$

$$I_E = \alpha_N I_1 - I_2. \quad (3.2)$$

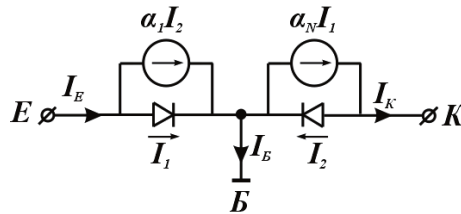


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема біполярного транзистора

Величини струмів I_1 та I_2 крізь p - n -переходи виражаються стандартними формулами:

$$I_1 = I'_{E_0} \left(e^{\frac{eU_E}{k_B T}} - 1 \right), \quad (3.3)$$

$$I_2 = I'_{K_0} \left(e^{\frac{eU_K}{k_B T}} - 1 \right), \quad (3.4)$$

де I'_{E_0} і I'_{K_0} – зворотні струми насичення p - n -переходів, пов'язані зі зворотними струмами емітера I_{E_0} і колектора I_{K_0} співвідношеннями:

$$I'_{E_0} = \frac{I_{E_0}}{1 - \alpha_N \alpha_1}, \quad (3.5)$$

$$I'_{K_0} = \frac{I_{K_0}}{1 - \alpha_N \alpha_1}. \quad (3.6)$$

З формул (3.5) – (3.6) видно, що $I_{E_0} \ll I'_{E_0}$, $I_{K_0} \ll I'_{K_0}$. Відмінність, наприклад, зворотних струмів I_{K_0} , I'_{K_0} з'являється тому, що струм I_{K_0} визначається при розімкненому емітерному ланцюгу ($I_E = 0$), а струм I'_{K_0} визначається при короткозамкненому емітерному ланцюгу ($U_E = 0$).

Тоді, враховуючи формули (3.1) – (3.4), отримуємо залежності від напруги емітерного і колекторного струмів:

$$I_E = I'_{E_0} \left(e^{\frac{eU_E}{k_B T}} - 1 \right) - \alpha_I I'_{K_0} \left(e^{\frac{eU_K}{k_B T}} - 1 \right), \quad (3.7)$$

$$I_K = \alpha_N I'_{E_0} \left(e^{\frac{eU_E}{k_B T}} - 1 \right) - I'_{K_0} \left(e^{\frac{eU_K}{k_B T}} - 1 \right), \quad (3.8)$$

Струм бази

$$I_B = I_E - I_K = (1 - \alpha_N) I'_{E_0} \left(e^{\frac{eU_E}{k_B T}} - 1 \right) + (1 - \alpha_I) I'_{K_0} \left(e^{\frac{eU_K}{k_B T}} - 1 \right). \quad (3.9)$$

Формули (3.7) – (3.9) називають *формулами Еберса – Молла*, вони корисні для аналізу *статичних* характеристик біполярного транзистора при будь-яких співвідношеннях знаків струмів і напруг. *Статичними характеристиками* називають графічно виражені залежності струму від напруги вхідного ланцюга (*вхідні ВАХ*) і вихідного ланцюга (*вихідні ВАХ*). Вид характеристик залежить від способу вмикання транзистора.

Вольт-амперні характеристики біполярного *p-n-p*-транзистора в активному режимі в схемі зі СБ представлені на рис. 3.4 і описуються рівняннями виду:

$$I_K = \alpha_N I_E - I_{K_0} \left(e^{\frac{eU_K}{k_B T}} - 1 \right) \quad (3.10)$$

– для сім'ї *колекторних (вихідних)* характеристик $I_K = f(U_K)$ з параметром I_E (рис. 3.4, б);

$$U_E = \frac{k_B T}{e} \ln \left[\frac{I_E}{I'_{E_0}} + 1 + \alpha_N \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) \right]. \quad (3.11)$$

– для сім'ї *емітерних (вхідних)* характеристик $I_E = f(U_E)$ з параметром U_K (рис. 3.4, а).

Для активного режиму, коли $U_E > 0$, $U_K < 0$, $|U_K| \ll 0$, вирази (3.10), (3.11) переходять у

$$I_K = \alpha_N I_E - I_{K_0}, \quad (3.12)$$

$$U_E = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{I_E}{I'_{E_0}}. \quad (3.13)$$

Ідеалізовані вольт-амперні характеристики БТ в схемі зі СБ у вигляді (3.12), (3.13) є найбільш розповсюдженими при аналізі фізичних процесів у транзисторі.

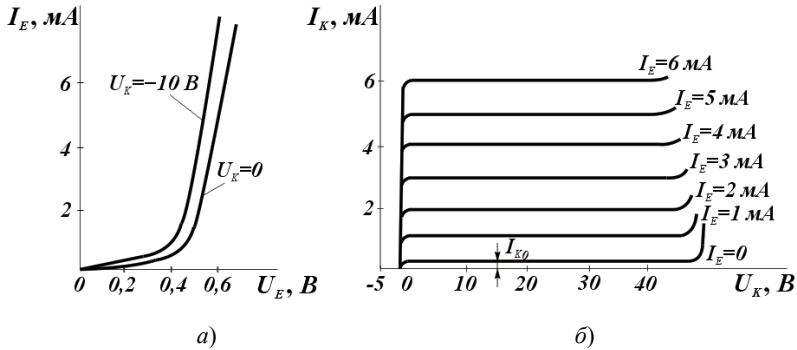


Рисунок 3.4 – Вольт-амперні характеристики $p-n-p$ БТ в активному режимі

Основними величинами, що характеризують параметри БТ, є:
– *коефіцієнт передачі струму емітера* (чим більший цей коефіцієнт, тим ефективніше транзистор передає струм)

$$\alpha = \frac{dI_K}{dI_E} \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}, \text{ при } U_{KB} = \text{const} \quad \text{або} \quad \alpha = \gamma \varkappa, \quad (3.14)$$

де

$$\gamma = \frac{dI_{pE}}{dI_E} \approx 1 - \frac{N_{dB}}{N_{aE}} \quad (3.15)$$

– *коефіцієнт інжекції або ефективність емітера*, тобто частка корисного діркового струму I_{pE} в повному струмі емітера I_E ;

$$\varkappa = \frac{dI_{pK}}{dI_{pE}} \quad \text{або} \quad \varkappa = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_p} \right)^2 \quad (3.16)$$

– *коефіцієнт перенесення*, тобто частка емітерного діркового струму I_{pE} , що без рекомбінації дійшла до колекторного переходу (W_B – товщина базової області);

– *коефіцієнт підсилення базового струму* БТ в схемі зі СЕ:

$$\beta = \frac{dI_K}{dI_E} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \approx \frac{1}{1-\alpha} \approx 2 \frac{L_p^2}{W_E^2}; \quad (3.17)$$

– диференціальний опір емітерного переходу:

$$r_E = \frac{dU_E}{dI_E} = \frac{k_B T}{e I_E}, \quad \text{при} \quad I_K = \text{const}, \quad (3.18 \text{ а})$$

$$\text{в умовах короткого замикання } (U_E=0) \quad r_E = \frac{dU_E}{dI_E} = \frac{\Phi_T}{I'_{E_0}}, \quad (3.18 \text{ б})$$

$$\text{в умовах холостого ходу } (I_E=0) \quad r_E = \frac{dU_E}{dI_E} = \frac{\Phi_T}{I_{E_0}}; \quad (3.18 \text{ в})$$

– диференціальний опір колекторного переходу:

$$r_K = \frac{dU_K}{dI_K} \text{ при } I_E = \text{const} \text{ або } r_K = \sqrt{\frac{2eN_d}{\epsilon\epsilon_0}} \frac{L_p^2}{W_B} \frac{\sqrt{U_K}}{\gamma I_E}; \quad (3.19)$$

– коефіцієнт зворотного зв'язку (відношення приросту напруги на емітері до приросту напруги на колекторі, що його викликав при постійному струмі через емітер):

$$\mu_{EK} = \frac{dU_K}{dU_E} \text{ при } I_E = \text{const} \text{ або } \mu_{EK} = -\sqrt{2 \frac{\epsilon\epsilon_0}{eN_{dБ}}} \frac{\Phi_T}{W_B \sqrt{U_K}}; \quad (3.20)$$

– час прольоту носіїв крізь базу дифузійного транзистора (за відсутності струмів не існує електричного поля в базі) визначається товщиною бази і коефіцієнтом дифузії неосновних носіїв:

$$t_{\text{пр(диф)}} = \frac{W_B^2}{2D_{pБ}}; \quad (3.21)$$

– напруженість електричного поля в базі дрейфового транзистора (в базі спеціальною технологією створюється неоднорідний розподіл домішки, і за рахунок цього виникає вбудоване електричне поле, що значно розширює область використання транзистора за частотою) визначається дифузійною довжиною основних носіїв заряду $L_{nБ}$ в базі:

$$\varepsilon = \frac{k_B T}{e} \frac{1}{L_{nB}}; \quad (3.22)$$

– час прольоту носіїв через базу дрейфового транзистора:

$$t_{\text{пр(др)}} = \frac{W_B^2}{2D_{pB}} = t_{\text{пр(диф)}} \frac{2}{m}, \quad (3.23)$$

де m показує, у скільки разів струм емітера дрейфового транзистора більший за струм емітера дифузійного транзистора (N_E – концентрація домішки в емітері; $N_B(x)$ – розподіл домішки в базі транзистора):

$$m = \frac{N_E}{\bar{N}}, \quad \text{де } \bar{N} = \frac{1}{W_B} \int_0^{W_B} N_B(x) dx; \quad (3.24)$$

– коефіцієнт підсилення за напругою:

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}; \quad (3.25)$$

– коефіцієнт підсилення за потужністю:

$$K_P = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = \alpha K_U. \quad (3.26)$$

Будь-яка схема вмикання транзистора характеризується двома основними показниками:

- коефіцієнт підсилення за струмом $I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}}$;
- вхідний опір $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$.

Порівняльна характеристика схем вмикання біполярного транзистора представлена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Особливості схем вмикання транзистора

Схема включення	СЕ	СБ	СК
1	2	3	4
Принципова схема			
Вхідний струм $I_{вх}$	I_B	I_E	I_B
Вхідна напруга $U_{вх}$	U_{BE}	U_{EB}	U_{BK}
Вихідний струм $I_{вих}$	I_K	I_K	I_E
Вихідна напруга $U_{вих}$	U_{KE}	U_{KB}	U_{EK}
Вхідний опір $R_{вх} = U_{вх} / I_{вх}$	$\Delta U_{BE} / \Delta I_B$ середній	$\Delta U_{EB} / \Delta I_E$ малий	$\Delta U_{BK} / \Delta I_B$ дуже високий
Вихідний опір $R_{вих} = U_{вих} / I_{вих}$	$\Delta U_{KE} / \Delta I_K$ середній	$\Delta U_{KB} / \Delta I_K$ високий	$\Delta U_{EK} / \Delta I_E$ малий
Підсилення за струмом $I_{вих} / I_{вх}$	$\frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} (\beta \gg 1)$	$\frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} = \alpha (\alpha < 1)$	$\frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \frac{1}{1 - \alpha} = \frac{\beta}{\alpha} (\beta \gg 1)$
Підсилення за напругою $K_U = U_{вих} / U_{вх}$	декілька сотень	декілька сотень або тисяч	близько одиниці

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
Підсилення за потужністю $K_P = P_{вих}/P_{вх}$	декілька тисяч	декілька сотень	декілька десятків
Напруга на виході та вході	в протифазі	в фазі	в фазі
Переваги	– великий коефіцієнт підсилення за струмом; – великий коефіцієнт підсилення за напругою; – найбільше підсилення потужності; – достатньо одного джерела живлення; – вихідна змінна напруга інвертується відносно вхідної; – велика допустима напруга.	– добрі температурні та частотні властивості; – висока допустима напруга.	– великий вхідний опір; – малий вихідний опір.
Недоліки	дещо гірші частотні та температурні властивості, ніж у схемі зі спільною базою.	– мале підсилення за струмом, ($\alpha < 1$); – малий вхідний опір; – необхідні два різних джерела напруги для живлення.	– коефіцієнт підсилення за напругою менше одиниці.

Параметри транзистора як чотирьохполюсника. Біполярний транзистор у схемотехнічних застосуваннях представляють як чотирьохполюсник і розраховують його параметри для такої схеми. Для транзистора як чотирьохполюсника характерні два значення струму I_1 та I_2 і два значення напруги U_1 та U_2 (рис. 3.5).

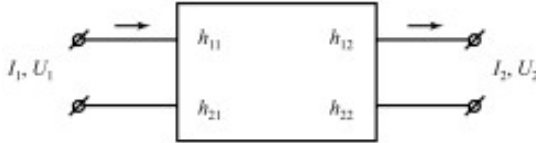


Рисунок 3.5 – Схема чотирьохполюсника

Параметри z , y , h . Залежно від того, які з цих параметрів обрані як вихідні, можна побудувати три системи формальних параметрів транзистора як чотирьохполюсника. Це системи z -параметрів, y -параметрів та h -параметрів. Розглянемо їх більш детально, використовуючи лінійне наближення.

Система z -параметрів. Задамо як вхідні параметри біполярного транзистора як чотирьохполюсника струми I_1 та I_2 , а напруги U_1 та U_2 визначатимемо як функції цих струмів. Тоді зв'язок напруг і струмів у лінійному наближенні матиме вигляд:

$$\begin{aligned} U_1 &= z_{11}I_1 + z_{12}I_2; \\ U_2 &= z_{21}I_1 + z_{22}I_2. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Коефіцієнти z_{ik} у цих рівняннях визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} z_{11} &= \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad \text{та} \quad z_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1=0} && \text{– вхідний і вихідний опори;} \\ z_{12} &= \left. \frac{U_1}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad \text{та} \quad z_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2=0} && \text{– опори зворотної та прямої передачі.} \end{aligned}$$

Вимірювання z -параметрів здійснюють у режимі **холостого ходу** на вході ($I_1 = 0$) і виході ($I_2 = 0$). Реалізувати режим розімкнутого

входу $I_1 = 0$ для біполярного транзистора достатньо просто (опір емітерного переходу складає всього десятки ом, і тому розмикаючий опір у ланцюзі емітера в декілька кілоом дозволяє вважати $I_1 = 0$). Реалізувати режим розімкнутого виходу $I_2 = 0$ для біполярного транзистора складно (опір колекторного переходу дорівнює десяткам мегаом, розмикаючий опір у ланцюзі колектора в силу цього має бути порядку гігаом).

Система y -параметрів. Задамо як вхідні параметри біполярного транзистора як чотирьохполюсника напруги U_1 та U_2 , а струми I_1 та I_2 визначатимемо як функції цих напруг. Тоді зв'язок струмів і напруг у лінійному наближенні матиме вигляд:

$$\begin{aligned} I_1 &= y_{11}U_1 + y_{12}U_2; \\ I_2 &= y_{21}U_1 + y_{22}U_2. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Коефіцієнти в цих рівняннях мають розмірність провідності і визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} y_{11} &= \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{та} \quad y_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{U_1=0} && \text{— вхідна і вихідна провідності;} \\ y_{12} &= \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{U_1=0} \quad \text{та} \quad y_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0} && \text{— провідності зворотної та прямої передач.} \end{aligned}$$

Вимірювання y -параметрів відбувається в режим **короткого замикання** на вході ($U_1 = 0$) і виході ($U_2 = 0$). Реалізувати режим короткого замикання на вході ($U_1 = 0$) для біполярного транзистора достатньо складно (опір емітерного переходу складає всього десятки ом, і тому замикаючий опір у ланцюзі емітера має складати частки ома, що досить складно). Реалізувати режим короткого замикання на виході ($U_2 = 0$) для біполярного транзистора просто (опір колекторного переходу дорівнює десяткам мегаом і замикаючий опір у ланцюзі колектора може бути навіть сотні ом).

Система h -параметрів. Система h -параметрів використовується як комбінована схема з двох попередніх, причому з міркувань зруч-

ності вимірювання параметрів біполярного транзистора обирається режим короткого замикання на виході ($U_2 = 0$) і режим холостого ходу на вході ($I_1 = 0$). Тому для системи h -параметрів як вхідні параметри задаються струм I_1 і напруга U_2 , а як вихідні параметри розраховуються струм I_2 і напруга U_1 , при цьому система, що описує зв'язок вхідних I_1 , U_2 та вихідних I_2 , U_1 параметрів, виглядає так:

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}I_2; \\ I_2 &= h_{21}U_1 + h_{22}U_2. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Значення коефіцієнтів у рівнянні для h -параметрів мають наступний вигляд:

$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{— вхідний опір при короткому замиканні на виході;}$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0} \quad \text{— вихідна провідність при холостому ході у вхідному ланцюзі;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0} \quad \text{— коефіцієнт зворотного зв'язку при холостому ході у вхідному ланцюзі;}$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{— коефіцієнт передачі струму при короткому замиканні на виході.}$$

Еквівалентна схема чотирьохполюсника з h -параметрами наведена на рис. 3.6. З цієї схеми можна легко побачити, що режим короткого замикання на виході дозволяє виміряти той чи інший h -параметр.

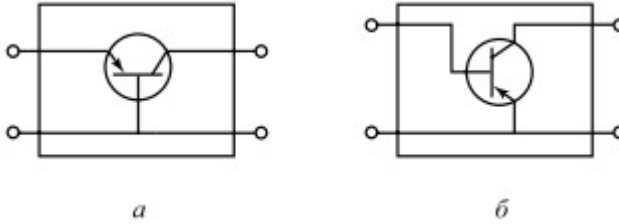


Рисунок 3.6 – Еквівалентна схема чотирьохполюсника:

а – біполярний транзистор у схемі зі спільною базою;

б – біполярний транзистор у схемі зі спільним емітером

3.2 Приклади розв'язування задач

Приклад 3.2.1. Визначити середній час прольоту дірок $t_{\text{пр(диф)}}$ від емітера до колектора за кімнатної температури. Товщина бази складає $W_B = 0,001$ см. Транзистор виготовлений із кремнію.

Розв'язок

Середній час прольоту від емітера до колектора визначається виразом (3.21):

$$t_{\text{пр(диф)}} = \frac{W_B^2}{2D_{pB}}.$$

Коефіцієнт дифузії дірок у базі знайдемо за допомогою співвідношення Ейнштейна

$$D_{pB} = \frac{k_B T}{e} \mu_p.$$

Тому

$$t_{\text{пр(диф)}} = \frac{e W_B^2}{2 k_B T \mu_p} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (10^{-5})^2}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 0,06} = 3,22 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 3,22 \text{ мс}.$$

Відповідь: $t_{\text{пр(диф)}} = 3,22 \text{ мс}.$

Приклад 3.2.2. Як зміниться коефіцієнт перенесення на низькій частоті $\varkappa$, якщо товщина бази зменшиться втричі?

Розв'язок

Коефіцієнт перенесення визначається співвідношенням (3.16):

$$\varkappa = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2.$$

Якщо $W_{B_1} = \frac{1}{3} W_B$, то

$$\varkappa_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{3L_{pB}} \right)^2 = 1 - \frac{1}{18} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2$$

і коефіцієнт перенесення зменшиться на величину:

$$\Delta \varkappa = \varkappa - \varkappa_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2 - \left(1 - \frac{1}{18} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2 \right) = \frac{4}{9} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2 = \left(\frac{2W_B}{3L_{pB}} \right)^2.$$

Відповідь: $\Delta \varkappa = \left(\frac{2W_B}{3L_{pB}} \right)^2.$

Приклад 3.2.3. Знайдіть диференційний опір колекторного переходу германієвого транзистора при напрузі колектора $U_K = 8$ В і струмі емітера $I_E = 1$ мА. Товщина бази $W_B = 0,004$ см, концентрація донорів в базі $N_d = 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³, дифузійна довжина дірок $L_p = 0,08$ см. Прийміть, що коефіцієнт інжекції дорівнює одиниці.

Розв'язок

Диференційний опір колекторного переходу визначається виразом (3.19):

$$r_k = \sqrt{\frac{2eN_d}{\epsilon\epsilon_0} \frac{L_p^2}{W_B} \frac{\sqrt{U_K}}{\gamma I_E}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{14}}{16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} \cdot \frac{(0,08)^2}{0,004} \cdot \frac{\sqrt{8}}{1 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 3,04 \cdot 10^7 \text{ Ом} = 30,4 \text{ МОм}.$$

Відповідь: $r_k = 30,4 \text{ МОм}$.

Приклад 3.2.4. Концентрації домішок в базі, емітері й колекторі деякого транзистора $p-n-p$ і ширина бази контролюються так, що тільки 1 % дірок, що інжектуються з емітера, втрачається при рекомбінації в базі. Нехтуючи струмами витікання, знайти коефіцієнт передачі струму емітера, ефективність емітера, коефіцієнт перенесення, якщо електронна складова струму емітера $I_{nE} = 0,01 I_E$. Коефіцієнт множення в колекторному переході приймається рівним одиниці.

Розв'язок

Ефективність емітера (коефіцієнт інжекції)

$$\gamma = \frac{I_{pE}}{I_{pE} + I_{nE}} = \frac{I_E - I_{nE}}{I_E} = 1 - \frac{I_{nE}}{I_E} = 1 - 0,01 = 0,99.$$

$$\text{Коефіцієнт перенесення } \kappa = \frac{I_{pK}}{I_{pE}} = \frac{I_{pE} - 0,01 \cdot I_{pE}}{I_{pE}} = 0,99.$$

Коефіцієнт передачі струму емітера $\alpha = \kappa \gamma M$,

де коефіцієнт множення $M=1$. Отже, $\alpha = 0,99 \cdot 0,99 \cdot 1 = 0,98$.

Відповідь: $\gamma = 0,99$; $\kappa = 0,99$; $\alpha = 0,98$.

Приклад 3.2.5. Прямий струм емітера $n-p-n$ -транзистора складає $I_E = 2 \text{ мА}$, колекторний ланцюг розірвано. Визначити:

- напругу на колекторному та емітерному переходах;

б) напругу емітер – колектор, вважаючи $I_{КБ_0} = 2 \text{ мкА}$, $I_{ЕБ_0} = 1,6 \text{ мкА}$, $\alpha = 0,98$. В якому режимі працює транзистор?

Розв'язок

За умовами задачі $I_K = 0$, $I_E = 2 \text{ мА}$, тому

$$U_{BE} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_E}{I_{ЕБ_0}} \right) = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-6}} \right) = 0,1853 \text{ В}.$$

Напруга база – колектор

$$U_{BK} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{\alpha I_E}{I_{КБ_0}} \right) = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(1 + \frac{0,98 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-6}} \right) = 0,1179 \text{ В},$$

тому транзистор працює в режимі насичення.

Напруга емітер – колектор

$$U_{EK} = U_{BK} - U_{BE} = 0,1179 - 0,1853 = -0,0063 \text{ В}.$$

Відповідь: $U_{BE} = 0,1853 \text{ В}$; $U_{BK} = 0,1179 \text{ В}$; $U_{EK} = -0,0063 \text{ В}$.

Приклад 3.2.6. У $p-n-p$ -транзисторі концентрація донорів в емітері $N_d = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, концентрація акцепторів в базі $N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Вважаючи, що рухливості електронів і дірок рівні $0,4$ і $0,2 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ відповідно, визначити відношення діркового струму до електронного на переході емітер – база.

Розв'язок

Відношення діркового струму до електронного на $p-n$ -переході дорівнює відношенню питомих провідностей матеріалів бази та емітера, які утворюють $p-n$ -перехід, для будь-яких напруг зміщення. Отже,

$$\frac{I_p}{I_n} = \frac{\sigma_p}{\sigma_n} = \frac{e \mu_p N_a}{e \mu_n N_d},$$

де N_a та N_d – концентрації акцепторів та донорів.

Для даного випадку

$$\frac{I_p}{I_n} = \frac{10^{22} \cdot 0,2}{10^{24} \cdot 0,4} = \frac{1}{200}.$$

Відповідь: $\frac{I_p}{I_n} = \frac{1}{200}.$

Приклад 3.2.7. Транзистор p - n - p ввімкнений у схему зі спільною базою. Показати, що диференціальний опір емітерного переходу можна наближено розрахувати за формулою $r_E \approx \frac{k_B T}{e I_E}$. Розрахувати r_E за температури $T = 300$ К, якщо $I_E = 2$ мА.

Розв'язок

Оскільки на емітерний перехід подається пряма напруга, то струм емітера можна визначити з виразу:

$$I_E \approx I_{E_0} e^{\frac{e U_{EB}}{k_B T}},$$

де I_{E_0} – початковий струм емітерного переходу.

Тоді

$$\begin{aligned} r_E &= \left. \frac{dU_{EB}}{dI_E} \right|_{U_{KB}=\text{const}} = \frac{1}{\left. \frac{dI_E}{dU_{EB}} \right|_{U_{KB}=\text{const}}} = \frac{k_B T}{e I_{E_0} e^{\frac{e U_{EB}}{k_B T}}} = \frac{k_B T}{e I_E} = \\ &= \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 13 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Відповідь: $r_E = 13$ Ом.

Приклад 3.2.8. Інтегрований кремнієвий n^+ - p - n -транзистор має такі параметри: середня концентрація домішки в області

бази $N_{aB} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$; товщина бази $W_B = 0,5 \text{ мкм}$; дифузійна довжина електронів у базі $L_{nB} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$; $\alpha_N = 0,99$; $\alpha_I = 0,5$; $\mu_n = 0,127 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Транзистор працює за нормальних умов в активному режимі $U_{BE} = 0,7 \text{ В}$; $U_{BK} = -4 \text{ В}$. Площа p - n -переходу дорівнює 400 мкм^2 . Розрахувати струми транзистора: I_E , I_K , I_B .

Розв'язок

Спочатку знаходимо струм насичення транзистора I_s . Товщина бази менша за дифузійну довжину електронів у базі ($W_B < L_{nB}$), тому згідно формули:

$$I_s = eSD_n \frac{n_{B_0}}{L_{nB}} \frac{1}{\text{sh}\left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)}.$$

Концентрацію неосновних носіїв заряду в області бази за умов рівноваги визначимо згідно із законом діючих мас (1.15 а):

$$n_{B_0} = \frac{n_i^2}{p_{B_0}} = \frac{n_i^2}{N_{aB}} = \frac{(1,45 \cdot 10^{16})^2}{10^{23}} = 2,25 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}.$$

Коефіцієнт дифузії D_n електронів знаходимо з рівняння Ейнштейна $D_n = \mu_n \varphi_T = 0,127 \cdot 0,026 = 0,33 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

Знаходимо концентрацію неосновних надлишкових електронів в області бази:

$$\Delta n_B(0) = n_{B_0} \left[e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}} - 1 \right] = 2,25 \cdot 10^9 \cdot \left[e^{\frac{0,7}{0,026}} - 1 \right] = 1,1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Тоді струм насичення дорівнює:

$$I_s = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 400 \cdot 10^{-12} \cdot 0,33 \cdot 10^{-2} \cdot 2,25 \cdot 10^9}{1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \operatorname{sh} \frac{0,6 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-5}}} = 9,5 \cdot 10^{-16} \text{ A}.$$

Струм колектора в активному нормальному режимі:

$$I_{\text{К акт}} = I_s \left[e^{\frac{U_{BE}}{\Phi_T}} - 1 \right] = 9,5 \cdot 10^{-16} \left[e^{\frac{0,7}{0,026}} - 1 \right] = 0,468 \text{ mA}.$$

Скориставшись формулою (3.14), знаходимо струм емітера в активному нормальному режимі:

$$I_{\text{Е акт}} = \frac{I_{\text{К акт}}}{\alpha_N} = \frac{4,68 \cdot 10^{-4}}{0,99} = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ A}.$$

Знайдемо струм емітера в активному інверсному режимі

$$I_{\text{Е инв}} = I_s \left[e^{\frac{U_{BK}}{\Phi_T}} - 1 \right] = 9,5 \cdot 10^{-16} \left[e^{\frac{-4}{0,026}} - 1 \right] = -9,5 \cdot 10^{-16} \text{ A}.$$

Тоді струм колектора в активному інверсному режимі:

$$I_{\text{К инв}} = \frac{I_{\text{Е инв}}}{\alpha_1} = \frac{-9,5 \cdot 10^{-16}}{0,5} = -1,9 \cdot 10^{-15} \text{ A}.$$

$$\text{Струм емітера } I_E = I_{\text{Е акт}} - I_{\text{Е инв}} \cong I_{\text{Е акт}} = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ A}.$$

$$\text{Струм колектора } I_K = I_{\text{К акт}} - I_{\text{К инв}} \cong I_{\text{К акт}} = 4,68 \cdot 10^{-4} \text{ A}.$$

Струм бази знайдемо як суму струмів бази в нормальному та інверсному режимах, але визначальним за умов задачі буде струм бази в активному нормальному режимі:

$$I_B \cong I_{\text{Бакт}} = I_{\text{Е акт}} - I_{\text{К акт}} = 4,73 \cdot 10^{-4} - 4,68 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ A}.$$

Відповідь: $I_E = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ A}$, $I_K = 4,68 \cdot 10^{-4} \text{ A}$, $I_B = 5 \cdot 10^{-6} \text{ A}$.

Приклад 3.2.9. У транзисторі n - p - n надлишкова концентрація електронів поблизу емітерного переходу в базі дорівнює 10^{20} м^{-3} . Площі переходів S однакові та дорівнюють 10^{-6} м^2 . Побудувати графік приблизного розподілу концентрації електронів в області бази й визначити струм колектора, якщо ефективна ширина бази $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, рухливість електронів $\mu_n = 0,39 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ при $T = 300 \text{ К}$.

Розв'язок

Будемо вважати, що ширина бази набагато менша дифузійної довжини електронів (неосновних носіїв), концентрація акцепторних домішок в базі значно нижча концентрації донорних домішок в емітері та колекторі, в базовій області відсутня рекомбінація носіїв, тобто розподіл електронів в базі лінійний, концентрація неосновних носіїв на колекторному переході дорівнює нулю.

Виходячи з цих припущень, побудуємо приблизний розподіл концентрації електронів в базі (рис. 3.7).

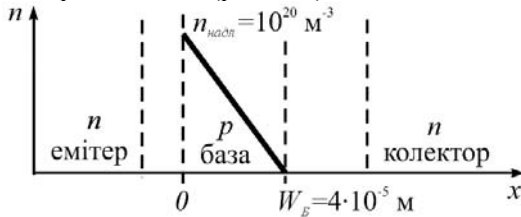


Рисунок 3.7 – Розподіл концентрації електронів у базі

Густина струму неосновних носіїв заряду (електронів) в базі

$$j_n = e D_n \frac{dn_E}{dx}.$$

Коефіцієнт дифузії знаходимо зі співвідношення Ейнштейна

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_B T}{e}, \text{ звідки}$$

$$D_n = \frac{k_B T \mu_n}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 0,39}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Визначимо градієнт концентрації електронів в базі

$$\frac{dn_E}{dx} = -\frac{n_{\text{напл}}}{W_B} = -\frac{10^{20}}{4 \cdot 10^{-5}} = -0,25 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-4}.$$

Якщо прийняти напрямом струму колектора в активному режимі за додатній, тоді

$$\begin{aligned} I_K \approx -j_n S &= -e D_n \frac{dn_E}{dx} S = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25 \cdot 10^{25} \cdot 10^{-6} = \\ &= 4 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 4 \text{ мА}. \end{aligned}$$

Відповідь: $I_K = 4 \text{ мА}$.

Приклад 3.2.10. У p - n - p -транзисторі площі емітерного та колекторного переходів однакові і складають $S = 1 \text{ мм}^2$;

$D_{pB} = 4,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $U_{KB} = -1 \text{ В}$; розподіл дірок у базі

лінійний; ширина бази $W_B = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$;

$N_{pE} = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Знайти:

а) дірковий струм емітера;

б) диференціальний опір між колектором і базою при $U_{KB} = -16 \text{ В}$, якщо товщина колекторного переходу

$$W_{KB} = \left(1 + \sqrt{|U_{KB}|}\right) \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Вважати, що умови на переході емітер – база не змінюються.

Розв'язок

Розподіл концентрації дірок у базі має вигляд, наведений на рис. 3.8.

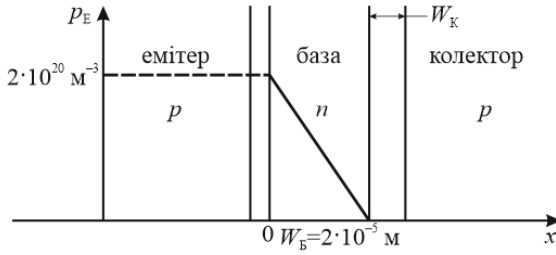


Рисунок 3.8 – Розподіл концентрації дірок у базі

Густина діркового струму в базі

$$j_{pB} = -eD_{pB} \frac{dp_E}{dx}.$$

Оскільки умови на переході емітер – база не змінюються, то дірковий струм емітера

$$I_{pE} = -eD_{pB} \frac{dp_E}{dx} S = j_{pB} S.$$

Гradient концентрації дірок (рис. 3.6)

$$\frac{dp_E}{dx} = -\frac{p_E}{W} = -\frac{2 \cdot 10^{20}}{2 \cdot 10^{-5}} = -10^{25} \text{ м}^{-4}.$$

Отже,

$$I_{pE} = j_{pB} S = -eD_{pB} \frac{dp_E}{dx} S = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 47 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{25} \cdot 10^{-6} = 7,5 \text{ мА}.$$

Струм колектора

$$I_K = eD_{pB} \frac{p_E}{W_{\text{повн}} - W_K} S = eD_{pB} \frac{p_E}{W_{\text{eff}}} S,$$

де W_{eff} – ефективна ширина бази.

Отже, $W_{\text{повн}} = W_{\text{eff}} + W_K = 2 \cdot 10^{-5} + \left(1 + \sqrt{|U_{KB}|}\right) \cdot 10^{-6};$ при

$U_{KB} = -1 \text{ В}$ $W_{\text{повн}} = W_{\text{eff}} + W_K = 2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, тоді

$$I_K = \frac{eD_{pB} p_E S}{\left| W_{\text{повн}} - \left(1 + \sqrt{|U_{KB}|}\right) \cdot 10^{-6} \right|}.$$

Здиференціюємо цей вираз за U_{KB} :

$$\left| \frac{dI_K}{dU_{KB}} \right| = \frac{eD_{pB} p_E S \left(+ \frac{1}{2\sqrt{|U_{KB}|}} \right) \cdot 10^{-6}}{\left| W_{\text{повн}} - \left(1 + \sqrt{|U_{KB}|}\right) \cdot 10^{-6} \right|}.$$

При $U_{KB} = -16$ В

$$\begin{aligned} \left| \frac{dI_K}{dU_{KB}} \right| &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 47 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{2\sqrt{16}} \cdot 10^{-6}}{\left| 2,2 \cdot 10^{-5} - \left(1 + \sqrt{16}\right) \cdot 10^{-6} \right|} = \\ &= \frac{1,88 \cdot 10^{-14}}{2,89 \cdot 10^{-10}} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ СМ}. \end{aligned}$$

Диференціальний опір

$$r_{KB} = \frac{1}{\left| \frac{dI_K}{dU_{KB}} \right|} = \frac{1}{6,5 \cdot 10^{-5}} = 15,4 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 15,4 \text{ кОм}.$$

Відповідь: $I_{pE} = 7,5 \text{ мА}$; $r_{KB} = 15,4 \text{ кОм}$.

Приклад 3.2.11. Маємо біполярний транзистор n - p - n -типу; легування емітера $N_d = 10^{24} \text{ м}^{-3}$; легування бази $N_a = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Ширина нейтральної області емітера $W_E = 2 \text{ мкм}$, бази $W_B = 0,4 \text{ мкм}$. Час життя електронів у базі складає 100 нс . Розрахувати ефективність емітера, коефіцієнт переносу та коефіцієнт підсилення транзистора в прямому активному режимі. Рухливість

електронів і дірок прийміть такою: $\mu_n = 1000 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$,

$\mu_p = 300 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Яка частина базового струму переходитиме в емітер?

Розв'язок

Коефіцієнт ефективності емітера

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} N_{aB} W_B}{D_{nB} N_{aE} W_E}}.$$

Враховуючи співвідношення Ейнштейна

$$D_{nB} = \frac{k_B T}{e} \mu_n, \quad D_{pE} = \frac{k_B T}{e} \mu_p,$$

отримаємо

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\mu_p N_{aB} W_B}{\mu_n N_{aE} W_E}} = \frac{1}{1 + \frac{300 \cdot 10^{23} \cdot 0,4}{1000 \cdot 10^{24} \cdot 2}} \approx 0,9940.$$

Коефіцієнт переносу визначається формулою (3.16):

$$\begin{aligned} \varkappa &= 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_p} \right)^2 = 1 - \frac{W_B^2}{2 D_{nB} \tau_n} = 1 - \frac{e W_B^2}{2 k_B T \mu_n \tau_n} = 1 - \\ &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (0,4 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 1000 \cdot 0,1 \cdot 10^{-7}} \approx 0,9969. \end{aligned}$$

Коефіцієнт підсилення знайдемо за допомогою виразу (3.17):

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{\gamma \varkappa}{1 - \gamma \varkappa} = \frac{0,994 \cdot 0,9969}{1 - 0,994 \cdot 0,9969} \approx 109,8.$$

Відношення струму дірок із бази, що буде переходити в емітер, до повного струму бази дорівнює

$$\frac{I_{pE}}{I_B} = \frac{\frac{1-\gamma}{\gamma}}{\frac{1-\gamma}{\gamma} + 1 - \varkappa} = \frac{1-\gamma}{1-\gamma\varkappa} = \frac{1-0,994}{1-0,994 \cdot 0,9969} \approx 0,661.$$

Відповідь: $\gamma = 0,994$; $\varkappa = 0,9969$; $\beta = 109,8$; $\frac{I_{pE}}{I_B} = 0,661$.

Приклад 3.2.12. Сплавний транзистор $p-n-p$ ввімкнений у схему, зображену на рис. 3.9. Визначити колекторний струм, якщо коефіцієнт передачі струму емітера $\alpha = 0,98$ і зворотний струм колекторного переходу $I_{KB_0} = 10$ мкА.

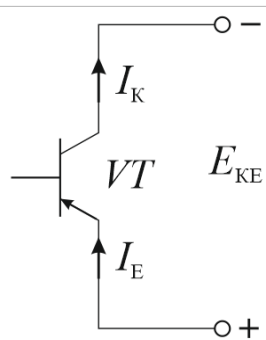


Рисунок 3.9 – Ввімкнення транзистора з розірваним ланцюгом бази

Розв'язок

Скористаємось співвідношеннями для струмів транзистора в активному режимі (3.10):

$$I_K = \alpha I_E + I_{KB_0}.$$

Оскільки ланцюг бази розірвано, то $I_B = 0$ і $I_K = I_E - I_B = I_E$. Виключаючи струм I_E із попереднього рівняння, отримаємо

$$I_K = \alpha_N I_K + I_{KB_0} \quad \text{або} \quad I_K = \frac{I_{KB_0}}{1 - \alpha}.$$

Цей струм позначається як I_{KE_0} і має назву зворотного струму колекторного переходу біполярного транзистора, ввімкненого за схемою із спільним емітером при розімкненому виводі бази.

Отже,

$$I_{KE_0} = \frac{I_{KB_0}}{1 - \alpha} = \frac{10}{1 - 0,98} = 500 \text{ мкА}.$$

Відповідь: $I_{KE_0} = 500 \text{ мкА}.$

Приклад 3.2.13. Користуючись схемою заміщення біполярного транзистора із залежним джерелом струму, ввімкненого за схемою із спільною базою (рис. 3.10), встановіть залежність між власними параметрами і параметрами системи h .

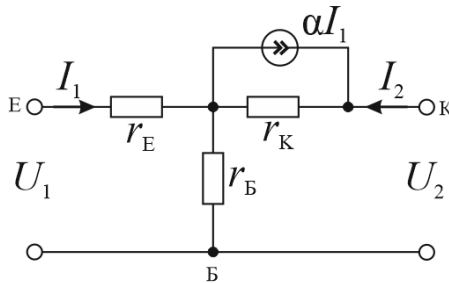


Рисунок 3.10 – Вихідна фізична малосигнальна еквівалентна схема біполярного транзистора

Розв'язок

Параметри

$$h_{11B} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{і} \quad h_{21B} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0}$$

визначаються в режимі короткого замикання на виході для змінного струму. Тому для знаходження цих параметрів перетворимо схему, наведену на рис. 3.10 у схему, зображену на рис. 3.11. Застосовуючи до цієї схеми закони Кірхгофа, знайдемо напругу на вході

$$U_1 = I_1 r_E + \frac{(1-\alpha) I_1 r_B r_K}{r_B + r_K}.$$

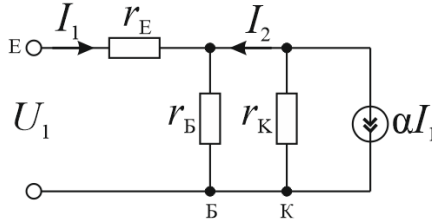


Рисунок 3.11 – Фізична малосигнальна еквівалентна схема біполярного транзистора в режимі короткого замикання на виході

Тому вхідний опір транзистора при короткому замиканні на виході для змінного струму

$$h_{11B} = \frac{U_1}{I_1} = r_E + \frac{(1-\alpha) r_B r_K}{r_B + r_K}.$$

Це точний вираз, який можна спростити. Враховуючи, що $r_K \gg r_B$, можна записати: $h_{11B} \approx r_E + (1-\alpha) r_B$.

Зі схеми на рис. 3.9 видно, що

$$I_2 + \alpha I_1 = -\frac{U}{r_K}, \quad U = \frac{(1-\alpha) I_1 r_B r_K}{r_B + r_K}.$$

Тому,

$$I_2 = -\alpha I_1 - \frac{(1-\alpha) I_1 r_B}{r_B + r_K} = -I_1 \frac{\alpha r_B + \alpha r_K + r_B - \alpha r_B}{r_B + r_K} = -I_1 \frac{\alpha r_K + r_B}{r_B + r_K},$$

звідки

$$h_{21Б} = \frac{I_2}{I_1} \bigg|_{U_2=0} = -\frac{\alpha r_K + r_B}{r_B + r_K} = -\frac{\alpha + \frac{r_B}{r_K}}{1 + \frac{r_B}{r_K}}.$$

Оскільки $\alpha \approx 1$, $\frac{r_B}{r_K} \ll 1$, то $h_{21Б} \approx -\alpha$.

Параметри $h_{12Б}$ і $h_{22Б}$ визначаються в режимі холостого ходу вхідного ланцюга для змінного струму (при розімкнених вхідних за- тискачах). При цьому струм залежного джерела струму стає рівним нулю (внаслідок того, що $I_1 = 0$). Тому

$$h_{12Б} = \frac{r_B}{r_B + r_K} \quad \text{і} \quad h_{22Б} = \frac{1}{r_B + r_K}.$$

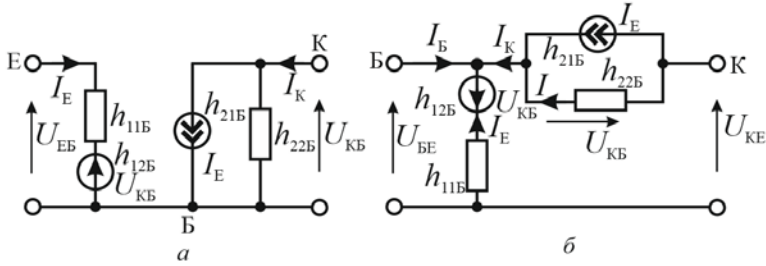
Відповідь: $h_{11Б} = r_E + \frac{(1-\alpha)r_B r_K}{r_B + r_K}; \quad h_{21Б} = -\frac{\alpha r_K + r_B}{r_B + r_K}; \quad h_{12Б} = \frac{r_B}{r_B + r_K};$

$$h_{22Б} = \frac{1}{r_B + r_K}.$$

Приклад 3.2.14. Виразити параметри транзистора $h_{12Е}$ і $h_{11Е}$ у схемі зі спільним емітером через h -параметри транзистора у схемі зі спільною базою.

Розв'язок

Схема заміщення транзистора зі спільною базою зображена на рис. 3.12, а. Якщо цей транзистор увімкнути в схему зі спільним емітером, то схема заміщення набуває вигляду, зображеного на рис. 3.12, б.



a – зі спільною базою; *б* – зі спільним емітером

Рисунок 3.12 – Еквівалентні схеми біполярного транзистора в системі h - параметрів:

За визначенням

$$h_{12E} = \left. \frac{U_{BE}}{U_{KE}} \right|_{I_B=0} = \left. \frac{-U_{KB} + U_{KE}}{U_{KE}} \right|_{I_B=0} = \left(1 - \frac{U_{KB}}{U_{KE}} \right) \bigg|_{I_B=0}.$$

Якщо $I_B = 0$, то $I_K = -I_E$ і струм (рис. 3.12, б) $I = -(1 + h_{21B})I_E$.

Оскільки h_{22B} є провідністю, то $I = h_{22B}U_{KB} = -(1 + h_{21B})I_E$.

Використовуючи другий закон Кірхгофа для вихідного контуру на рис. 3.12, б, можна записати:

$$h_{11B}I_E + h_{12B}U_{KB} - U_{KB} + U_{KE} = 0.$$

Комбінуючи два останніх вирази, отримаємо:

$$-\frac{h_{11B}h_{22B}}{1 + h_{21B}}U_{KB} + h_{12B}U_{KB} - U_{KB} + U_{KE} = 0,$$

або

$$\frac{U_{KB}}{U_{KE}} = \frac{1 + h_{21B}}{h_{11B}h_{22B} + (1 - h_{12B})(1 + h_{21B})}.$$

Отже,

$$h_{12E} = 1 - \frac{U_{KB}}{U_{KE}} = \frac{h_{11B}h_{22B} - (1 + h_{21B})h_{12B}}{h_{11B}h_{22B} + (1 - h_{12B})(1 + h_{21B})}.$$

Оскільки $h_{12B} \ll 1$ і $h_{11B}h_{22B} \ll 1 + h_{21B}$, цю формулу можна спростити:

$$h_{12E} \approx \frac{h_{11B}h_{22B}}{(1 + h_{21B})} - h_{12B}.$$

За визначенням, $h_{11E} = \left. \frac{U_{BE}}{I_B} \right|_{U_{KE}=0}$, тобто цей параметр визначається в режимі короткого замикання на виході. Замикаючи вихідні зажими в схемі на рис. 3.12, б, отримаємо схему, зображену на рис. 3.13.

Відмітимо, що в цьому випадку $U_{KB} = -U_{BE}$.

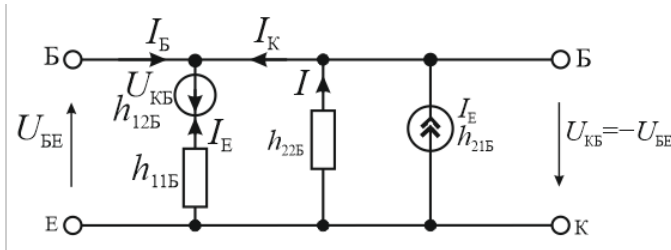


Рисунок 3.13 – Еквівалентна схема біполярного транзистора при ввімкненні зі спільним емітером у системі h -параметрів при короткому замиканні на виході

Використовуючи другий закон Кірхгофа для вхідного контуру, отримуємо

$$U_{KB} - h_{11B}I_E - h_{12B}U_{KB} = 0,$$

звідки

$$I_E = \frac{1 - h_{12B}}{h_{11B}} U_{KB}.$$

Застосовуючи перший закон Кірхгофа для вузла „Б“ (рис. 3.13), отримуємо:

$$I_{\text{Б}} + I_{\text{Е}} + h_{21\text{Б}} I_{\text{Е}} + I = I_{\text{Б}} + I_{\text{Е}} + h_{21\text{Б}} I_{\text{Е}} - h_{22\text{Б}} U_{\text{БЕ}}.$$

Отже,

$$h_{11\text{Е}} = \left. \frac{U_{\text{БЕ}}}{I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{КЕ}}=0} = \frac{h_{11\text{Б}}}{h_{11\text{Б}} h_{22\text{Б}} + (1 - h_{12\text{Б}})(1 + h_{21\text{Б}})}.$$

Внаслідок того, що $h_{12\text{Б}} \ll 1$ і $h_{11\text{Б}} h_{22\text{Б}} \ll 1 + h_{21\text{Б}}$, останній вираз приводиться до вигляду:

$$h_{11\text{Е}} \approx \frac{h_{11\text{Б}}}{1 + h_{21\text{Б}}}.$$

Відповідь: $h_{11\text{Е}} \approx \frac{h_{11\text{Б}}}{1 + h_{21\text{Б}}}$; $h_{12\text{Е}} \approx \frac{h_{11\text{Б}} h_{22\text{Б}}}{(1 + h_{21\text{Б}})} - h_{12\text{Б}}.$

Приклад 3.2.15. Встановити зв'язок між z -параметрами та y -параметрами транзистора.

Розв'язок

Рівняння для системи z -параметрів мають вигляд (3.27):

$$\begin{cases} U_1 = z_{11} I_1 + z_{12} I_2; \\ U_2 = z_{21} I_1 + z_{22} I_2. \end{cases} \quad (1)$$

Рівняння для системи y -параметрів мають вигляд (3.28):

$$\begin{cases} I_1 = y_{11} U_1 + y_{12} U_2; \\ I_2 = y_{21} U_1 + y_{22} U_2. \end{cases} \quad (2)$$

Перехід від однієї системи параметрів до іншої зручно здійснити за допомогою визначників.

Розв'язуючи рівняння системи (1) відносно I_1 та I_2 , отримуємо:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{\begin{vmatrix} U_1 & z_{12} \\ U_2 & z_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix}} = \frac{z_{22}U_1 - z_{12}U_2}{z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}} = \frac{z_{22}}{\Delta_z}U_1 - \frac{z_{12}}{\Delta_z}U_2; \\
 I_2 &= \frac{\begin{vmatrix} z_{11} & U_1 \\ z_{21} & U_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix}} = \frac{z_{11}U_2 - z_{21}U_1}{z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}} = -\frac{z_{21}}{\Delta_z}U_1 + \frac{z_{11}}{\Delta_z}U_2,
 \end{aligned} \tag{3}$$

де $\Delta_z \equiv z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$.

Зіставляючи коефіцієнти перед U_1 та U_2 рівнянь системи (2) з відповідними коефіцієнтами рівнянь (3), отримаємо шукані співвідношення:

$$y_{11} = \frac{z_{22}}{\Delta_z}; \quad y_{12} = -\frac{z_{12}}{\Delta_z}; \quad y_{21} = -\frac{z_{21}}{\Delta_z}; \quad y_{22} = \frac{z_{11}}{\Delta_z}. \tag{4}$$

Відповідь: $y_{11} = \frac{z_{22}}{\Delta_z}; y_{12} = -\frac{z_{12}}{\Delta_z}; y_{21} = -\frac{z_{21}}{\Delta_z}; y_{22} = \frac{z_{11}}{\Delta_z}$.

Приклад 3.2.16. В схемі на рис. 3.14 використовується транзистор із коефіцієнтом передачі струму бази $\beta = 19$. Визначити напругу колектор – емітер.

Дані схеми: $E_k = 24 \text{ В}; R_6 = 50 \text{ кОм}; R_H = 10 \text{ кОм}; U_{BE} = 0,6 \text{ В}.$

Розв'язок

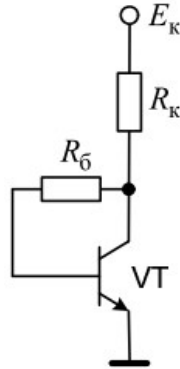


Рисунок 3.14 – Ланцюг зміщення біполярного транзистора з паралельним зворотним зв'язком за напругою

Нехтуючи струмом $I_{КБ0}$, маємо:

$$U_{KE} = E_k - I_E R_n = E_k - I_B (\beta + 1) R_n = E_k - (\beta + 1) \frac{R_n}{R_6} (U_{KE} - U_{BE}),$$

звідки

$$U_{KE} = \frac{E_k + \frac{R_n}{R_6} (\beta + 1) U_{BE}}{1 + \frac{R_n}{R_6} (\beta + 1)} = \frac{24 + \frac{10^4}{5 \cdot 10^4} \cdot (19 + 1) \cdot 0,6}{1 + \frac{10^4}{5 \cdot 10^4} \cdot (19 + 1)} = 5,28 \text{ В.}$$

Відповідь: $U_{KE} = 5,28 \text{ В.}$

Приклад 3.2.17. Визначити, чи є сумісними типові значення параметрів деякого транзистора, ввімкненого за схемою із спільною базою: $h_{116} = 30 \text{ Ом}$; $h_{126} = 4 \cdot 10^{-3}$; $h_{216} = -0,97$; $h_{226} = 10^{-6} \text{ См}$. Параметри задані для робочої точки: $U_{KB} = -5 \text{ В}$; $I_E = 1 \text{ мА}$.

Розв'язок

Необхідність попередньої перевірки сумісності усіх чотирьох h -параметрів пов'язана з тим, що вони характеризують один транзистор

і тому між ними існують певні співвідношення. В довідниках даються усереднені значення параметрів, які можуть цим співвідношенням не задовольняти. Інакше кажучи, беручи для розрахунку наведені в довідниках типові значення параметрів, можна отримати абсурдні результати.

Перевірку сумісності значень параметрів виконують, розраховуючи за допомогою цих параметрів значення Т-подібної схеми заміщення. Як критерій сумісності приймають положення про те, що всі три опори Т-подібної схеми заміщення з одним залежним джерелом повинні бути додатними.

Знайдемо власні параметри транзистора за формулами:

$$\alpha = -h_{216} = 0,97 ;$$

$$r_6 \approx \frac{h_{126}}{h_{226}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 4000 \text{ Ом} ;$$

$$\begin{aligned} r_e \approx h_{116} - h_{126} \frac{1 + h_{216}}{h_{226}} &= h_{116} - r_6 (1 - \alpha) = 30 - 4000 \cdot (1 - 0,97) = \\ &= -90 \text{ Ом} ; \end{aligned}$$

$$r_k = \frac{1}{h_{226}} - r_6 \approx \frac{1}{h_{226}} = \frac{1}{10^{-6}} = 10^6 \text{ Ом} = 1 \text{ МОм} .$$

Оскільки $r_e = -90 \text{ Ом} < 0$, наведені в умові задачі значення параметрів є несумісними. Від'ємне значення опору r_e зумовлене занадто великим значенням r_6 , а останній – великим значенням параметра h_{126} .

При несумісності параметрів як вихідні дані при розрахунку приймають будь-які три h -параметри з чотирьох, наведених у довіднику, а четвертий визначається з урахуванням вибраних значень трьох інших, задаючись додатково значеннями одного з опорів схеми заміщення транзистора. Наприклад, у випадку що розглядається, приймаємо: $h_{116} = 30 \text{ Ом}$; $h_{216} = -0,97$; $h_{226} = 10^{-6} \text{ См}$ і вважаємо, що значен-

ня опору емітера в схемі заміщення транзистора при $U_{\text{КБ}} = -5 \text{ В}$ та $I_{\text{Е}} = 1 \text{ мА}$ складає $r_{\text{е}} = 26 \text{ Ом}$.

Вважаючи $r_{\text{е}} = 26 \text{ Ом}$ і $\alpha = |h_{216}|$, знаходимо $r_{\text{б}}$ за формулою

$$r_{\text{б}} = \frac{h_{116} - r_{\text{е}}}{1 - |h_{216}|} = \frac{30 - 26}{1 - 0,97} = 133 \text{ Ом}.$$

Тепер знаходимо параметр h_{126} за формулою

$$h_{126} = r_{\text{б}} h_{226} = 133 \cdot 10^{-6} = 1,33 \cdot 10^{-4}.$$

Відповідь: $r_{\text{б}} = 133 \text{ Ом}$; $h_{126} = 1,33 \cdot 10^{-4}$.

3.3 Задачі для самостійного розв'язування

- 3.3.1 Як зміниться диференціальний опір колекторного переходу при збільшенні напруги колектора в 10 разів?
- 3.3.2 Струм емітера збільшився з $I_{\text{Е}_1} = 2 \text{ мА}$ до $I_{\text{Е}_2} = 5 \text{ мА}$. Як це вплине на диференціальний опір колекторного переходу?
- 3.3.3 Напруга колектора збільшена на 15 В. Знайти зміну напруги емітера, якщо коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою дорівнює 10^4 .
- 3.3.4 Знайти опір активної області бази, що має питомий опір $\rho_{\text{Б}} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ і товщину $W_{\text{Б}} = 0,003 \text{ см}$.
- 3.3.5 Знайти товщину бази, якщо опір її активної області дорівнює 50 Ом, а питомий опір $\rho_{\text{Б}} = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.
- 3.3.6 Транзистор типу *n-p-n* включений за схемою зі спільною базою. Напруга емітер – база $U_{\text{ЕБ}} = -0,5 \text{ В}$; напруга колектор – база $U_{\text{КБ}} = 12 \text{ В}$. Знайти напругу колектор – емітер $U_{\text{КЕ}}$.

- 3.3.7 Транзистор типу $p-n-p$ включений по схемі зі спільним емітером. Напруга база – емітер $U_{BE} = -0,8 \text{ В}$; напруга колектор – емітер $U_{KE} = 10 \text{ В}$. Знайти напругу колектор – база U_{KB} .
- 3.3.8 У транзисторі $I_E = 1 \text{ мА}$, $I_B = 20 \text{ мкА}$, $I_K = 1,02 \text{ мА}$. Визначити коефіцієнт передачі струму бази транзистора β^* .
- 3.3.9 У $n-p-n$ -транзисторі надлишкова концентрація електронів $\Delta n_E = 10^{20} \text{ м}^{-3}$; площа $p-n$ -переходів $S = 1 \text{ мм}^2$; ефективна ширина бази 50 мкм ; $\mu_n = 0,4 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$; $T = 300 \text{ К}$. Визначити струм колектора.
- 3.3.10 Визначити коефіцієнт переносу дірок через базу на низькій частоті α , якщо товщина бази $W_B = 0,004 \text{ см}$, а дифузійна довжина дірок $L_p = 0,02 \text{ см}$.
- 3.3.11 Визначити коефіцієнт передачі струму на низькій частоті в схемі зі спільною базою α транзистора, в якого питомий опір емітера $\rho_E = 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, питомий опір бази $\rho_B = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а коефіцієнт переносу $\alpha = 0,98$.
- 3.3.12 Визначити середній час прольоту дірок $t_{\text{пр(диф)}}$ від емітера до колектора за кімнатної температури. Товщина бази $W_B = 0,003 \text{ см}$. Як зміниться середній час прольоту дірок в базі, якщо замінити германієвий транзистор кремнієвим?
- 3.3.13 Чи однакові середні часи прольоту електронів і дірок через бази однакової товщини?
- 3.3.14 Як зміниться величина коефіцієнта передачі струму зі зменшенням питомого опору бази при незмінному питомому опорі емітера?
- 3.3.15 Знайти диференційний опір емітерного переходу за кімнатної температури та струму емітера $I_E = 1 \text{ мА}$.

- 3.3.16 Знайти диференційний опір колекторного переходу германієвого транзистора при напрузі колектора $U_K = 10 \text{ В}$ і струмі емітера $I_E = 2 \text{ мА}$. Товщина бази $W_B = 0,005 \text{ см}$, концентрація донорів в базі $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, дифузійна довжина дірок $L_p = 0,07 \text{ см}$. Прийняти, що коефіцієнт інжекції дорівнює одиниці.
- 3.3.17 Знайти дифузійну ємність емітера германієвого транзистора типа $p-n-p$, якщо товщина бази $W_B = 0,002 \text{ см}$, а диференціальний опір емітерного переходу дорівнює 25 Ом . Як зміниться дифузійна ємність емітера, якщо замінити германієвий транзистор на кремнієвий? Як зміниться дифузійна ємність емітера при збільшенні товщини бази кремнієвого транзистора з $W_{B_1} = 0,002 \text{ см}$ до $W_{B_2} = 0,005 \text{ см}$?
- 3.3.18 Знайти дифузійну ємність колектора германієвого транзистора типа $p-n-p$ при струмі емітера $I_E = 1 \text{ мА}$ та напрузі на колекторі $U_K = 16 \text{ В}$. Товщина бази $W_B = 0,003 \text{ см}$, концентрація донорів в базі $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Чи зміниться дифузійна ємність колектора, якщо транзистор типа $p-n-p$ замінити транзистором типа $n-p-n$?
- 3.3.19 Визначити коефіцієнт підсилення струму для $p-n-p$ -транзистора, що включений за схемою зі спільним емітером, якщо при зміні струму бази струм колектора змінився на 5 мА , а струм емітера – на $5,2 \text{ мА}$.
- 3.3.20 Визначити коефіцієнт переносу біполярного $p-n-p$ -транзистора з товщиною бази W_B і дифузійною довжиною неосновних носіїв (дірок) L_{pB} .
- 3.3.21 Транзистор типу $n-p-n$ включений за схемою зі спільним емітером. Пояснити, в якому режимі працює транзистор, якщо:
- а) напруга база – емітер $U_{BE} = -0,4 \text{ В}$ та напруга колектор – емітер $U_{KE} = -0,3 \text{ В}$;
 - б) $U_{BE} = -0,4 \text{ В}$ та $U_{KE} = -10 \text{ В}$.

3.3.22 Біполярний транзистор працює в активному режимі. Струм насичення емітера $I_{E_s} = 10^{-14}$ А; струм насичення колектора $I_{K_s} = 1,9 \cdot 10^{-14}$ А; $\alpha_N = 0,99$; $\alpha_1 = 0,5$. Напруга зовнішнього зміщення p - n -переходу база – емітер $U_{BE} = 0,65$ В, напруга зовнішнього зміщення p - n -переходу база – колектор $U_{BK} = -4,5$ В. Розрахувати струми I_E , I_B та I_K .

3.3.23 Нарисувати схеми включення зі спільною базою для транзисторів типів p - n - p і n - p - n . Показати полярності живлячих напруг для випадків роботи транзистора:

- а) в активному режимі;
- б) у режимі відсічки;
- в) у режимі насичення;
- г) в інверсному режимі.

На обох схемах показати напрямки струмів емітера I_E , колектора I_K , бази I_B для всіх режимів роботи.

Додаток А
Одиниці вимірювання фізичних величин

<i>Величина</i>	<i>Одиниця в СІ</i>	<i>Зв'язок з іншими одиницями</i>
Маса	кілограм (кг)	$1 \text{ кг} = 10^3 \text{ г} = 10^6 \text{ мг}$
Довжина	метр (м)	$1 \text{ м} = 10^2 \text{ см} = 10^9 \text{ нм} = 10^{10} \text{ Å}$
Об'єм	метр³ (м³)	$1 \text{ м}^3 = 10^3 \text{ л} = 10^6 \text{ см}^3$
Тиск	паскаль (Па)	$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 0,987 \text{ атм} = 750 \text{ Торр}$
		$1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па} = 760 \text{ Торр}$
Енергія	джоуль (Дж)	$1 \text{ Дж} = 0,2390 \text{ кал} = 10^{-3} \text{ кДж}$
		$1 \text{ еВ} = 8065,5 \text{ см}^{-1} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} =$ $= 96\,485 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} = 23\,060 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1}$

Додаток Б
Фундаментальні фізичні сталі

Величина	Значення
Заряд електрона q	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса спокою електрона m_0	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Стала Планка $\hbar$	$1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 6,5855 \cdot 10^{-16} \text{ еВ} \cdot \text{с}$
Стала Больцмана k_B	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ еВ/К}$
Число Авогадро N_A	$6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала $R = N_A k_B$	$8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$

Додаток В

Властивості напівпровідників

Таблиця В.1 – Властивості напівпровідників

<i>Параметр</i>	<i>Si</i>	<i>Ge</i>	<i>GaAs</i>
Атомний номер	14	32	31/33
Кристалічна структура, тип	алмазу		цинкової обманки
Кількість атомів, м^{-3}	$5,0 \cdot 10^{28}$	$4,42 \cdot 10^{28}$	$4,42 \cdot 10^{28}$
Атомна маса	28,08	72,6	144,63
Стала ґратки, <i>нм</i>	0,543	0,565	0,565
Густина, $10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	2,328	5,3267	5,32
Відносна діелектрична проникність	11,8	16	10,9
Точка плавлення, $^{\circ}\text{C}$	1 412	937	1 238
Теплопровідність, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	1 450	640	460
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, $\frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T}$, K^{-1}	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
Спорідненість до електрона, eВ	4,05	4,0	4,07
Власна концентрація, м^{-3}	$1,6 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1,1 \cdot 10^{13}$
Ефективна густина станів, м^{-3} в зоні провідності N_c у валентній зоні N_v	$2,8 \cdot 10^{25}$ $1,02 \cdot 10^{25}$	$1,04 \cdot 10^{25}$ $6,1 \cdot 10^{24}$	$4,7 \cdot 10^{23}$ $7,0 \cdot 10^{24}$
Ефективні маси для густини станів, в. о. електронів $\frac{m_{dn}^*}{m_e}$ дірок $\frac{m_{dp}^*}{m_e}$	1,08 0,56	0,56 0,35	0,068 0,5
Ширина забороненої зони ΔE_g			

при 300 К, еВ при 0 К, еВ	1,11 1,182	0,66 0,777	1,43 1,559
Температурний коефіцієнт ширини забороненої зони ξ , $\frac{\text{еВ}}{\text{К}}$	$-2,4 \cdot 10^{-4}$	$-3,9 \cdot 10^{-4}$	$-4,3 \cdot 10^{-4}$
Час життя неосновних носіїв, с	$2,5 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-8}
Рухливість, $\frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ електронів μ_n дірок μ_p	0,15 0,06	0,39 0,19	0,85 0,04
Коефіцієнт дифузії, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ електронів D_n дірок D_p	$3,5 \cdot 10^{-3}$ $1,31 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$ $4,4 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$ $1,1 \cdot 10^{-3}$
Питомий опір власного напівпровідника ρ , Ом $\cdot$ м	0,47	$2,3 \cdot 10^3$	10^6
Фактор виродження домішкового рівня g донорна домішка акцепторна домішка	2 4	2 4	2 2
Дебаївська температура, Θ_D , К	645	406	344
Швидкість звука, s , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$9,15 \cdot 10^3$	$5,4 \cdot 10^3$	
Енергія раманівських фононів E_R , еВ	0,063	0,037	0,035

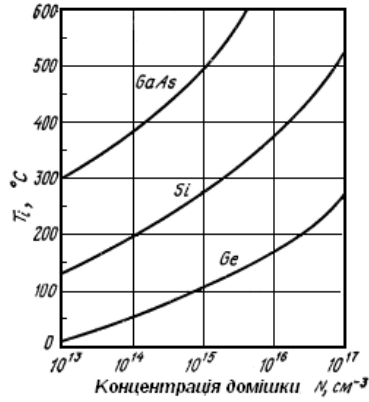


Рисунок В.1 – Залежність температури початку власної провідності напівпровідника T_i від ступеня легування