

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

«ТВЕРДОТІЛЬНІ КОМПОНЕНТИ МІКРО_ ТА
НАНОЕЛЕКТРОНІКИ»

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт та
самостійної роботи для здобувачів вищої освіти бакалавра
спеціальності «Мікро та наносистемна техніка» освітньої
програми 153 «Мікро та наносистемна техніка»

ЗАПОРІЖЖЯ

2021

ЗМІСТ

1 Фізичні явища на контактi 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
Особливості практикуму	

ФІЗИЧНІ ЯВИЩА НА КОНТАКТИ ТА ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ТІЛ

11 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

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

$em^* k^2$

де $A \equiv \frac{n}{2\pi^2 h^3} B$ – 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 *антизапiрним* в залежності від співвідношення $A_m - A_n$ – висота між роботами виходу електронів із напівпровідника і металу. Запiрний контакт метал – напівпровідник n -типу має *ширину об’ємного заряду* в напівпровіднику:

$$d = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 (A_m - e\phi_k)}{e^2 N_d}}, \quad (1.2)$$

де ε – діелектрична проникність напівпровідника;

потенціального бар’єру на межі метал – напівпровідник; N_d – концентрація донорів у напівпровіднику n -типу.

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

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

Запiрний 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* ($n_p = n_i^2$ (для n -типу), $p_n = n_i^2$ (для p -типу)):

$$n_n \quad i \quad p_p \quad i$$

$$n^2$$

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

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

Питома провідність квазінейтральної p -області

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

вазінейтральної n -області

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

агато більші за провідність збідненої 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

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

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);

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

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):

$$d = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0}{e} (\varphi_k - U) \left(\frac{1}{n_n} + \frac{1}{p_p} \right)}$$

$$d = d_n + d_p ;$$

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

де d_n і d_p – товщини областей просторового заряду в n - і p -

областях (рис. 1.1, а).

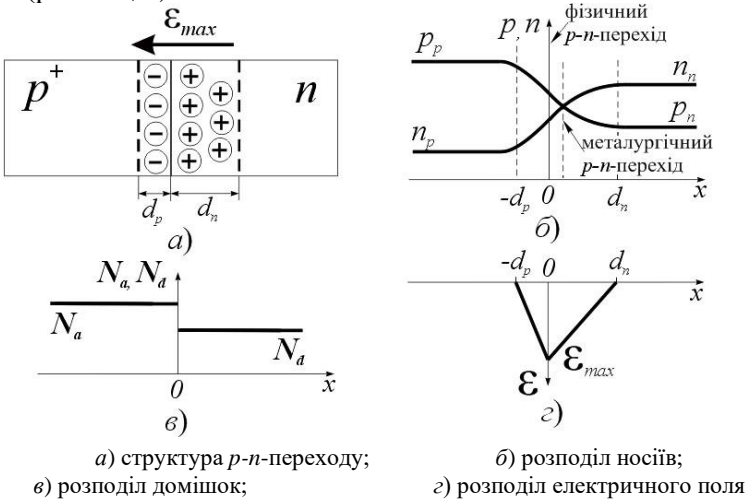


Рисунок 1.1 – Електронно-дірковий перехід у рівноважному стані

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

$$d = \sqrt[3]{\frac{3\epsilon_0\epsilon}{e} \left(\frac{1}{N'_a} + \frac{1}{N'_d} \right)^2 (\phi_K - U)}, \quad (1.9, б)$$

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.

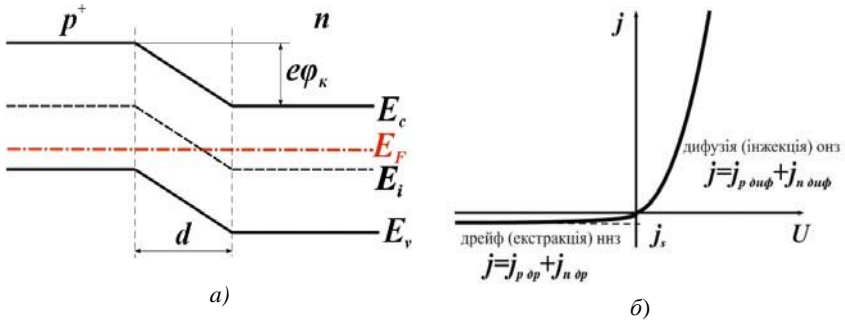


Рисунок 1.2 – Зонна діаграма електронно–діркового переходу в рівноважному стані (а) та ВАХ p - n -переходу (б)

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

$$\mathcal{E}_{\max} = -\frac{2\varphi_k}{d} \quad \text{або} \quad \mathcal{E}_{\max} = -\frac{eN_a d_p}{\epsilon \epsilon_0} = -\frac{eN_d d_n}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (1.12, a)$$

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

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon \epsilon_0} (d_n - x), \quad x > 0; \quad (1.12, б)$$

та

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{eN_a}{\epsilon \epsilon_0} (d_p + x), \quad x < 0. \quad (1.12, в)$$

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

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

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 інжекттованих носіїв у базу з емітера:

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

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:

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

При зворотному зміщенні – зменшуються:

$$\left(\frac{-eU}{k_B T} \right) \quad \left(\frac{-eU}{k_B T} \right)$$

$$\Delta p_n(0) = p_n \left(e^{k_b T} - 1 \right); \quad \Delta n_p(0) = n_p \left(e^{k_b T} - 1 \right). \quad (1.17, \delta)$$

Ці значення концентрацій використовуються як граничні умови на p -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 :

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

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):

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

– дрейфовий струм дірок $j^{p_{\text{др}}} = e \mu^p p^n \mathcal{E}^{\text{max}}; \quad (1.21)$

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

$$- \text{ дрейфовий струм електронів } j_{\text{др}} = e\mu n E_{\text{max}}. \quad (1.23)$$

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

$$n(\mathbf{r}) = N_c e^{\frac{E_F - E_c^0 + e\varphi(\mathbf{r})}{k_B T}} = n e^{\frac{e\varphi(\mathbf{r})}{k_B T}}, \quad (1.25)$$

$$p(\mathbf{r}) = N_v e^{\frac{E_v^0 - e\varphi(\mathbf{r}) - E_F}{k_B T}} = p e^{-\frac{e\varphi(\mathbf{r})}{k_B T}}.$$

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 *збідненого* шару. В останньому випадку, якщо вигин зон достатньо великий (як правило, більший за $\frac{\Delta E_g}{2}$, де ΔE_g – ширина заборони

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*.

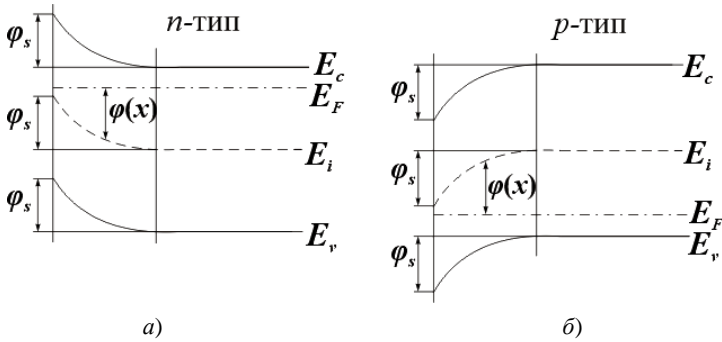


Рисунок 1.3 – Енергетичні діаграми на поверхні напівпровідника n -типу (а) та p -типу (б), режим збіднення

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

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 k_B T}{2e^2 n_i}}. \quad (1.29)$$

Залежність концентрації власних носіїв заряду від температури виражається формулою

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

$$\text{де } A^* = 0,5 \cdot 10^{16} \left| \frac{m^* m^*}{dn_2 dp} \right| T^2 \cdot \left(\frac{m_e}{m_e} \right)^3$$

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

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

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

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

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

12 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

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} = \frac{1}{e N_a \mu_p},$$

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

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

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

Приклад 1.2.2. В германієвому p - n -переході питома провідність p -області $\sigma_p = 10^4 \text{ См} \cdot \text{м}$, а питома провідність n -

області $\sigma_n = 10^2 \text{ См} \cdot \text{м}$. Рухливості електронів μ_n і ді-

рок μ_p у германії відповідно дорівнюють 0,39 і 0,19 $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}$. Концентрація власних носіїв в герма-

нії 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
 $j = 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$.

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

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

Відомо, що $D = k_B T \mu$ та $D = k_B T \mu$ (рівняння Ейнштейна).

$$p \quad \mu_p \quad p \quad n \quad \mu_n \quad n$$

Відповідно,

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

Відношення діркової складової зворотного струму насичення до електронної

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

- б) Напругу, яку необхідно прикласти до p - n -переходу для отримання струму густиною $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, знайдемо з рівняння ВАХ p - n -переходу:

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

$$\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{e} \left(\frac{10^6}{j_s} + 1 \right)$$

Тоді $U = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \ln \left| \frac{0,31}{0,31 + 1} \right| = 0,328 \text{ В.}$

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

приходиться 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:

$$N = 4,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}, \quad n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

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

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

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⁻¹.

Використаємо формулу залежності власної концентрації носіїв заряду від температури:

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

де N_c , N_v – густини станів у 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 експоненціальним 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 $\sigma = 800 \text{ СМ}$ і $\sigma = 240 \text{ СМ}$ 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

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

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: $\varphi_k = 0,688 \text{ В}; \quad d = 0,166 \text{ мкм}; \quad d_p = 0,111 \text{ мкм};$

$d_n = 0,055 \text{ мкм}; \quad \varepsilon_{\text{max}} = 8,29 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}; \quad \varphi_1 = 0,188 \text{ В};$

$\varphi_2 = 5,688 \text{ В}.$

Приклад 1.2.6. Зворотний струм насичення p - n -переходу за температури $T_1 = 293 \text{ К}$ $I = 10^{-14} \text{ А}$. 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

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

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 $T_2 = 398 \text{ К}$:

$$\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 398}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \left(\frac{10^{-3}}{10^{-14}} + 1 \right)$$

$$U_2 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \ln | 10^{-14} \cdot 10^5 + 1 | = 0,5 \text{ B.}$$

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

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

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 $n_i = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$;

$$\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \qquad \frac{D}{n} \qquad 0$$

$$04 \text{ c} ; \quad D_p = 0,0015 \frac{\text{M}^2}{\text{c}} ; \quad L_n = 100 \text{ MKM} ;$$

$$L_p = 60 \text{ MKM} ; N^d = 10^{21} \text{ M}^{-3} ; N^a = 10^{23} \text{ M}^{-3} .$$

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

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

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 - n -переході $\varphi_k = \frac{e}{2\varepsilon_0\varepsilon} \left(n_n d_n^2 + p_p d_p^2 \right)$, де ε – діелектрична

проникність напівпровідника; d_n і d_p – шири-

на 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 - n -переходів за відсутності та наявності зовнішньої напруги. Отримайте вираз для бар'єрної ємності симетричного та несиметричного p - n -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 $C_{\delta} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}$, де

S – площа переходу, знайдемо бар'єрну ємність симетричного та несиметричного p - n -переходів

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

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 зрівняється з концентрацією електронів? Оцінити товщину приповерхневого шару, в якому $p(x) > n(x)$, якщо $e\varphi_s = 0,5 \text{ eV}$, концентрація електронів в об'ємі $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $T = 300 \text{ K}$, $b = \frac{\mu_n}{\mu_p} = 2,9$.

Розв'язок

Рівняння Пуассона з урахуванням носіїв заряду обох знаків:

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

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

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

$k_B T$

Точка $x = x_i$, в якій $n(x_i) = p(x_i) = n_i \approx 0,3 \text{ В}$.

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

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

$y_i \ll 1$ і $p \ll n$, маємо

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

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

13.3 Задачі для самостійного розв'язування

1.3.1 Визначте контактну різницю потенціалів ϕ_k кремнієвого p - n -

переходу при $T = 300 \text{ К}$, якщо $N = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ 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:

- контактну різницю потенціалів (висоту потенціального бар'єру) при $T = 300\text{ К}$;
- густину зворотного струму насичення;
- відношення діркової складової зворотного струму насичення до електронної;
- напругу, що забезпечує густину прямого струму $10^5\text{ мА}/\text{см}^2$.

1.3.4 В германієвому p - n -переході питома провідність p -області $\sigma_p = 10^4\text{ См}/\text{м}$, а питома провідність n -області $\sigma_n = 10^2\text{ См}/\text{м}$. Рухливості електронів μ_n і дірок μ_p у германії відповідно до-

рівнюють $0,39$ і $0,19 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Концентрація власних носіїв в ге-

рманії 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 потенці-

ального 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 $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ 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 $N = 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Площа по-

перечного 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 $\mu_p = 0,2 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, дифузій-

ні довжини неосновних носіїв заряду $L_n = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$,

$L_p = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, 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 $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\varepsilon = 12,5$,

$$\phi_k = 0,6 \text{ eВ}, S = 10^{-4} \text{ см}^2.$$

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 ;

г) 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 $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$,

$n_n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $L_p = 0,1 \text{ см}$, $L_n = 0,01 \text{ см}$, $S = 10^{-4} \text{ см}^2$,

$j_s = 100 \text{ мкА}$.

1.3.16 В кремнієвому p - n -переході концентрація домішки в області p -типу дорівнює $N = 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, в області n -типу дорівнює a

$N_d = 3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, 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 , $p_p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $n_n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$,

$D_p = 50 \text{ см}^2 \text{ с}$, $D_n = 100 \text{ см}^2 \text{ с}$, $L_p = 0,1 \text{ см}$, $L_n = 0,01 \text{ см}$. Ви-

значте 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 $n = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Час життя неосновних носіїв заряду $\tau_n^i = 75$ мкс та

$\tau_p = 150$ 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 інжектованих 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 $\sigma_p = 10^3 \text{ См } \cdot \text{м}$ та n -області $\sigma_n = 20 \text{ См } \cdot \text{м}$. Час життя

неосновних носіїв заряду 5 та 1 мкс у p - та n -областях відповідно. Температура $T = 300 \text{ К}$, концентрація власних носіїв за-

ряду $n = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, рухливість електронів

$$\mu_n = 0,12 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}, \text{ рухливість дірок } \mu_p = 0,05 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}.$$

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 рівномір-но леговані області: концентрація домішки в емітері 10^{25} м^{-3} , в базі $- 10^{22} \text{ м}^{-3}$, в колекторі $- 10^{20} \text{ м}^{-3}$. 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 $D_{nB} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{с}$, дірок в емітері $-$

$D_{pE} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}$, электронів 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 хара-

ктеризує 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

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

s

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 $R_б$ має вигляд:

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

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 $A_m \gg A_n$) приконтактного 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 металу 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, *a, z*), 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 Шоттки*.

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, a ($A_n < A_m$) 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 ($x = d$).

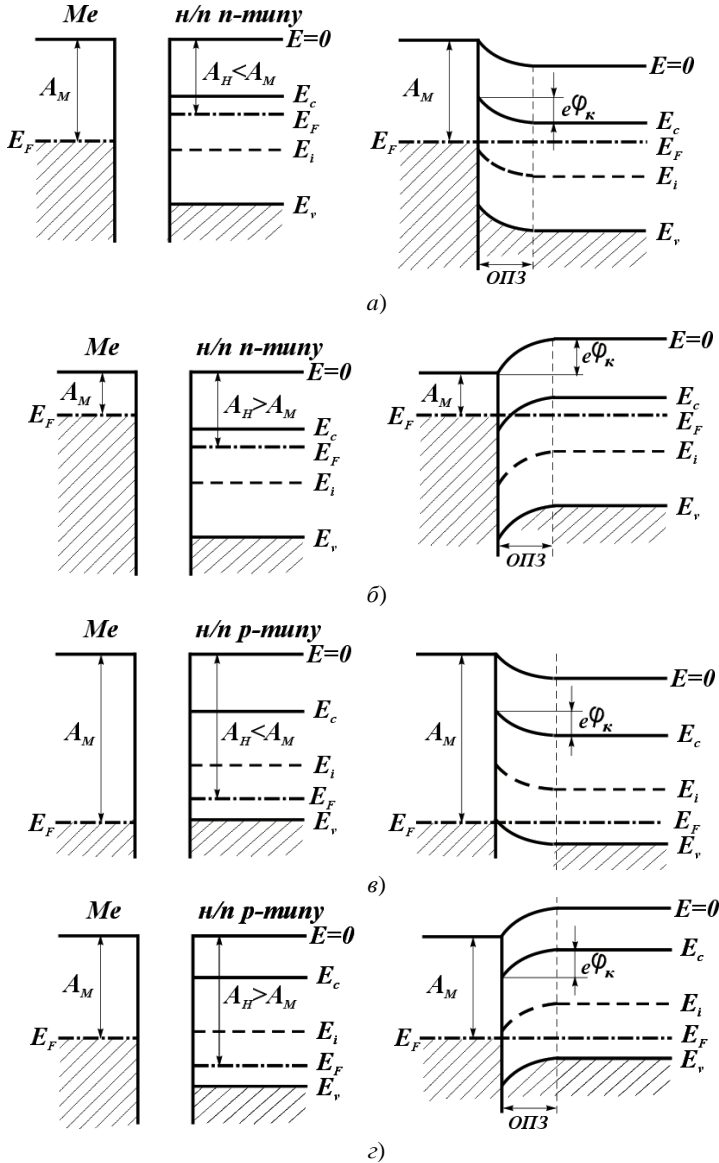


Рисунок 2.1 – Зонна діаграма метала, напівпровідника та їх контакту

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

$$n_s = n_0 e^{-\frac{e\varphi_0}{k_B T}} = n_0 e^{-\frac{\varphi_0}{\Phi_B}}, \quad (2.13)$$

n_0 – рівноважна концентрація основних носіїв у напівпровіднику

$$n_0 = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_{c0} - E_F}{k_B T}}, \quad (2.14)$$

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 p -типу є *омічним*. Система, що складається з $n-p$ -шарів, називається *базою* діода. Шар p -типу вводиться для зменшення опору бази.

Еквівалентна схема діода Шотткі наведена на рис. 2.2, в, де R_δ – *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.

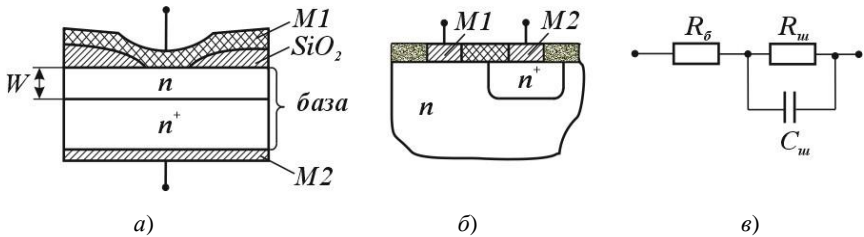


Рисунок 2.2 – Структура дискретного (а) та інтегрального (б) діодів Шоттки, еквівалентна схема діода Шоттки (в)

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

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

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

де a – радіус точкового контакту.

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

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

гою:

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

Тоді з урахуванням того, що $I = I_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$, даний вираз можна пред-

ставити 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 обкладінок якого є метал, а іншою (уявною) обкладіною 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

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

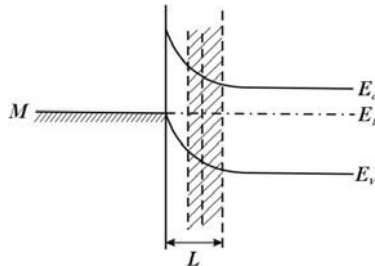


Рисунок 2.3 – Структура контакту метал – напівпровідник, що пояснює сенс $C_{\text{ш}}$

З формули (2.20) видно, що ємність $C_{\text{ш}}$ залежить від концент-

рації 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:

$$\left. \begin{aligned}
 I_{\text{Ш}} &= C_{\text{Ш}} \frac{dU_{\text{Ш}}}{dt} + \frac{U_{\text{Ш}}}{R_{\text{Ш}}} + I'_{\text{Ш}}; \\
 I'_{\text{Ш}} &= I_s \left(e^{\frac{eU_{\text{Ш}}}{m k_B T}} - 1 \right); \\
 &= C^0
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 C_{\text{Ш}} &= \frac{\text{Ш}}{\sqrt{1 + \frac{U_{\text{Ш}}}{W}}}; \\
 R &= \rho \frac{\text{Ш}}{S}; \\
 U_6 &= I_{\text{Ш}} R_6,
 \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

де m – коефіцієнт неідеальності діода Шотткі. Визначається експериментально.

Отже, схема заміщення (рис. 2.4) і система рівнянь (2.21) пред-

ставляють собою модель діода Шотткі.

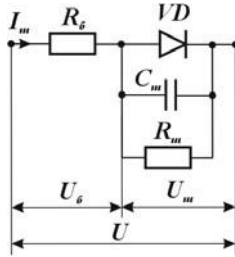


Рисунок 2.4 – Схема заміщення для моделі діода Шотткі

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 зміщенні, 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.

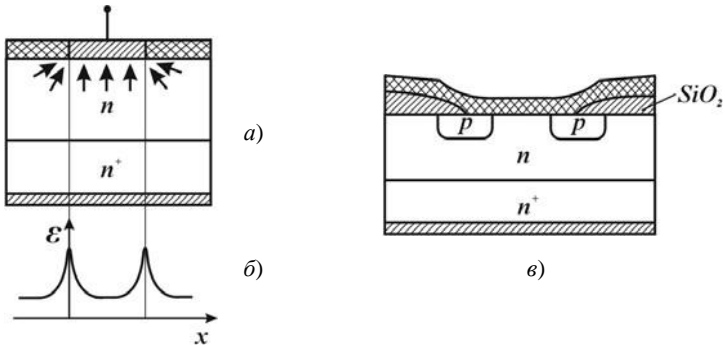


Рисунок 2.5 – Структура діода Шотткі (а), розподіл напруженості електричного поля на контакті (б) та конструкція діода Шотткі з охоронним p - n -переходом (в)

Деякі характеристики діодів Шотткі:

Залежність концентрації носіїв у збідненому шарі напівпровідника від значення потенціалу:

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

$$\varphi = \frac{1}{2}(A - \chi) - \text{бар'єр Шотткі};$$

$$\varphi_s^0 = \frac{1}{e} \int_{s}^m (A - A_n) - \text{поверхневий потенціал};$$

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

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

$$I_s = SA^* T^2 e^{\frac{k_B T}{e\varphi_s^0}} - \text{струм насичення ідеального діода};$$

$$I_s = SA^* T^2 e^{\frac{-e\varphi_s^0 - \Delta\phi}{k_B T}} - \text{зворотній струм реального діода Шотткі};$$

$$\Delta\phi = \beta_{\text{Ш}} \sqrt{\varphi_s^0 \pm U} - \text{зниження бар'єра Шотткі за рахунок ефекту Шотткі};$$

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

$$\mathcal{E}_{\text{max}} = \frac{eN_d}{\varepsilon_0 \varepsilon} L - \text{максимальна напруженість електричного поля на}$$

бар'єрі Шоттки;

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

Максимальна добротність діода Шоттки:

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

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 $I_s = 25 \text{ мкА}$, працює при

прямій напрузі, що дорівнює $0,1 \text{ В}$ при $T = 300 \text{ К}$.

Визначити:

а) опір діода постійному струму R_0 ;

б) диференціальний опір $r_{\text{диф}}$.

Розв'язок

Знайдемо струм діода при прямій напрузі $U = 0,1 \text{ В}$ 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

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

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

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

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

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:

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

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 відно-
шення 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

$$\left(D \quad D \quad \left(\frac{eU}{k_B T} \right) \right) \quad n^2 \quad n^2$$

$$j = e \left| \begin{array}{cc} -n & n_p \\ L_n & L_p \end{array} + \frac{1}{e^{k_b T} - 1} \right| \quad \text{та} \quad n_p = \frac{i}{N_a}; \quad p_n = \frac{i}{N_d},$$

маємо

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

звідси

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

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

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

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

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):

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

де K – деякий коефіцієнт, рівний

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

Знаходимо зворотню напругу, при якій $C_{\sigma}=50$ пФ:

$$50 \cdot 10^{-12} = \frac{3,35 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{(U_{зв} + 0,082)^2}},$$

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 бі-

льша концентрації донорів N_d . В p -області висока концентрація дірок

p_p , а в n -області – висока концентрація електронів n_n і низька кон-

центрація дірок p_n (рис. 1.1, б). Електрони і дірки рекомбінують в об-

ласті 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 зменшу-

ється до величини $e(\varphi_k - U_{np})$. Отже, дифундувати може більша кількість дірок з p -області в n -області і більша кількість електронів з n -

області в p -область. Напряга 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:

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

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

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

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

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

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:

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

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:

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

Повний струм враховує площу переходу S :

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

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:

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

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.

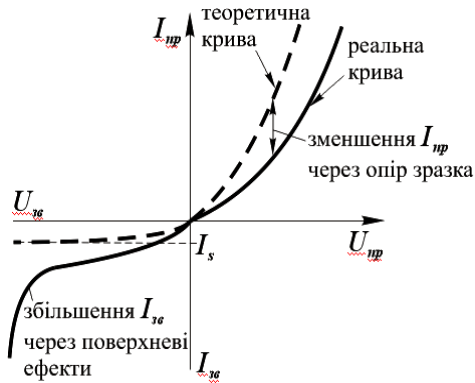


Рисунок 2.6 – Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діоду

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

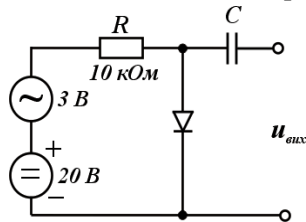


Рисунок 2.7 – Електрична схема для задачі 2.2.6

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

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

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

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 $I_s = 10 \text{ мкА}$.

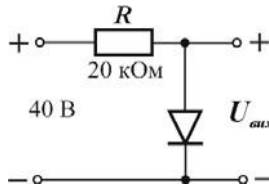


Рисунок 2.8 – Електрична схема для задачі 2.2.7

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

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

Βιθνοειδής: $f_1 = 5 \text{ κГц}$; $f_2 = 50 \text{ ΜГц}$.

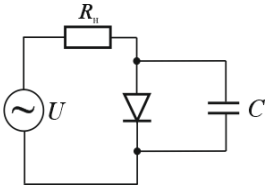
Приклад 2.2.9. Сплавний діод працює в найпростішій схемі випрямлення з опором навантаження $R_H = 10 \text{ кОм}$ (рис. 2.9).

Діод має параметри $R_{пр} = 40 \text{ Ом}$, $R_{зв} = 400 \text{ кОм}$ і

$C = 80 \text{ пФ}$. Знайти, на якій частоті випрямлений струм за рахунок впливу ємності діода зменшується вдвічі.

Розв'язання

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



$$I_{пр. \max} \approx \frac{U_{\max}}{R_H + R_{пр}} \approx \frac{U_{\max}}{R_{пр}}$$

і

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

На високій частоті як і раніше

Рисунок 2.9 – Електрична схема для задачі 2.2.9

$$I_{пр} \approx \frac{U}{R_H}, \quad \text{а} \quad I_{зв} \approx \frac{U}{Z_{зв}}$$

При зменшенні $I_{випр}$ вдвічі повинно бути $I_{зв} \approx 0,5 I_{пр}$, тому

$Z_{зв} = 2R_H$. Можна вважати, що $Z = \sqrt{R_H^2 + X_C^2}$, і звідси

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

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

$$f = \frac{1}{2\pi X_C C} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,73 \cdot 10^4 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,384 \cdot 10^{-6}} \approx 115 \text{ кГц}$$

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

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

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

$$I = 9,3 \cdot 10^{-5}$$

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

$$\phi_s^0 = k T \ln \frac{n_0}{n_s}$$

$$s \quad \frac{-B}{e} \ln \frac{0}{n_s} = 0,0258 \cdot \ln 10^{15} = 0,12 \text{ B.}$$

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

s

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

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

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

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

Розв'язок

Напруженість електричного поля на поверхні напівпровідника

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

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

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 $\mathcal{E} = 8,5 \cdot 10^2 \frac{\text{В}}{\text{см}}$. Концен-

трація 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:

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

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

$$\mathcal{E} = \frac{eN_d}{\epsilon_0 \epsilon} (L - x),$$

звідки

$$L = x + \frac{\epsilon_0 \mathcal{E}}{eN_d} \mathcal{E}.$$

Тоді для напруженості поля на межі контакту матимемо

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{eN_d}{\epsilon_0 \epsilon} \left(\frac{\epsilon_0 \mathcal{E}_{\max}}{eN_d} \right) = \mathcal{E}_{\max} + \frac{eN_d}{\epsilon_0 \epsilon} \cdot \frac{\epsilon_0 \mathcal{E}_{\max}}{eN_d} \cdot \mathcal{E}_{\max} = \mathcal{E}_{\max} + 8,5 \cdot 10^4 + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22} \times 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 16 \times 5 \cdot 10^{-7} = 5,7 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

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 $\phi^0 = 0,8 \text{ В}$ і концентрація дірок у n -базі складає 10^5 см^{-3} . Концентрація власних носіїв заряду $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, діелектричність кремнію $\epsilon = 12$.

Розв'язок
Відповідно до закону „діючих мас“ $n^2 = n_i p$. Тому

$$n^2 = 10^{20}$$

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

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:

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

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

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

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

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

Приклад 2.2.16. Діод Шотткі виготовлено на основі контакту кремнію n -типу провідності з питомим опором $\rho_6 = 3,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ та електронною спорідненістю

$\chi = 3,5 \text{ еВ}$ і металу, що має роботу виходу

$A_m = 4,5 \text{ еВ}$. У кремнії $E_c - E_F = 0,2 \text{ еВ}$. Площа контакту $S = 10^{-4} \text{ см}^2$. Рухливість електронів $\mu = \text{см}^2$

$n = 1400 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{В} \cdot \text{с}}$. 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

$$\varphi_s^0 = \frac{1}{e} (A_n - A_m) = \frac{1}{e} A_n - \frac{1}{e} A_m = \frac{1}{e} (\chi_n + (E_n - E_m)),$$

маємо

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

Концентрація домішки в базі за умови, що всі донори йонізовані

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

За умовою задачі $U = 0$, тому

$$C_{ш} = S \sqrt{\frac{e \varepsilon \varepsilon_0 N_d}{2 \varphi_s^0}} = 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,28 \cdot 10^{21}}{2 \cdot 0,8}} =$$

$$= 1,17 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 1,17 \text{ пФ}.$$

Відповідь: $C_{ш} = 1,17 \text{ пФ}$.

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 $\varepsilon = 16$.

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

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

звідки

$$\varphi_s^0 = \frac{enL^2}{2\varepsilon_0\varepsilon}$$

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

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

Тепер розрахуємо концентрацію електронів на поверхні напівпровідника

$$\begin{aligned} n_s &= N_c e^{-\frac{(E_F - E_c) + e\varphi^0}{k_B T}} = \left| \frac{2\pi m^* k T}{h^2} \right|^{3/2} e^{-\frac{(E_F - E_c) + e\varphi^0}{k_B T}} = \\ &\left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{(6,62 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{3/2} \cdot e^{-(0,2+0,25)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = \\ &= 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{(6,62 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{3/2} \cdot e^{-0,45} = \\ &= 7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}. \end{aligned}$$

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

Приклад 2.2.18. При зворотному зміщенні $U_{зв} = 20 \text{ В}$ крізь діод Шотт-

ткі тече струм $2 \cdot 10^{-7}$ А. За цих умов на частоті

$f = 750$ кГц діод має максимальну добротність

$Q_{\max} = 2 \cdot 10^3$. Площа контакту $S = 5 \cdot 10^{-5}$ см². 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

$$C_{Ш} = \frac{1}{\omega_{Q_{\max}} \sqrt{R_6 R_{Ш}}} = \frac{1}{2\pi f \sqrt{R_6 R_{Ш}}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,29 \cdot 10^5}} = 6,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 6,6 \text{ нФ}.$$

Визначаємо робочий діапазон частот за формулою:

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

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

$$= 0,13 \text{ Гц};$$

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

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

$$= 2,12 \cdot 10^6 \text{ Гц}.$$

Питомий опір бази знайдемо з виразу:

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

при цьому прийmemo 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: $C_{\text{III}} = 6,6 \text{ нФ}$; $R_6 = 8 \text{ мОм}$; $R_{\text{III}} = 1,29 \cdot 10^5 \text{ Ом}$;

$$f_{\min} = 0,13 \text{ Гц}; f_{\max} = 2,12 \cdot 10^6 \text{ Гц}; \rho_6 = 0,11 \text{ мкОм} \cdot \text{м}.$$

Приклад 2.2.19. За температури $T = 300 \text{ К}$ і зворотному зміщенні

$U_{\text{зв}} = 9 \text{ В}$ максимальна добротність діода Шоттки

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 просторо-

вого 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

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

Розв'язок

Розрахуємо значення коефіцієнта Шотткі:

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

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

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

Звідси

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

i

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

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

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

Максимальна добротність діода Шотткі:

$$Q_{\text{max}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_{\text{Ш}}}{R_{\sigma}}}$$

звідки опір діода Шотткі

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

Зворотний струм реального діода Шоттки

$$I_{зв} = \frac{U_{зв}}{R_{III}} = A^* T^2 S e^{-\frac{e(\phi_6 - \Delta\phi)}{k_B T}},$$

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

$$\ln \frac{U_{зв}}{A^* R_{III} T^2 S} = -\frac{e(\phi_6 - \Delta\phi)}{k_B T},$$

звідки величина бар'єру Шотткі

$$\begin{aligned} \phi_6 = \Delta\phi - \frac{eU}{k_B T} - \ln \frac{U_{зв}}{A^* R_{III} T^2 S} &= 0,035 - \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \times \\ &\times \ln \frac{9}{140 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 10^8 \cdot 300^2 \cdot 10^{-4}} = 0,975 \text{ В}. \end{aligned}$$

Вольт-амперна характеристика реального діода Шотткі

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

де струм насичення

$$I_s = \frac{e\phi_6}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,975}$$

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

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

$$\left(\quad \right)$$

реального діода Шотткі.

Відповідь: $\Delta\phi = 0,035 \text{ В}; \quad R_{III} = 4 \cdot 10^8 \text{ Ом}; \quad \phi_6 = 0,975 \text{ В};$

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

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 $U = -0,1 \text{ В}$ 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 $-0,1 \text{ В}$; б) 0,2 В та $-0,2 \text{ В}$; в) 0,3 В та $-0,3 \text{ В}$.
- 2.3.3 Визначити струм насичення діода, якщо при прямій напрузі $U_{\text{пр}} = 0,1 \text{ В}$ струм $I_{\text{пр}} = 1,4 \text{ мА}$. 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 $l_n = 1,5 \text{ мкА}$, $l_p = 2 \text{ мкА}$. Дифузійна довжина дірок в n -області $L_p = 30 \text{ мкА}$, електронів в p -області $L_n = 20 \text{ мкА}$. Коефіцієнт дифузії дірок $D_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}$, електронів – $D = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}$. 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 областей 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. Области 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 $T = 300 \text{ K}$, 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 $0,2 \text{ В}$ (через $0,05 \text{ В}$).

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 -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:

- а) від 20 до 80°C для германієвого діода;
- б) від 20 до 150°C для кремнієвого діода.

Діоди Шоттки

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, $\epsilon = 12,5$, ро-

бота виходу з металу $A_m = 4,6$ еВ, робота виходу з напівпровідника $A_n = 4,3$ еВ, площа контакту $S = 10^{-4}$ см². 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 $A_n = 4,3 \text{ eV}$ відповідно до діодної теорії при

$$N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

2.3.17 Визначити опір бази діода Шоттки R_g на основі електронного

кремнію з концентрацією домішки $N^d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Площа конта-

кту $S = 10^{-5} \text{ см}^2$, товщина бази $W = 10 \text{ мкм}$.

2.3.18 Визначити диференціальний опір діода Шоттки 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 Шоттки за температури $T = 300 \text{ К}$, якщо контактує напівпровідник n -типу провідності, що має електронну спорідненість $\chi = 3,1 \text{ eV}$ і метал з ро-

ботю виходу $A_m = 4,0 \text{ eV}$. 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 Шоттки 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 Шоттки, 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 ($\varepsilon = 12$), якщо концентрація електронів у об'ємі напівпровідника $n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, висота потенціального бар'єру $\varphi_s^0 = 0,5 \text{ В}$. До контакту прикладено зворотне 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 нульово-

му зміщенні $1,38 \text{ пФ}$. Ефективна стала $A^* = 110 \frac{\text{А}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^2}$. Визна-

чити:

- 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 змі-

щення 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*.

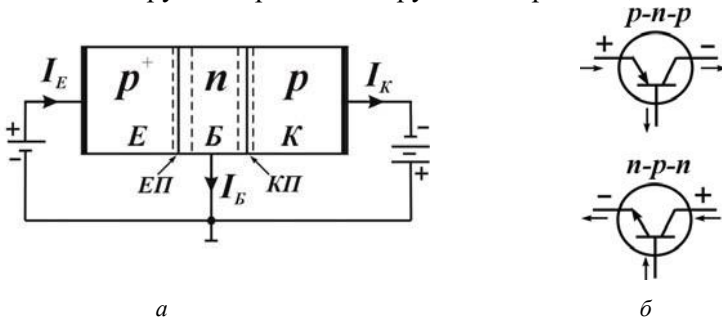


Рисунок 3.1 – Транзистор типу p^+-n-p :

а – структура транзистора;

б – умовне позначення.

Конструктивно біполярний транзистор (БТ) є сукупністю двох взаємодіючих $p-n$ -переходів, ввімкнених назустріч один одному. Кожен 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 (прямозміщені);
- ❖ *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 інжекттованих 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 інверс-

ному вмиканні транзистора прямому колекторному струму I_2 буде

відповідати емітерний струм $\alpha_I I_2$, де α_I – *коефіцієнт передачі в ін-*

версному вмиканні. Отже, струми емітера I_E та колектора I_K в загал-

ьному випадку складаються з інжектуюмого (I_1 або I_2) і екстрагуємого ($\alpha_N I_1$ або $\alpha_I I_2$) струмів:

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

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

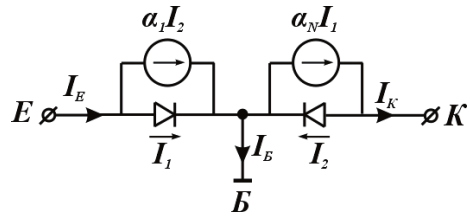


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема біполярного транзистора

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:

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

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

З формул (3.5) – (3.6) видно, що $I_{E_0} \square I'_{E_0}$, $I_{K_0} \square I'_{K_0}$. Відмін-

ність, 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 емітерно-

му ланцюгу ($U_E = 0$).

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

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

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \quad I_{K_0} \left(\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \\
 & \left(\frac{eU_E}{k_B T} \right) \quad \left(\frac{eU_K}{k_B T} \right) \\
 I_K = \alpha_N I'_{E_0} \left| e^{k_B T} - 1 \right| - I'_{K_0} \left| e^{k_B T} - 1 \right|, & \quad (3.8) \\
 & \left(\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

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);

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

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

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

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

$$U = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_E}{I'_{E_0}} + 1 \right)$$

$${}_E \frac{1}{e} \ln \frac{1}{I'_{E_0}}. \quad (3.13)$$

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

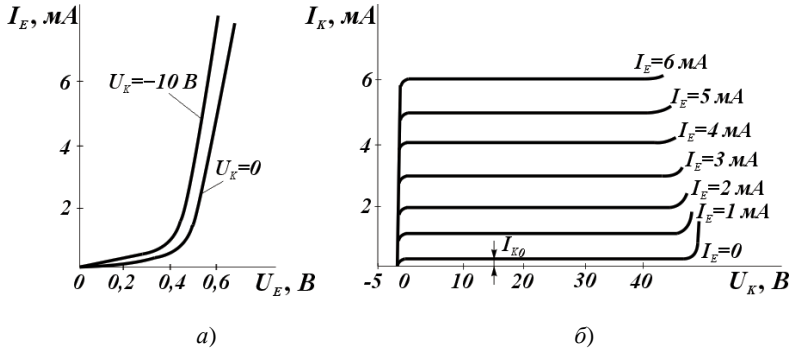


Рисунок 3.4 – Вольт-амперні характеристики $p-n-p$ БТ в активному режимі

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

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

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 ;

$$\square = \frac{dI_{pE}}{dI_E} \quad \text{або} \quad \square = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_p} \right)^2 \quad (3.16)$$

– *коефіцієнт перенесення*, тобто частка емітерного діркового струму I_{pE} , що без рекомбінації дійшла до колекторного переходу (W_B – тов-

щина базової області);

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

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

– диференціальний опір емітерного переходу:

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

в умовах короткого замикання ($U_E=0$) $r_E = \frac{dU_E}{dI_E} = \frac{\Phi_T}{I'_{E0}}, \quad (3.18 \text{ б})$

в умовах холостого ходу ($I_E=0$) $r_E = \frac{dU_E}{dI_E} = \frac{\Phi_T}{I_{E0}}; \quad (3.18 \text{ в})$

– диференціальний опір колекторного переходу:

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

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

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

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

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

рБ

– 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) ви-

значається 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):

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

– 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 стру-	$\Delta I_K = \beta = \alpha$ ($\beta \gg 1$)	$\Delta I_K = \alpha$ ($\alpha < 1$)	$\Delta I_E = 1 = \beta$ ($\beta \gg 1$)
мом $I_{вих} / I_{вх}$	$\frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$ $\frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$ $1 - \alpha$	$\frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$	$\frac{\Delta I_E}{\Delta I_B}$ $\frac{\Delta I_E}{\Delta I_B}$ $\frac{\Delta I_E}{\Delta I_B}$ $1 - \alpha$ α

Підсилення за на-
пругою $K_U = U_{вих} / U_{вх}$

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	<ul style="list-style-type: none"> – 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. 	<ul style="list-style-type: none"> – добрі температурні та частотні властивості; – висока допустима напруга. 	<ul style="list-style-type: none"> – великий вхідний опір; – малий вихідний опір.
Недоліки	<p>дещо гірші частотні та температурні властивості, ніж у схемі зі спільною базою.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – мале підсилення за струмом, ($\alpha < 1$); – малий вхідний опір; – необхідні два різних джерела напруги для живлення. 	<ul style="list-style-type: none"> – 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).

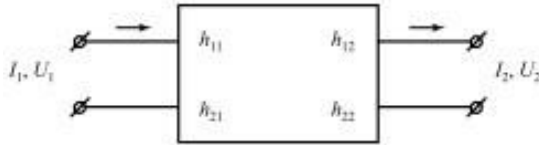


Рисунок 3.5 – Схема чотирьохполюсника

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:

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

Вимірювання z -параметрів здійснюють у режимі *холостого хо-*

∂y на вході ($I_1=0$) і виході ($I_2=0$). Реалізувати режим розімкнутого

входу $I_1 = 0$ для біполярного транзистора достатньо просто (опір емі-

терного переходу складає всього десятки ом, і тому розмикаючий опір у ланцюзі емітера в декілька кілоом дозволяє вважати $I_1 = 0$). Реалізу-

вати 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 у-параметрів. Задамо як вхідні параметри біполярного транзистора як чотирьохполосника 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:

$$y_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{та} \quad y_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{U_1=0} \quad - \text{вхідна і вихідна провідності};$$

$$y_{12} = \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{U_1=0} \quad \text{та} \quad y_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0} \quad - \text{провідності зворотної та прямої пере-}$$

дач.

Вимірювання у-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:

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

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

цюзі;

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

дному ланцюзі;

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

вході.

Еквівалентна схема чотирьохполосника 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.

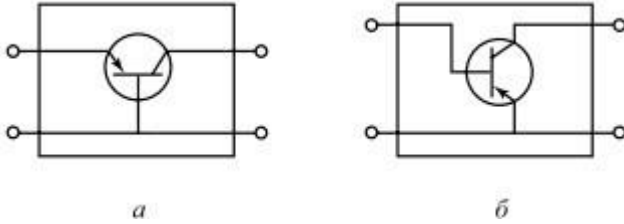


Рисунок 3.6 – Еквівалентна схема чотирьохполосника:

a – біполярний транзистор у схемі зі спільною базою;

б – біполярний транзистор у схемі зі спільним емітером

3.2 2 Приклади розв'язування задач

Приклад 3.2.1. Визначити середній час прольоту дірок $t_{\text{пр(диф)}}$ від емі-

тера 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):

$$t_{\text{пр(диф)}} = \frac{W_b^2}{2D_p}$$

Коефіцієнт дифузії дірок у базі знайдемо за допомогою співвідношення Ейнштейна

$$D_p = \frac{k_B T}{e} \mu_p$$

Тому

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

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

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

Розв'язок

Коефіцієнт перенесення визначається співвідношенням (3.16):

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

Якщо $W_B = \frac{1}{3} W_B$, то

$$\beta_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{3L_{pB}} \right)^2 = 1 - \frac{1}{18} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2$$

і коефіцієнт перенесення зменшиться на величину:

$$\Delta\beta = \beta - \beta_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2 - \left[1 - \frac{1}{18} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2 \right] = \frac{4}{9} \left(\frac{W_B}{L_{pB}} \right)^2 = \frac{4}{9} \left(\frac{2W_B}{3L_{pB}} \right)^2.$$

Відповідь: $\Delta\beta = \frac{4}{9} \left(\frac{2W_B}{3L_{pB}} \right)^2.$

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

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

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

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

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

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

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
 $I_{КБ_0} = 2 \text{ мкА}$, $I_{ЕБ} = 1,6 \text{ мкА}$, $\alpha = 0,98$. В якому

режимі працює транзистор?

Розв'язок

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

$$k T \left(I \right) = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \left(2 \cdot 10^{-3} \right)$$

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

Напруга база – колектор

$$k T \left(\alpha I \right) = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \left(0,98 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \right)$$

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

тому транзистор працює в режимі насичення.

Напруга емітер – колектор

$$U_{ЕК} = U_{БК} - U_{BE} = 0,1179 - 0,1853 = -0,0674 \text{ В.}$$

Відповідь: $U_{BE} = 0,1853 \text{ В}$; $U_{БК} = 0,1179 \text{ В}$; $U_{ЕК} = -0,0674 \text{ В}$.

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,

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

$$I_n \quad \sigma_n \quad e\mu_n N_d$$

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:

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

де I_{E_0} – початковий струм емітерного переходу.

Тоді

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

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 $W_B = 0,5 \text{ мкм}$; ди-

фузійна 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 дорі-

внює 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:

$$I_s = eSD_n \frac{n_{B0}}{L_{nB}} \frac{1}{\text{sh}\left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)}.$$

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

$$n_{B0} = \frac{n^2}{p_{B0}} = \frac{n^2}{N_{aB}} = \frac{(1,45 \cdot 10^{16})^2}{10^{23}} = 2,25 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}.$$

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:

$$\Delta n_B(0) = n_{B0} \left[e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}} - 1 \right] = 2,25 \cdot 10^9 \cdot \left[e^{\frac{0,7}{0,026}} - 1 \right] = 1,1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Тоді струм насичення дорівнює:

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

Струм колектора в активному нормальному режимі:

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

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

$$I_{E \text{ акт}} = \frac{I_{K \text{ акт}}}{\alpha_N} = \frac{4,68 \cdot 10^{-4}}{0,99} = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Знайдемо струм емітера в активному інверсному режимі

$$I_{E \text{ інв}} = I_s \left[e^{\frac{U_{BK}}{\varphi_T}} - 1 \right] = 9,5 \cdot 10^{-16} \left[e^{-\frac{0,7}{0,026}} - 1 \right] = -9,5 \cdot 10^{-16} \text{ А.}$$

Тоді струм колектора в активному інверсному режимі:

$$I_{K \text{ інв}} = \frac{I_{E \text{ інв}}}{\alpha_1} = \frac{-9,5 \cdot 10^{-16}}{0,5} = -1,9 \cdot 10^{-15} \text{ А.}$$

Струм емітера $I_E = I_{E \text{ акт}} - I_{E \text{ інв}} \cong I_{E \text{ акт}} = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$

Струм колектора $I_K = I_{K \text{ акт}} - I_{K \text{ інв}} \cong I_{K \text{ акт}} = 4,68 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$

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

$$I_B \cong I_{B \text{ акт}} = I_{E \text{ акт}} - I_{K \text{ акт}} = 4,73 \cdot 10^{-4} - 4,68 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

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

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 $4 \cdot 10^{-5}$ м, рухливість електронів $\mu_n = 0,39 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ при $T = 300$ 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).

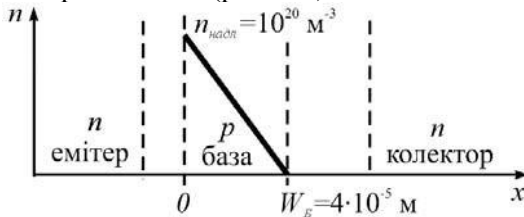


Рисунок 3.7 – Розподіл концентрації електронів у базі

Густина струму неосновних носіїв заряду (електронів) в базі

$$j = eD \frac{dn_E}{dx}$$

Коефіцієнт дифузії знаходимо зі співвідношення Ейнштейна $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_B T}{e}$, звідки

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

Визначимо градієнт концентрації електронів в базі

$$\frac{dn}{dx} = - \frac{n_{\text{накл}}}{W_B} = - \frac{10^{20}}{4 \cdot 10^{-5}} = -0,25 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-1}.$$

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

$$I_K \approx -j_n S = -e D_n \frac{dn_E}{dx} S = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25 \cdot 10^{25} \cdot 10^{-6} =$$

$$= 4 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 4 \text{ мА}.$$

Відповідь: $I_K = 4 \text{ мА}$.

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

$D_{pB} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; $U_{KB} = -1 \text{ В}$; 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.

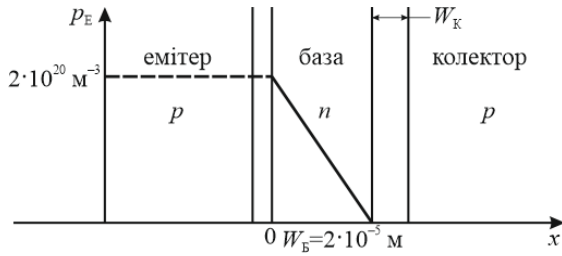


Рисунок 3.8 – Розподіл концентрації дірок у базі

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

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

Градiєнт 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

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

повн К eff

де W_{eff} – ефективна ширина бази.

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

$$\sqrt{|U_{\text{кв}}|}$$

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

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

Здиференціюємо цей вираз за U_{KB} :

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

При $U_{KB} = -16$ В

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

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

Приклад 3.2.11. Маємо біполярний транзистор n - p - n -типу; легування емітера $N = 10^{24} \text{ м}^{-3}$; легування бази $N = 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

Ширина нейтральної області емітера $W_E = 2$ мкм,

бази $W_b = 0,4$ 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):

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

Коефіцієнт підсилення знайдемо за допомогою виразу (3.17):

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

Відношення струму дірок із бази, що буде переходити в емітер,

до повного струму бази дорівнює

$$I_{pE} = \frac{1-\gamma}{\gamma} = \frac{1-0,994}{0,994} \approx 0,661.$$

$$I_B = \frac{1-\gamma}{\gamma} + 1 - \beta = \frac{1-0,994}{0,994} + 1 - 109,8 = 1 - 0,994 \cdot 0,9969$$

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

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.

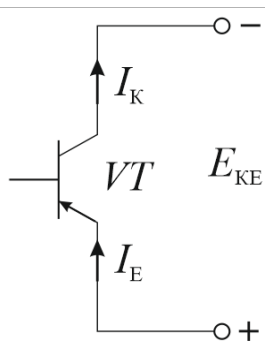


Рисунок 3.9 – Ввімкнення транзистора з розірваним ланцюгом бази

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} 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 .

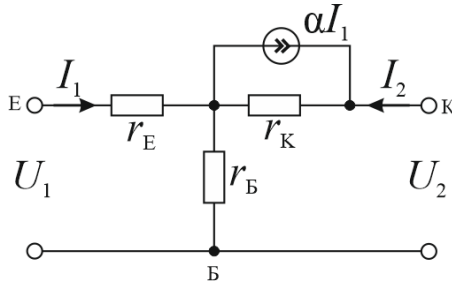


Рисунок 3.10 – Вихідна фізична малосигнальна еквівалентна схема біполярного транзистора

Розв'язок

Параметри

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

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

$$U = I r_{1E} + \frac{(1-\alpha) I_1 r_B r_K}{r + r_{BK}}$$

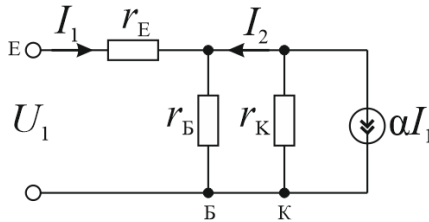


Рисунок 3.11 – Фізична малосигнальна еквівалентна схема біполярного транзистора в режимі короткого замикання на виході

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

$$h_{11B} = \frac{U_1}{I_1} = r_{1E} + \frac{(1-\alpha) r_B r_K}{r + r_{BK}}$$

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

Зі схеми на рис. 3.9 видно, що

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

Тому,

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

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

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 затискачах). При цьому струм залежного джерела струму стає рівним нулю (внаслідок того, що $I_1 = 0$). Тому

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

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

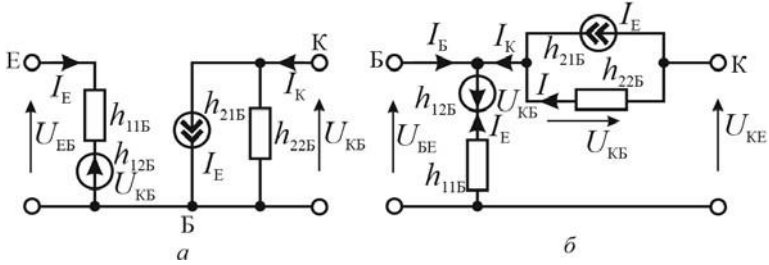
$$h_{22Б} = \frac{1}{r_B + r_K}.$$

Приклад 3.2.14. Вирозити параметри транзистора h_{12E} і h_{11E} 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

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

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, отримуємо схему, зображену на рис. 3.13. Відмітимо, що в цьому випадку $U_{KB} = -U_{BE}$.

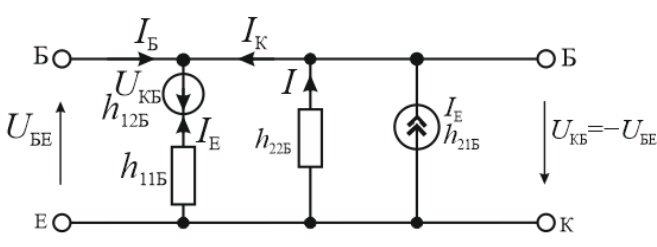


Рисунок 3.13 – Еквівалентна схема біполярного транзистора при ввімкненні зі спільним емітером у системі h -параметрів при короткому замиканні на виході

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:

$$I_B + I_E + h_{21B} I_E + I = I_B + I_E + h_{21B} I_E - h_{22B} U_{BE} .$$

Отже,

$$h_{11E} = \left. \frac{U_{BE}}{I_B} \right|_{U_{KE}=0} = \frac{h_{11B}}{h_{11B} h_{22B} + (1-h_{22B})(1+h_{21B})} .$$

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

$$h_{11E} \approx \frac{h_{11B}}{1 + h_{21B}} .$$

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

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:

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

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:

$$\begin{aligned}
 y_{11} &= \frac{z_{22}}{\Delta_z}; & y_{12} &= -\frac{z_{12}}{\Delta_z}; & y_{21} &= -\frac{z_{21}}{\Delta_z}; & y_{22} &= \frac{z_{11}}{\Delta_z}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

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

$$\begin{aligned}
 y_{11} &= \frac{z_{22}}{\Delta_z}; & y_{12} &= -\frac{z_{12}}{\Delta_z}; & y_{21} &= -\frac{z_{21}}{\Delta_z}; & y_{22} &= \frac{z_{11}}{\Delta_z}.
 \end{aligned}$$

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: $E_k = 24$ В; $R_6 = 50$ кОм;

$R_H = 10$ кОм; $U_{BE} = 0,6$ В.

Розв'язок

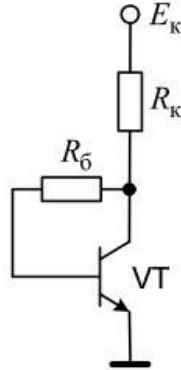


Рисунок 3.14 – Ланцюг зміщення біполярного транзистора з паралельним зворотним зв'язком за напругою

Нехтуючи струмом $I_{кБ_0}$, маємо:

$$U_{кЕ} = E - I_{кЕ} R_{к} = E - I_{кБ} (\beta + 1) R_{б} = E - (\beta + 1) \frac{R_{б}}{R_{б}} (U_{кЕ} - U_{кБ}),$$

звідки

$$U_{кЕ} = \frac{E + \frac{R_{б}}{R_{б}} (\beta + 1) U_{кБ}}{1 + \frac{R_{б}}{R_{б}} (\beta + 1)} = \frac{24 + \frac{10^4}{5 \cdot 10^4} \cdot (19 + 1) \cdot 0,6}{1 + \frac{10^4}{5 \cdot 10^4} (19 + 1)} = 5,28 \text{ В.}$$

Відповідь: $U_{кЕ} = 5,28 \text{ В.}$

Приклад 3.2.17. Визначити, чи є сумісними типові значення параметрів деякого транзистора, ввімкненого за схемою із спільною базою: $h_{11б} = 30 \text{ Ом}$; $h_{12б} = 4 \cdot 10^{-3}$;

$h_{21б} = -0,97$; $h_{22б} = 10^{-6} \text{ См}$. Параметри задані для

робочої точки: $U_{кБ} = -5 \text{ В}$; $I_{Е} = 1 \text{ мА}$.

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:

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

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

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

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

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, прийма-

ємо: $h_{116} = 30 \text{ Ом}$; $h_{216} = -0,97$; $h_{226} = 10^{-6} \text{ См}$ 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 $r_{\text{с}}$ за формулою

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

Тепер знаходимо параметр h_{126} за формулою

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

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

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. Напряга база – емітер $U_{BE} = -0,8$ В; напряга колектор – емітер $U_{KE} = 10$ В. Знайти напрягу колектор – база U_{KB} .
- 3.3.8 У транзисторі $I_E = 1$ мА, $I_B = 20$ мкА, $I_K = 1,02$ мА. Визначити коефіцієнт передачі струму бази транзистора β^* .
- 3.3.9 У $n-p-n$ -транзисторі надлишкова концентрація електронів $\Delta n_E = 10^{20}$ м⁻³; площа $p-n$ -переходів $S = 1$ мм²; ефективна ширина бази 50 мкм; $\mu_n = 0,4 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$; $T = 300$ К. Визначити струм колектора.
- 3.3.10 Визначити коефіцієнт переносу дірок через базу на низькій частоті α , якщо товщина бази $W_B = 0,004$ см, а дифузійна довжина дірок $L_p = 0,02$ см.
- 3.3.11 Визначити коефіцієнт передачі струму на низькій частоті всхемі зі спільною базою α транзистора, в якого питомий опір емітера $\rho_E = 0,01$ Ом · см, питомий опір бази $\rho_B = 5$ Ом · см, а ко-ефіцієнт 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 $W_B = 0,003$ 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 однакої 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 $U_K = 10$ В і струмі емітера $I_E = 2$ мА. Товщина бази $W_B = 0,005$ см, концентрація донорів в базі $N = 10^{14}$ см⁻³, дифузійна довжина дірок $L_p = 0,07$ см. Прийняти, що коефіцієнт інжекції дорівнює одиниці.
- 3.3.17 Знайти дифузійну ємність емітера германієвого транзистора типа $p-n-p$, якщо товщина бази $W_B = 0,002$ 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 $W_{B_1} = 0,002$ см до $W_{B_2} = 0,005$ см?
- 3.3.18 Знайти дифузійну ємність колектора германієвого транзистора типа $p-n-p$ при струмі емітера $I_E = 1$ мА та напрузі на колекторі $U_K = 16$ В. Товщина бази $W_B = 0,003$ см, концентрація донорів в базі $N_d = 10^{14}$ 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 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 $U_{\text{BE}} = -0,4 \text{ В}$ та напруга колектор – емітер $U_{\text{KE}} = -0,3 \text{ В}$;

б) $U_{\text{BE}} = -0,4 \text{ В}$ та $U_{\text{KE}} = -10 \text{ В}$.

3.3.22 Біполярний транзистор працює в активному режимі. Струм насичення емітера $I_{E_s} = 10^{-14}$ А; струм насичення колектора

$$I_{K_s} = 1,9 \cdot 10^{-14} \text{ А}; \alpha_N = 0,99; \alpha_1 = 0,5. \text{ Напряга зовнішнього змі-}$$

щення $p-n$ -переходу база – емітер $U_{BE} = 0,65 \text{ В}$, напруга зовнішнього зміщення $p-n$ -переходу база – колектор $U_{BK} = -4,5 \text{ В}$. 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

Величина	Одиниця в СІ	Зв'язок з іншими одиницями
Маса	кілограм (кг)	$1 \text{ кг} = 10^3 \text{ г} = 10^6 \text{ мг}$
Довжина	метр (м)	$1 \text{ м} = 10^2 \text{ см} = 10^9 \text{ нм} = 10^{10} \text{ \AA}$
Об'єм	метр ³ (м ³)	$1 \text{ м}^3 = 10^3 \text{ л} = 10^6 \text{ см}^3$
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, m^{-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, $\frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T}, \text{K}^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
Спорідненість до електрона, eV	4,05	4,0	4,07
Власна концентрація, m^{-3}	$1,6 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1,1 \cdot 10^{13}$
Ефективна густина станів, m^{-3}			
в зоні провідності N_c	$2,8 \cdot 10^{25}$	$1,04 \cdot 10^{25}$	$4,7 \cdot 10^{23}$
у валентній зоні N_v	$1,02 \cdot 10^{25}$	$6,1 \cdot 10^{24}$	$7,0 \cdot 10^{24}$
Ефективні маси для густини станів, в. о.			
електронів $\frac{m_{dn}^*}{m_e}$	1,08	0,56	0,068
дірок $\frac{m_{dp}^*}{m_e}$	0,56	0,35	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}
м^2 Рухливість, $\frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ електронів μ_n	0,15	0,39	0,85
дірок μ_p Коефіцієнт дифузії, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ електронів D_n	0,06	0,19	0,04
дірок D_p	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$
дірок D_p	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Питомий опір власного напівпровідника ρ , Ом·м Фактор виродження домішкового рівня g	0,47	$2,3 \cdot 10^3$	10^6
донорна домішка	2	2	2
акцепторна домішка	4	4	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

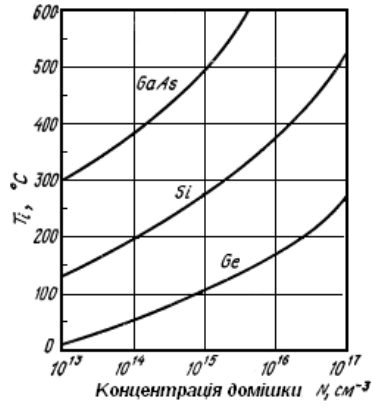
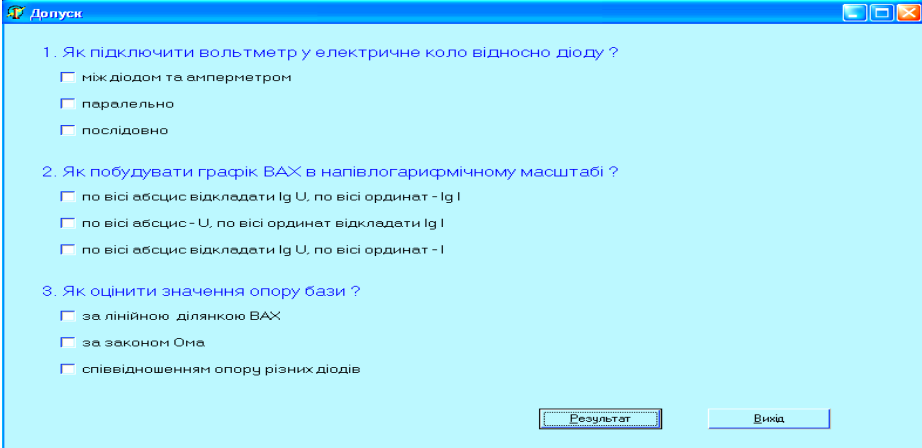


Рисунок В.1 – Залежність температури початку власної провідності напівпровідника T_i від ступеня легування

Особливості практикуму

Віртуальний практикум розроблений як для роботи із фізично існуючими стендами так і при віртуальній симуляції певних твердотілих структур.

Щоб розпочати виконання роботи необхідно спочатку отримати допуск відповівши на три запитання (мал. 2.1). У разі вірних відповідей студент матиме змогу перейти до виконання поставленої задачі.



Допуск

1. Як підключити вольтметр у електричне коло відносно діоду ?
 - між діодом та амперметром
 - паралельно
 - послідовно
2. Як побудувати графік ВАХ в напівлогарифмічному масштабі ?
 - по вісі абсцис відкладати $I_g U$, по вісі ординат - $I_g I$
 - по вісі абсцис - U , по вісі ординат відкладати $I_g I$
 - по вісі абсцис відкладати $I_g U$, по вісі ординат - I
3. Як оцінити значення опору бази ?
 - за лінійною ділянкою ВАХ
 - за законом Ома
 - співвідношенням опору різних діодів

Результат Вийти

Малюнок 2.1 – Стартове вікно програми для отримання допуску

Практикум передбачає виконання дев'яти робіт: дослідження ВАХ діода, дослідження залежності диференційного опору діода від струму, дослідження механізмів пробою в діодах, дослідження статичних характеристик біполярного транзистора, дослідження характеристик польового транзистора з керуючим р-п переходом, дослідження характеристик світлодіода, дослідження бар'єрної ємності р-п переходів інтегральних схем, вивчення температурної залежності параметрів біполярного транзистора, дослідження параметрів тунельних діодів.

Першочергово на екрані з'являється вікно введення початкових параметрів певної напівпровідникової структури(мал. 2.2 – мал. 2.10)

Лабораторна робота №1.

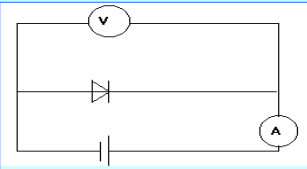
Дослідження вольт-амперної характеристики діода.

Мета роботи : Досліджувати механізм проходження струму у діоді.

Занести кількість діодів :

Занести порядковий номер виданого діода :

Занести тип діода :



Електрична схема вимірювання ВАХ

1. Занести вимірювання струму у таблицю при заданій напрузі :

U,В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
I(D1)A	1e-6	2e-6	3e-6	9e-6	15e-6	23e-6	33e-6	43e-6	53e-6	65e-6	78e-6	89e-6	100e-6	113e-6	125e-6	135e-6
I(D2)A	1e-6	2e-6	3e-6	4e-6	5e-6	10e-6	17e-6	25e-6	35e-6	45e-6	58e-6	69e-6	80e-6	93e-6	105e-6	115e-6
I(D3)A	1e-6	1e-6	2e-6	2e-6	3e-6	5e-6	10e-6	14e-6	20e-6	28e-6	35e-6	44e-6	53e-6	62e-6	73e-6	84e-6
I(D4)A	1e-6	1e-6	1e-6	1e-6	2e-6	3e-6	5e-6	8e-6	13e-6	19e-6	26e-6	33e-6	42e-6	51e-6	60e-6	70e-6

Малюнок 2.2 – Вікно для початкових даних роботи
№1

Лабораторна робота № 2.

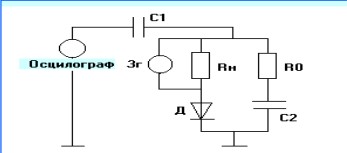
Дослідження залежності диференційного опору діода від струму.

Мета роботи : Встановити залежність диференційного опору діода від струму.

Занести кількість діодів :

Занести порядковий номер виданого діода :

Занести тип діода :



Електричний ланцюг

1. Занести вимірювання напруги при заданому струмі :

I,А	1e-7	2e-7	3e-7	4e-7	5e-7	6e-7	7e-7	8e-7	9e-7	1e-6
U(D1)В	0,6e-1	0,7e-1	0,9e-1	1,3e-1	1,5e-1	1,8e-1	1,9e-1	2,1e-1	2,3e-1	2,6e-1
U(D2)В	0,82e-1	0,84e-1	1,0e-1	1,4e-1	1,8e-1	2,1e-1	2,4e-1	2,7e-1	2,8e-1	3,0e-1
U(D3)В	1,0e-1	1,07e-1	1,1e-1	1,16e-1	1,2e-1	1,23e-1	1,25e-1	1,29e-1	1,32e-1	1,38e-1
U(D4)В	1,1e-1	1,5e-1	1,7e-1	1,8e-1	2e-1	2,2e-1	2,2e-1	2,4e-1	2,5e-1	2,6e-1

Малюнок 2.3 - Вікно для початкових даних роботи
№2

Лабораторна робота №3.

Дослідження механізмів пробою в діодах.

Мета роботи: Дослідити механізм електричного пробою.

Занести кількість діодів:

Занести порядковий номер виданого діоду:

Занести тип діоду:

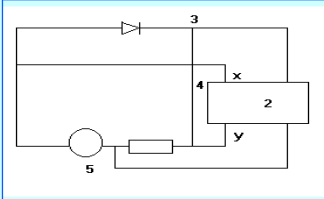


Схема вимірювання пробної напруги

1. Занести вимірювання струму у таблицю при заданій напрузі:

U,В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
I(Д1)А	1e-6	2e-6	3e-6	9e-6	15e-6	23e-6	33e-6	43e-6	53e-6	65e-6	78e-6	89e-6	100e-6	113e-6	125e-6	135e-6
I(Д2)А	1e-6	2e-6	3e-6	4e-6	5e-6	10e-6	17e-6	25e-6	35e-6	45e-6	58e-6	69e-6	80e-6	93e-6	105e-6	115e-6
I(Д3)А	1e-6	1e-6	2e-6	2e-6	3e-6	5e-6	10e-6	14e-6	20e-6	28e-6	35e-6	44e-6	53e-6	62e-6	73e-6	84e-6
I(Д4)А	1e-6	1e-6	1e-6	1e-6	2e-6	3e-6	5e-6	8e-6	13e-6	19e-6	26e-6	33e-6	42e-6	51e-6	60e-6	70e-6

Малюнок 2.4 - Вікно для початкових даних роботи №3

Лабораторна робота №4.

Дослідження статичних характеристик біполярного транзистора.

Мета роботи: Досліджувати залежність струму колектора біполярного транзистора (БТ) від напруги на колекторі $U_{кб}$, струму емітера I_e від напруги на емітері $U_{еб}$.

Занести порядковий номер виданого транзистора:

Занести тип транзистора:

1. Вхідні характеристики:

$U_{еб}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{e1}A$	1e-7	6e-7	8e-7	12e-7	1e-6	2e-6	4e-6	1e-5	2e-5	4e-5	7e-5
$I_{e2}A$	1e-7	5e-7	11e-7	1e-6	3e-6	5e-6	10e-6	20e-6	35e-6	70e-6	50e-6
$I_{e3}A$	1e-7	1e-7	1e-7	1e-6	6e-6	10e-6	24e-6	46e-6	80e-6	81e-6	85e-6

2. Вихідні характеристики:

$U_{кб}$	0	0,1	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$I_{k1}A$	0e-7	1e-7	2,5e-7	3e-7	3,3e-7	3,5e-7	3,6e-7	3,7e-7	3,8e-7	3,9e-7	4e-7
$I_{k2}A$	1e-7	2e-7	7e-7	9e-7	10e-7	1,1e-6	1,1e-6	1,2e-6	1,2e-6	1,2e-6	1,2e-6
$I_{k3}A$	1e-7	3e-7	15e-7	20e-7	21e-7	23e-7	25e-7	26e-7	28e-7	29e-7	30e-7

Малюнок 2.5 - Вікно для початкових даних роботи №4

Лабораторна робота № 5.

Дослідження характеристик польового транзистора з керуючим р-п переходом.

Мета роботи : Ознайомитися з принципом дії польового транзистора та дослідити його характеристики.

Занести кількість транзисторів :

Занести порядковий номер виданого транзистора :

Занести тип транзистора :

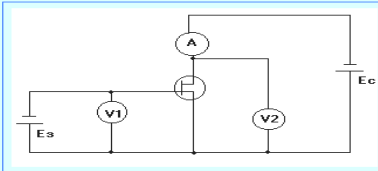


Схема вимірювання характеристик польового транзистора

1. Занести вимірювання струму стоку I_c при заданій напрузі витік-стік $U_{cс}$:

U _{с.В}	0,1	2,1	4,1	6,1	8,1	10,1	12,1	14,1	16,1	18,1	20,1	22,1	24,1	26,1	28,1	30,0
I _c (T1),A	2e-6	3e-6	5e-6	6e-6	8e-6	9e-6	10e-6	13e-6	14e-6	15e-6	16e-6	18e-6	19e-6	20e-6	23e-6	24e-6
I _c (T2),A	1e-6	2e-6	3e-6	4e-6	5e-6	6e-6	8e-6	15e-6	18e-6	24e-6	25e-6	27e-6	28e-6	29e-6	31e-6	32e-6
I _c (T3),A	2e-6	6e-6	9e-6	12e-6	16e-6	19e-6	21e-6	24e-6	26e-6	29e-6	30e-6	33e-6	35e-6	36e-6	37e-6	39e-6
I _c (T4),A	20e-6	22e-6	24e-6	25e-6	26e-6	28e-6	29e-6	31e-6	36e-6	39e-6	45e-6	46e-6	47e-6	48e-6	49e-6	50e-6
I _c (T5),A	1e-6	2e-6	4e-6	9e-6	12e-6	13e-6	17e-6	20e-6	23e-6	29e-6	30e-6	31e-6	35e-6	39e-6	40e-6	45e-6

Малюнок 2.6 - Вікно для початкових даних роботи №5

Лабораторна робота №6

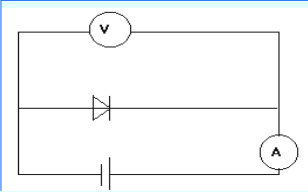
Дослідження характеристик світлодіода.

Мета роботи : Досліджувати механізм проходження струму у світлодіоді , спектральний склад випромінювання світла .

Занести кількість діодів :

Занести порядковий номер виданого діода :

Занести тип діода :



Електрична схема вимірювання ВАХ

1 Занести вимірювання струму у таблицю при заданій напрузі :

U,В	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25
I(Д1),A	11e-6	12e-6	13e-6	17e-6	21e-6	28e-6	35e-6	45e-6	55e-6	67e-6
I(Д2),A	20e-6	21e-6	22e-6	23e-6	27e-6	34e-6	41e-6	51e-6	60e-6	74e-6
I(Д3),A	1e-6	2e-6	3e-6	4e-6	8e-6	12e-6	19e-6	26e-6	36e-6	46e-6

Малюнок 2.7 - Вікно для початкових даних роботи №6

Лабораторна робота № 9

Дослідження параметрів тунельних діодів.

Мета роботи: Вивчити фізичні процеси, що відбуваються у тунельних електрон-діркових переходах під впливом прикладеної напруги різної полярності.

Занести кількість діодів :

Занести порядковий номер виданого діода :

Занести тип діода :

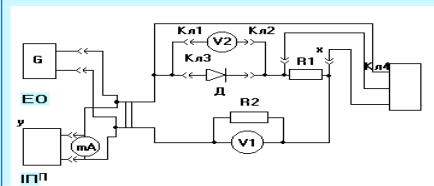


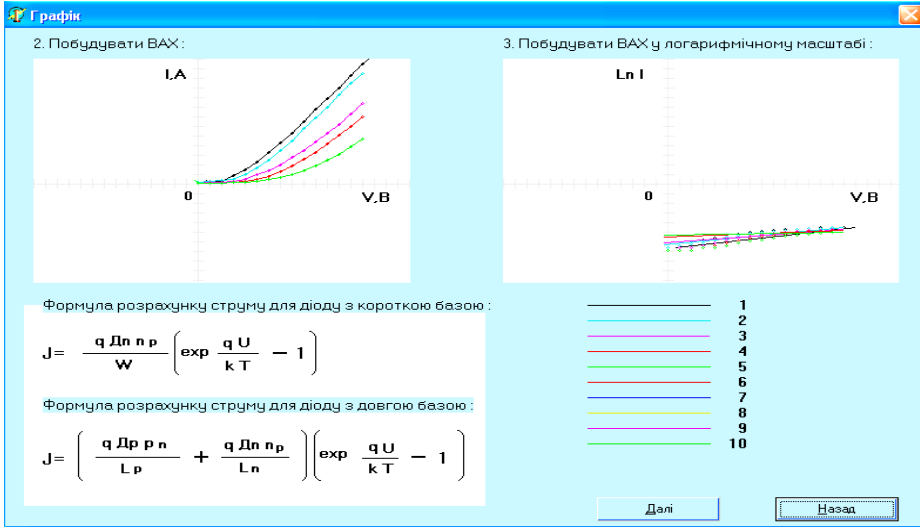
Схема експериментальної установки для дослідження параметрів тунельних p-n переходів

1. Занести вимірювання струму у таблицю при заданій напрузі :

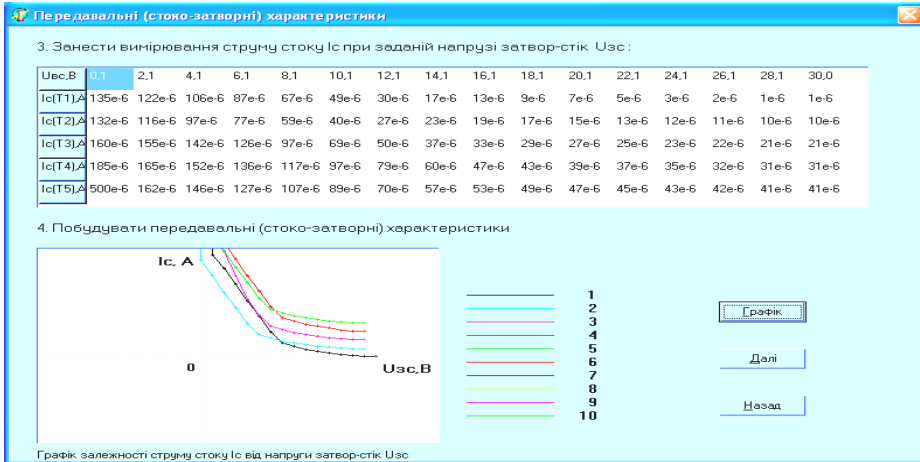
U,В	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
I(Д1)А	2e-3	5e-3	8e-3	13e-3	20e-3	27e-3	34e-3	39e-3	43e-3	42e-3	39e-3	34e-3	27e-3	20e-3	24e-3
I(Д2)А	5e-3	6e-3	9e-3	11e-3	16e-3	23e-3	30e-3	37e-3	42e-3	46e-3	45e-3	42e-3	37e-3	30e-3	34e-3
I(Д3)А	15e-3	16e-3	19e-3	22e-3	27e-3	34e-3	41e-3	48e-3	53e-3	57e-3	56e-3	53e-3	48e-3	41e-3	45e-3

Малюнок 2.10 - Вікно для початкових даних роботи №9

Після введення початкових параметрів програма розраховує необхідні величини і виводить їх у вигляді таблиць та графіків (мал. 2.11 – мал. 2.12).



Малюнок 2.11 – Результати розрахунку у вигляді графіків



Малюнок 2.12 – Результати розрахунку у вигляді таблиць та графіків

Після отримання результатів необхідно захистити роботу. Захист проходить у вигляді тестування на комп'ютері після чого студентів зараховується або не зараховується робота.