

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Факультет Електроніки
Кафедра мікроелектроніки

Практична робота №4
з дисципліни: «Твердотіла електроніка»

ВАХ ідеального та реального діода

Виконав:
Студент 3-го курсу

(підпис)

Кузьмінський О.Р.

Перевірив:

(підпис)

Королевич Л.М.

1. Мета роботи

Побудувати вольт-амперні характеристики (ВАХ) ідеалізованого та реального діоду у відповідності до варіанту. Побудову реальної ВАХ виконувати з урахуванням всіх факторів (пробій, опір пасивних елементів, струми термогенерації та рекомбінації). Визначити тип пробою р-п переходу.

Вказати:

- Концентрації домішок у базі та емітері.
- Тип пробою р-п переходу (лавинний чи тунельний).
- Напругу пробою.
- Значення струму для трьох значень зовнішньої напруги $0,1 \cdot \varphi_0$, $0,8 \cdot U_{пр}$, $0,3 \cdot \varphi_0$. - як для реальної так і для ідеалізованої.

2.Вхідні дані

Табл.1.Вхідні параметри.

Матеріал	Si
Елементарний заряд q , Кл	$1,6 \cdot 10^{-19}$
Концентрація власних носіїв заряду n_i , см^{-3}	$1,45 \cdot 10^{10}$
Площа поперечного перерізу S , см^2	0,0098
l_p , см	$1,458 \cdot 10^{-4}$
l_n , см	$3,26 \cdot 10^{-5}$
Температурний потенціал φ_T , В	0,026
Гradient концентрації акцепторів N'_A , см^{-4}	$5 \cdot 10^{18}$
Гradient концентрації донорів N'_D , см^{-4}	$1 \cdot 10^{20}$
Коефіцієнт дифузії електронів D_n , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	36
Коефіцієнт дифузії дірок D_p , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	12,5
Дифузійна довжина електронів L_n , см	0,005
Дифузійна довжина дірок L_p , см	0,002
Довжина діода L_D , см	0,0595
Час життя носіїв τ , с	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Концентрація акцепторів N_A , см^{-4}	$7,29 \cdot 10^{14}$
Концентрація донорів N_D , см^{-4}	$3,26 \cdot 10^{15}$

3. Розрахунок ВАХ ідеалізованого рп-переходу

Виходячи з назви вольт-амперної характеристики, нам потрібно знайти залежність струму від напруги, тобто функцію $I(U)$. Скористаймося формулою для знаходження аналітичного виразу ВАХ ідеалізованого рп-переходу:

$$I = \left(\frac{qD_p p_{n0} S}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0} S}{L_n} \right) \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

де p_{n0} та n_{p0} — рівноважні концентрації дірок та електронів.

Врахувавши закон діючих мас: $p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$, $n_{p0} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$, перепишемо рівняння (1) наступним чином:

$$I = qn_i^2 S \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

Покладемо:

$$I_1 = qn_i^2 S \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \quad (3)$$

Тоді аналітичний вираз для ВАХ ідеального рп-переходу перепишеться наступним чином:

$$I = I_1 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (4)$$

Проведемо чисельне спрощення для величини I_1 :

$$\begin{aligned} I_1 &= qn_i^2 S \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (1,45 \cdot 10^{10})^2 \cdot 0,0098 \times \left(\frac{12,5}{0,002 \cdot 3,26 \cdot 10^{15}} + \frac{36}{0,005 \cdot 7,29 \cdot 10^{14}} \right) = \\ &= 5,907 \cdot 10^{-12} \end{aligned}$$

Остаточна функція для побудови ВАХ ідеального діода наступна:

$$\boxed{I(U) = 5,907 \cdot 10^{-12} \left(e^{\frac{U}{0,026}} - 1 \right)} \quad (5)$$

4. Розрахунок ВАХ реального рп-переходу

4.1. Пряма гілка вольт-амперної характеристики

На вплив прямої ВАХ впливає струм, обумовлений рекомбінацією електронів та дірок-струм **рекомбінації** I_R .

Формула для його розрахунку наступна:

$$I_R = \frac{1}{2} q S l_0 \frac{n_i}{\tau} \times e^{\frac{U}{2\varphi_T}}, \quad (6)$$

де: $l_0 = l_n + l_p$ —ширина плавного рп-переходу в рівноважному стані.

У реальних р-п переходах за прямого зміщення напруга зовнішнього джерела спадає не тільки на опорі р-п переходу, але й на **опорі областей емітера та бази**.

Опір бази знаходиться формулою:

$$r_b = \frac{W_b \rho_b}{S}, \quad (7)$$

де ρ_b -питомий опір бази, W_b -товщина бази

Опір емітера знаходиться за формулою:

$$r_e = \frac{W_e \rho_e}{S}, \quad (8)$$

де ρ_e -питомий опір емітера, W_e -товщина емітера

Опір баз набагато більший за опір емітера, врахувавши, що $l_p > l_n$, маємо те, що база- напівпровідник р-типу, а емітер- напівпровідник п-типу.

Це дає змогу записати нам наступні вирази для товщини бази та емітера відповідно:

$$W_b = \frac{L_D}{2} - l_p, \quad (9)$$

$$W_e = \frac{L_D}{2} - l_n, \quad (10)$$

де L_D —довжина діода.

В свою чергу питомий опір бази можна знайти через рівняння електропровідності напівпровідника, врахувавши що матеріал бази у нас напівпровідник р-типу.

$$\rho_b = \frac{1}{\sigma_b} = \left[q \left(\frac{-N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_n + \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_p \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

Підставивши усі дані питомий опір бази дорівнює $\rho_b = 19,052 \text{ Ом} \cdot \text{см}$
Товщина бази дорівнює:

$$W_b = \frac{L_D}{2} - l_p = \frac{0,0595}{2} - 1,458 \cdot 10^{-4} = 0,0296 \text{ см.}$$

Остаточно розраховуємо опір бази:

$$r_b = \frac{W_b \rho_b}{S} = \frac{0,0296 \cdot 19,052}{0,0098} = 57,545 \text{ Ом}$$

Розрахуємо питомий опір емітера :

$$\rho_e = \frac{1}{\sigma_b} = \left[q \left(\frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_n + \frac{-N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_p \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

Підставивши усі дані, маємо $\rho_e = 1,278 \text{ Ом} \cdot \text{см}$
Товщина емітера дорівнює:

$$W_e = \frac{L_D}{2} - l_n = \frac{0,0595}{2} - 3,26 \cdot 10^{-5} = 0,0297 \text{ см.}$$

Нарешті, опір емітера знаходимо так:

$$r_e = \frac{W_e \rho_e}{S} = \frac{0,0297 \cdot 1,278}{0,0098} = 3,873 \text{ Ом}$$

Маючи усі опори, запишемо вираз ВАХ в наступному вигляді:

$$I_{\text{пас.ел.}} = I_0 \times \left(e^{\frac{U - I_R \cdot r_{b+e}}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (13)$$

Тепер кінцева формула для побудови реальної ВАХ для прямої гілки складатиметься із суми струмів: струму рекомбінації та струму з впливом пасивних елементів.

$$I_{\text{sum1}} = I_R + I_{\text{пас.ел.}} = \left(\frac{1}{2} q S l_0 \frac{n_i}{\tau} \times e^{\frac{U}{2\varphi_T}} \right) + I_0 \times \left(e^{\frac{U - I_R \cdot r_{b+e}}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (14)$$

4.2. *Обернена гілка вольт-амперної характеристики*

На обернену гілку ВАХ реального діода впливають: струм термогенерації, тепловий струм, струм пробою та струм витікання, але струмом витікання ми нехтуємо, оскільки вважаємо, що наш діод виготовлений з якісних матеріалів.

Аналітичний вираз для **теплогового струму** має наступний вираз:

$$I_0 = qSL_p \times \frac{p_{n0}}{\tau_p}, \quad (15)$$

де: τ_p —час життя дірок, який в свою чергу знаходиться як $\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p}$.

Врахуєм також закон діючих мас $p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$, і перепишем вираз (15) наступним чином:

$$I_0 = qS \times \frac{n_i^2 \cdot D_p}{N_D \cdot L_p} \quad (16)$$

$$I_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,0098 \times \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2 \cdot 12,5}{3,26 \cdot 10^{15} \cdot 0,002} = 6,32 \cdot 10^{-13}$$

Розглянемо вплив **струму термогенерації**. Аналітичний вираз для його розрахунку наступний:

$$I_G = \frac{1}{2}qSl \times \frac{n_i}{\tau}, \quad (17)$$

де: l —ширина переходу, яка в свою чергу наближено дорівнює наступному:

$$l \approx l_0 \cdot \sqrt{\frac{|U_{зв}|}{\varphi_0}}, \quad (18)$$

де φ_0 —контактна різниця потенціалів, яка в свою чергу дорівнює:

$$\varphi_0 = \varphi_T \times \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right). \quad (19)$$

З огляду на це, підставимо вирази (18) та (19) у вираз (17), та отримаємо кінцеве рівняння ВАХ для струму термогенерації:

$$I_G = \frac{1}{2}q \cdot S \cdot \frac{n_i}{\tau} \cdot l_0 \times \sqrt{\frac{|U_{зв}|}{\varphi_T \times \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right)}} \quad (20)$$

Нарешті, врахуємо **вплив пробою** на ВАХ реального рп-перехода. Перш за все необхідно визначити, який саме пробій наявний у рп-переході: лавинний чи тунельний.

Запишемо напівемпіричні формули для тунельного та лавинного пробіів відповідно:

$$U_{\text{прб.т.}} = 40\rho_n + 8\rho_p, \quad (21)$$

$$U_{\text{прб.л.}} = K\rho_b^m, \quad (22)$$

де: ρ_n, ρ_p — питомі опори в n та p областях відповідно; K, m — певні коефіцієнти для розрахунку лавинного пробію, в залежності від матеріалу та типу електропровідності бази.

Оскільки база в моєму випадку має провідність р-типу, а емітер— n-типу, то $\rho_n = \rho_e$, а $\rho_p = \rho_b$. Окрім цього, коефіцієнти для лавинного пробію прийматимуть наступні значення: $K = 23, m = 0,75$.

Виконуємо розрахунок:

$$U_{\text{прб.т.}} = 40\rho_n + 8\rho_p = 40 \cdot 1,278 + 8 \cdot 19,052 = 203,536 \text{ В}$$

$$U_{\text{прб.л.}} = K\rho_b^m = 23 \cdot (19,052)^{0,75} = 209,741 \text{ В}$$

Відомо, що напруга пробію, що менша 5 В відповідає тунельному пробію, а напруга, більша за 7 В- лавинному. Ми бачимо, що напруна тунельного пробію складає 203,536 В, що значно більше за 5 В, тому для даного рп-переходу обираємо лавинний пробій, а отже напругу $U_{\text{прб.л.}} = 209,741 \text{ В}$.

Обравши потрібний тип пробію, записуємо відповідний йому аналітичний вираз ВАХ:

$$I_{\text{проб.}} = \frac{I_0}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{прб.л.}}} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (23)$$

Запишемо остаточні складові впливу на ВАХ реального рп-переходу для прямої та зворотної гілок.

- **Пряма гілка реальної ВАХ**

$$I_{\text{пряма}} = \left(\frac{1}{2} q S l_0 \frac{n_i}{\tau} \times e^{\frac{U}{2\varphi_T}} \right) + I_0 \times \left(e^{\frac{U - I_R \cdot r_{b+e}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

- **Зворотня гілка реальної ВАХ**

$$I_{\text{зворотня}} = \frac{q S n_i l_0}{2\tau} \times \sqrt{\frac{|U_{\text{зв}}|}{\varphi_T \times \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right)} + \frac{I_0}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{прб.л.}}}\right)^{\frac{3}{2}}}}$$

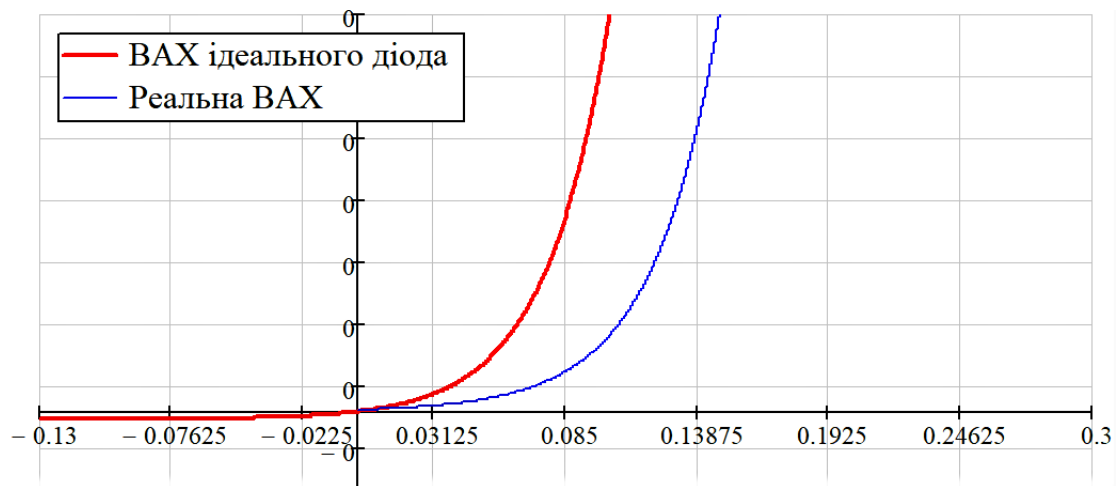


Рис.1. Порівняння гілок ВАХ ідеалізованого та реального рп-переходу.