

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
Градiєнт концентрації акцепторів N'_A , см^{-4}	$5 \cdot 10^{18}$
Градiєнт 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	$2,5 \cdot 10^{-3}$

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: $p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$, $n_{p0} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$, та розписавши концентрації через їхні градієнти $N_A = N'_A l_p$ та $N_D = N'_D l_n$, перепишемо рівняння (1) наступним чином:

$$I = qn_i^2 S \left(\frac{D_p}{L_p N'_D l_n} + \frac{D_n}{L_n N'_A l_p} \right) \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

Покладемо:

$$I_0 = qn_i^2 S \left(\frac{D_p}{L_p N'_D l_n} + \frac{D_n}{L_n N'_A l_p} \right) \quad (3)$$

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

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (4)$$

Проведемо чисельне спрощення для величини I_0 :

$$\begin{aligned} I_0 &= qn_i^2 S \left(\frac{D_p}{L_p N'_D l_n} + \frac{D_n}{L_n N'_A l_p} \right) = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (1,45 \cdot 10^{10})^2 \cdot 0,0098 \times \\ &\left(\frac{12,5}{0,002 \cdot 10^{20} \cdot 3,26 \cdot 10^{-5}} + \frac{36}{0,005 \cdot 5 \cdot 10^{18} \cdot 1,458 \cdot 10^{-4}} \right) = \\ &= 5,907 \cdot 10^{-12} \end{aligned}$$

Остаточна функція для побудови ВАХ ідеального діода наступна:

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

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.

Для початку, знайдемо опір бази за такою формулою:

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

де ρ_b -питомий опір бази.

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

$$\rho_b = \frac{1}{\sigma_b} = \left[q \left(\frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_n + \frac{-N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_p \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

Перепишем формулу (8), врахувавши, що $N_D = N'_D l_n$:

$$\rho_b = \frac{1}{\sigma_b} = \left[q \left(\frac{N'_D l_n + \sqrt{(N'_D l_n)^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_n + \frac{-(N'_D l_n) + \sqrt{(N'_D l_n)^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_p \right) \right]^{-1}$$

Підставивши усі дані питомий опір бази дорівнює $\rho_b = 1,278 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ В свою чергу, повний опір бази дорівнює:

$$r_b = \frac{L\rho_b}{S} = \frac{0,0595 \cdot 1,278}{0,0098} = 7,7592 \text{ Ом}.$$

Опір емітера знаходимо за формулою:

$$r_e = \frac{L\rho_e}{S}, \quad (9)$$

де ρ_e -питомий опір емітера.

Питомий опір емітера знаходим аналогічним чином за рівнянням електропровідності, врахувавши, що емітер є напівпровідником р-типу.

$$\rho_e = \frac{1}{\sigma_b} = \left[q \left(\frac{-N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_n + \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_p \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

Або, з урахуванням $N_A = N'_A l_p$, маємо:

$$\rho_e = \frac{1}{\sigma_e} = \left[q \left(\frac{-(N'_A l_p) + \sqrt{(N'_A l_p)^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_n + \frac{N'_A l_p + \sqrt{(N'_A l_p)^2 + 4n_i^2}}{2} \times \mu_p \right) \right]^{-1}$$

Підставивши усі дані, маємо $\rho_e = 19,052 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

Повний опір емітера дорівнює:

$$r_e = \frac{L\rho_e}{S} = \frac{0,0595 \cdot 19,052}{0,0098} = 115,672 \text{ Ом.}$$

Знайдем загальний опір бази та емітера:

$$r_{b+e} = 7,7592 + 115,672 = 123,4312 \text{ Ом.}$$

Маючи усі опори, запишемо вираз ВАХ в наступному вигляді:

$$I_{\text{опір}} = I_0 \times \left(e^{\frac{U - I \cdot r_{b+e}}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (11)$$

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

$$I_{\text{sum}} = I_R + I_{\text{опір}} = \left(\frac{1}{2} q S l_0 \frac{n_i}{\tau} \times e^{\frac{U}{2\varphi_T}} \right) + I_0 \times \left(e^{\frac{U - I \cdot r_{b+e}}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (12)$$