

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ

Кафедра мікроелектроніки

**ЗВІТ
З ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ № 3**

3 курсу «Твердотільна електроніка»

На тему: «ВАХ діода»

Виконав:
студент 3 курсу
групи ДМ-82
Іващук Віталій

Перевірив:
Любомир Миколайович
Королевич

Оцінка: _____

Київ 2020

Завдання:

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. На графіках показати порівняння реальної ВАХ та ідеальної. За необхідності виконати побудову у різних масштабах та діапазонах струму/напруги, для досягнення повної інформативності.

Додатково в кінці звіту вказати:

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

Данні за варіантом:

Таблиця 1. Вхідні параметри

Матеріал	Ge
Гradient концентрації акцепторів N_A' , см^{-4}	$1,2 \cdot 10^{19}$
Гradient концентрації донорів N_D' , см^{-4}	$4,8 \cdot 10^{21}$
Довжина діода L_D , см	0,045
Площа поперечного перерізу S , см^2	0,011
Дифузійна довжина електронів L_n , см	0,005
Дифузійна довжина дірок L_p , см	0,002
Температурний потенціал φ_T , В	0,026
Коефіцієнт дифузії електронів D_n , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	94
Коефіцієнт дифузії дірок D_p , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	44
Час життя носіїв τ , с	10^{-5}
Елементарний заряд q , Кл	$1,6 \cdot 10^{-19}$
Концентрація власних носіїв заряду n_i , см^{-3}	$2,4 \cdot 10^{13}$
Ширина переходу в п-області l_n , см	$0,4147 \cdot 10^{-6}$
Ширина переходу в р-області l_p , см	$8,2941 \cdot 10^{-5}$
Висота потенціального бар'єра φ_0 , В	0,2707

Виконання:

Для початку побудуємо вольт-амперну характеристику ідеального діода. Запишемо формулу, яка описує ВАХ ідеального діода:

$$I = \left(q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} S + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} S \right) \left(e^{\frac{U}{\phi_T}} - 1 \right); \quad (1)$$

де, p_{n0} – рівноважна концентрація дірок; n_{p0} – рівноважна концентрація електронів.

Концентрацію неосновних носіїв можна розраховувати за формулами:

$$\begin{aligned} p_{n0} &= \frac{n_i^2}{N_D}; \\ n_{p0} &= \frac{n_i^2}{N_A}. \end{aligned} \quad (2)$$

де, N_D, N_A – концентрації донорних та акцепторних домішок.

Концентрації донорних та акцепторних домішок можна знайти через їх градієнти концентрацій за формулами:

$$\begin{aligned} N_D &= N'_D \cdot l_n; \\ N_A &= N'_A \cdot l_p. \end{aligned} \quad (3)$$

Знайдемо числові значення рівноважних концентрацій:

$$p_{n0} = \frac{(2,4 \cdot 10^{13})}{4,8 \cdot 10^{21} * 0,4147 \cdot 10^{-6}} = 27072183562 \text{ см}^{-3}$$

$$n_{p0} = \frac{(2,4 \cdot 10^{13})}{1,2 \cdot 10^{19} * 8,2941 \cdot 10^{-5}} = 541443671256 \text{ см}^{-3}$$

За допомогою формули (1), розрахованими параметрами і вхідними даними побудуємо ВАХ ідеального діода (окремо пряму і зворотну гілки для відповідності масштабів):

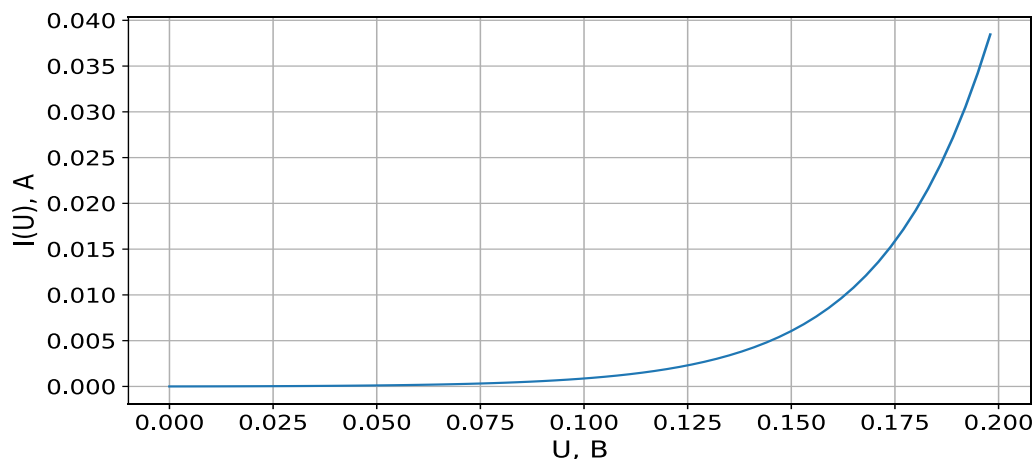


Рисунок 1. Пряма гілка ВАХ ідеального діода

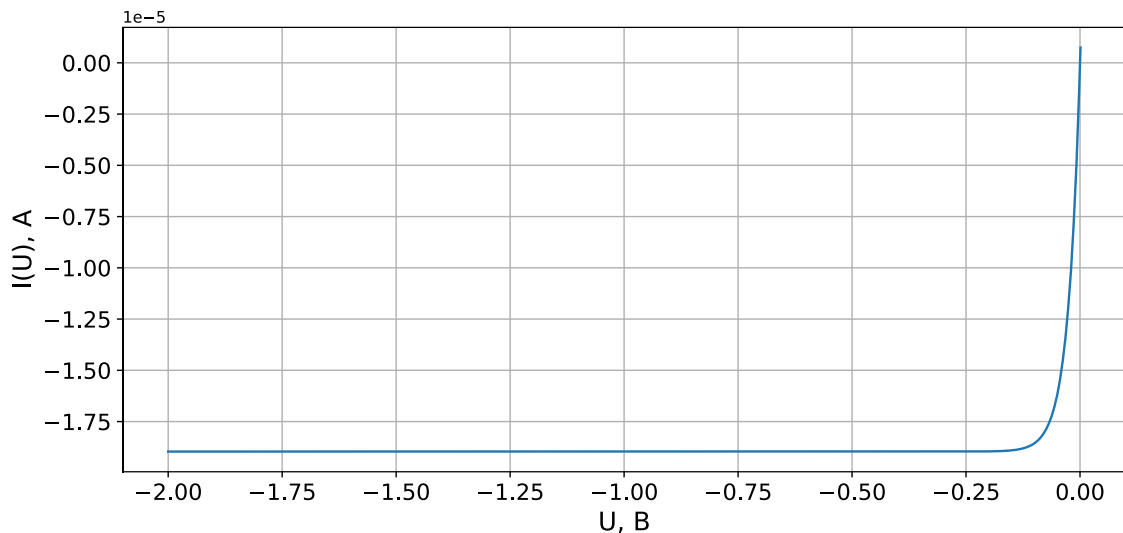


Рисунок 2. Зворотно гілка ВАХ ідеального діода

Далі побудуємо графік ВАХ для реального діода. Цей графік буде значно відрізнятися від ВАХ ідеального діода, адже в реальному діоді враховується вплив опору бази, вплив струму рекомбінації, вплив пробоя та ін.

Для початку зобразимо пряму гілку ВАХ реального діода. Для цього потрібно враховувати вплив опору бази а також струму рекомбінації.

Струм рекомбінації розраховуємо за формулою:

$$I_R = \frac{1}{2} q S l_0 \frac{n_i}{\tau_{\text{еф}}} e^{\frac{U}{2\varphi_T}} = I_{R0} e^{\frac{U}{2\varphi_T}}. \quad (4)$$

де S — площа р-п переходу; $l_0 = l_n + l_p$ — ширина переходу у зрівноваженому стані; $\tau_{\text{еф}} = \tau$ — ефективна тривалість життя носіїв заряду; I_{R0} — струм рекомбінації у зрівноваженому стані.

Також 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. Розрахуємо ці опори за формулами:

1. Опір бази:

$$r_b = \frac{W_b \rho_b}{S}; \quad (5)$$

де ρ_b — питомий опір бази; W_b — товщина бази.

2. Опір емітера:

$$r_e = \frac{W_e \rho_e}{S}; \quad (6)$$

де ρ_e — питомий опір емітера; W_e — товщина емітера.

Оскільки $l_p > l_n$ можна вважати, що база знаходиться в р-області, тоді емітер знаходиться в п-області. З урахуванням області бази і емітера можна записати формули для знаходження їх товщини:

1. Товщина бази:

$$W_b = \frac{L_D}{2} - l_p; \quad (7)$$

2. Товщина емітера:

$$W_e = \frac{L_D}{2} - l_e; \quad (8)$$

де L_D — довжина діода.

Далі потрібно визначити питомий опір бази і емітера, що можна визначити як обернену величину до електропровідності, враховуючи тип напівпровідника.

Формула для визначення питомого опору бази має вигляд:

$$\rho_b = \frac{1}{\sigma_b} = \frac{1}{q \left(\frac{-N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2} \cdot \mu_n + \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2} \cdot \mu_p \right)}. \quad (9)$$

Підставивши всі значення, отрисуємо, що $\rho_b = 3,0873$ Ом·см.

Формула для визначення питомого опору емітера має вигляд:

$$\rho_e = \frac{1}{\sigma_e} = \frac{1}{q \left(\frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \cdot \mu_n + \frac{-N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \cdot \mu_p \right)}. \quad (10)$$

Підставивши всі значення, отрисуємо, що $\rho_e = 0,0753$ Ом·см.

Тепер знайдемо товщину емітера і бази за формулат:

$$W_b = \frac{0,045}{2} - 8,2941 \cdot 10^{-5} = 22,4113 \cdot 10^{-3} \text{ см};$$

$$W_e = \frac{0,045}{2} - 0,4147 \cdot 10^{-6} = 22,4955 \cdot 10^{-3} \text{ см}.$$

Далі знайдемо опір бази і емітера за формулами (5) і (6) підставивши розраховані і відомі величини в формули:

$$r_b = \frac{22,4113 \cdot 10^{-3} \cdot 3,0873}{0,011} = 6,2901 \text{ Ом};$$

$$r_e = \frac{22.4955 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0753}{0,011} = 0.1540.$$

Тепер запишемо формулу яка описує вплив опору бази та емітера на пряму гілку ВАХ реального діода:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U - I \cdot (r_b + r_e)}{\varphi_T}} - 1 \right). \quad (11)$$

На пряму гілку ВАХ впливають струми рекомбінації і опори бази і емітера, результуюче рівняння яке описує пряму гілку ВАХ реального діода знаходиться за формулою:

$$I_{\text{пр}} = I + I_R = I_0 \left(e^{\frac{U - I \cdot (r_b + r_e)}{\varphi_T}} - 1 \right) + \frac{1}{2} q S l_0 \frac{n_i}{\tau_{\text{еф}}} e^{\frac{U}{2\varphi_T}}. \quad (12)$$

Побудуємо пряму гілку ВАХ реального діода за формулою (12):

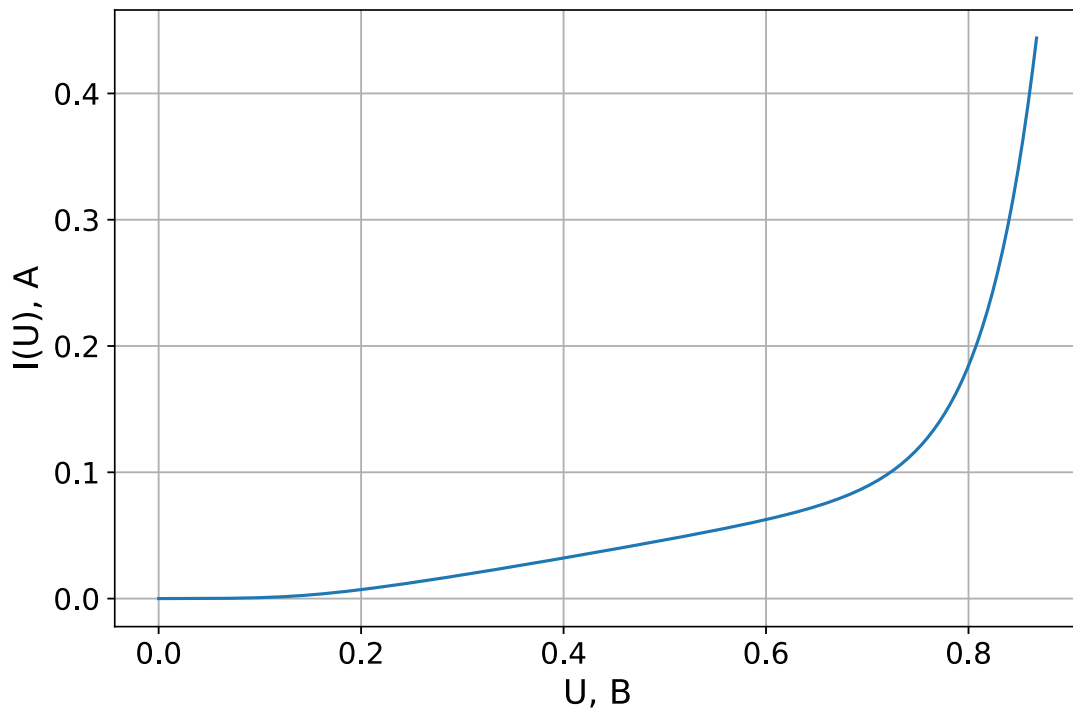


Рисунок 3. Пряма гілка ВАХ реального діода.

Для порівняння також побудуємо пряму гілку реального та ідеального діода на одному рисунку:

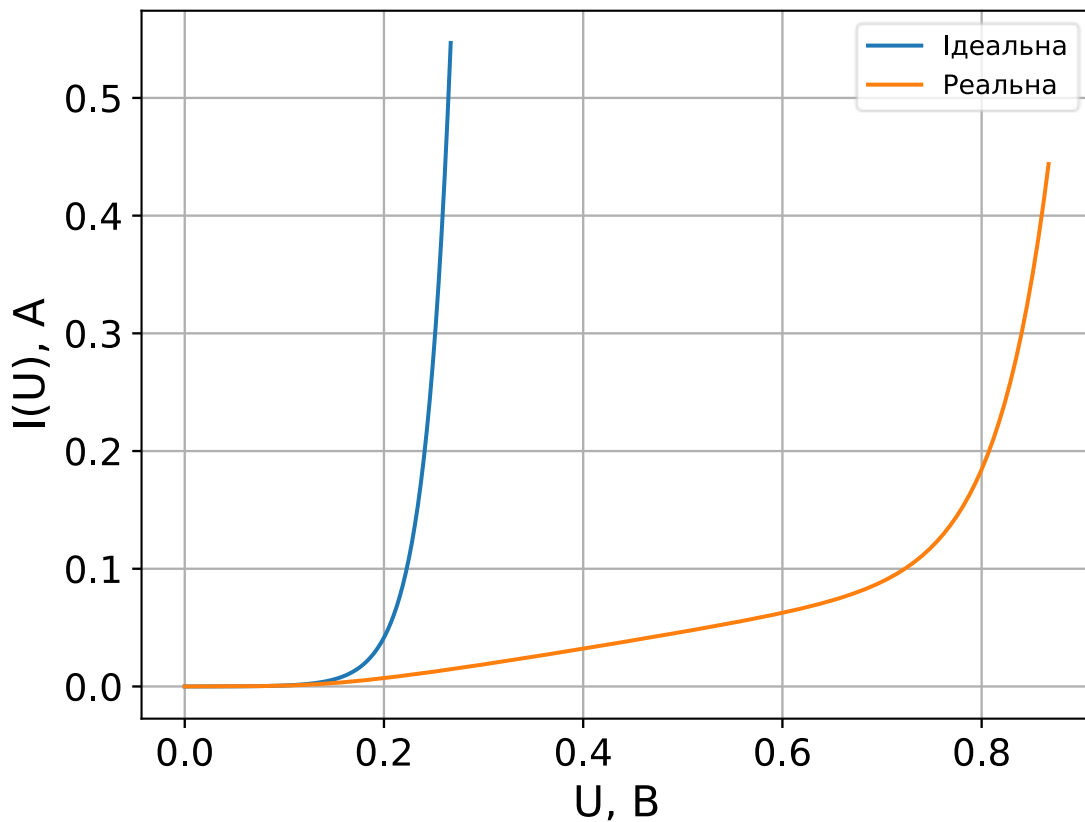


Рисунок 4. Пряма гілка ВАХ реального і ідеального діодів.

Тепер побудуємо зворотну гілку реального діода. Під час побудови зворотної гілки потрібно враховувати, що в зворотній гілці потрібно врахувати пробій, тепловий струм і струм термогенерації.

Для початку запишемо вираз для розрахунку впливу теплового струму на зворотну гілку ВАХ:

$$I_0 = qSL_p \frac{p_{n0}}{\tau_p}; \quad (13)$$

де $\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p}$ — час життя дірок.

Знайдемо значення теплового струму підставивши всі значення у формулу (13) :

$$I_0 = 1,0482 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

Далі запишемо формулу за якою знайдемо вплив струму термогенерації на зворотну гілку:

$$I_G = \frac{1}{2} qSl \frac{n_i}{\tau}; \quad (14)$$

де, l – ширина переходу.

Підставимо всі значення в (14) і знайдемо значення струму термогенерації:

$$I_G = 1.9659 \cdot 10^{-8} \text{ А.}$$

Далі порахуємо пробій у нашому діоді. Для початку нам потрібно визначити тип пробою тунельний чи лавинний у діоді. Для цього спочатку потрібно визначити напруги при яких відбувається пробій і для лавинного і для тунельного пробою.

Виходячи з того, що матеріал з якого виготовлений діод це германій запишемо формули для визначення напруг цих пробіїв:

$$U_{\text{проб.т}} = 100\rho_n + 50\rho_p; \quad (15)$$

$$U_{\text{проб.л}} = K\rho_b^m. \quad (16)$$

Де ρ_n, ρ_p – відповідно питомі опори в n і p -областях; K, m – коефіцієнти матеріалу.

Оскільки у нашому випадку база знаходиться в p-області то $K = 52$; $m = 0,6$, а $\rho_n = \rho_e$ і $\rho_p = \rho_b$.

Підставивши всі значення в (15) і (16) визначимо напруги пробою:

$$U_{\text{проб.т}} = 161.8986 \text{ В;}$$

$$U_{\text{проб.л}} = 102.2711 \text{ В.}$$

Оскільки $U_{\text{проб.т}} > U_{\text{проб.л}}$ у нашому випадку буде лавинний пробій, і формула за якою визначається струм пробою на зворотній гілці буде:

$$I_{\text{проб}} = I_{\text{зв}} \cdot M; \quad (17)$$

де $I_{\text{зв}}$ описується формулою (1);

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{проб.л}}}\right)^n}. \quad (18)$$

де $n = 5$ – константа, яка залежить від матеріалу і типу бази.

Тепер запишемо остаточну формулу, яка описує ВАХ зворотної гілки діода:

$$I_{zv} = I_{\text{проб}} + I_G + I_0 = \frac{1}{2} q S l \frac{n_i}{\tau} + \frac{I_0 \left(e^{\frac{U}{2\varphi_T}} - 1 \right)}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{проб.л}}} \right)^5} \quad (19)$$

Побудуємо графік зворотної гілки реального діода за формулою (19):

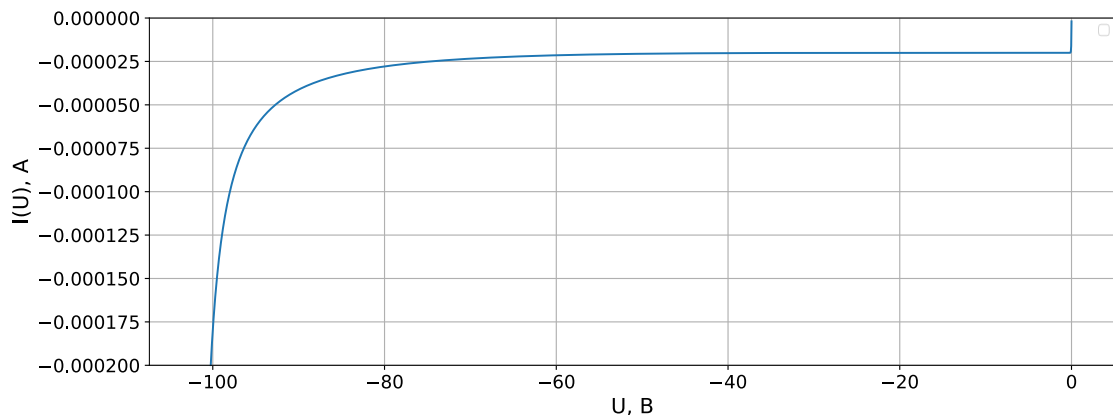


Рисунок 5. Зворотна гілка ВАХ реального діода.

І для наглядності побудуємо зазворотні гілки реального та ідеального діодів:

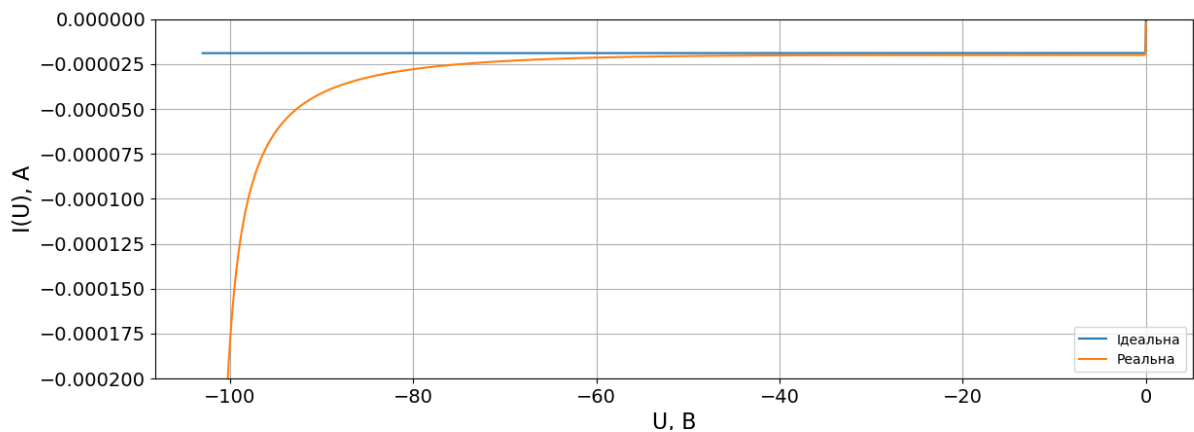


Рисунок 6. Зворотна гілка ВАХ реального і ідеального діодів.

Тепер знайдемо значення струму для трьох значень зовнішньої напруги $(0,1) \cdot \varphi_0$, $(0,8) \cdot U_{\text{проб}}$, $(0,3) \cdot \varphi_0$. - як для реальної так і для ідеалізованої.

Спочатку знайдемо ці струми для ідеалізованої ВАХ:

Розрахунки проводимо для трьох напруг, які становлять:

$$U_1 = 0,1 \cdot \varphi_0 = 0,1 \cdot 0,2707 = 0,02707 \text{ В}$$

$$U_2 = 0,3 \cdot \varphi_0 = 0,3 \cdot 0,2707 = 0,08121 \text{ В}$$

$$U_3 = 0,8 \cdot U_{\text{пробл}} = 0,8 \cdot (-102,2711) = -81,8168 \text{ В}$$

Підставимо ці значення у формулу (1) і отримаємо необхідні значення:

$$\begin{aligned} I_1 &= 3.4750 \cdot 10^{-5} \text{ А} \\ I_2 &= 0.4119 \cdot 10^{-3} \text{ А} \\ I_3 &= -1.8963 \cdot 10^{-5} \text{ А} \end{aligned}$$

Далі розрахуємо струми для реального діода при напругах U_1, U_2, U_3 . Оскільки U_1, U_2 знаходяться на прямій гілці ВАХ то струм знаходимо з формули (12), а U_3 це зворотня гілка, то струм знаходимо за (19):

$$\begin{aligned} I_1 &= 3.5033 \cdot 10^{-5} \text{ А} \\ I_2 &= 0.3750 \cdot 10^{-3} \text{ А} \\ I_3 &= -2.9268 \cdot 10^{-5} \text{ А} \end{aligned}$$

Кінцеві результати:

Концентрації домішок:

У базі:

$$N_A = N'_A \cdot l_p = 1.0638 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

У емітері:

$$N_D = N'_D \cdot l_n = 2.1276 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Тип пробою – лавинний;

Напруга пробою: $U_{\text{пробл}} = 102.2711 \text{ В}$.

Значення струму для трьох значень зовнішньої напруги:

Для ідеального діода:

$$\begin{aligned} I_1 &= 3.4750 \cdot 10^{-5} \text{ А} \\ I_2 &= 0.4119 \cdot 10^{-3} \text{ А} \\ I_3 &= -1.8963 \cdot 10^{-5} \text{ А} \end{aligned}$$

Для реального діода:

$$\begin{aligned} I_1 &= 3.5033 \cdot 10^{-5} \text{ А} \\ I_2 &= 0.3750 \cdot 10^{-3} \text{ А} \\ I_3 &= -2.9268 \cdot 10^{-5} \text{ А} \end{aligned}$$