

Лабораторна робота № 6

Дослідження діода мікрохвильового діапазону

Мета роботи - вивчити переваги, недоліки та області використання діода Гана, виконати математичне моделювання його вольт – амперної характеристики та визначити на основі розробленої моделі робочі параметри діода.

4.1 Короткі теоретичні відомості

До діодів мікрохвильового діапазону належать діоди з бар'єром Шоткі, лавінопрольотні, тунельні діоди та діоди Гана.

Діодом Гана називають пристрій з напівпровідникового матеріалу, що має складну структуру зони провідності (арсеніду галію, фосфіду індію) із двома омичними контактами (анодом і катодом). Діод Гана є пристроєм твердотільної електроніки, дія якого заснована на створенні в активному середовищі динамічних неоднорідностей під впливом зовнішніх фізичних факторів у процесі експлуатації пристрою. Дія діода Ганна ґрунтується на появі негативного диференціального опору приладу під впливом сильного електричного поля, тобто так названої N – образної ВАХ (рис.4.1).

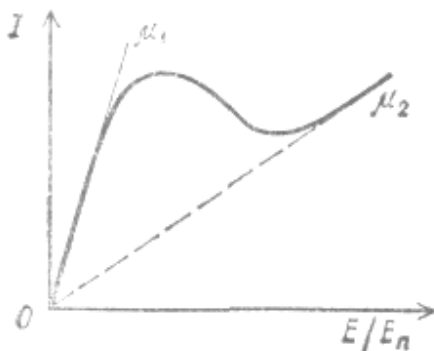


Рисунок 4.1 - Вольт-амперна характеристика діода Гана

Поява ділянки з негативним диференціальним опором на ВАХ приладу обумовлена існуванням двох “долин” в зоні провідності кристала арсеніду галію. В слабких електричних полях електрони у стані рівноваги знаходяться в нижній долині і характеризуються ефективною масою m^*_1 та рухливістю μ_1 . Зі зростанням напруженості прикладеного до діода електричного поля E енергія електронів зростає. Коли напруженість досягає визначеної величини E_n

(порогове поле), енергія електронів стає достатньою для їх інтенсивного переходу з нижньої долини в верхню, де їх ефективна маса більше ($m^*_2 > m^*_1$), а рухливість – менше ($\mu_2 < \mu_1$). Внаслідок цього процесу при слабких електричних полях ($E \ll E_n$) густина струму описується співвідношенням

$$J_1 = en_0 \mu_1 E, \quad (4.1)$$

де: e – заряд електрона, n_0 – густина електронів провідності, а при сильних електричних полях ($E \gg E_n$) швидкість і щільність струму визначаються рухливістю μ_2 :

$$J_2 = en_0 \mu_2 E. \quad (4.2)$$

Поблизу граничного поля ($E = E_n$) у залежності дрейфової швидкості електронів від поля повинен відбуватися перехід від прямої, що відповідає рухливості μ_1 , до прямої, що відповідає рухливості μ_2 . Густина струму на цій ділянці:

$$J = e(n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2) E, \quad (4.3)$$

де n_1 і μ_1 - відповідно концентрація й рухливість електронів у нижній долині зони провідності; n_2 і μ_2 - відповідно концентрація й рухливість електронів у верхній долині зони провідності.

Перехід електронів з нижньої долини у верхню залежить від співвідношення між напруженостями прикладеного електричного поля E и граничного поля переходу E_n :

$$n_1 = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{E}{E_n}\right)^4}, \quad (4.4)$$

$$n_2 = \frac{n_0 \left(\frac{E}{E_n}\right)^4}{1 + \left(\frac{E}{E_n}\right)^4}. \quad (4.5)$$

Легко переконатися, що повна концентрація електронів провідності залишається постійною при будь-якій напруженості електричного поля:

$$n_1 + n_2 = \frac{n_0 \left[1 + \left(\frac{E}{E_n} \right)^4 \right]}{1 + \left(\frac{E}{E_n} \right)^4} = n_0.$$

Струм діода: $I = S \cdot J$ (4.6)

Підставляючи (4.3), (4.4), (4.5) в (4.6) і виразивши напруженість поля E через напругу U і відстань між анодом і катодом діода l

$$(E = U/l),$$

одержуємо вираз для вольт-амперної характеристики діода Гана:

$$I = S n_0 \frac{\frac{\mu_1 + \mu_2}{l} \left(\frac{U}{l E_n} \right)^4}{1 + \left(\frac{U}{l E_n} \right)^4} U, \quad (4.7)$$

де S - площа перетину кристала; E_n - порогове поле.

Для арсеніду галія: $E_n \approx 3$ кВ/см; $\mu_1 = 8000$ см²/(В • с); $\mu_2 = 180$ см²/(В • с).

Потрібна довжина кристала l (відстань між електродами) визначається робочою частотою діода f :

$$l = v_l / f,$$

де v_l - величина дрейфової швидкості електронів в слабких полях (в арсеніді галію $v_l = 2 \cdot 10^7$ см/с).

Перевіримо межі застосовності отриманого виразу для ВАХ. При дуже малих напругах $U \rightarrow 0$ четвертий ступінь відношення в

дужках дає зневажливо малу величину $\left(\frac{U}{l E_n} \right)^4 \rightarrow 0$,

тому
$$I = S n_0 \mu_1 \frac{U}{l} = S n_0 \mu_1 E.$$

Розділивши струм на перетин кристала, одержимо вираз для густини струму (4.1).

При високих напругах $U \rightarrow \infty$ четвертий ступінь відношення в дужках дає дуже велику величину, тому одиницею в знаменнику й виразом $\mu_1 l$ у чисельнику можна зневажити, тому одержуємо:

$$I = Sen_0 \mu_2 \frac{U}{l} = Sen_0 \mu_2 E ,$$

що аналогічно виразу для густини струму (4.2).

Таким чином, вираз (4.7) адекватно описує не тільки падаючу ділянку ВАХ, але й всі ділянки вольт-амперної характеристики, тобто є адекватною математичною моделлю вольт – амперної характеристики діода Гана.

Підставивши в (4.7) задані параметри напівпровідникової структури діода S, l, n_0 , значення величини заряду електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а також параметри монокристала арсенида галію $\mu_1 = 8000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_2 = 180 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $E_n = 3\ 000 \text{ В/см}$, можемо виконати чисельний розрахунок ВАХ діода Гана.

По розрахованій ВАХ можна визначити робочі параметри діода:

1. Піковий струм – значення струму в максимумі ВАХ $I_{\text{п}}$.
2. Струм западини - значення струму в мінімумі ВАХ I_3 .
3. Відношення струмів - $I_{\text{п}} / I_3$.
4. Напругу піка - значення напруги в максимумі ВАХ $U_{\text{п}}$.
5. Напругу западини - значення напруги в мінімумі ВАХ U_3 .
6. Негативну провідність - диференціальну провідність на падаючій ділянці ВАХ $g = \Delta I / \Delta U$.

4.2 Порядок виконання роботи

1. Довести математичну модель ВАХ до вигляду, прийнятного для числового розрахунку, для чого підставити в (4.7) числові величини за своїм варіантом завдання (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Завдання для моделювання ВАХ діода Гана

Номер варіанта	Частота, f , ГГц	Площа перетину S , см^2	Густина електронів n_0 , см^{-3}
1	30	0,03	$3 \cdot 10^{15}$

2	35	0,025	$4 \cdot 10^{15}$
3	40	0,02	$5 \cdot 10^{15}$
4	45	0,015	$6 \cdot 10^{15}$
5	50	0,01	$7 \cdot 10^{15}$

2. Використовуючи програму Microsoft Excel виконати розрахунок і побудувати графік ВАХ діода.

3. За побудованим графіком ВАХ визначити робочі параметри діода Гана.

4.3 Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Побудова математичної моделі ВАХ діода Гана.
3. Числова форма математичної моделі ВАХ для заданого варіанта.
4. Розрахована ВАХ у графічному вигляді.
5. Розраховані робочі параметри діода Гана.

4.4 Контрольні питання

1. Фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, область застосування діода Шоткі.
2. Фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, область застосування лавино-прольотного діода.
3. Фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, область застосування тунельного діода.
4. Фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, область застосування діода Гана.
5. Принцип математичного моделювання ВАХ діода Гана.
6. Визначення робочих параметрів діода Гана.