

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем**



ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт

СУМИ – 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт

**для здобувачів 3 та 1с.т. курсу
освітньої програми**

**«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм здобуття освіти
ступеню вищої освіти «Бакалавр»**

СУМИ – 2025

УДК 621.382(073)

Р 99

Укладачі:

Рясна О.В., ст. викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем.

Н22 Електронні пристрої в системах керування: методичні вказівки щодо виконання практичних робіт / укл.: О.В. Рясна - Суми, 2025. – 29 с.

Методичні вказівки спрямовані на надання методичної допомоги здобувачам під час виконання практичних робіт. Містять загальні методичні рекомендації, практичні завдання, алгоритми для проведення розрахунків з забезпечення ефективного та безпечного функціонування в системах електроніки та контрольні питання для самоконтролю знань.

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт призначені для здобувачів ступеню вищої освіти «Бакалавр» освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензенти:

Козін В.М., к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ;

Лобода В. Б., к.ф.-м.н., професор кафедри охорони праці та фізики СНАУ.

Відповідальний за випуск:

Чепіжний А.В., к.т.н., доцент, завідувач кафедрою енергетики та електротехнічних систем СНАУ.

Рекомендовано до видання Радою із забезпечення якості освітньої діяльності та якості вищої освіти інженерно-технологічного факультету СНАУ. Протокол № 6 від «20» травня 2025 року

© Сумський національний аграрний університет, 2025

ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ РОБІТ	8
	Практична робота № 1 Електрон в електричному та магнітному полях ..	8
	Практична робота № 2 Електронно-променеві прилади	11
	Практична робота № 3 Будова атома. Основи квантової механіки	15
	Практична робота № 4 Власні та домішкові напівпровідники. Елементи фізичної статистики	17
	Практична робота № 5 Електропровідність руху носіїв у напівпровіднику	20
	Практична робота № 6 Неврівноважені носії заряду	24
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	28

ВСТУП

Електронні пристрої в системах керування є ключовою навчальною дисципліною, що вивчає активні електронні компоненти та принципи їх використання в сучасних системах автоматичного керування. Основна увага приділяється аналізу, вибору та практичному застосуванню електронних приладів у структурі систем збору, обробки та перетворення інформації.

Засвоєння матеріалу ґрунтується на знаннях, здобутих у курсах «Вища математика», «Фізика», «Основи електроніки», «Основи електротехніки», «Електротехнічні матеріали».

До складу активних компонентів, що розглядаються в межах дисципліни, входять електронні вакуумні прилади, дискретні напівпровідникові елементи, а також інтегральні мікросхеми, що використовуються в керуючих і регулювальних пристроях. Для глибшого розуміння їх роботи необхідно вивчити фізичні процеси, пов'язані з переміщенням електронів у твердих тілах, вакуумі, рідких середовищах і на межах розділу фаз.

Мета дисципліни — забезпечити майбутніх фахівців знаннями, що дозволяють ефективно використовувати напівпровідникові та вакуумні прилади, ІМС у системах автоматичного керування, а також орієнтуватися в новітніх тенденціях розвитку елементної бази таких систем.

Курс сприяє формуванню у здобувачів освіти практичних навичок з правильного вибору електронних компонентів з урахуванням вимог до конкретної системи керування, їх моделювання та аналізу. Це дозволяє інженерам здійснювати оптимальне проектування та експлуатацію технічних систем з урахуванням таких параметрів, як надійність, швидкодія, енергоефективність, компактність і маса.

Матеріал дисципліни електронні пристрої в системах керування є необхідною основою для подальшого вивчення аналогових, імпульсних і цифрових систем керування, побудованих на сучасних дискретних та інтегральних електронних компонентах.

1. ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

Практична робота № 1

Тема 1 Електрон в електричному та магнітному полях

Мета: вивчення особливостей руху електронів в електричному та магнітному полях.

Короткі теоретичні відомості

1. Рух фізичної частки можна описати законами кінематики

$$\begin{aligned}v_2 &= v_1 + a \cdot t, \\ S &= v_1 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}, \\ v_2^2 &= v_1^2 + 2 \cdot a \cdot S,\end{aligned}$$

де v_1, v_2 – початкова та кінцева швидкості частки, $м/с$; a – постійне прискорення, $м/с^2$; S – відстань, яку пройшла частка, $с$.

Кінетична енергія частки [Дж] масою m :

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Сила [Н], що діє на частку:

$$F = m \cdot a .$$

2. На електрон, що знаходиться в електричному полі діє сила:

$$F = q \cdot E = q \cdot \frac{U}{d},$$

де q – заряд електрона Кл; E – напруженість електричного поля, $В/м$; U – напруга між пластинами, що утворює електричне поле, В; d – відстань між пластинами, $м$.

Кінетична енергія електрона:

$$E_k = q \cdot U.$$

Зв'язок між одиницями вимірювання: $[Дж] = q \times [eВ]$.

3. На електрон, що рухається в однорідному магнітному полі, діє сила Лоренца:

$$F_{\text{л}} = B \cdot q \cdot U \cdot \sin \alpha ,$$

де B – магнітна індукція, Тл ; α – кут між напрямком струму і магнітною силовою лінією поля; v – швидкість руху електрона, м/с .

Завдання до теми

1. Із середини нижньої пластини у вертикальному напрямку інжектується електрон з початковою швидкістю $v_0 = 10^7 \text{ м/с}$. Відстані між пластинами $d = 10 \text{ мм}$. Напруга, що подається на пластини дорівнює 100 В . Верхня пластина заряджена позитивно. Визначити:

- 1) швидкість електрона v_2 у момент стикання з верхньою пластиною;
- 2) час прольоту електрона t між пластинами;
- 3) енергію електрона E в момент стикання з пластиною.

Відповіді: $v_2 = 1,163 \cdot 10^7 \text{ м/с}$; $t = 0,93 \text{ нс}$; $E = 385 \text{ еВ}$.

2. Початкові умови попередньої задачі. Коли електрон знаходиться на відстані 4 мм від нижньої пластини, полярність змінюється. Визначити:

- 1) у яку пластину влучить електрон;
- 2) швидкість у момент удару по пластині;
- 3) повний час прольоту.

Відповіді: електрон вдариться у верхню пластину; $v_2 = 0,964 \cdot 10^7 \text{ м/с}$; $t = 0,39 \text{ нс}$.

3. Із середини зазору в горизонтальному напрямку вилітає електрон з початковою енергією 250 еВ . Визначити різницю потенціалів між пластинами, якщо траєкторія електрона лінії торкається краю пластини.

Відповідь: $U = 5 \text{ В}$.

4. Пучок електронів, маючи швидкість $v = 3,1 \cdot 10^7 \text{ м/с}$, потрапляє в однорідне поперечне магнітне поле з індукцією $B = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб / м}^2 (\text{Тл})$, пройшовши відстань $S = 5 \text{ см}$, відхиляється на кут 5° . Знайти співвідношення заряду електрона до його маси.

Відповідь: $\frac{e}{m} = 1,69 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$.

Тестові завдання

1. Вивести вираз для радіуса та періоду обертання частки в поперечному магнітному полі з індукцією B , якщо енергія частки E [eB].

Відповіді: електрон окреслює повну окружність за час $T = \frac{2\pi}{B} \cdot \frac{m}{e}$;

$$r = \frac{1}{B} \left(2 \cdot \frac{m}{e} \cdot E \right)^{\frac{1}{2}}.$$

2. Електронний промінь проходить крізь поперечне магнітне поле з індукцією $6,5 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$, яке діє на відстані 6 см в напрямку розповсюдження променя. Визначити прискорювальну напругу, якщо промінь відхилився на 15° .

Відповідь: $U = 1950 \text{ В}$.

3. Із середини нижньої пластини у вертикальному напрямку інjektується електрон, з початковою швидкістю $v_0 = 0 \text{ м/с}$. Відстані між пластинами $d = 3 \text{ см}$. Напруга, що подається на пластини, дорівнює 2000 В . Верхня пластина заряджена позитивно. Визначити:

- а) через який проміжок часу швидкість електрона буде сягати 10^7 м/с ; б) який при цьому шлях він пройде;
- в) яка різниця потенціалів відповідає цій швидкості;
- г) на скільки збільшиться кінетична енергія електрона в кінці шляху.

Відповіді:

а) $t = 8,5 \cdot 10^{-10} = 0,85 \text{ нс}$;

б) $S = 4 \text{ мм}$;

в) $U_2 = 284,2 \text{ В}$;

г) $\Delta E = 27,5 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$.

Література: [1–10].

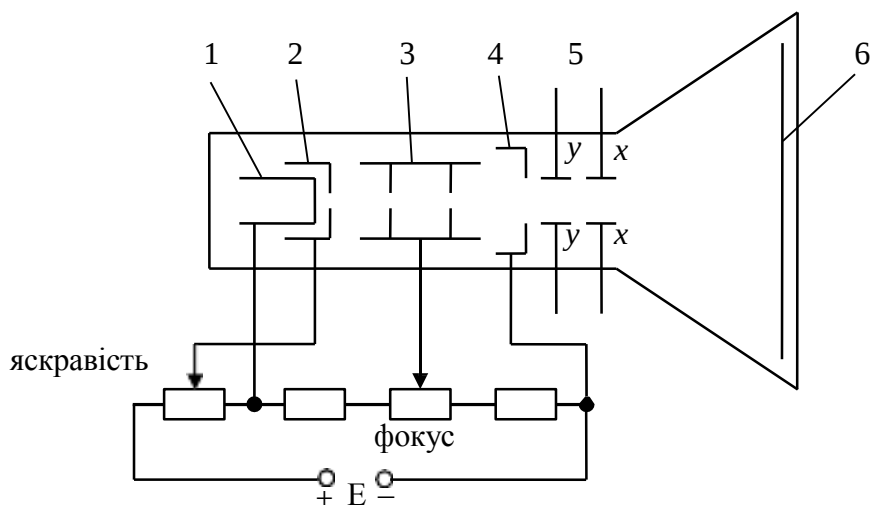
Практична робота № 2

Тема 2 Електронно-променеві прилади

Мета: вивчити будову та принцип дії електронно-променевих приладів.

Короткі теоретичні відомості

1. Система електростатичного відхилення електронно-променевої трубки (ЕПТ).



1 – катод; 2 – електрод керування; 3 – перший анод; 4 – другий анод;

5 – пластини відхилення; 6 – екран

Рисунок 2.1 – Будова ЕПТ

Основні складові трубки:

1) електронна гармата (1–4) – створює вузький електронний промінь, що направлений уздовж усієї трубки. Аноди 3 і 4 необхідні для прискорення та фокусування електронів;

2) система відхилення (5);

3) екран.

Щоб отримати зображення на ЕПТ, на пластини ХХ подається пилкоподібна напруга, а сигнал, що вимірюється, подається на пластини YY, тоді вертикальне зміщення пучка пропорційне миттєвій величині сигналу.

Для отримання нерухомого зображення на екрані, необхідно, щоб період розгорання T_p дорівнював цілому числу періодів сигналу T_c , що досліджується:

$$T_p = n T_c ,$$

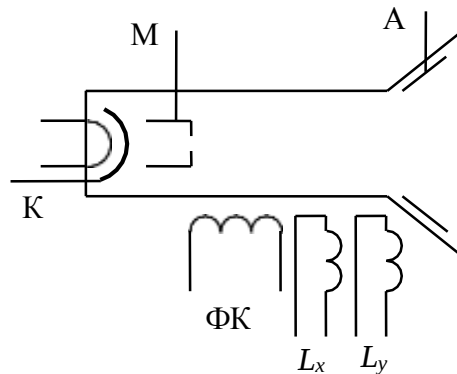
де $n = 1, 2, 3 \dots$ – ціле число.

Основний параметр ЕПТ – чутливість трубки:

$$S = \frac{y}{U} = \frac{1}{2} \cdot \frac{LD}{dU_a}, \quad (2.1)$$

де y – зміщення променя у вертикальному напрямку; U – напруга, що подається на YY пластини; L, d – довжина пластин і відстань між ними; D – відстань від середини пластин до екрана; U_a – напруга на останньому аноді.

2. Магнітні ЕПТ



ФК – фокусувальна котушка; L_x, L_y – система відхилення котушок; К – катод;

М – модулятор; А – анод

Рисунок 2.2 – Будова магнітної ЕПТ

Фокусувальна система та система відхилення котушок знаходяться назовні трубок, тому їхня будова простіша, ніж електростатичних.

Чутливість магнітної трубки – це відношення відхилення y променя на екрані до величини магнітного поля B , яке спричиняє це відхилення:

$$S = \frac{y}{B} = LD \sqrt{\frac{e}{m} \cdot \frac{1}{2U_a}} \quad (2.2)$$

Завдання до теми

1. Вивести формулу 1 та розрахувати чутливість до електростатичного відхилення, якщо потенціал на останньому від катода аноді дорівнює 2 кВ, а розміри системи відхилення: $L = 20$ мм, $d = 5$ мм, $D = 0,25$ м.

Відповідь: $S = 0,25$ мм/В.

2. Отримати формулу 2 чутливості до магнітного відхилення ЕПТ.

Котушки відхилення ЕПТ створюють однорідний потік магнітного поля, яке

розповсюджується на відстань $L = 0,03$ м уздовж осі, а центр цього поля лежить на відстані $D = 0,25$ м від екрана. Визначити чутливість ЕПТ, якщо напруга на аноді $U_a = 4,45$ кВ.

Відповідь: $S = 33,21$ м/Тл.

Тестові завдання

1. На Y – пластини ЕПТ подається напруга $U_y = 100 \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t)$, В. Якою повинна бути тривалість безперервного лінійного розгортання для отримання осцилограми досліджуваної напруги в 5 періодів.

Відповідь: 5 мс.

2. На пластини відхилення подано синусоїдальну напругу. На екрані спостерігається пряма лінія довжиною 5 см. Визначити амплітудне значення напруги, якщо чутливість пластин $h_y = 0,4$ мм/В.

Відповідь: 62,5 В.

3. На Y – пластини ЕПТ подається напруга $U_y = 100 \cdot \sin(2\pi \cdot 1000t)$, В, а на X – пластини $U_x = 0$. Які координати має електрон на екрані в момент $t = 0,2$ мс, якщо чутливість обох пар пластин однакова й дорівнює $h = 0,23$ мм/В.

Відповідь: (0; 22) мм.

4. Напруга, що досліджується, має період $T = 100$ мкс. Якою повинна бути частота безперервного лінійного розгортання для отримання осцилограми досліджуваної напруги в 5 періодів.

Відповідь: 50 кГц.

Література: [1–10].

Практична робота № 3

Тема. Будова атома. Основи квантової механіки

Мета: вивчити будову атома та закони квантової механіки.

Короткі теоретичні відомості

Постулати Бора

В атомі існують стаціонарні стани. Рух електронів по стаціонарних орбітах не супроводжується випромінюванням електромагнітних хвиль.

На такій орбіті має розміщуватися ціле число хвиль де Бройля:

$$2\pi r_n = n \cdot \lambda_n = n \cdot h / (mV)$$

де V - швидкість електрона, що рухається по n -ій орбіті радіуса r_n .

Правило частот

Унаслідок переходу електрона з однієї стаціонарної орбіти на іншу випромінюється (поглинається) один фотон з енергією, що дорівнює різниці енергії відповідних стаціонарних станів n і m :

$$h\nu = E_n - E_m$$

Гіпотеза де Бройля (корпускулярно-хвильовий дуалізм)

Кожний мікрооб'єкт має корпускулярні властивості (енергія E та імпульс p), а з іншого боку хвильовими (частота ν та довжина хвилі λ) характеристиками, які пов'язані між собою залежностями:

$$E = h \nu,$$

$$E = mv^2,$$

$$p = h/\lambda,$$

$$p = mv.$$

Зв'язок довжини хвилі з частотою: $\lambda = v/\nu$, $\nu = 1/T$.

Для фотонів швидкість дорівнює : $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Завдання до теми

1. Визначить радіус стаціонарної орбіти r і відповідний їй енергетичний рівень електрона для незбудженого стану атома водню.

Відповідь: $r_1 = 0,53 \text{ \AA}$, $E_1 = -13,57 \text{ eV}$

2. Визначити довжину хвилі випромінювання атома водню у разі переходу електрона з енергетичного рівня з головним квантовим числом $n = 3$ в основний стан ($n = 1$).

Відповідь : $\lambda = 103$ нм.

3. Визначити довжину хвилі де Бройля для електронів, які пройшли різницю потенціалів 1 та 1000 В.

Відповідь: $\lambda = 1,2 \text{ \AA}$.

4. α -частка рухається в однорідному магнітному полі по колу з радіусом $R = 0,83 \text{ см}$. Напруженість поля $H = 0,025 \text{ А/м}$. Визначити довжину хвилі де Бройля.

Відповідь: $\lambda = 7,912 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Тестові завдання

1. У наближенні боровської моделі водню визначити частоту колового руху електрона по орбіті для незбудженого стану атома та довжину хвилі.

Відповідь: $\lambda_1 = 917,4 \text{ \AA}$, $\nu = 3,75 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$.

2. Визначити енергію, масу та імпульс фотона, довжина хвилі якого $\lambda = 500 \text{ нм}$.

Відповідь: $E = 3,972 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $p = 1,324 \cdot 10^{-27} \text{ Дж} \cdot \text{с/м}$, $m = 4,4 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$.

3. З якою швидкістю повинен рухатись електрон, щоб його кінетична енергія дорівнювала енергії фотона з довжиною хвилі $\lambda = 5200 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Відповідь: $v = 9,1 \cdot 10^5 \text{ м/с}$.

4. Яка кількість фотонів зеленого випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 520 \text{ нм}$ у вакуумі матимуть сумарну енергію 10^{-3} Дж ?

Відповідь: $n_\phi = 2,6 \cdot 10^{15} \text{ шт}$.

Література: [1–4].

Практична робота № 4

Тема. Власні та домішкові напівпровідники. Елементи фізичної статистики

Мета: вивчення зонної теорії власних і домішкових напівпровідників .

Короткі теоретичні відомості

Згідно із зонною теорією речовини, сукупність енергетичних рівнів валентних електронів утворюють валентну зону. Більш високі енергетичні рівні

вільних електронів утворює зону провідності. Ці зони розподілені забороненою зоною.

Вірогідність знаходження електрона в енергетичному стані з енергією E визначається функцією Фермі-Дірака.

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}},$$

де E_F – енергія Фермі. Вірогідність того, що електрон має енергію Фермі дорівнює $f(E_F) = 0,5$.

Коли напівпровідник невідроджений, $E_n - E_F \gg kT$ і користуються статистикою Максвелла-Больцмана. Тоді концентрація електронів і дірок:

$$n = N_n \cdot \exp\left[-\frac{E_n - E_F}{kT}\right],$$

$$p = N_p \cdot \exp\left[-\frac{E_F - E_p}{kT}\right],$$

де N_n та N_p – ефективні щільності стану в зоні; визначаються за формулами:

$$N_n = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_n \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}},$$

$$N_p = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_p \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}},$$

де m_n , m_p – ефективні маси електронів і дірок у відповідних зонах; k – стала Больцмана; T – температура, °K; h – стала Планка.

Власний напівпровідник не містить домішок:

$$n_i = n = p.$$

Для домішкових напівпровідників застосовують закон «діючих мас»:

$$n_i = \sqrt{n \cdot p} = \sqrt{N_n \cdot N_p} \cdot e^{-\frac{\Delta E_z}{2kT}}$$

де ΔE_z – ширина забороненої зони.

Для напівпровідників у рівному стані справедлива умова електронейтральності:

$$p + N_{D^+} = n + N_{A^-},$$

де N_{D^+}, N_{A^-} – концентрації іонізованих донорів та акцепторів.

Завдання до теми

1. Рівень Фермі напівпровідника знаходиться на 0,01 eV вище стелі валентної зони. Розрахувати:

- імовірність появи дірки на верхньому рівні валентної зони при 300 °K;
- імовірність знаходження електрона на дні зони провідності при 300 °K

та ширини забороненої зони 0,67 eV.

Відповідь: $f_p(E_v) = 0,405$; $f_n(E_c) = 8,2 \cdot 10^{-12}$.

2. Рівень Фермі в кремнії при 300 K розташований на 0,2 eV нижче зони провідності. Розрахувати рівноважну концентрацію електронів і дірок, якщо ширина забороненої зони 1,12 eV, а ефективні маси щільності станів $m_n = 1,05 \cdot m_0$, $m_p = 0,56 \cdot m_0$ (m_0 – маса електрона).

Відповіді: $n_0 = 1,18 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $p_0 = 3,72 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$.

3. У кристалах антимоніду індія InSb знаходиться $1,47 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ атомів кремнію та $2,94 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ атомів олова. Кремній заміщує в решітці InSb вузли сурми (Sb) і є акцептором, а олово (Sn) заміщує індій (In) і є донором. Визначити концентрації електронів і дірок, якщо власна концентрація носіїв заряду в антимоніді індію $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Відповідь: $n = 2,86 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $p = 1,39 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Тестові завдання

1. Визначити ймовірність заповнення електронами енергетичного рівня, розташованого на 10 kT вище рівня Фермі. Як зміниться ймовірність заповнення цього рівня електронами, якщо температуру збільшити у 2 рази?

Відповідь: $f_n(T_1) = 4,54 \cdot 10^{-5}$; збільшиться у 147 разів.

2. Концентрація електронів провідності в напівпровіднику 10^{18} м^{-3} . Визначити концентрацію дірок, якщо власна концентрація носіїв заряду за такої самої температури 10^{16} м^{-3} .

Відповідь: 10^{14} м^{-3} .

3. Рівень Фермі в напівпровіднику знаходиться на $0,3 \text{ eV}$ нижче дна зони провідності. Яка ймовірність того, що при $T = 20^\circ\text{C}$ енергетичні рівні, розташовані на $3 kT$ вище дна зони провідності, зайняті?

Відповідь: $3,45 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-3}$.

4. Умова задачі 3. Яка ймовірність того, що на рівні, розташованому біля стелі валентної зони, знаходяться дірки, якщо ширина забороненої зони $1,1 \text{ eV}$.

Відповідь: $1,7 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-3}$.

Література: [1–4].

Практична робота № 5

Тема. Електропровідність руху носіїв у напівпровіднику

Мета: вивчення дрейфового руху носіїв заряду в напівпровідниках

Короткі теоретичні відомості

Тепловий хаотичний рух

Характеризується середньою довжиною вільного пробігу:

$$\bar{l} = v_T \cdot t_n$$

де t_n – середній час між двома послідовними зіткненнями; $v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ – середня швидкість теплового хаотичного руху.

Направлений рух

Дрейф – спрямоване переміщення вільних носіїв заряду, обумовлене електричним полем.

Рух електрона вважають рівноприскореним між двома послідовними зіткненнями. Тоді швидкість дрейфу:

$$\bar{v}_{dp} = \bar{a} \cdot \bar{t}_n = \frac{F}{m} \cdot \bar{t}_n = \frac{q \cdot \varepsilon}{m} \cdot \bar{t}_n = \mu \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де ε – напруженість електричного поля, В/м; q – заряд електрона, Кл; $\mu = \frac{q}{m} \cdot \bar{t}_n$

$$\text{м}^2$$

– рухомість носія, $\frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Тобто μ – швидкість дрейфу вільних носіїв заряду, яку

вони отримують в електричному полі напруженістю в 1В: $\frac{\text{м} / \text{с}}{\text{В} / \text{м}}$.

Щільність дрейфового струму:

$$j_{dp} = j_{dpn} + j_{dpr} = qen\mu_n + qer\mu_p = qe(n\mu_n + r\mu_p) \quad (3)$$

j_{dpn}, j_{dpr} – електронна та діркова складові дрейфового струму, А/м²; n, p – концентрація електронів і дірок, м⁻³; μ_n, μ_p – рухомість електронів і дірок, м²/(В·с).

Вираз (3) можна записати у вигляді:

$$j = \sigma \cdot \varepsilon = \varepsilon / \rho, \quad (4)$$

де $\sigma = q(n\mu_n + r\mu_p)$ – питома електропровідність напівпровідника, См/м; $\rho = 1/\sigma$ – питомий опір напівпровідника, Ом·м.

Вираз (4) являє собою закон Ома у диференційній формі запису.

Дифузія – направлений рух вільних носіїв, обумовлений їх нерівномірним розподілом в об'ємі напівпровідника.

Завдання до теми

1. Визначити середній час і довжину вільного пробігу носіїв заряду за температурою 300 К, якщо їх рухомість $\mu = 0,1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а їх ефективна маса складає 0,26 від маси електрона.

Відповіді: $t_n = 1,478 \cdot 10^{-13} \text{ с}$, $l = 3,38 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

2. Питомий опір власного кремнію при 300 К дорівнює 2000 Ом·м, власна концентрація носіїв заряду $n_i = 1,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Чому дорівнює за такої температури питомий опір кремнію n-типу з концентрацією електронів $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$? Узяти, що рухомість електронів у 3 рази більша ніж рухомість дірок,

і це співвідношення зберігається як для власного, так і для домішкового напівпровідника із заданим ступенем легування.

Відповіді: $\rho = 0,4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

3. Зразок германію містить 10^{20} м^{-3} донорних атомів і $7\cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ акцепторних домішкових атомів. За такої температури власний питомий опір германію дорівнює $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Визначити рівноважну концентрацію електронів і дірок, а також щільність дрейфового струму, який проходитиме через зразок під дією електричного поля, напружністю 200 В/м . Рухомість електронів і дірок: $0,39$ та $0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Відповіді: $n = 4\cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $p = 1,15\cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; $j = 569,8 \text{ А/м}^2$.

Тестові завдання

1. Визначити теплову та дрейфову швидкість електронів за температури 300 К у германії n-типу з концентрацією донорів 10^{22} м^{-3} , якщо щільність струму через зразок $j = 10^4 \text{ А/м}^2$, а ефективна маса електронів провідності складає $0,12$ маси електрона.

Відповідь: $v_T = 3,37\cdot 10^5 \text{ м/с}$, $v_{др\ n} = 6,24 \text{ м/с}$.

2. Через кристал кремнію n-типу з питомим опором $0,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ проходить електронний струм щільністю 200 мА/см^2 . За який час електрони проходять відстань 10 мкм , якщо їх рухомість дорівнює $0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$?

Відповідь: $t = 0,357\cdot 10^{-6} \text{ с}$.

3. Визначити величину струму через зразок кремнію прямокутної форми розмірами $l \times b \times h = 5 \times 2 \times 1 \text{ мм}$, якщо вздовж зразка (l) прикладено напругу 10 В . Відомо, що концентрація електронів у напівпровіднику 10^{21} м^{-3} , а їх рухомість $0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Відповідь: $I = 0,897\cdot 10^{-3} \text{ А}$.

4. Через пластину кремнію з питомим опором $0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ проходить електричний струм щільністю 10 мА/мм^2 . Знайти середні швидкості дрейфу електронів і дірок, якщо їх рухомості відповідно $0,14$ та $0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Відповідь: $v_{др\ n} = 14 \text{ м/с}$; $v_{др\ p} = 5 \text{ м/с}$.

Література: [1–10].

Практична робота

№ 6 Тема. Неврівноважені носії заряду

Мета: вивчити процеси генерації та рекомбінації неуврівноважених носіїв заряду в напівпровідниках.

Короткі теоретичні відомості

Урівноважена концентрація – носії заряду розподілені по об'єму напівпровідника, збуджуються унаслідок взаємодії з фонами решітки та знаходяться у термодинамічній рівновазі з нею.

Неуврівноважені носії – потрапляють у напівпровідник із прилеглих ділянок (інжектуються) або генеруються в цьому об'ємі внаслідок зовнішньої дії (електромагнітного випромінювання) і не знаходяться у термодинамічній рівновазі з решіткою, тобто їхня температура відрізняється від температури решітки.

Носії переходять з місць з вищою концентрацією в місця з нижчою концентрацією, що сприяє виникненню дифузійного струму.

Щільність дифузійного струму:

$$j_{\text{диф}} = j_{\text{диф } n} + j_{\text{диф } p} = qD_n \left(\frac{dn}{dx} \right) - qD_p \left(\frac{dp}{dx} \right),$$

де $\frac{dn}{dx}, \frac{dp}{dx}$ – градієнти концентрації, показують наскільки різко змінюється

концентрація електронів чи дірок уздовж осі x ; q – заряд електрона, Кл; D_n, D_p – коефіцієнти дифузії електронів і дірок, $\text{см}^2/\text{с}$. Визначаються за формулами:

$$D_n = \varphi_T \mu_n,$$

$$D_p = \varphi_T \mu_p,$$

де $\varphi_T = \frac{kT}{q}$ – співвідношення Енштейна; T – температура, $^\circ\text{K}$; μ_n, μ_p – рухомість

електронів та дірок, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Зазвичай беруть такі позначення концентрацій у напівпровіднику:

n_0, p_0 – уврівноважені;

n, p – невідновжені;

$\Delta n, \Delta p$ – надлишкові.

Відповідні концентрації між собою пов'язані співвідношеннями:

$$\Delta n = n - n_0,$$

$$\Delta p = p - p_0.$$

Проміжок часу, за який відновлюється рівновага (електронейтральність), називають *часом діелектричної релаксації*.

$$T_{rel} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho,$$

де $\varepsilon, \varepsilon_0$ – абсолютна та відносна діелектрична проникненість; ρ – питомий опір, Ом·м.

Уважають, що при $t > \tau_{rel}$ надлишкові концентрації електронів і дірок однакові: $\Delta p = \Delta n$.

Розглянемо деякі випадки зміни в часі надлишкових концентрацій для напівпровідника *n*-типу:

Процес генерації припиняється після створення надлишкової концентрації неосновних носіїв $\Delta p_n(0)$

$$G = 0,$$

де G – швидкість генерації носіїв, яка задається зовнішнім джерелом, см³/с. Дорівнює кількості надлишкових носіїв, що виникають в одиничному об'ємі за одиницю часу.

Тоді рівняння має вигляд:

$$\Delta p_n(t) = \Delta p_n(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}},$$

де τ_p – середній час життя неосновних надлишкових носіїв (від моменту появи до моменту рекомбінації), с.

Початкова надлишкова концентрація відсутня $\Delta p_n(0) = 0$. У момент часу $t = 0$ починає діяти джерело: $G \neq 0$.

Тоді рівняння має вигляд:

$$\Delta p_n(t) = G \cdot \tau_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right).$$

У разі дифузійного розповсюдження неврівноважених носіїв уздовж напівпровідника їхня концентрація внаслідок рекомбінації змінюється не тільки в часі, але й у просторі:

$$\Delta p_n(x) = \Delta p_n(0) \cdot e^{-\frac{x}{L_p}},$$

де L_n – дифузійна довжина, м. Характеризує зменшення надлишкової концентрації в просторі в e разів. Визначається за формулою:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p},$$

або для електронів:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}.$$

Завдання до теми

1. У зразку кремнію n-типу при $T = 300$ К час життя неосновних носіїв заряду $\tau_p = 5$ мкс, їхня рухомість – $\mu_p = 0,04$ м²/(В·с). В одну з площин зразка вводиться і підтримується постійною у часі надлишкова концентрація дірок $\Delta p(0) = 10^{19}$ м⁻³. Визначити щільність дифузійного струму безпосередньо в цій площині. На якій глибині концентрація дірок складе 10^{18} м⁻³? Уважати, що товщина зразка значно більша, ніж дифузійна довжина носіїв заряду.

Відповіді: $j = 23$ А/м², $x = 166$ мкм.

2. Під час легування напівпровідника донорними домішками час життя неосновних носіїв заряду зменшився у 5 разів, а їхня рухомість зменшилася на 30 %. Визначити, на скільки змінилася дифузійна довжина дірок унаслідок легування напівпровідника, порівняно з нелегованим.

Відповідь: зменшиться у 2,67 раза.

3. Визначити час життя неосновних носіїв заряду в напівпровіднику, якщо їхня концентрація під дією джерела збурення складає 10^{20} м⁻³, початкова швидкість зменшення надлишкової концентрації у наслідок вимкнення джерела $7,1 \cdot 10^{23}$ м⁻³/с. Визначити надлишкову концентрацію Δn у момент часу $t = 2$ мкс після вимкнення джерела збудження.

Відповідь: $\Delta n = 6,25 \cdot 10^{13}$ м⁻³.

Тестові завдання

1. Визначити час життя та рухомість електронів у германії при $T = 300$ К, якщо дифузійна довжина $L_n = 1,5$ мм, а коефіцієнт дифузії $D_n = 9,8 \cdot 10^{-3}$ м²/с.

Відповіді: $\tau_n = 0,23 \cdot 10^{-3}$ с, $\mu_n = 0,38$ м²/(В·с).

2. У напівпровідник n-типу в площину $x = 0$ безперервно інжектуються дірки з концентрацією біля поверхні $\Delta p(0) = 10^{20}$ м⁻³. Визначити надлишкову концентрацію дірок на відстані $x = 2$ мм від поверхні, якщо час життя $\tau_p = 10^{-4}$ с, а коефіцієнт дифузії $D_n = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м²/с.

Відповідь: $\Delta p(x) = 3,1 \cdot 10^{17}$ м⁻³.

3. На поверхні однорідної пластини кремнію p-типу за допомогою світлового зонду відбувається генерація електронно-діркових пар. Визначити дифузійну довжину електронів, якщо їх надлишкова концентрація при віддаленні від поверхні на 2 мм зменшується у 20 разів.

Відповідь: $L_n = 0,67$ мм.

4. Визначити надлишкову концентрацію дірок у напівпровіднику n - типу через проміжок часу, що дорівнює подвоєному часу життя, якщо почало діяти зовнішнє джерело зі швидкістю генерації $G = 10^{10}$ см⁻³/с, а середній час життя дірки $\tau_p = 1$ мкс.

Відповідь: $\Delta p_n = 8 \cdot 10^9$ м⁻³.

Література: [1–10].

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основна

1. Квітка С.О., Яковлев В.Ф., Нікітіна О.В. Електроніка та мікросхемотехніка.- Суми: Сумський національний аграрний університет, 2012.
2. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є., Чернівчан В.Я., Мусихіна Н.П. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки: Навчальний посібник. – 2-ге вид., стереотип. – Львів: ”Магнолія плюс”, видавець СПД ФО В.М. Піча, 2006. – 225с.
3. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник/ за ред. А. Г. Соскова.- К.: Каравела, 2006.- 384 с.
4. Левитський С.М. Напівпровідникові прилади. Київ, ВПЦ “Київський університет”, 2000 р.
5. Сосков, А. Г. Промислова електроніка : підручник / А. Г. Сосков, Ю. П. Колонтаєвський. – Київ : Каравела, 2017. – 536 с.
6. Васильєва, Л. Д. Напівпровідникові прилади : підручник для вузів / Л. Д. Васильєва, Б. І. Медведенко, Ю. І. Якименко. - К. : ІВЦ «Вид-во «Політехніка», 2012. – 554 с.
7. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студ. вищ. навч. закладів : у 4-х т. – Київ : Каравела. Т. 3 Цифрові пристрої / В. І. Сенько [та ін.]. – 2017. – 399 с.
8. Електроніка і мікросхемотехніка / В. І. Сенько [та ін.]. – К.: Каравела. Т. 4, Кн. 1: Силова електроніка / за ред. В. І. Сенька. – 2013. – 640 с.
9. Електроніка і мікросхемотехніка / В. І. Сенько [та ін.]. – К.: Каравела. Т. 4, Кн. 2 / за ред. В. І. Сенька. – 2013. – 316 с.
10. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за напрямками «Електромеханіка та Електротехніка»: У 4-х т. /Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. та ін. Т2. Аналогові та імпульсні пристрої. -Харків: Фоліо, 2002.

Інформаційні ресурси

1. <http://www.kmu.gov.ua> - Кабінет Міністрів України.
4. <http://nubip.edu.ua/> - головна сторінка НУБіП України.
5. <http://nubip.edu.ua/node/1376> - кафедра автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І.Мартиненка.
6. <http://elibrary.nubip.edu.ua> - електронна наукова бібліотека НУБіП України.
7. <http://energ.nauu.kiev.ua/> - навчально-інформаційний портал ННІ енергетики і автоматики

8. <http://www.nbuv.gov.ua/> - національна бібліотека України імені В.І. Вернадського, Київ.

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

Методичні вказівки до виконання практичних робіт

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул. Г. Кондратьєва, 160

Підписано до друку: січень 2025 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman

Тираж: ____ примірників Замовлення _____ Ум. друк. арк. 1,2
