



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

4416 Методичні вказівки
до виконання практичних робіт та самостійної роботи
з курсу «**Матеріали і компоненти функціональної
електроніки**»
для освітньо-кваліфікаційного ступеня «магістр»
спеціальності 171 «*Електроніка*»
денної та заочної форм навчання



Суми
Сумський державний університет
2018

Методичні вказівки до виконання практичних робіт та самостійної роботи з курсу «Матеріали і компоненти функціональної електроніки» / укладачі: Л. В. Овчаренко, І. М. Пазуха. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 56 с.

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Тема 1. Провідникові матеріали електроніки

Заняття 1. Електрична провідність металів

Мета – поглиблення знань про фізичні основи електричної провідності металів, визначення впливу температури на величину питомого опору провідникових матеріалів.

Методичні вказівки. Під час розв'язування задач за заданою темою необхідно знати, що в слабких і середніх електричних полях провідність металів має омичний характер та описується законом Ома, згідно з яким густина струму визначається за співвідношенням $j = \sigma E$, де E – напруженість постійного електричного поля.

У разі, якщо електрони з концентрацією n_e за одиницю об'єму провідника рухаються зі швидкістю v , густина струму буде визначатися за виразом $j = -en_e v$, а питома провідність σ – за співвідношенням

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{en_e v}{E}, \quad (1.1)$$

де ρ – питомий опір масивного матеріалу; e – заряд електрона; n_e – концентрація електронів; v – швидкість дрейфу носіїв заряду; E – напруженість електричного поля.

Згідно з квантовою теорією провідності в металах за температур, відмінних від абсолютного нуля, електрони внаслідок зіткнень з іонами, розміщеними у вузлах кристалічних ґраток, здійснюють тепловий рух, а електричне поле, що виникає під час прикладення зовнішнього напруження, змушує електрони в проміжках між зіткненнями рухатися з прискоренням $a = eE/m_0$, де m_0 – маса спокою електрона. Відстань, що проходять електрони між зіткненнями,

називається середньою довжиною вільного пробігу (СДВП), λ_0 , а максимальна швидкість дрейфу v_{\max} , якої набирає електрон за час вільного пробігу, τ_0 , визначається за співвідношенням $v_{\max} = a\tau_0$. Однак оскільки швидкість спрямованого руху електронів після зіткнення знижується до нуля, то середнє значення швидкості дрейфу за час вільного пробігу буде дорівнювати половині максимального. Тоді середнє значення швидкості дрейфу визначається за співвідношенням

$$\bar{v} = \frac{eE}{2m_0} \tau_0. \quad (1.2)$$

Для характеристики температурної залежності опору провідникових матеріалів вводяться поняття термічного коефіцієнта опору (ТКО, β_R) й термічного коефіцієнта питомого опору (β_ρ).

Термічний коефіцієнт опору (питомого опору) – це фізична величина, яка чисельно дорівнює відносній зміні опору (питомого опору) за зміни температури на 1 К:

$$\beta_R = \frac{1}{R_n} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \text{ або } \beta_\rho = \frac{1}{\rho_n} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T}, \quad (1.3)$$

де R_n , ρ_n – початкове значення опору та питомого опору відповідно.

Коефіцієнти β_R та β_ρ пов'язані з температурним коефіцієнтом розширення матеріалу α_l співвідношенням

$$\alpha_l = \beta_\rho - \beta_R. \quad (1.4)$$

Згідно з теорією Дебая для масивних зразків перехідних d -металів температурна залежність питомого опору описується так:

$$\rho_0 = \rho_{0\text{зал.}} + AT^2 + B(T/\Theta_{0D})^3 J_3(\Theta_{0D}/T) + C(T/\Theta_{0D})^5 J_5(\Theta_{0D}/T), \quad (1.5)$$

де $\rho_{0\text{ зал}}$ – залишковий питомий опір, що не залежить від температури, пов'язаний зі структурою та концентрацією домішок у зразку; A, B, C – коефіцієнти пропорційності; $J_i(\Theta_{0D}/T)$ – інтеграл Дебая; Θ_{0D} – температура Дебая для масивного зразка.

Для тонкоплівкових матеріалів

$$\rho(T) = \rho_{\text{зал}} + aT^2 + C^*(T/\Theta_{0D})^3 J_3(\Theta_D/T). \quad (1.6)$$

Як бачимо із співвідношення (5), характер температурної залежності питомого опору може істотно змінюватися залежно від температури. Однак під час збільшення температури до $T > \Theta_{0D}$ залежності $\rho_0(T)$ і $\rho(T)$ стають лінійними, а вираз (5) спрощується до вигляду

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \beta_\rho \Delta T). \quad (1.7)$$

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Визначити час, упродовж якого електрон пройде відстань $l = 1$ км по мідному дроту, а різниця потенціалів на кінцях провідника $U = 220$ В. За який час електрон пролетить цю саму відстань, рухаючись без зіткнень, за тієї самої різниці потенціалів? Який час передавання сигналу? (питомий опір міді $\rho_{\text{Cu}} = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; концентрація вільних електронів у міді $n_e = 8,45 \cdot 10^{28}$ м⁻³).

Розв'язування

Час, за який електрон пролетить відстань l , відповідає часу дрейфу електронів по провіднику, тобто $t = l/v$, де v –

середня швидкість дрейфу електронів.

Згідно із законом Ома питома провідність металів визначається за співвідношенням (1.1). Тобто $\sigma = 1/\rho = e \cdot n_e \cdot v/E$. Звідси знаходимо середню швидкість дрейфу електронів: $v = E/(\rho \cdot e \cdot n_e)$.

Напруженість електричного поля визначається як $E = U \cdot l$. Отже, $v = U/(\rho \cdot e \cdot n_e \cdot l)$.

$$\begin{aligned} \text{Звідси } t = l/v &= l \cdot \rho \cdot e \cdot n_e \cdot l/U = l^2 \cdot \rho \cdot e \cdot n_e/U = \\ &= 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,45 \cdot 10^{28}/220 = 10^6 \text{ с.} \end{aligned}$$

У разі, якщо зіткнення з вузлами кристалічних ґраток відсутні, електрони будуть рухатися рівноприскорено. Отже, час прольоту електронів t_{np} буде визначатися із співвідношення для рівноприскореного руху: $l = \frac{at^2}{2}$. Таким

чином, $t_{np} = \sqrt{\frac{2l}{a}}$.

Ураховуючи те, що, пройшовши різницю потенціалів U , електрон набуває кінетичної енергії $\frac{m_0 v_k^2}{2} = eU$, а

прискорення електрона визначається рівнянням $a = \frac{F}{m} = \frac{e \cdot E}{m}$,

одержуємо рівняння для часу прольоту електрона:

$$t_{np} = \sqrt{\frac{2l^2 m}{eU}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 220}} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Передавання енергії вздовж дротів лінії здійснюється електромагнітним полем, що поширюється вздовж дротів зі швидкістю світла c . Ураховуючи, що середовищем, яке оточує провідник, є повітря, час передавання сигналу t_c визначається так: $t_c = l/c = 10^3/(3 \cdot 10^8) = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$

Відповідь: час дрейфу $t = 10^6 \text{ с}$, час прольоту $t_{np} = 10^{-4} \text{ с}$, час передавання сигналу $t_c = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Приклад 2. Під час вмикання в електричний ланцюг провідника діаметром 0,6 мм і довжиною 75 мм різниця потенціалів на кінцях провідника становила 2,3 В за струму 1,5 А. Визначити питомий опір матеріалу провідника.

Розв'язування

Опір провідника довжиною l та з поперечним перерізом S визначається за співвідношенням $\rho = R \frac{S}{l}$, де ρ – питомий опір провідника, $S = \pi d^2/4$. За законом Ома $R = U/I$, тоді

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi d^2}{4l} = \frac{2,3}{1,5} \cdot \frac{\pi(0,6 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 75 \cdot 10^{-3}} = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Відповідь: питомий опір матеріалу провідника $\rho = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$

Задачі для розв'язування

Задача 1. Визначити час, упродовж якого електрон пройде відстань 2 км по мідному дроту, якщо питомий опір міді $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а різниця потенціалів на кінцях провідника 220 В. За який час електрон пролетить цю саму відстань, рухаючись без зіткнень, за тієї самої різниці потенціалів? Який час передавання сигналу? (Питомий опір міді $\rho_{\text{Cu}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; концентрація вільних електронів у міді $n_e = 8,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$).

Задача 2. У мідному провіднику під дією електричного поля проходить електричний струм густиною 1 А/мм^2 . Визначити швидкість дрейфу електронів.

Задача 3. Один полюс джерела струму приєднаний до

електричної схеми мідним дротом, а інший – алюмінієвим дротом такого самого діаметра. Порівняти швидкість дрейфу електронів в обох провідниках (на кожен атом міді припадає один електрон провідності, а на кожен атом алюмінію – три електрони провідності).

Задача 4. Під час вмикання в електричний ланцюг провідника діаметром 0,5 мм і довжиною 43 мм різниця потенціалів на кінцях провідника становила 2,4 В за струму 2 А. Визначити питомий опір матеріалу провідника.

Задача 5. Обчислити питомий опір металевого провідника, що має густину 970 кг/м^3 і молярну масу 0,023 кг/моль, якщо відомо, що середня швидкість дрейфу електронів у електричному полі напруженістю 0,1 В/м становить $5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$. Припустимо, що на кожен атом кристалічних ґраток припадає один електрон.

Задача 6. Мідний і алюмінієвий провідники рівної довжини мають однакові опори. Визначити відношення діаметрів цих провідників. Обчислити, у скільки разів маса алюмінієвого провідника менша за масу мідного.

Задача 7. Визначити температурний коефіцієнт лінійного розширення α_l і подовження ніхромового дроту, якщо відомо, що під час підвищення температури від 293 до 1 273 К електричний опір дроту змінюється з 50 до 56,6 Ом. Довжина дроту в холодному стані $l = 50 \text{ м}$. Температурний коефіцієнт питомого опору ніхрому β дорівнює $15 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

Задача 8. Питомий опір чистої міді за 293 і 373 К дорівнює $16,8 \cdot 10^{-9}$ і $2,26 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Користуючись лінійною апроксимацією залежності $\rho(T)$, визначити температурний коефіцієнт опору за 273 К.

Заняття 2. Електрична провідність металевих сплавів та провідників, що містять домішки.

Мета заняття – поглиблення знань про фізичні основи електричної провідності металів та металевих сплавів; визначення залежності опору від типу та концентрації домішок або вмісту компонент (у разі двокомпонентних сплавів); вивчення фізичних процесів у контактах метал – метал.

Методичні вказівки. Під час розв’язування задач за заданою темою необхідно знати, що питомий опір провідників істотно залежить від типу та концентрації домішок та структурних дефектів кристалічної ґратки. Під час введення у чистий матеріал домішки будь-якого типу та концентрації відбувається зростання питомого опору зразка.

Складова питомого опору, пов’язана з розсіюванням носіїв струму на домішках та дефектах кристалічної будови, не залежить від зміни температури. За температур, близьких до абсолютного нуля, питомий опір провідникових матеріалів буде прямувати до певного сталого значення, що одержало назву залишкового питомого опору. Звідси впливає правило Матіссена про адитивність питомого опору

$$\rho = \rho_T + \rho_3, \quad (1.8)$$

де ρ_T – питомий опір, обумовлений розсіюванням електронів на вузлах кристалічної ґратки;

ρ_3 – питомий опір, обумовлений розсіюванням електронів на домішках та дефектах.

Якщо розглядати питомий опір металевих сплавів, то величини залишкового питомого опору будуть істотно залежати від типу домішок. Так, згідно з правилом Лінде, зміна залишкового опору на 1 ат. % домішки для одновалентних металів становить

$$\Delta\rho_3 = b(\Delta Z)^2, \quad (1.9)$$

де ΔZ – різниця валентностей метала-розчинника і атома домішки; b – константа, однакова для атомів домішок, що належать до одного періоду Періодичної системи хімічних елементів.

Залежність залишкового опору від концентрації атомів домішки має лінійний характер і описується виразом

$$\rho = \rho_T + \rho_3 = \rho_T + b(\Delta Z)^2 x, \quad (1.10)$$

де x – концентрація атомів домішки.

У мікро- і наноелектроніці широкого практичного застосування набули металеві сплави. Питомий опір сплаву можна описати, враховуючи два основні процеси розсіювання електронів провідності: 1) розсіювання на теплових коливаннях ґратки (температурна складова опору ρ_T); 2) розсіювання на неоднорідностях структури сплаву (залишковий опір ρ_3). У результаті питомий опір плівкового сплаву буде визначатися за співвідношенням

$$\rho_{\text{спл}} = \rho_T + \rho_3. \quad (1.11)$$

Для двокомпонентних сплавів зміна питомого опору залежно від концентрації компонент описується законом Нордгейма

$$\rho_3 = Cx_A \cdot x_B = Cx_A(1 - x_A), \quad (1.12)$$

де C – константа, що залежить від природи сплаву; x_A і x_B – концентрація компонент у сплаві. Для двокомпонентних сплавів залишковий питомий опір досягає максимуму за рівного внеску кожного компонента.

Під час з'єднання двох різних металевих провідникових матеріалів виникає контактна різниця потенціалів. Причина виникнення контактної різниці потенціалів пов'язана з різною концентрацією електронів у різних металах. Визначається вона за співвідношенням

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}, \quad (1.13)$$

де U_A і U_B – потенціали зіткнення металів; $n_A n_B$ – концентрації електронів у металах A та B ; k – стала Больцмана; T – термодинамічна температура; e – заряд електрона.

За різної температури між точкою спаю двох різних провідників T_1 та їх вільних кінців провідників T_2 виникає струм, що одержав назву термоелектричного. При цьому на вільних кінцях виникає різниця потенціалів, названа термоелектрорушійною силою (термо-е. р. с.), а це явище одержало назву ефекту Зеебека. Визначається термо-е. р. с. за співвідношенням

$$U = \frac{k}{q} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B}. \quad (1.14)$$

Для двох конкретних речовин співвідношення (14) може бути переписане у вигляді

$$U = C \cdot (T_1 - T_2), \quad (1.15)$$

де C – коефіцієнт термо-е. р. с., стала величини для заданої цієї пари провідників.

Термічний коефіцієнт опору (питомого опору) провідникових сплавів визначається аналогічно до однокомпонентних матеріалів за співвідношенням (3).

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Два провідникових зразки пройшли однакове технологічне оброблення. Методом хімічного аналізу було встановлено, що склад першого зразка (Cu+1 ат % Zn), а другого – (Cu+1,5ат % As). Визначити, який матеріал має більш високу питому провідність.

Розв'язування

Залежність залишкового опору від концентрації атомів домішки має лінійний характер і описується співвідношенням (1.10): $\rho = \rho_T + \rho_s$. Згідно з правилом Лінде (співвідношення

(1.9)) $\Delta\rho_s = b(\Delta Z)^2$. Отже, $\rho = \rho_T + \rho_s = \rho_T + b(\Delta Z)^2 x$.

Необхідно враховувати, що атоми Zn та As належать до одного періоду Періодичної системи елементів, а також те, що Cu є одновалентним. Отже, під час введення різниці ΔZ валентностей метала-розчинника і атома домішки дорівнює 1 під час введення Zn та 4 під час введення As.

$$\begin{aligned}\rho_2 - \rho_1 &= b(\Delta Z_2)^2 x(As) - b(\Delta Z_1)^2 x(Zn) = \\ &= b\left((\Delta Z_2)^2 x(As) - (\Delta Z_1)^2 x(Zn)\right) = \\ &= b\left(4^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} - 1^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}\right) = 0,145 \cdot b.\end{aligned}$$

Таким чином, перший матеріал має менший питомий опір. Оскільки згідно зі співвідношенням (1.1) $\sigma = 1/\rho$, то більш високу провідність буде мати перший матеріал.

Відповідь: перший матеріал має більш високу питому провідність.

Приклад 2. Визначити внутрішню контактну різницю потенціалів, що виникає під час контакту двох металів із

концентрацією вільних електронів $n_1 = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ і $n_2 = 1 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ за температури 0 К. Який із металів буде мати більш високий потенціал?

Розв'язування

Для визначення контактної різниці потенціалів на межі двох металів необхідно скористатися співвідношенням

$$\Delta\varphi_{\text{конт}} = \frac{E_{F_2} - E_{F_1}}{e},$$

де E_{F_1} і E_{F_2} – енергії Фермі відповідно для металів 1 і 2, що визначаються за співвідношеннями

$$E_{F_1}(0) = \frac{\hbar^2}{2m \cdot e} (3\pi^2 n_1)^{\frac{2}{3}} \text{ і } E_{F_2}(0) = \frac{\hbar^2}{2m \cdot e} (3\pi^2 n_2)^{\frac{2}{3}}.$$

Підставляючи співвідношення для визначення енергії Фермі у вираз для контактної різниці потенціалів, одержуємо

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{\text{конт}} &= \frac{\hbar^2}{2m \cdot e} (3\pi^2)^{\frac{2}{3}} \left[n_2^{\frac{2}{3}} - n_1^{\frac{2}{3}} \right] = \\ &= \frac{(1,054 \cdot 10^{-34})^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} (3\pi^2)^{\frac{2}{3}} \left[(1 \cdot 10^{29})^{\frac{2}{3}} - (5 \cdot 10^{22})^{\frac{2}{3}} \right] = \\ &= 6,3 \text{ В}. \end{aligned}$$

Оскільки $E_{F_2}(0) > E_{F_1}(0)$, то більш високий потенціал буде мати другий метал.

Відповідь: $\Delta\varphi_{\text{конт}} = 6,3 \text{ В}$. Другий метал має більш високий потенціал.

Задачі для розв'язування

Задача 1. Є два провідникових зразки, що пройшли однакове технологічне оброблення. Хімічним аналізом встановлено, що склад першого зразка (Cu + 2 ат % Zn), а другого – (Cu + 0,5 ат % As). Визначити, який матеріал має більш високу питому провідність.

Задача 2. Питомий опір мідного провідника, що містить 0,5 ат % індію, дорівнює $2,34 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Визначити концентрацію атомів індію в мідному сплаві з питомим опором $2,98 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, вважаючи, що весь залишковий опір обумовлений розсіюванням на домішкових атомах індію.

Задача 3. Визначити внутрішню контактну різницю потенціалів, що виникає під час контакту двох металів з концентрацією вільних електронів $n_1 = 5 \cdot 10^{28}$ м⁻³ і $n_2 = 1 \cdot 10^{29}$ м⁻³ за температури 0 К. Який із металів буде мати більш високий потенціал?

Задача 4. Один спай термопари розміщений у печі з температурою 200 °С, інший – перебуває за температури 20 °С. Вольтметр показує при цьому термо-е. р. с. 1,8 мВ. Чому дорівнює термо-е. р. с., якщо другий спай термопари помістити в посудину: а) з льодом, що тане; б) із киплячою водою? Відносну питому термо-е. р. с. у всьому температурному діапазоні 0–200 °С вважати постійною.

Задача 5. Опір провідника з константану за 20 °С дорівнює 500 Ом. Визначити опір цього провідника за 450 °С, якщо за 20 °С температурний коефіцієнт питомого опору константану $\beta_p = -15 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, температурний коефіцієнт лінійного розширення становить 10^{-5} К⁻¹.

Задача 6. Визначити температурний коефіцієнт лінійного розширення і подовження ніхромового дроту, якщо відомо, що під час підвищення температури від 20 до 1 000 °С електричний опір дроту змінюється від 50 до 56,6 Ом. Довжина дроту в холодному стані $l = 50$ м. Температурний коефіцієнт питомого опору дорівнює $15 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Заняття 3. Питомий опір провідникових матеріалів на високих частотах.

Мета заняття – вивчення закономірностей зміни опору провідникових матеріалів під час пропускання змінного електричного струму.

Методичні вказівки. Під час розв'язування задач необхідно знати, що на високих частотах має місце нерівноважний розподіл електричного струму по перетину провідників, при цьому густина струму буде максимальною на поверхні, а у міру проникнення вглиб провідника відбувається його зменшення. Причиною нерівноважного розподілу струму є дія магнітного поля того самого провідника. Магнітний потік Φ , що виникає під час проходження електричного струму, буде пропорційним цьому струму I , та визначається за співвідношенням $\Phi = L \cdot I$, де L – індуктивність провідника. За зміни магнітного потоку виникає електрорушійна сила (е. р. с.) самоіндукції $E_l = -L(dI/dt)$. У разі, якщо струм у провіднику змінюється за синусоїдальним законом, індукована е. р. с. буде пропорційна частоті

$$I = I_m \sin \omega t; E_l = -\omega L I \cos \omega t. \quad (1.16)$$

Напрямок е. р. с. самоіндукції протилежний струму у провіднику, тому електрорушійна сила гальмує носії електричного струму відповідно до закону Ленца. Під час

пропускання змінного струму поза провідником та всередині нього виникає змінне магнітне поле, е. р. с. самоіндукції максимальна в центрі провідника і зменшується у напрямку до його поверхні. Для провідника, радіус кривизни поверхні якого більший порівняно з глибиною рівняння розподілу струму по перетину провідника за умови, що розподіл залишається незмінним у напрямку проходження струму, має вигляд

$$J_x = J_0 \exp(-z/\Delta), \quad (1.17)$$

де J_0 – густина струму на поверхні, Δ – глибина проникнення поля в провідник.

Підсилення поверхневого ефекту відбувається не лише під час збільшення частоти, але й під час збільшення питомої електропровідності та магнітної проникності. Глибина проникнення поля пов'язана з фізичними характеристиками речовини співвідношенням

$$\Delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu_0 \mu)}, \quad (1.18)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; μ – відносна магнітна проникність матеріалу.

У разі, якщо глибина проникнення поля набагато менша за товщину провідника, коефіцієнт збільшення опору провідника з круглим, перетином визначається за співвідношенням

$$K_R = R/R_0 = d/(4\Delta). \quad (1.19)$$

Приклад розв'язування задачі

Приклад 1. Розрахувати, у скільки разів опір R мідного дроту круглого перетину діаметром $d = 1$ мм на частоті $f = 10$ МГц більше за опір R_0 цього самого дроту за постійного

електричного струму (ρ (Cu) = $1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом · м).

Розв'язування

Зв'язок глибини проникнення поля з фізичними характеристиками визначається співвідношенням (1.18):

$\Delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu_0 \mu)}$. Оскільки Cu – це діаманітна речовина, то її відносна магнітна проникність $\mu = 1$. Тоді для Cu на частоті 10 МГц глибини проникнення поля дорівнює

$$\Delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu_0 \mu)} = \sqrt{1,75 \cdot 10^{-8} / (\pi \cdot 10^7 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1)} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Оскільки $\Delta \ll d$, то поверхневий ефект є сильно вираженим, а отже, коефіцієнт збільшення опору провідника круглого перетину визначається за співвідношенням (1.19)

$$K_R = R / R_0 = d / (4\Delta) = 10^{-3} / (4 \cdot 2,1 \cdot 10^{-5}) = 12.$$

Відповідь: $K_R = 12$.

Задачі для розв'язування

Задача 1. Обчислити, у скільки разів опір R мідного дроту круглого перетину діаметром $d = 1,5$ мм на частоті $f = 20$ МГц більше за опір R_0 цього самого дроту за постійного електричного струму.

Задача 2. Обчислити глибину проникнення електромагнітного поля в мідний провідник на частотах 50 Гц і 1 МГц.

Задача 3. Визначити відношення глибини проникнення електромагнітного поля в алюмінієвий і сталевий провідники на частоті 50 Гц і 1 МГц. Для

маловуглецевої сталі $\mu = 1\,000$, $\rho = 10^{-7}$ Ом \cdot м.

Задача 4. Мініатюрний резистор з опором $R = 20$ Ом $\pm 10\%$, що має номінальну потужність розсіювання $P_{\text{ном}} = 0,5$ Вт, використовується на частоті 50 Гц. Температурний коефіцієнт опору резистора $\beta_R = -2 \cdot 10^{-3}$ К $^{-1}$. Відомо, що через малі габарити резистора за сталої граничної напруги $U_{\text{пр}} = 100$ В відбувається поверхневий пробій між виводами. Визначити, яка максимальна напруга може бути прикладена до цього резистора за температури: а) 20 °С; б) 100 °С.

Питання для самостійного опрацювання теми 1

1. Надпровідники і кріопровідники. Перехід Джозефсона.

2. Вплив магнітного поля на критичну температуру переходу в стан надпровідності. Високотемпературна надпровідність.

3. Застосування надпровідників і кріопровідників в електроніці: генератори, детектори, вимірювальні прилади, пристрої обчислювальної техніки.

4. Провідникові матеріали на основі оксидів металів як контактні та резистивні шари мікроелектронних приладів.

Рекомендована література

1. Долбня В. Т. Електроніка і мікросхемотехніка / В. Т. Долбня, Ю. Д. Сакара, Т. В. Миланіч. – Харків : НТУ «ХП», 2006. – 204 с.
2. Корчинський Г. А. Хімія / Г. А. Корчинський. – Вінниця : Поділля-2000, 2002. – 525 с.
3. Пахолук А. П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали : навч. посібник / А. П. Пахолук. – Львів : Світ, 2005. – 172 с.

4. Проценко І. Ю. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості) : навч. посібник / І. Ю. Проценко, В. А. Саєнко. – Суми : СумДУ, 2002. – 187 с.
5. Швець С. Я. Матеріали електронної техніки : навч. посібник / С. Я. Швець, І. Ф. Червоний, О. П. Головка. – Запоріжжя : Вид-во ЗДІА, 2008. – 380 с.

Тема 2. Напівпровідникові матеріали мікро- і наноелектроніки

Заняття 4. Електрична провідність
напівпровідникових матеріалів

Мета заняття – поглибити знання про фізичні основи провідності власних та домішкових напівпровідникових матеріалів.

Методичні вказівки. У напівпровідникових матеріалів на відміну від провідників переважним механізмом провідності є електронно-діркова провідність. При цьому носії заряду, концентрація яких є більшою у цьому напівпровіднику (НП) називають основними, а носії заряду, концентрація яких є меншою – неосновними. Власний напівпровідник характеризується тим, що в ньому рівноважна концентрація електронів n дорівнює рівноважній концентрації дірок p , тобто $n = p = n_i$, де n_i – концентрація власних носіїв заряду.

За зміни у НП концентрації домішок відбувається зміна положення рівня Фермі, а отже, й концентрації електронів і дірок, але при цьому загальна концентрація носіїв у невиродженому НП в умовах термодинамічної рівноваги за заданої температури залишається незмінною і згідно зі співвідношенням діючих мас визначається як

$$n \cdot p = n_i^2. \quad (1.20)$$

Для напівпровідників n - і p - типів концентрація основних носіїв заряду буде збігатися з концентрацією відповідно до донорної ($n_n = N_d$) або акцепторної домішки ($n_p = N_a$) домішки, а концентрація неосновних носіїв заряду визначається із співвідношення (1.20):

$$p_n = n_i^2 / N_d; \quad n_p = n_i^2 / N_a, \quad (1.21)$$

де p_n і p_p – концентрація дірок провідності відповідно до напівпровідників n - і p - типів; N_d , N_a – відповідно концентрації донорної й акцепторної домішок.

Як основні, так і неосновні носії заряду за відсутності впливу зовнішніх електричних і магнітних полів перебувають у безперервному тепловому русі. Під час прикладення зовнішнього електричного поля носії струму починають рухатися з т. зв. швидкістю дрейфу у напрямку дії поля, тим самим створюючи струм. Провідність напівпровідникових матеріалів характеризується поняттям «рухомість носіїв заряду» μ , що визначається як відношення середньої швидкості дрейфу \bar{v} до напруженості електричного поля E

$$\mu = \frac{\bar{v}}{E}. \quad (1.22)$$

Враховуючи, що у НП наявні два типи носіїв заряду (електрони та дірки) співвідношення для густини струму може бути записане у такому вигляді:

$$J = e(n\mu_n + p\mu_p)E, \quad (1.23)$$

де n і p – концентрації електронів і дірок провідності; μ_n і μ_p – рухливість електронів і дірок відповідно.

З іншого боку згідно з узагальненим законом Ома густина струму визначається як $J = \sigma E$, де σ – питома провідність. Враховуючи співвідношення (1.23), вираз для

питомої провідності напівпровідника може бути записаний у вигляді

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (1.24)$$

Оскільки у власному НП рівноважна концентрація вільних електронів і дірок однакові ($n_i = p_i$), співвідношення для питомої провідності власного напівпровідника може бути переписане таким чином:

$$\sigma = en_i(\mu_n + \mu_p) \quad (1.24')$$

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Визначити власну питому провідність антимоніду індію за кімнатної температури. Взяти власну концентрацію носіїв заряду за кімнатної температури $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, рухомість електронів $\mu_n = 7,8 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухомість дірок $\mu_p = 0,075 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Розв'язування

Питома провідність напівпровідника визначається за співвідношенням (1.24). Враховуючи, що згідно з умовою задачі необхідно визначити власну питому провідність напівпровідника, то для розрахунків може бути використане співвідношення (1.24').

$$\begin{aligned} \text{Таким чином, } \sigma &= en_i(\mu_n + \mu_p) = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{22}(7,8 + 0,075) = 2,5 \cdot 10^4 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}. \end{aligned}$$

Відповідь: власна провідність антимоніду індію за кімнатної температури $\sigma = 2,5 \cdot 10^4 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$.

Приклад 2. Розрахувати концентрацію електронів і

дірок у германії p -типу з питомим опором $0,05 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ за кімнатної температури. Взяти власну концентрацію носіїв заряду за кімнатної температури $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, рухомість електронів $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухомість дірок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Розв'язування

Питомий опір пов'язаний із питомою провідністю та концентрацією електронів і дірок співвідношеннями $\rho = 1/\sigma$ і $1/\rho = en\mu_n + ep\mu_p$ відповідно. Питома провідність НП визначається за співвідношенням (1.24). Враховуючи, що $n \cdot p = n_i^2$, можна записати рівняння $\frac{1}{\rho} = \frac{en_i^2\mu_n}{p} + ep\mu_p$.

Для концентрації основних носіїв заряду (дірок) одержуємо квадратичне рівняння вигляду $p^2 - \frac{p}{e\mu_p\rho} + \frac{n_i^2\mu_n}{\mu_p} = 0$.

Підставляючи в останній вираз вихідні дані, одержуємо

$$p^2 - \frac{p}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,19\rho} + \frac{(1 \cdot 10^{19})^2 \cdot 0,39}{0,19} = p^2 - 6,58 \cdot 10^{20} + 9,03 \cdot 10^{38} = 0.$$

Таким чином, $p = 6,56 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Для визначення концентрації неосновних носіїв заряду (електронів) можна скористатися виразом $n \cdot p = n_i^2$. Звідси $n = n_i^2 / p = (1 \cdot 10^{19})^2 / 6,56 \cdot 10^{20} = 6,72 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

Відповідь: концентрація електронів $n = 6,72 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$, концентрація дірок $p = 6,56 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Задачі для розв'язування

Задача 1. Визначити власну питому провідність германію за кімнатної температури. Взяти власну концентрацію носіїв заряду за кімнатної температури $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, рухомість електронів $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухомість дірок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 2. Обчислити відношення повного струму через напівпровідник до струму, обумовленого дірковою складовою: а) у германію з власною провідністю; б) у германію p -типу з питомим опором $0,05 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Взяти власну концентрацію носіїв заряду за кімнатної температури $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, рухливість електронів $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухливість дірок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 3. Оцінити дрейфову швидкість електронів за 300 К у германії n -типу з концентрацією донорів $N_D = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, якщо густина струму через зразок $j = 10^4 \text{ А/м}^2$.

Задача 4. Визначити, у скільки разів дрейфова швидкість електронів у германії n -типу з $N_D = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ відрізняється від дрейфової швидкості електронів у міді під час проходження через них електричного струму однакової густини $j = 10^4 \text{ А/м}^2$. Поясніть причину розходження швидкостей. Концентрація вільних електронів у міді $n = 8,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Задача 5. Визначити питомий опір напівпровідника n -типу, якщо концентрація електронів провідності в ньому дорівнює 10^{22} м^{-3} , а їх рухомість $\mu_n = 0,5 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 6. За напруженості електричного поля 100 В/м густина струму через напівпровідник – $6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Визначити

концентрацію електронів провідності у напівпровіднику, якщо їх рухомість $\mu_n = 0,375 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Дірковою складовою знехтувати.

Задача 7. До стрижня з арсеніду галію довжиною 50 мм прикладена напруга 50 В. За який час електрон пройде через весь зразок, якщо рухомість електронів $\mu_n = 0,9 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 8. За температури $T = 300 \text{ К}$ концентрація дірок у германії p -типу дорівнює $2,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а концентрація електронів у 100 разів менша. Рухомість електронів $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а рухомість дірок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. На підставі цих даних обчислити власний питомий опір германію.

Задача 9. Визначити, за якої концентрації домішок питома провідність германію за температури 300 К має найменше значення. Обчислити відношення власної питомої провідності до мінімальної за тієї самої температури.

Задача 10. Обчислити відношення власної питомої провідності до мінімальної за $T = 300 \text{ К}$ для антимоніду індію, що має такі параметри: $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $\mu_n = 7,8 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 0,075 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 11. Визначити концентрацію електронів і дірок за $T = 300 \text{ К}$ у зразку германію, що має концентрацією донорних домішок $N_D = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ і концентрацію акцепторних домішок $N_A = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Задача 12. Зразок кремнію містить $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ атомів домішки фосфору. Яку потрібно створити концентрацію атомів гелію в цьому напівпровіднику, щоб тип

електропровідності змінився на протилежний, а питомий опір дорівнював $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$? Взяти рухливість дірок $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Заняття 5. Ефект Холла у напівпровідниках

Мета заняття – вивчення процесів взаємодії рухомих носіїв струму у напівпровіднику з магнітним полем та визначення сталої Холла залежно від типу напівпровідника.

Методичні вказівки. Якщо на НП одночасно діють електричне та магнітне поля, то в напівпровіднику виникають т. зв. гальваномагнітні ефекти, найбільш поширеним серед яких є ефект Холла.

Суть ефекту Холла полягає в тому, що під час прикладання зовнішнього магнітного поля з індукцією \vec{B} на НП пластину зі струмом густиною \vec{j} (причому напрямком силових ліній магнітного поля перпендикулярний до напрямку проходження струму), то на бічних гранях пластини у напрямку перпендикулярному до струму і магнітного поля, виникає різниця потенціалів – е. р. с. Холла (рис. 1). Поява різниці потенціалів пов'язана з тим, що на носії заряду, що рухаються у магнітному полі зі швидкістю v , діє сила Лоренца, яка й відхиляє їх до бічних граней пластини

$$F_{\text{л}} = qvB\cos\alpha, \quad (1.25)$$

де α кут між напрямками вектора швидкості та індукції магнітного поля).

Як відомо, напрямком сили Лоренца визначається лише напрямками електричного і магнітних полів та не залежить від типу носіїв заряду, тому електрони і дірки у напівпровідниках будуть відхилятися в одному напрямку за заданих напрямів векторів напруженості електричного поля та індукції магнітного поля. Однак оскільки електрони і дірки мають заряди, протилежні за знаком, то полярність е. р. с.

Холла у напівпровіднику n -типу буде протилежна полярності, що виникає у напівпровіднику p -типу. Ця особливість використовується при визначенні типу електропровідності напівпровідників.

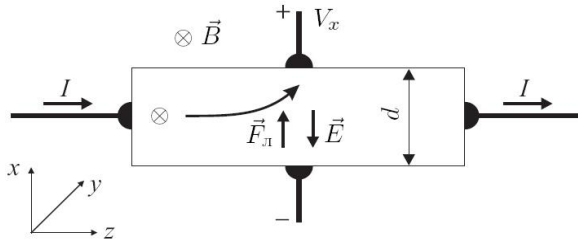


Рисунок 1 – Механізм виникнення е. р. с. Холла у НП

Величина е. р. с. Холла визначається за співвідношенням

$$e_x = X \frac{IB}{a}, \quad (1.26)$$

де $X = 1/qp$ – стала Холла (p – концентрація дірок), I – струм, який проходить у пластині напівпровідника перпендикулярно до напрямку ліній магнітної індукції B ; a – ширина пластини.

Для напівпровідника n -типу величина сталої Холла визначається за співвідношенням $X = 1/qn$, де n – концентрація електронів. Однак унаслідок того, що носії струму розсіюються в напівпровіднику, їх швидкості будуть неоднаковими, то в правій частині співвідношення для сталої Холла вводиться коефіцієнт A .

У разі напівпровідника змішаного типу, внаслідок того, що електрони і дірки відхиляються магнітним полем в один бік, величина сталої Холла буде визначатися за більш складним співвідношенням, яке враховує концентрацію електронів n і дірок p провідності:

$$X = \frac{A}{q} \cdot \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p - n\mu_n)^2}, \quad (1.27)$$

де μ_n і μ_p – рухомість електронів і дірок провідності відповідно.

За $p = 0$ одержуємо сталу Холла для домішкового напівпровідника n -типу: $X_n = -A/(qn) = -A \cdot \mu_n/\sigma_n$, а за $n = 0$ одержуємо сталу Холла для домішкового напівпровідника p -типу $X_p = -A/(qp) = -A \cdot \mu_p/\sigma_p$.

Зауважимо, що для Ge та Si – основних матеріалів сучасної електроніки $-A = 3/8$.

Приклад розв'язування задачі

Приклад 1. Матеріалом датчика Холла є германій p -типу, питомий опір якого $\rho = 0,06 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а рухомість електронів $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Розрахуйте сталу Холла цього напівпровідника, а також концентрацію вільних носіїв заряду у ньому.

Розв'язування

У разі домішкового напівпровідника p -типу сталу Холла можна розрахувати за співвідношенням $X_p = -A \cdot \mu_p/\sigma_p = -A \cdot \mu_p \cdot \rho_p = -(3/8) \cdot 0,19 \cdot 0,06 = -4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$.

З іншого боку, $X_p = -A/(qp)$. Звідси $p = -A/(qX_p) = -(3/8)/(1,6 \cdot 10^{-19} \cdot -4,2 \cdot 10^{-3}) = 5,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Відповідь: $X_p = -4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$, $p = 5,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Задачі для розв'язування

Задача 1. Сила Лоренца F , що діє на рухомий заряд q , зі швидкістю v , в магнітному полі з індукцією \vec{B} , $Tл$, є

векторний добуток $F = q(\overline{V} \cdot \overline{B})$. Через зразок напівпровідника, розміщеного перпендикулярно до вектора індукції B , проходить струм I (рис. 1). Виходячи з наведеної формули, зазначте, на яких гранях зразка виникне надлишок дірок, якщо взяти p за зразок. Як визначити величину та знак е. р. с. Холла?

Задача 2. Визначте концентрацію дірок та їх рухомість в германії p -типу провідності, якщо коефіцієнт Холла $X_p = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$, а питомий опір $\rho = 0,06 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Задача 3. Пластина напівпровідника має товщину 1 мм, довжину 5 мм, ширину 3 мм. Як необхідно розмістити цю пластину відносно магнітного поля і в якому напрямку пропустити електричний струм I через неї для того, щоб е. р. с. Холла була найбільшою? Як визначити напрямок зміщення зарядів? Як датчиком Холла можна визначити тип електропровідності напівпровідника?

Задача 4. Матеріалом датчика Холла є миш'яковистий індій, питомий опір якого $\rho = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а рухомість електронів $\mu_n = 3 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Розрахуйте сталу Холла цього напівпровідника, а також концентрацію вільних електронів у ньому.

Задача 5. Визначте концентрацію дірок та їх рухомість в германії p -типу провідності, якщо коефіцієнт Холла $X_p = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$, а питомий опір $\rho = 6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Задача 6. Визначте концентрацію дірок та їх рухомість в германії p -типу провідності, якщо стала Холла $X_p = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$, а питомий опір $\rho = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Питання для самостійного опрацювання теми 2

1. Методи кристалізаційного очищення напівпровідникових матеріалів.
2. Технології вирощування монокристалів кремнію, германію та арсеніду галію.
3. Епітаксійні методи осадження НП шарів.
4. Використання аморфних напівпровідників як чутливих елементів сенсорів.

Рекомендована література

1. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посіб. / І. І. Василенко, В. В. Широков, Ю. І. Василенко. – Львів : Магнолія, 2006, 2008. – 242 с.
2. Пахолюк А. П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали : навч. посіб. / А. П. Пахолюк. – Львів : Світ, 2005. – 172 с.
3. Швець С. Я. Матеріали електронної техніки : навч. посіб. / С. Я. Швець, І. Ф. Червоний, О. П. Головка. – Запоріжжя : Вид-во ЗДІА, 2008. – 380 с.

Тема 3. Діелектричні матеріали електронної техніки

Заняття 6. Електропровідність діелектриків

Мета заняття – визначити причини виникнення струмів у діелектриках та особливості процесу електропровідності.

Методичні вказівки. Під час розв'язування задач на цю тематику необхідно знати, що густина струму в діелектрику, що має назву струму витоку, $J_{\text{вит}}$, складається з двох струмів: абсорбційного $J_{\text{аб}}$, (струми зсуву, які виникають внаслідок поляризаційних процесів зсуву зарядів у речовині) та наскрізного, $J_{\text{наск}}$, (виникає в діелектриках внаслідок

наявності незначної кількості вільних зарядів, а також внаслідок їх інжекції з електродів), тобто $J_{\text{вит}} = J_{\text{аб}} + J_{\text{наск}}$.

Густина струму зсуву буде визначатися миттєвими (електронними та іонними) вповільненими зсувами зарядів. Провідність же діелектрика за сталої напруги буде визначатися за наскрізним струмом, який супроводжується виділенням та нейтралізацією зарядів на електродах. У разі, якщо на електроди подається змінна напруга, активна провідність буде визначатися як наскрізним струмом так і активною складовою поляризаційних струмів.

Необхідно також знати, що електропровідність діелектриків здебільшого іонна.

Якщо діелектрик розмістити між двома електродами, на які подається стала напруга, то в діелектрику виникає опір ізоляції $R_{\text{із}}$, розрахувати який можна за співвідношенням

$$R_{\text{із}} = U / (I_{\text{вит}} - \sum I_{\text{пол}}), \quad (1.28)$$

де U – напруга на електродах; $I_{\text{вит}}$ – струм витоку; $\sum I_{\text{пол}} = I_{\text{аб}}$ – сума струмів, викликаних уповільненими механізмами поляризації.

Під час використання твердих діелектричних матеріалів як ізоляцію необхідно розрізняти поверхневу і об'ємну електропровідності.

Поверхневий питомий опір ρ_s – це фізична величина, яка чисельно дорівнює опору, уявно виділеному на поверхні матеріалу квадрата будь-якого розміру, якщо струм проходить через два протилежні боки цього квадрата, і визначається за співвідношенням

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l}, \quad (1.29)$$

де R_s – поверхневий опір діелектрика, розміщеного між

двома паралельними електродами шириною d , що перебувають на відстані l один від одного.

Питомий поверхневий опір пов'язаний із питомою поверхневою провідністю співвідношенням $\sigma_s = 1/\rho_s$.

Об'ємний питомий опір ρ_v – це фізична величина, яка чисельно дорівнює опору уявно виділеного з діелектричного матеріалу куба з ребром в 1 м, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба.

Об'ємний питомий опір плоского зразка діелектричного матеріалу за однорідного поля визначається за співвідношенням

$$\rho_v = R \frac{S}{h}, \quad (1.30)$$

де R_v – об'ємний опір; S – площа електрода; h – товщина діелектричного матеріалу.

За аналогією з питомим поверхневим опором питомий об'ємний опір пов'язаний із питомою об'ємною провідністю співвідношенням $\sigma_v = 1/\rho_v$.

Повна провідність твердого діелектрика пов'язана з його опором R_{i3} і складається з поверхневої і об'ємної провідностей.

Під час розв'язування задач за цією тематикою необхідно також знати, що у разі, якщо діелектричний матеріал розміщується між обкладками плоского конденсатора ємністю C , стала часу цього конденсатора τ_0 пов'язана з опором ізоляції R_{i3} співвідношенням: $\tau = R_{i3} \cdot C$.

Приклад розв'язування задач

Приклад 1. Об'ємний і поверхневий опори діелектрика за напруги $U = 450$ В відповідно дорівнюють 10^{10} і 10^{12} Ом. Чому дорівнює опір витoku (ізоляції) та струм витoku діелектрика?

Розв'язування

Повна провідність твердого діелектрика пов'язана з його опором R_{i3} і складається з поверхневої і об'ємної провідностей, тобто можна записати, що повна провідність дорівнює $G = G_V + G_S$ та $1/R_{i3} = 1/R_V + 1/R_S$. Виходячи із останнього виразу, можна записати, що

$$R_{i3} = \frac{R_V \cdot R_S}{R_V + R_S} = \frac{10^{10} \cdot 10^{12}}{10^{10} + 10^{12}} = 9,9 \cdot 10^9 \text{ Ом.}$$

$$\text{Згідно із законом Ома } I_{i3} = \frac{U}{R_{i3}} = \frac{450}{9,9 \cdot 10^9} = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ А.}$$

Відповідь: $R_{i3} = 9,9 \cdot 10^9 \text{ Ом}$, $I_{i3} = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ А}$.

Задачі для розв'язування

Задача 1. Об'ємний і поверхневий опори діелектрика за напруги $U = 500 \text{ В}$ відповідно дорівнюють 10^{10} і 10^{12} Ом. Чому дорівнює опір витoku (ізоляції) та струм витoku діелектрика?

Задача 2. На поверхні діелектрика, зображеного на рисунку 1, було виділено три ділянки, що мають поверхневі опори $R_{s1} = 10^{12}$ Ом, $R_{s2} = 7 \cdot 10^{10}$ Ом і $R_{s3} = 7 \cdot 10^{10}$ Ом. Чому дорівнює повний поверхневий опір діелектрика?

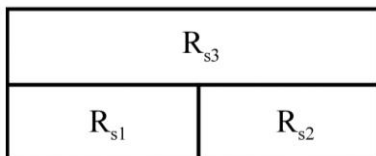


Рисунок 2 – Схематичне зображення поверхні діелектрика

Задача 3. Діелектрик площинного конденсатора зі заданими геометричними розмірами (рис.3) має питомий

об'ємний опір 10^{11} Ом·м та опір витікання (ізоляції) 10^9 Ом. Визначте величину питомого поверхневого опору діелектрика.

Задача 4. Опір витікання (ізоляції) діелектрика дорівнює 10^{14} Ом. Дайте визначення цього опору та запишіть його величину в кілоомах (кОм), мегаомах (МОм), гігаомах (ГОм) і тераомах (ТОм).

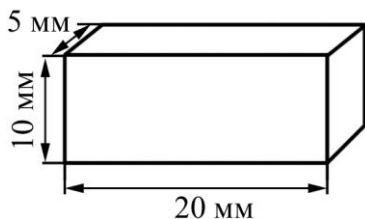


Рисунок 3 – Геометричні розміри діелектрика площинного конденсатора

Задача 5. Відомо, що стала часу конденсатора визначається за співвідношенням $\tau = R_v \cdot C$. Враховуючи, що R_v – об'ємний опір діелектрика, а C – ємність площинного конденсатора, виразіть сталу часу конденсатора через параметри ε і ρ діелектрика, що розділяє електроди конденсатора.

Задача 6. Обчисліть величину питомого об'ємного опору діелектрика конденсатора ємністю $C = 320$ пФ, якщо величина об'ємного опору $R_v = 10^{12}$ Ом, а діелектрична проникність $\varepsilon = 3,5$.

Заняття 7. Температурна залежність відносної діелектричної проникності

Мета заняття – встановлення характеру температурної залежності відносної діелектричної проникності; визначення величини термічного коефіцієнта відносної діелектричної проникності методом графічного

диференціювання температурної залежності.

Методичні вказівки. Здатність діелектричних матеріалів поляризуватися під час прикладення зовнішнього електричного поля характеризується відносною діелектричною проникністю ε , що визначається за співвідношенням:

$$\varepsilon = C_D/C_0, \quad (1.31)$$

де C_D – ємність плоского конденсатора під час розміщення між електродами заданого діелектричного матеріалу; C_0 – ємність плоского конденсатора з вакуумним прошарком.

Відносна зміна відносної діелектричної проникності за зміни температури характеризується температурним коефіцієнтом відносної діелектричної проникності

$$\beta_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT}, \quad (1.32)$$

а відносна зміна ємності конденсатора за зміни температури – температурним коефіцієнтом ємності

$$\beta_C = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT}. \quad (1.33)$$

Величина коефіцієнта β_ε може бути обчислена методом графічного диференціювання температурної залежності відносної діелектричної проникності $\varepsilon = f(T)$ (рис. 4).

Під час визначення величини β_ε для заданої температури до графіка залежності $\varepsilon = f(T)$ проводять дотичну в заданій точці, після цього будують на дотичній прямокутний трикутник довільних розмірів. Обов'язково при

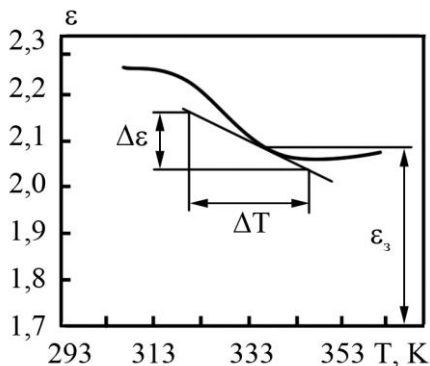


Рисунок 4 – Температурна залежність відносної діелектричної провідності

цьому необхідно враховувати масштаб величин, відкладених по координатних осях.

Таким чином, величина β_ε може бути визначена як

$$\beta_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_T} \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T}. \quad (1.34)$$

Умова температурної компенсації ємності $\beta_c = 0$.

Під час паралельного з'єднання двох конденсаторів ця умова виконується, якщо $C_1 \cdot \beta_{c1} + C_2 \cdot \beta_{c2} = 0$, а під час послідовного з'єднання – $C_1 \cdot \beta_{c2} + C_2 \cdot \beta_{c1} = 0$.

Приклад розв'язування задачі

Приклад 1. Паперовий площинний конденсатор має такі геометричні розміри: товщина діелектричного прошарку – 20 мкм, розмір обклашки – (12×125) мм. Skorиставшись даними таблиці 1, побудуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T)$ та знайдіть β_ε за $T = 333$ К.

Таблиця 1 – Результати вимірювання ємності площинного паперового конденсатора за зміни температури

T, K	293	303	313	323	333	343	353	363
$C, нФ$	3,229	3,265	3,294	3,331	3,400	3,481	3,624	4,128

Розв'язування

Відносна діелектрична проникність визначається за співвідношенням (1.31): $\varepsilon = C_d/C_0$, де C_d – ємність плоского конденсатора під час розміщення між електродами заданого діелектричного матеріалу, відповідає експериментальним даним, наведеним у таблиці 1; $C_0 = \varepsilon_0 S/d$ – ємність площинного конденсатора з вакуумним прошарком.

Отже,
$$\varepsilon = \frac{C_d \varepsilon_0 S}{d}$$
.

Проводимо розрахунки та будуємо графік залежності $\varepsilon = f(T)$ (рис. 5).

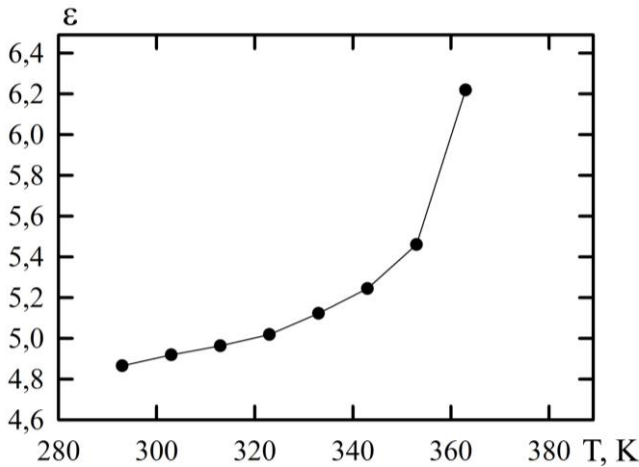


Рисунок 5 – Експериментальна температурна залежність відносної діелектричної провідності

Температурний коефіцієнт відносної діелектричної проникності визначається за співвідношенням (1.32)

$$\beta_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT},$$

$$\beta_\varepsilon = \frac{1}{4,69} \cdot \frac{5,12 - 4,69}{333 - 293} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Відповідь: $\beta_\varepsilon = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Задачі для розв'язування

Задача 1. Циліндричний керамічний конденсатор має такі геометричні розміри: зовнішній діаметр циліндра $D = 4,2$ мм, внутрішній діаметр циліндра $d = 4,0$ мм, довжина циліндра $L = 30$ мм. Скориставшись даними таблиці 2, побудуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T)$ та обчисліть β_ε за $T = 333$ К.

Таблиця 2 – Результати вимірювання ємності циліндричного керамічного конденсатора за зміни температури

$T, \text{ К}$	293	303	313	323	333	343	353	363
$C, \text{ нФ}$	252,0	257,0	261,3	261,9	270,7	271,3	280,1	283

Задача 2. Площинний слюдяний конденсатор має такі геометричні розміри: товщина діелектрика $d = 50$ мкм, розмір обкладинки (12×12) мм, кількість пластин $n = 18$. Скориставшись даними таблиці 3, побудуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T)$ та обчисліть β_ε за $T = 353$ К.

Таблиця 3 – Результати вимірювання ємності площинного слюдяного конденсатора за зміни температури

$T, \text{ К}$	293	303	313	323	333	343	353	363
$C, \text{ нФ}$	1 086,4	1 092,7	1 100,4	1 104,1	1 109,1	1 113	1 118	1 120

Задача 3. Площинний конденсатор з полістиролу має такі геометричні розміри: товщина діелектрика $d = 20$ мкм, розмір обклашки (14×35) мм. Скориставшись даними таблиці 4, побудуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T)$ та обчисліть β_ε за $T = 323$ К.

Таблиця 4 – Результати вимірювання ємності площинного конденсатора з полістиролу за зміни температури

$T, \text{К}$	293	303	313	323	333	343	353	363
$C, \text{нФ}$	591,7	595,9	598,8	601,5	608,0	612,1	614,7	616,7

Заняття 8. Частотна залежність діелектричної сталої та втрат у діелектрику

Мета заняття – встановлення характеру температурної залежності відносної діелектричної проникності; розрахунок величини термічного коефіцієнта відносної діелектричної проникності методом графічного диференціювання температурної залежності.

Методичні вказівки. Під час розв’язування задач за цією темою необхідно знати, що діелектричні втрати – це електрична потужність, яка витрачається на нагрівання діелектрика, розміщеного в електричному полі. Оскільки в твердих діелектричних матеріалах має місце наскрізний струм витоку, обумовлений електропровідністю, то втрати енергії в діелектриках будуть спостерігатися як за змінної, так і за сталої напруги.

У тому разі, якщо ділянка діелектрика з опором ізоляції R_{iz} знаходиться під сталою напругою, величина діелектричних втрат визначається за співвідношеннями

$$P = \frac{U}{R_{iz}} = UI = I^2 R_{iz}, \quad (1.35)$$

де I – наскрізний струм витоків через ізоляцію і

$$P = \frac{E}{\rho_V} = E^2 \sigma_V, \quad (1.36)$$

де ρ_V – питомий об’ємний опір діелектрика;
 σ_V – питома об’ємна провідність.

У тому разі, якщо ділянка діелектрика знаходиться під змінною напругою за реактивної компоненти струму $I_p = U\omega C$, величина діелектричних втрат визначається за співвідношеннями

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (1.37)$$

де δ – кут діелектричних втрат.

Зауважимо, що величина $\operatorname{tg} \delta$ не залежить від розмірів та форми зразка, а також від форми поля. Ця величина значно більш чутлива до змін властивостей речовин порівняно з діелектричною проникністю ϵ .

На рисунку 6 подана векторна діаграма струмів у діелектрику з втратами. Згідно з цим рисунком величина $\operatorname{tg} \delta$

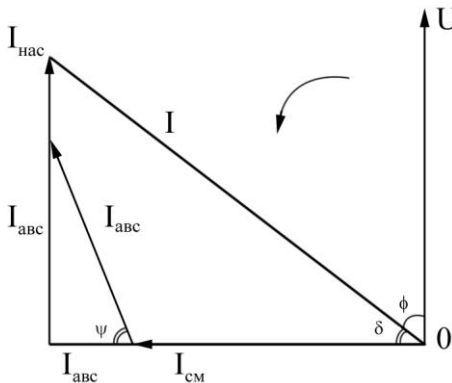


Рисунок 6 – Векторна діаграма струмів у діелектрику з втратами

буде дорівнювати відношенню активного I_a і реактивного I_p компонентів струму, що проходить через діелектричну ізоляцію, тобто $\operatorname{tg}\delta = I_a/I_p$.

Зобразимо діелектрик у вигляді паралельної або послідовної схем заміщення (рис. 7), для яких тангенс кута діелектричних втрат визначається як

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega C_n Z_n} = \omega C_s r_s = \frac{I_a}{I_c} = \frac{U_c}{U_a} = \frac{1}{Q}, \quad (1.38)$$

де Q – добротність ізоляції; C_n і C_s – ємності за паралельної і послідовної схем заміщення діелектрика відповідно, а діелектричні втрати визначаються за співвідношенням

$$P_a = U^2 \omega C_n \operatorname{tg}\delta = U^2 \omega C_s \frac{\operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (1.39)$$

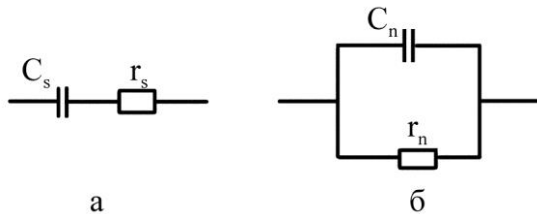


Рисунок 7 – Послідовна (а) і паралельна (б) схеми заміщення діелектрика

Тоді елементи C_n і C_s , r_n і r_s послідовної і паралельної схем заміщення діелектрика будуть пов'язані між собою співвідношеннями

$$C_n = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad i \quad r_n = r_s \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right), \quad (1.40)$$

де r_n і r_s – опори за паралельної і послідовної схем заміщення діелектрика відповідно.

Співвідношення для питомих діелектричних втрат, тобто потужності, що розсіюється у м³ діелектрика, має вигляд

$$p = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2 \omega C_n \operatorname{tg} \delta}{Sh} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2, \quad (1.41)$$

де V – об'єм діелектрика, який знаходиться між електродами площинного конденсатора; E – напруженість електричного поля.

Реактивна і активна складові питомої провідності будуть визначатися відповідно за співвідношеннями

$$\sigma_c = \omega \varepsilon_0 \varepsilon, \quad (1.42)$$

$$\sigma_r = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta, \quad (1.43)$$

Таким чином, $\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_r}{\sigma_c} = \frac{\varepsilon^n}{\varepsilon}$, де ε_n – коефіцієнт діелектричних втрат.

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Визначте величину питомих діелектричних втрат на частоті 10 МГц для мусковіту ($\varepsilon = 7$, $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$), якщо напруженість електричного поля, прикладеного до діелектрика, – 450 В/м.

Розв'язання

Величина питомих діелектричних втрат визначається за співвідношеннями (1.41):

$$p = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2 = 10 \cdot 10^6 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 7 \cdot 3 \cdot 10^{-4} 450^2 =$$

$$= 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} / \text{м}^3.$$

$$\text{Відповідь: } p = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} / \text{м}^3.$$

Приклад 2. Параметри послідовної схеми заміщення діелектриків за частоти 10 МГц такі: ємність $C_s = 0,05 \text{ мкФ}$, активний опір $r_s = 120 \text{ Ом}$. Визначте ємність C_n і опір r_n для паралельної схеми заміщення діелектрика.

Розв'язування

Елементи послідовної і паралельної схем заміщення діелектрика пов'язані між собою співвідношеннями (1.40):

$$C_n = \frac{C_s}{1 + \text{tg}^2 \delta} \text{ і } r_n = r_s \left(1 + \frac{1}{\text{tg}^2 \delta} \right), \text{ де } \text{tg} \delta = \omega C_s r_s,$$

$$\text{отже, } C_n = \frac{C_s}{1 + (\omega C_s r_s)^2} = \frac{0,05 \cdot 10^{-6}}{1 + (10 \cdot 10^6 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot 120)^2} =$$

$$= 13 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} = 13 \text{ пФ};$$

$$r_n = r_s \left(1 + \frac{1}{\omega C_s r_s} \right) = 120 \cdot \left(1 + \frac{1}{10 \cdot 10^6 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot 120} \right) =$$

122 Ом.

$$\text{Відповідь: } C_n = 13 \text{ пФ}, r_n = 122 \text{ Ом}.$$

Задачі для розв'язування

Задача 1. Визначте величину питомих діелектричних втрат на частоті 1 МГц для мусковіту ($\varepsilon = 7$, $\text{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$), якщо напруженість електричного поля, прикладеного до діелектрика, 500 В/м.

Задача 2. Порівняйте величину питомих діелектричних втрат на частоті 50 Гц для неполярної рідини –

трансформаторного масла ($\varepsilon = 2,3$, $\operatorname{tg}\delta = 10^{-3}$) і полярної рідини – соволу ($\varepsilon = 5$, $\operatorname{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-2}$), якщо напруга, прикладена до діелектриків, – 300 кВ, площа діелектрика між плоскими електродами $1\,200\text{ мм}^2$, відстань між електродами 10 мм.

Задача 3. Визначте величину питомих діелектричних втрат для флогопіту ($\varepsilon = 6$, $\operatorname{tg}\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$) на частоті 1 кГц, якщо напруженість електричного поля, прикладеного до діелектрика, – 1 кВ, поверхня дотику діелектрика з плоскими електродами 169 мм^2 , товщина діелектрика 25 мкм.

Задача 4. До конденсатора, діелектрик якого має діелектричну проникність $\varepsilon = 2,5$, прикладено поле напруженістю 500 В/м. Визначити поверхневу густину зарядів на електродах і на боках діелектрика, що дотикаються до електродів.

Задача 5. Конденсатор ємністю 100 пФ, увімкнений у змінну напругу 100 В частотою 1 МГц і утримує в ролі діелектрика кераміку $\operatorname{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-4}$. Визначте діелектричні втрати в цьому конденсаторі.

Задача 6. Параметри послідовної схеми заміщення діелектриків за частоти 1 МГц такі: ємність $C_s = 0,01\text{ мкФ}$, активний опір $R_s = 115\text{ Ом}$. Визначте ємність та опір C_n для паралельної схеми заміщення діелектрика.

Задача 7. У конденсаторі ємністю 100 пФ, увімкненому на змінну напругу 100 В, частотою 1 МГц, розсіюється енергія у вигляді тепла $P_a = 10^{-5}\text{ Вт}$. Обчисліть величину $\operatorname{tg}\delta$ і добротність конденсатора.

Задача 8. Через конденсатор ємністю 100 пФ, увімкнений

на напругу 100 В з частотою 10 кГц, проходить струм $2 \cdot 10^{-9}$ А. Потужність діелектричних втрат $5 \cdot 10^{-5}$ Вт. Розрахуйте: а) ємнісну і активну складові струмів; б) активний опір паралельної схеми заміщення діелектрика; в) добротність діелектрика.

Задача 9. Параметри паралельної схеми заміщення діелектрика за частоти 1 МГц такі: ємність $C_n = 0,5$ мкФ, активний опір $R_n = 320$ Ом. Обчислити ємність C_s і опір C_s послідовної схеми заміщення діелектрика.

Питання для самостійного опрацювання теми 3

1. Технологія отримання конденсаторної кераміки і п'єзокерамічних матеріалів.
2. Властивості епоксидних компаундів.
3. Практичне застосування рідкокристалічних матеріалів.

Рекомендована література

1. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посіб. / І. І. Василенко, В. В. Широков, Ю. І. Василенко. – Львів : Магнолія, 2006, 2008. – 242 с.
2. Прокопів В. В. Матеріали електронної техніки : навч. посіб. / В. В. Прокопів. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. – 288 с.
3. Швець С. Я. Матеріали електронної техніки : навч. посіб. / С. Я. Швець, І. Ф. Червоний, О. П. Головка. – Запоріжжя : Вид-во ЗДІА, 2008. – 380 с.

Тема 4. Магнітні матеріали мікро- і наноелектроніки

Заняття 9. Магнітні матеріали електроніки

Мета заняття – вивчення властивостей магнітних матеріалів та особливостей фізичних процесів у феромагнітних металах.

Методичні вказівки. Магнітні речовини – це клас речовин, які за розміщення в магнітному полі напруженістю \vec{H} намагнічуються. Міра намагнічення речовини – це намагніченість \vec{J} (магнітний момент одиниці об'єму), визначається за співвідношення $\vec{J} = \vec{M}/V$.

У невеликих полях намагніченість пов'язана з напруженістю магнітного поля співвідношенням

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (1.44)$$

де χ – об'ємна магнітна сприйнятливість речовини.

Магнітне поле, що створюється всередині намагніченої речовини, описується вектором магнітної індукції \vec{B} :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi), \quad (1.45)$$

де $1 + \chi = \mu$ – магнітна проникність середовища; μ_0 – магнітна стала.

Розрізнять різні види магнітної проникності: статична магнітна проникність визначається за співвідношенням $\mu = B/\mu_0 H$; диференціальна магнітна проникність $\mu_{\text{диф}}$ характеризує крутість окремих ділянок петлі магнітного гістерезису (рис. 8) і визначається за співвідношенням

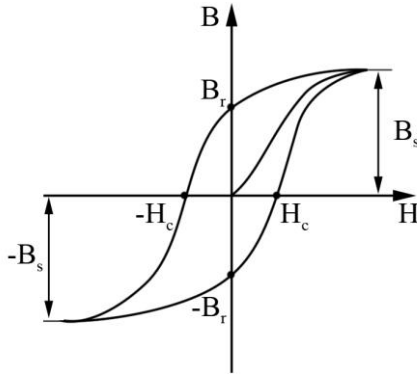


Рисунок 8 – Типова петля магнітного гістерезису ферромагнітного матеріалу та основна крива намагнічування: B_s – величина поля насичення; B_r – залишкова індукція; H_c – напруженість розмагнічувального поля (коерцитивна сила)

$\mu_{\text{диф}} = (\mu_0)^{-1} (dB/dH)$ та початкова магнітна проникність $\mu_{\text{п}}$ – магнітна проникність за напруженості поля, близької до нуля, яка має важливе значення під час технічного застосування магнітних матеріалів.

Задачі для розв'язування

Задача 1. За напруженості магнітного поля 10^4 А/м магнітна індукція у вісмуті дорівнює 12,564 мТл. Визначити магнітну сприйнятливість χ речовини. Яка природа намагніченості цього матеріалу?

Задача 2. За кривою намагнічування пермалою (рис. 9), визначте залежність статичної та динамічної магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля. Поясніть характер одержаної залежності.

Задача 3. За основною кривою намагнічування технічного заліза, наведеною на рисунку 8, визначте максимальні статичну та динамічну проникності.

Задача 4. В однорідному магнітному полі з індукцією B_0 перпендикулярного до магнітного потоку розміщена пластина з однорідного ізотропного феромагнетика з магнітною проникністю μ . Визначте магнітну індукцію B_i та напруженість магнітного поля H_i .

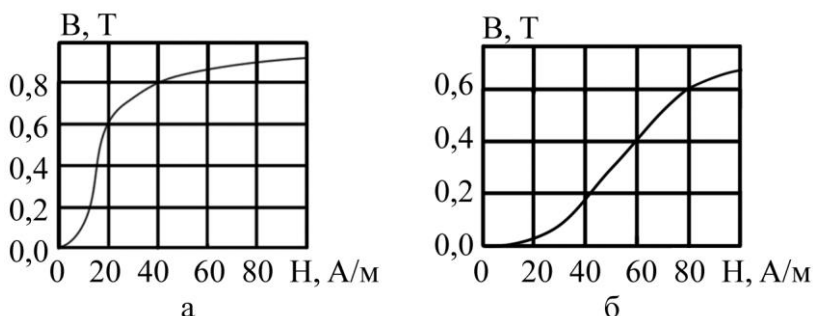


Рисунок 9 – Криві намагнічування пермалюю (а) та технічного заліза (б)

Заняття 10. Особливості поведінки магнітних матеріалів у змінних магнітних полях

Мета заняття – вивчення фізичних процесів у магнітних матеріалах під час перемагнічування під дією змінного магнітного поля.

Методичні вказівки. Закон повного струму і закон електромагнітної індукції встановлюють зв'язок між електричними та магнітними параметрами. Величина струму в обмотках осердя та зменшення напруги на них залежать від напруженості магнітного поля, магнітної індукції та потоку.

Закон повного струму для осердя з незмінними магнітними властивостями має вигляд

$$H_e = \Sigma IN, \quad (1.46)$$

де N – кількість витків обмоток.

Під дією напруженості в осерді виникає магнітний потік. За законом електромагнітної індукції та за зміни магнітного потоку в обмотці осердя виникає е. р. с. Під час періодичного змінення цього магнітного потоку від максимального до мінімального значення, середня за половину періоду величина е. р. с. визначається за співвідношенням

$$e_{cp} = 4fNSB_m, \quad (1.47)$$

де f – частота перемагнічування; S – площа поперечного перерізу осердя; B_m – максимальне значення магнітної індукції.

Середньоквадратичне значення напруги, прикладене до обмотки,

$$U = 4k_\phi fNSB_m, \quad (1.48)$$

де k_ϕ – коефіцієнт форми, який під час синусоїдальної напруги дорівнює 1,11.

Отже, вираз для середньоквадратичного значення напруги при синусоїдальному законі зміни напруги має вигляд

$$U = 4,44 \cdot fNSB_m. \quad (1.49)$$

Індуктивність соленоїда, довжина якого достатньо велика порівняно з діаметром,

$$L_0 = \mu_0(N^2 S/l), \quad (1.50)$$

де l – довжина осердя.

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. До мережі змінної напруги у 50 В, частотою 400 Гц підключили обмотку осердя, переріз якого становить $0,14 \text{ см}^2$, а кількість витків – 1 200. Визначити амплітуду магнітної індукції в осерді.

Розв'язування

Величина діючого значення напруги і амплітуди магнітної індукції пов'язані між собою співвідношенням (1.49): $U = 4,44 \cdot f N S B_m$.

$$\begin{aligned} \text{Звідси } B_m &= U / (4,44 \cdot f N S) = \\ &= 50 / (4,44 \cdot 400 \cdot 1\,200 \cdot 0,14 \cdot 10^{-4}) = 1,7 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

Відповідь: $B_m = 1,7 \text{ Тл}$.

Приклад 2. Обмотку осердя, розраховану на напругу 120 В за частоти 40 Гц, під'єднали під напругу 250 В із частотою 400 Гц. Як зміниться амплітуда магнітної індукції?

Розв'язування

Амплітуда магнітної індукції визначається за співвідношенням $B_m = k \frac{U}{f}$, де $k = 1/(N S)$.

За напруги $U = 120 \text{ В}$ і частоти $f = 40 \text{ Гц}$ амплітуда магнітної індукції буде дорівнювати $B_{m1} = k \cdot 120/40 = 3k$.

За напруги $U = 250 \text{ В}$ і частоти $f = 400 \text{ Гц}$ амплітуда магнітної індукції буде дорівнювати $B_{m2} = k \cdot 250/400 = = 0,625k$.

Відношення $B_{m1}/B_{m2} = 3/0,625 = 4,8$, тому можна зробити висновок, що амплітуда магнітної індукції зменшилася в 4,8 рази.

Відповідь: амплітуда магнітної індукції зменшилася в 4,8 рази.

Задача 1. Визначте напругу змінного струму, прикладеного до обмотки дроселя, за якого відбувається зміна магнітної індукції в осерді з амплітудою – 1 Тл, якщо частота джерела живлення – 50 Гц, кількість витків 1 000, переріз осердя – 10 см².

Задача 2. Амплітуда магнітної індукції в осерді дроселя, увімкненого до синусоїдної напруги 141 В та частотою 400 Гц, дорівнює 1 Тл, переріз осердя – 0,16 см². Визначте амплітуду магнітної індукції у тому самому осерді, якщо кількість витків дорівнює 3 000.

Задача 3. Визначте напругу змінного струму, прикладену до обмотки трансформатора, за якої відбувається зміна магнітної індукції в осерді з амплітудою 1,2 Тл, якщо частота джерела живлення – 100 Гц, кількість витків – 500, переріз осердя – 7 см².

Задача 4. Обмотку осердя ввімкнено до мережі змінного струму 50 В із частотою 400 Гц. Переріз осердя – 0,16 см², кількість витків – 1 600. Визначте амплітуду магнітної індукції в осерді.

Задача 5. Первинна обмотка трансформатора знаходиться під дією напруги 100 В із частотою 50 Гц. Переріз осердя трансформатора – 2 см², кількість витків обмотки – 1 250. Визначте амплітуду магнітної індукції в осерді.

Задача 6. Амплітуда магнітної індукції в осерді дроселя, ввімкненого до синусоїдної напруги з амплітудою 141 В та частотою 400 Гц, дорівнює 1 Тл, переріз осердя – 0,15 см². Визначте амплітуду магнітної індукції у тому самому осерді з кількістю витків – 2 000.

Задача 7. Обмотку осердя, розраховану на напругу

127 В за частоти 50 Гц, увімкнули до напруги 200 В із частотою 400 Гц. Як зміниться амплітуда магнітної індукції?

Задача 8. Обчисліть індуктивність соленоїда, що має 200 витків, намотаних на діелектричну основу, довжиною 50 мм та площу поперечного перерізу 50 мм^2 . Як зміниться індуктивність котушки, якщо до неї введено циліндричне феритове осердя, яке має магнітну проникність $\mu = 400$?

Задача 9. Визначте, скільки витків необхідно намотати на магнітне осердя довжиною 100 мм та діаметром 8 мм, щоб одержати індуктивність котушки $L = 10 \text{ мГн}$. Магнітна проникність осердя $\mu = 500$.

Задача 10. Кільцеве феритове осердя з середнім діаметром $l = 25 \text{ мм}$ має повітряний проміжок довжиною 1 мм. Під час пропускання струму 0,17 А через обмотку осердя, яка має 500 витків, у проміжку виникає магнітна індукція $B_0 = 0,1 \text{ Тл}$. Визначте магнітну проникність фериту.

Питання для самостійного опрацювання теми 4

1. Технологія отримання конденсаторної кераміки і п'езокерамічних матеріалів.
2. Властивості епоксидних компаундів.
3. Практичне застосування рідкокристалічних матеріалів.

Рекомендована література

1. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посіб / І. І. Василенко, В. В. Широков, Ю. І. Василенко. – Львів : Магнолія, 2006, 2008. – 242 с.
2. Прокопів В. В. Матеріали електронної техніки : навч.

- посіб. / В. В. Прокопів. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. – 288 с.
3. Швець С. Я. Матеріали електронної техніки : навч. посіб. / С. Я. Швець, І. Ф. Червоний, О. П. Головка. – Запоріжжя : Вид-во ЗДІА, 2008. – 380 с.

Тема 5. Пасивні елементи електроніки

Заняття 11. Семінар на тему «Резистори і конденсатори»

Питання семінару

1. Класифікація та основні параметри резисторів.
2. Маркування резисторів.
3. Конструкції, монтаж та можливі несправності резисторів.
4. Класифікація та маркування конденсаторів.
5. Основні параметри та характеристики конденсаторів.
6. Стабільність характеристик конденсаторів під впливом експлуатаційних факторів.

Методичні вказівки. У процесі підготовки до семінару необхідно звернути увагу на такі моменти.

До основних параметрів резистора відносяться: номінальний опір, номінальну потужність розсіювання, температурний коефіцієнт опору (ТКО), електричну міцність, рівень власних шумів та вольт-амперну характеристику.

Існують такі класифікації резисторів: за виглядом вольт-амперної характеристики, за конструкцією, за матеріалом, за способом захисту резистивного матеріалу та призначенням.

Під час маркування резисторів використовують

кодові позначення та колірне маркування.

Можливими причинами несправності резисторів можуть бути неправильне або помилкове маркування резисторів, обрив струмоведучої поверхні резистора, окислення виводів резистора та ін.

Конденсатор – це елемент електричного кола, основною функцією якого є накопичення енергії.

Існують такі класифікації конденсаторів: за призначенням, за характером зміни ємності, за способом захисту від факторів зовнішнього середовища, за способом монтажу, видом діелектрика тощо.

Під час маркування конденсаторів використовуються кодові позначення, що складаються з букв і цифр.

До основних параметрів та характеристик конденсаторів відносять: номінальну ємність, напругу і струм, опір ізоляції, струм витoku, температурний коефіцієнт ємності, а також специфічні електричні параметри і характеристики підлаштовувальних і вакуумних конденсаторів, серед яких можна виділити момент обертання, швидкість перебудови ємності, зносостійкість та електричну міцність.

Перелічені вище параметри і характеристики змінюються під впливом таких факторів, як електричні, кліматичні й механічні навантаження та радіаційні впливи. Ці фактори залежно від тривалості дії та виду можуть спричинити як зворотні, так і незворотні зміни параметрів конденсаторів.

Заняття 12. Семінар на тему «Індуктивні та комутаційні компоненти»

Питання семінару

1. Види індуктивних елементів, що використовують в електричних ланцюгах.
2. Функції, основні параметри та класифікація котушок

індуктивності.

3. Конструкції, монтаж та можливі несправності резисторів.

4. Призначення та основні параметри електричних дроселів.

5. Основні параметри комутаційних пристроїв.

6. Електричні розніми: класифікація та основні характеристики.

7. П'єзокерамічні комутаційні елементи. Галузі застосування, переваги та недоліки.

8. Геркони: основні параметри, галузі застосування, переваги та недоліки.

Методичні вказівки. У процесі підготовки до семінару необхідно звернути увагу на такі моменти.

До основних видів індуктивних компонентів електричних ланцюгів відносять котушки індуктивності, дроселі й трансформатори, які разом із конденсаторами використовують для формування фільтрів, запам'ятовувальних елементів, елементів затримки сигналів тощо. Індуктивні елементи не мають стандартної конструкції, а виготовляються для конкретних завдань, а саме перетворення електричних сигналів, напруг і струмів.

Комутаційні елементи, до яких відносять електричні розніми, перемикачі, п'єзокерамічні комутаційні елементи, реле та геркони, призначені для вмикання, вимикання і перемикання електричних ланцюгів, а також для зміни напрямку електричного струму в них.

Основні параметри комутаційних елементів: чутливість, час спрацювання, максимальне значення потужності, що комутується, частота комутації, коефіцієнт підсилення, вхідний опір, електроізоляційні властивості, опір комутуючих елементів, режими замикання і розмикання.

Список використаної літератури

1. Фізика твердого тіла : навч. посіб. / В. В. Бібик, Т. М. Гричановська, Л. В. Однорець, Н. І. Шумакова. – Суми : СумДУ, 2010. – 200 с.
2. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / М. С. Будіщев. – Львів : Афіша, 2001. – 424 с.
3. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посіб. / І. І. Василенко, В. В. Широков, Ю. І. Василенко. – Львів : Магнолія, 2006, 2008. – 242 с.
4. Кравченко Ю. С. Матеріали електронної техніки: Питання та задачі : навч. посіб. / Ю. С. Кравченко, Л. В. Крилик, Є. О. Смольков. – Вінниця : Вид-во ВНТУ, 2008. – 71 с.
5. Прищепа М. М. Мікроелектроніка. Ч. 1 : Елементи мікроелектроніки / М. М. Прищепа, В. П. Погребняк. – Київ : Вища школа, 2004. – 432 с.
6. Прокопів В. В. Матеріали електронної техніки : навч. посіб. / В. В. Прокопів. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. – 288 с.
7. Проценко І. Ю. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості) : навч. посібник / І. Ю. Проценко, В. А. Саєнко. – Суми : СумДУ, 2002. – 187 с.
8. Сенько Л. І. Елементна база електронних пристроїв / Л. І. Сенько, В. В. Ясінський. – Київ : Обереги, 2000. – Т. 1. – 300 с.
9. Швець С. Я. Матеріали електронної техніки : навч. посіб. / С. Я. Швець, І. Ф. Червоний, О. П. Головка. – Запоріжжя : Вид-во ЗДІА, 2008. – 380 с.
10. Швець С. Я. Матеріали і компоненти електроніки : навч. посіб. / С. Я. Швець, І. Ф. Червоний, О. П. Головка. – Запоріжжя : Вид-во ЗДІА, 2011. – 278 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт та самостійної роботи
з курсу «**Матеріали і компоненти функціональної**
електроніки»
для освітньо-кваліфікаційного ступеня «магістр»
спеціальності 171 «*Електроніка*»
денної та заочної форм навчання

Відповідальний за випуск І. Ю. Проценко
Редактор Н. В. Ніколаєнко
Комп'ютерне верстання І. М. Пазухи

Підписано до друку 25.04.2018, поз. 77.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 3,26. Обл.-вид. арк. 2,54. Тираж 30 пр. Зам. №
Собівартість видання грн к.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.