

Ю.С.Кравченко, Л.В.Крилик,

Є.О.Смольков

Матеріали електронної техніки: питання та задачі

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Ю.С. Кравченко, Л.В. Крилик, Є.О. Смольков

**МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ:
ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ**

Затверджено Методичною радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальностей „Мікроелектроніка та напівпровідникові прилади” і „Електронні прилади та пристрої”. Протокол № 10 від 25 травня 2007 р.

Вінниця ВНТУ 2008

УДК 621.382
К 78

Рецензенти:

В.М. Кичак, доктор технічних наук, професор

О.В. Осадчук, доктор технічних наук, доцент

В.М. Яремчук, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

К 78 **Кравченко Ю.С., Крилик Л.В., Смольков Є.О.**
Матеріали електронної техніки: Питання та задачі. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. - 71 с.

Посібник містить питання та задачі, розв'язання яких сприятиме засвоєнню теоретичного матеріалу з основ матеріалознавства провідників, напівпровідників, діелектриків та магнітних матеріалів. Посібник розроблено для студентів спеціальностей „Мікроелектроніка та напівпровідникові прилади” і „Електронні прилади та пристрої” відповідно до програми дисципліни „Матеріали електронної техніки”.

УДК 621.328

© Ю.С. Кравченко, Л.В. Крилик, Є.О. Смольков, 2008

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ.....	7
1.1 Короткі теоретичні відомості.....	7
1.2 Питання та задачі.....	9
2 НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ.....	14
2.1 Короткі теоретичні відомості.....	14
2.2 Питання та задачі.....	18
3 ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ.....	27
3.1 Короткі теоретичні відомості.....	27
3.2 Питання та задачі.....	37
4 МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ.....	49
4.1 Короткі теоретичні відомості.....	49
4.2 Питання та задачі.....	55
ЛІТЕРАТУРА	64
ДОДАТОК А Властивості провідників.....	65
ДОДАТОК Б Властивості напівпровідників.....	66

ДОДАТОК В Властивості діелектриків.....	69
ДОДАТОК Г Властивості магнітних матеріалів.....	70

ВСТУП

Підготовка спеціалістів з електронної техніки потребує надання майбутнім фахівцям ґрунтовних знань з квантової та статистичної фізики, фізики твердого тіла та електронних процесів, схемотехніки і основ проектування та конструювання електронних приладів та інтегральних мікросхем.

Метою вивчення дисципліни „Матеріали електронної техніки” є напрацювання у студентів фізичного та інженерного підходів при проектуванні різноманітних електронних приладів і вибору відповідних матеріалів для них. Щоб зрозуміти закономірності поведінки матеріалів в різних умовах, вільно орієнтуватись в конструктивних та технологічних їхніх можливостях, спеціаліст з електронної техніки повинен мати ґрунтовні знання, насамперед, з фізики, хімії, електротехніки та фізичних основ електроніки. Вивчення даної дисципліни викликає у студентів певні труднощі, які пов’язані як з широкою номенклатурою матеріалів, що використовуються в електронній техніці, так і з відсутністю навичок практичного застосування отриманих теоретичних знань. Розв’язання задач, які вміщені в даному посібнику, на наш погляд, буде сприяти розвитку цих навичок, дозволить глибше зрозуміти фізичну сутність процесів і явищ, що відбуваються в матеріалах за різних умов, практично відчувати значення і порядок деяких найважливіших параметрів електронних матеріалів, засвоїти застосування основних формул.

Посібник складається з чотирьох основних розділів, які присвячені основним матеріалам електронної техніки: провідникам, напівпровідникам, діелектрикам та магнітним матеріалам.

Кожний розділ окрім практичних питань і задач з відповідного напрямку містить також необхідні теоретичні відомості про дані матеріали

і основні розрахункові формули. В додатках наведені основні параметри провідникових, напівпровідникових та магнітних матеріалів.

Даний навчальний посібник призначений, насамперед, для самостійної роботи студентів і містить питання і задачі різного ступеня складності. Задачі підвищеного рівня складності можуть бути запропоновані студентам як індивідуальне завдання, а питання меншої складності можуть бути використані викладачем при проведенні колоквіумів, тестового контролю тощо.

Посібник, насамперед, може бути рекомендований для студентів, які навчаються за електронними спеціальностями („Мікроелектроніка та напівпровідникові прилади” та „Електронні прилади та пристрої”), і використаний при вивченні дисципліни „Матеріали електронної техніки”, а також студентам радіотехнічних та приладобудівних спеціальностей, в навчальному плані яких є аналогічні дисципліни.

1 ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

1.1 Короткі теоретичні відомості

Твердими провідниками (першого роду) є метали, металеві сплави та деякі модифікації вуглецю.

При звичайних температурах електрони в металах підпорядковуються статистиці Фермі-Дірака. Криві ймовірності заповнення енергетичних рівнів розраховують за допомогою статистики Фермі

$$P(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}}, \quad (1.1)$$

де E - енергія рівня, ймовірність заповнення якого визначається;

E_F - енергія рівня Фермі, на якому ймовірність заповнення дорівнює 1/2.

Рівню Фермі відповідає потенціал Фермі $\varphi_F = \frac{E_F}{l}$.

Питомий опір провідника ρ з поперечним перерізом S та довжиною l обчислюють за формулою

$$\rho = \frac{RS}{l}, \text{ ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}. \quad (1.2)$$

У системі СІ одиницею питомого опору є $1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$.

Температурний коефіцієнт питомого опору визначається так:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (1.3)$$

де ρ - питомий опір провідника при кімнатній температурі;

$\frac{d\rho}{dt}$ - нахил прямої в координатах $\rho = F(T)$.

Залежність змінення питомого опору провідників зі зростанням температури в межах лінійної частини характеристики має аналітичний вираз

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha_\rho \Delta T), \quad (1.4)$$

де ρ_0 - стала величина для заданого провідника, зумовлена його структурою та концентрацією домішки.

Величина α_ρ є температурним коефіцієнтом питомого опору в заданих межах температури

$$\alpha_\rho = TK\rho = \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}, K^{-1}. \quad (1.5)$$

Диференційний вираз α_ρ при температурі T відповідає формулі (1.3), а для чистих металів $\alpha_\rho = 1/273 = 0,004 K$.

На опір провідників суттєвий вплив мають домішки та структурні дефекти кристалічної ґратки. Чисті метали характеризуються найменшим значенням ρ . При введенні в метал домішки його питомий опір зростає. Він зростає навіть тоді, коли питомий опір домішки менший за питомий опір металу. Вплив домішки не змінюється зі зміною температури та при температурах, які близькі до абсолютного нуля, опір металів за наявності домішки прямує до деякого сталого значення ρ_{cm} , звідки випливає правило Матісена про адитивність питомого опору:

$$\rho_{\text{дом}} = \rho_T + \rho_{cm}, \quad (1.6)$$

де ρ_T - опір, зумовлений зіткненням електронів з вузлами кристалічної ґратки;

ρ_{cm} - залишковий опір, зумовлений зіткненням електронів з дефектами структури ґратки.

Сплави зі значним складом окремих компонентів, для яких зміна на ρ_{cm} описується законом Нордгейма:

$$\rho_{cm} = CX_A X_B = C(1 - X_A) = CX_B(1 - X_B), \quad (1.7)$$

де C - стала; $X_A > X_B$ - атомні частинки компонентів у сплаві.

Для бінарних розчинів $A-B$ ρ_{cm} досягає максимуму при рівному складі кожного компонента.

Контактна різниця потенціалів виникає при з'єднанні двох різних металевих провідників A та B внаслідок різної концентрації електронів у різних металах. Вона визначається так:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}, \quad (1.8)$$

де U_A, 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.

Термо-ЕРС виникає під дією різниці температур T_1 (спаю двох різних провідників A та B) та T_2 (температура їх вільних кінців), яка може бути визначена за формулою

$$U = U_{AB} + U_{BA} = \frac{k}{q} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B}. \quad (1.9)$$

Для двох конкретних речовин формулу (1.9) можна записати так:

$$U = C(T_1 - T_2), \quad (1.10)$$

де C - стала для даної пари провідників, коефіцієнт термо-ЕРС.

1.2 Питання та задачі

1.2.1 Який характер електричної провідності мають провідникові матеріали? Дайте означення питомого опору та його температурного коефіцієнта.

1.2.2 Наведіть класифікацію провідникових матеріалів. Назвіть області застосування кожної групи провідників.

1.2.3 Які матеріали відносяться до провідникових та за якими властивостями вони класифікуються?

1.2.4 Матеріали високої провідності, їхні основні фізико-механічні та електричні властивості, області застосування.

1.2.5 Дайте порівняльну характеристику властивостям міді та алюмінію. Від чого залежить техніко-економічна доцільність заміни міді на алюміній?

1.2.6 Дайте загальну характеристику сплавам високого опору. Перерахуйте найважливіші сплави, назвіть їх властивості та області застосування.

1.2.7 Які сплави високого опору використовуються у вимірювальних приладах, реостатах та електронагрівальних приладах? Які властивості вони мають?

1.2.8 Яка природа теплопровідності металевих провідників та її залежність від температури?

1.2.9 Як залежить термо-ЕРС від різниці температур? Які матеріали використовують для виготовлення термопар?

1.2.10 Назвіть основні властивості провідникових матеріалів.

1.2.11 Чи можуть мати провідники від'ємний температурний коефіцієнт питомого опору? Відповідь обґрунтуйте.

1.2.12 Наведіть формулу для визначення температурного коефіцієнта питомого опору провідників та поясніть його залежність від температури та вмісту домішок у металі.

1.2.13 Як відбувається перенесення електричних зарядів у металевих провідниках?

1.2.14 Чи існує у металах електронний газ? Від яких чинників залежить питома електрична провідність металевих провідників?

1.2.15 Як впливає температура на концентрацію вільних електронів в металах?

1.2.16 Чи залежить середня енергія вільних електронів в металах від числа атомів, які складають кристал?

1.2.17 Чому значну частину мідних провідників замінюють алюмінієвими? Які вони мають переваги та недоліки?

1.2.18 Що таке біметалеві провідники та контакти?

1.2.19 Яка область застосування в електроніці та електротехніці металів з найменшим температурним коефіцієнтом довжини?

1.2.20 Які вимоги висуваються до металів, з яких виробляють реостати та резистори? Наведіть приклади таких матеріалів.

1.2.21 Які матеріали високого електричного опору використовують у вимірювальних приладах та еталонних резисторах? У чому їх переваги та недоліки?

1.2.22 Чому питомий опір металів зростає з підвищенням температури?

1.2.23 Що називають температурним коефіцієнтом питомого опору? Чи є він константою для кожного матеріалу?

1.2.24 Як впливають домішки на питомий опір металів?

1.2.25 Як змінюється середня довжина пробігу електронів в ідеально чистих металах та в металах з домішками при підвищенні температури?

1.2.26 Чому металеві сплави типу твердих розчинів мають більший питомий опір ніж чисті компоненти, які утворюють сплав?

1.2.27 Чому при термічному загартовуванні питомий опір металів зростає, а при температурному відпалі зменшується?

1.2.28 Дайте пояснення поведінці провідників в електричному полі на високих частотах. Складіть графік розподілу густини струму через перетин циліндричного провідника при дії напруги високої частоти.

1.2.29 Як та чому змінюється питомий опір металів при механічній обробці (стискання, розтягування, перегин, пластична деформація)?

1.2.30 На які властивості металів впливає поведінка електронів?

1.2.31 Обчислити довжину вільного пробігу електронів у міді при $T = 300\text{ K}$, якщо її питомий опір при цій температурі дорівнює $0,017\text{ мкОм/м}$.

1.2.32 Визначити час, протягом якого електрон пройде відстань 1 км по мідному дроту, якщо питомий опір міді $0,017\text{ мкОм/м}$, а різниця потенціалів на кінцях провідника $U = 220\text{ В}$. За який час електрон пролетить цю ж відстань, рухаючись без зіткнень, при тій самій різниці потенціалів? Який час передачі сигналу?

1.2.33 Визначити температурний коефіцієнт лінійного розширення α_l і подовження ніхромового дроту, якщо відомо, що при підвищенні температури від 20 до 1000°C електричний опір дроту змінюється від 50 до $56,6\text{ Ом}$. Довжина дроту в холодному стані $l = 50\text{ м}$. Температурний коефіцієнт питомого опору ніхрому вважати рівним $15 \cdot 10^{-5}\text{ K}^{-1}$.

1.2.34 Обчислити питому теплоємність міді при температурі 1000 K . Зобразіть (якісно) на графіку, як буде змінюватися питома теплоємність міді при зниженні температури.

1.2.35 Визначити, у скільки разів зміниться питома теплопровідність λ_T міді при зміні температури ΔT від 20 до 200°C .

1.2.36 Потрібно виготовити дріт, що витримує розтягування силою $F = 50\text{ Н}$, не допускаючи пластичної деформації; при цьому опір 1 м дроту не повинен перевищувати $0,02\text{ Ом}$. Визначити і порівняти найменші припустимі діаметри дроту, який виготовлено з відпаленої міді і відпаленого алюмінію. Який дріт економічно вигідніший, якщо ціна 1 кг алюмінію в $1,5$ рази менша за ціну 1 кг міді. Границі текучості δ_T відпаленої міді і відпаленого алюмінію прийняти такими, що дорівнюють відповідно 70 і 35 Мпа .

1.2.37 Вуглеводневий резистор і дрововий резистор, який виготовлено з ніхрому, мають однаковий номінальний опір $R_{\text{ном}} = 100\text{ Ом}$. Резистори з'єднані паралельно і включені під напругу $U = 50\text{ В}$. Чи однакова потужність буде на цих резисторах?

1.2.38 Обчислити, у скільки разів опір R мідного дроту круглого перетину діаметром $d = 1\text{ мм}$ на частоті $f = 10\text{ МГц}$ більше опору R_0 цього ж дроту при постійному електричному струмові.

1.2.39 Мініатюрний резистор опором $R = 20 \text{ Ом} \pm 10\%$, що має номінальну потужність розсіювання $P_{\text{ном}} = 0,5 \text{ Вт}$, використовується на частоті 50 Гц . Температурний коефіцієнт опору резистора $\alpha_R = -2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Відомо, що через малі габарити резистора при постійній граничній напрузі $U_{\text{пр}} = 100 \text{ В}$ відбувається поверхневий пробій між выводами. Визначити, яка максимальна напруга може бути прикладена до цього резистора при температурах: а) 20°C ; б) 100°C .

1.2.40 Визначити площу поперечного перерізу плавкого свинцевого запобіжника, який розраховано на граничний струм у електричному колі $I = 6 \text{ А}$, якщо питомий опір свинцю $\rho = 0,19 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, густина його $d = 11,34 \text{ мг/м}^3$, а температура плавлення $T_{\text{пл}} = 327^\circ\text{C}$. Тепловіддачею у зовнішнє середовище через короткочасність аварійного режиму знехтувати (з урахуванням вимоги швидкодії захисту при настанні аварійного режиму в колі). Початкову температуру запобіжника вважати рівною 20°C .

2 НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

2.1 Короткі теоретичні відомості

У власних невідроджених напівпровідниках при температурі T , K рівноважна концентрація вільних електронів n_i (що заповнюють низькі рівні зони провідності) і дірок (що заповнюють верхні рівні валентної зони) однакові:

$$n_i = p_i = 2 \frac{(2\pi m^* kT)^{\frac{3}{2}}}{n^3} \cdot e^{-\frac{\Delta E_i}{2kT}} = N_i e^{-\frac{\Delta E_i}{2kT}}, \quad (2.1)$$

а питома провідність

$$\sigma_i = n_i q (\mu_n + \mu_p) = q (\mu_n + \mu_p) \cdot N_i e^{-\frac{\Delta E_i}{2kT}} = A e^{-\frac{\Delta E_i}{2kT}} \quad (2.2)$$

за умови, що ефективні маси електронів m_n^* та дірок m_p^* дорівнюють одна одній $m_n^* = m_p^* = m^*$.

Домішковий напівпровідник n -типу з концентрацією атомів донорної домішки N_d має рівноважну концентрацію вільних електронів

$$n_n = \sqrt{N_d N_i} e^{-\frac{\Delta E_n}{2kT}} = N_n e^{-\frac{\Delta E_n}{2kT}} \quad (2.3)$$

більшу, ніж концентрація вільних носіїв n_i та домішкових дірок p_n при достатньо низькій температурі, причому

$$n_n \cdot p_n = n_i^2 \quad (2.4)$$

і питома провідність

$$\sigma_n = n_n q \mu_n = q \mu_n N_n e^{-\frac{\Delta E_n}{2kT}} = A_n e^{-\frac{\Delta E_n}{2kT}}. \quad (2.5)$$

Домішковий напівпровідник p -типу з концентрацією атомів акцепторної домішки N_a має рівноважну концентрацію вільних дірок

$$p_p = \sqrt{N_a N_i} e^{-\frac{\Delta E_p}{2kT}} = N_p e^{-\frac{\Delta E_p}{2kT}} \quad (2.6)$$

більшу, ніж концентрація вільних носіїв n_i та домішкових електронів n_p при достатньо низькій температурі, причому

$$n_p \cdot p_p = n_i^2, \quad (2.7)$$

і питому провідність

$$\sigma_p = p_p q \mu_p = q \mu_p N_p e^{-\frac{\Delta E_p}{2kT}} = A_p e^{-\frac{\Delta E_p}{2kT}}. \quad (2.8)$$

У формулах (2.1 - 2.8) прийнято такі позначення та розмірності: концентрація $n_i, p_i, n_n, p_p, n_p, p_n, N_i, N_q, N_a$, м^{-3} ; маса m^* , кг і заряд електрона e , Кл ; рухливості μ_n, μ_p , $\text{м}^2/\text{В}$; стала Больцмана k , $\text{Дж}/\text{К}$ або $\text{еВ}/\text{К}$; стала Планка h , $\text{Дж}/\text{с}$ або $\text{еВ}/\text{с}$; заборонені зони напівпровідників власного і домішкових n - та p -типу $\Delta E_i, \Delta E_n, \Delta E_p$, Дж або еВ ; провідності $\sigma_i, \sigma_n, \sigma_p$, $1/\text{Ом}$.

Стала Холла, $\text{м}^3/\text{К}$ напівпровідника змішаного типу з концентрацією електронів n_n та дірок p_p обчислюється за формулою:

$$X = \frac{A}{q} \cdot \frac{p_p \mu_p^2 - n_n \mu_n^2}{(p_p \mu_p + n_n \mu_n)^2}. \quad (2.9)$$

При $p_p = 0$ з формул (2.5) - (2.9) одержуємо сталу Холла для домішкового напівпровідника n -типу.

$$X_n = -\frac{A}{n_n q} = -\frac{A}{\sigma_n} \cdot \mu_n, \quad (2.10)$$

а при $n_n = 0$ з формул (2.8) - (2.9) для напівпровідника p -типу

$$X_p = -\frac{A}{p_p q} = -\frac{A}{\sigma_p} \cdot \mu_p. \quad (2.11)$$

Для напівпровідників атомної структури, якими є германій та кремній $A = 3/8$, $\pi = 1,17$.

Величину ЕРС Холла визначають за формулою

$$e_x = X \frac{IB}{a}, \quad (2.12)$$

де I, A – струм, який проходить в пластині напівпровідника перпендикулярно до напрямку магнітної індукції $B, Tл$, яка паралельна товщині пластини $a, м$ (рис. 2.1).

При контакті напівпровідника p -типу і n -типу виникає контактна різниця потенціалів на p - n - переході при температурі $T, К$.

$$U_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}. \quad (2.13)$$

При дії зовнішньої постійної напруги U на p - n - переході в прямому напрямку (коли з'єднані затискач «+» джерела з p -напівпровідником, а затискач «-» - з n -напівпровідником) через перехід проходить струм дифузії, який має густину, $A/м^2$

$$I_{diff} = I_{nac} \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (2.14)$$

$$I_{nac} = q \left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right), \quad (2.15)$$

де D_n, D_p - коефіцієнти дифузії електронів і дірок, відповідно. Співвідношення Ейнштейна між рухливістю μ та коефіцієнтом дифузії має вигляд:

$$D = kT\mu / q, \quad (2.16)$$

де k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура;

q – заряд електрона;

μ_n та μ_p – рухливість електронів і дірок, відповідно, знаходяться з таблиці додатку Б.

p - n -перехід має ємність, Φ :

а) дифузійну

$$C_{\text{диф}} = \left| \frac{dQ}{dU} \right| = \frac{d(Q_p + Q_n)}{dU} = ; \quad (2.17)$$

$$= \frac{(\tau_n + \tau_p)qS}{kT} \cdot I_{\text{нас}} \cdot e^{\frac{qU}{kT}} = \frac{\tau_n + \tau_p}{kT} q \cdot I_{\text{нас}} \cdot e^{\frac{qU}{kT}}$$

б) бар'єрну

$$C_{\bar{o}} = \frac{dQ_{\bar{o}}}{dU} = A(U_k - U)^{-n}, \quad (2.18)$$

в) загальну

$$C = C_{\text{диф}} + C_{\bar{o}}. \quad (2.19)$$

В електричному замкнутому колі, описаному вище, під час опромінювання одного з напівпровідників поблизу p - n -переходу монохроматичним випромінюванням з'являється фотострум I_{ϕ} (якщо тільки це випромінювання поглинається напівпровідником), що протікає в закритому напрямку. Струм через перехід

$$I = I_{\text{диф}} \cdot S - I_{\phi}, \quad (2.20)$$

де S - площа запірного шару, м^2 .

При освітленні напівпровідника монохроматичним випромінюванням найбільша довжина хвилі λ , мкм, поглинається напівпровідником, визначається з рівняння:

$$\Delta E_i = n \nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda}, \quad (2.21)$$

де ΔE_i - це ширина забороненої зони власного напівпровідника, eB , а $c = 3 \cdot 10^{17}$ мкм/с – швидкість світла.

Ширина забороненої зони напівпровідника пов'язана з його питомою електропровідністю рівнянням:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (2.22)$$

де σ_0 - коефіцієнт, що залежить від матеріалу та температури. Це рівняння можна використати для експериментального визначення ширини забороненої зони ΔE . Для цього достатньо визначити два значення питомої провідності σ_1 та σ_2 при температурі T_1 та T_2 з області температур, де гарантовано перевагу власної електропровідності напівпровідника.

Для питомих провідностей σ_1 та σ_2 справедливі формули

$$\ln \sigma_1 = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{2kT_1} \quad \text{та} \quad \ln \sigma_2 = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{2kT_2},$$

з яких одержуємо

$$\Delta E = 2k \frac{\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2}{1/T_2 - 1/T_1}. \quad (2.23)$$

Аналогічно можна визначити енергію тонізації або енергію активації домішки.

2.2 Питання та задачі

2.2.1 Порівняйте фізичну сутність процесів електропровідності в напівпровідниках, провідниках та діелектриках.

2.2.2 Дайте означення напівпровідника. У чому полягає його спільність і відмінність від провідника та діелектрика?

2.2.3 Перелічіть напівпровідники, які є хімічними елементами. Які з них і з якою метою мають найбільше застосування? Які вони мають властивості?

2.2.4 Опишіть основні показники властивостей напівпровідникових матеріалів.

2.2.5 Порівняйте структуру та зонову діаграму домішкового та власного напівпровідників та опишіть процес термічної генерації носіїв заряду в них.

2.2.6 Назвіть напівпровідники, які є хімічними з'єднаннями, їхні властивості, області застосування.

2.2.7 Опишіть різні види електричної провідності напівпровідників. Власна і домішкова провідність. У чому різниця між напівпровідниками типу n та p ?

2.2.8 Що таке власний напівпровідник? Опишіть його основні параметри та їх залежність від температури.

2.2.9 Що таке домішковий напівпровідник? Опишіть його основні параметри та їх залежність від температури.

2.2.10 Наведіть класифікацію напівпровідникових матеріалів, дайте характеристику кожній групі, області їхнього застосування.

2.2.11 Чи може маса носія заряду в напівпровідниках бути негативною? Що таке ефективна маса?

2.2.12 Які зовнішні чинники і чому впливають на опір напівпровідникових матеріалів?

2.2.13 Вкажіть області застосування напівпровідників в електроніці. Доведіть ефективність їх використання.

2.2.14 В чому полягає суть методів очищення напівпровідників направленої кристалізації та зонової плавки? Яка досягнута ступінь очищення напівпровідників?

2.2.15 Як впливає температура на кількість вільних носіїв зарядів у напівпровідниках?

2.2.16 Коли напівпровідник стає виродженим? Яка різниця між виродженими та невиродженими напівпровідниками?

2.2.17 Як впливає температура на рухливість носіїв заряду у власних та домішкових напівпровідниках?

2.2.18 Чому рухливість дірок менша, ніж рухливість електронів?

2.2.19 Дайте характеристику фізичним процесам виникнення домішкової провідності в донорному та акцепторному напівпровідниках. Що таке домішка впровадження та заміщення?

2.2.20 Як пов'язана ширина забороненої зони напівпровідника з його чутливістю до зовнішніх енергетичних впливів і чому?

2.2.21 Яким способом можна визначити тип електричної провідності напівпровідника?

2.2.22 Як визначити ширину забороненої зони напівпровідника?

2.2.23 Як впливає температура на рухливість носіїв заряду в напівпровідниках? Порівняйте рухливість електронів і дірок.

2.2.24 Опишіть особливості температурної залежності електропровідності напівпровідників. Яка температурна залежність коефіцієнта питомого опору напівпровідника?

2.2.25 У напівпровіднику є домішки донорного та акцепторного типу в рівних кількостях (компенсований напівпровідник). Чому в цьому випадку провідність, рухливість та час життя неосновних носіїв струму стають меншими, ніж у власного напівпровідника?

2.2.26 Як впливає ширина забороненої зони напівпровідника на його робочу температуру?

2.2.27 Як залежить концентрація вільних носіїв заряду в напівпровідниках від температури? Порівняйте властивості домішкового та власного напівпровідників.

2.2.28 Поясніть, як впливає напруженість електричного поля на електропровідність напівпровідників?

2.2.29 Які властивості мають напівпровідникові сполуки типу $A^{II}B^{VI}$? Назвіть області їхнього застосування.

2.2.30 Які властивості мають напівпровідникові сполуки типу $A^{IV}B^{IV}$? Назвіть області їхнього застосування.

2.2.31 Опишіть властивості і області застосування напівпровідникових сполук типу $A^{III}B^V$.

2.2.32 Скільки електронів у напівпровіднику знаходиться на рівні Фермі? Обґрунтуйте вашу відповідь.

2.2.33 Чи можуть електрони виходити за межі напівпровідника? Відповідь обґрунтуйте.

2.2.34 Дайте характеристику ефекту Холла в напівпровідниках і які параметри напівпровідника можна визначити, використовуючи цей ефект?

2.2.35 Основні властивості електронно-діркових переходів і їх практичне використання.

2.2.36 Принцип дії світлодіода. Які матеріали використовують для виготовлення світлодіодів видимого та інфрачервоного діапазонів?

2.2.37 Оксидні напівпровідники, їх властивості та сфери застосування.

2.2.38 Фотоопори та фотоелементи. Якими особливостями вони наділені?

2.2.39 Дайте характеристику напівпровідниковим терморезисторам. У яких областях техніки вони застосовуються?

2.2.40 Як впливає освітленість на провідність напівпровідників? Власний і домішковий напівпровідники та їхні спектральні характеристики.

2.2.41 В чому полягає суть ефекту підсилення у напівпровідниках (транзисторах)?

2.2.42 В чому суть фотоелектричних явищ у напівпровідниках і які можливості їх використання на практиці?

2.2.43 Які явища викликає в напівпровідниках магнітне поле?

2.2.44 Як виявляються в напівпровідниках термоелектричні явища та де вони застосовуються?

2.2.45 Поясніть, яка провідність напівпровідника (домішкова чи власна) виявляється більшою при нормальному режимі роботи напівпровідникових діодів і транзисторів?

2.2.46 Чому для напівпровідникових діодів та транзисторів краще використовувати монокристали, а не полікристали напівпровідників?

2.2.47 Чим пояснюється порівняно великий розбіг параметрів напівпровідникових приладів однієї марки?

2.2.48 Які матеріали використовуються для виготовлення фоторезисторів, фотодіодів та фотоелементів?

2.2.49 З якого матеріалу виготовляють варистори? Наведіть приклади використання останніх.

2.2.50 З яких матеріалів виготовляється датчик Холла і яке його основне застосування?

2.2.51 Чому питома електропровідність напівпровідника зростає з підвищенням температури? Який характер має ця залежність?

2.2.52 Чим відрізняється температурна залежність питомого опору власного напівпровідника від домішкового?

2.2.53 Які параметри напівпровідників можна визначити за температурною залежністю їхнього опору?

2.2.54 Чим відрізняються напівпровідники від провідників?

2.2.55 Чим відрізняються напівпровідники від електроізоляційних матеріалів?

2.2.56 Коли електропровідність напівпровідника є власною, а коли домішковою?

2.2.57 Яку роль відіграють у напівпровідниках дифузійні процеси?

2.2.58 Як пов'язана ширина забороненої зони напівпровідника з його питомою електропровідністю?

2.2.59 Як залежить фоточутливість напівпровідника від інтенсивності падаючого світлового потоку? Частоти падаючого світла? Частоти світлових імпульсів? Температури?

2.2.60 Чи буде прозорим у видимому світлі монокристал германію? Фосфіду галію? Карбиду кремнію? Відповідь обґрунтуйте. Назвіть основні властивості та області застосування вказаних напівпровідників.

2.2.61 Питомий опір власного германію (при $T = 300\text{ K}$) $\rho = 0,43\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Визначте власну концентрацію електронів і дірок. Рухливість електронів і дірок в германії наведені в додатку Б.

2.2.62 Зразок германію при $T = 300\text{ K}$ легований домішкою атомів сурьми так, що один атом домішки припадає на $2 \cdot 10^6$ атомів германію. Визначте:

а) концентрацію електронів і дірок при $T = 300\text{ K}$ (припустити, що при цій температурі всі атоми сурьми іонізовані і концентрація атомів германію $N = 4,4 \cdot 10^{28}\text{ м}^{-3}$, а власна концентрація $n_i = 2,5 \cdot 10^{-19}\text{ м}^{-3}$);

б) питомий опір цього легованого матеріалу;

в) коефіцієнт дифузії електронів в германії при даній температурі.

2.2.63 Ширина забороненої зони власного кремнію при $T = 300\text{ K}$ дорівнює $1,12\text{ eV}$. Визначте максимальну довжину хвилі монохроматичного випромінювання, який поглинається власним кремнієм.

2.2.64 Питомий опір кремнію (при $T = 300\text{ K}$) $\rho = 2500\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Визначте концентрацію власних носіїв струму n_i при 300 K . Необхідні дані про напівпровідник знайдіть у відповідній таблиці додатку Б.

2.2.65 Розрахуйте ширину забороненої зони напівпровідника та визначте, якому матеріалу вона відповідає, якщо відомо, що при $T_1 = 300\text{ K}$ його питомий опір - $\rho_1 = 2 \cdot 10^{14}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, а при $T_2 = 400\text{ K}$ - $\rho_2 = 2,95 \cdot 10^9\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Для визначення матеріалу використайте таблиці додатку Б.

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

2.2.67 Сила Лоренца F , H , що діє на рухомий заряд q , K зі швидкістю V , $\text{м}/\text{с}$ в магнітному полі з індукцією $\vec{B}$, Тл , є векторний добуток $F = q(\vec{V} \cdot \vec{B})$. Через зразок напівпровідника, який розташовано перпендикулярно до вектора індукції B , проходить струм I (рис. 2.1). Виходячи з наведеної формули, вкажіть, на яких гранях зразка, з'явиться надлишок дірок, якщо взяти p -зразок. Як визначити величину та знак ЕРС Холла?

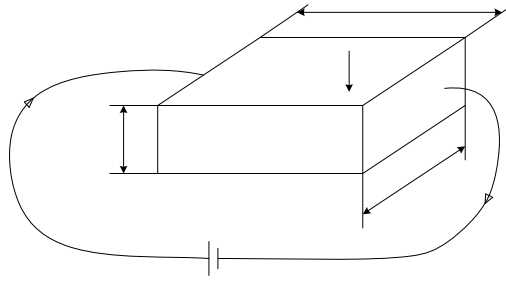


Рисунок 2.1 – До визначення ЕРС Холла в напівпровідниках

2.2.68 Для умови задачі 2.2.67 для зразка n -типу, вкажіть, на яких гранях зразка з'явиться надлишок електронів. Як визначити величину та знак ЕРС Холла?

2.2.69 Питомий опір карбіду кремнію при 300 К дорівнює 1000 Ом·м. Визначте концентрацію власних носіїв струму n_i при 300 К. Необхідні дані про карбід кремнію знайдіть у додатку Б.

2.2.70 Розрахуйте рівноважну концентрацію вільних електронів та дірок власного германію $\Delta E_i = 0,72$ eВ при температурі 20 °С та абсолютному нулі.

2.2.71 Ширина забороненої зони власного германію при 300 К дорівнює 0,72 eВ. Визначте максимальну довжину хвилі монохроматичного випромінювання, що поглинається власним германієм.

2.2.72 Густина струму насичення кремнієвого діода при 300 К дорівнює 10^{-3} А/м². Розрахуйте густину струму дифузії через p - n перехід діода, якщо до переходу прикладена зовнішня напруга в прямому напрямі 0,2 В. Чому дорівнює густина струму дифузії, якщо зовнішня напруга відсутня або прикладена в закритому напрямку?

2.2.73 Визначте власну концентрацію носіїв заряду в кремнії за кімнатною температурою, вважаючи, що $N_i = 10^{19}$ см⁻³, а $\Delta E_i = 1,22$ eВ. Як зміниться концентрація носіїв заряду при температурі кипіння води?

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

2.2.75 Розрахуйте при температурі 20°C дифузійну ємність кремнієвого діода на 1 м^2 бар'єрного шару, через який проходить струм насичення густиною 10^{-3} А/м^2 , якщо час життя неосновних носіїв струму $\tau_p = \tau_n = 2\text{ нс}$, а зовнішня напруга, яка прикладена до p - n переходу, в прямому напрямку дорівнює 0 та 0,2 В.

2.2.76 Густина струму насичення германієвого діода при 20°C дорівнює 10 А/м^2 . Розрахуйте густину струму дифузії через p - n перехід діода, якщо до переходу прикладена зовнішня напруга в прямому напрямку 0,2 В. Чому дорівнює густина струму дифузії, якщо зовнішня напруга відсутня або прикладена в закритому напрямку?

2.2.77 Відомі рухливості електронів $\mu_n = 0,39\text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ та дірок $\mu_p = 0,19\text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ власного германію та його ширина забороненої зони $\Delta E_i = 0,72\text{ еВ}$. Розрахуйте власний питомий опір германію при 20°C . Вважати, що $n_i = 2,5 \cdot 10^{-19}\text{ м}^{-3}$.

2.2.78 Питомий опір арсеніду галію при 300 К дорівнює $3,7 \cdot 10^6\text{ Ом} \cdot \text{см}$. Розрахуйте концентрацію власних носіїв струму n_i при 300 К . Необхідні дані про арсенід галію взяти в додатку Б.

2.2.79 Розрахуйте ширину забороненої зони напівпровідника, якщо відомо, що при $T_1 = 300\text{ К}$ його питомий опір $\rho_1 = 3,7 \cdot 10^6\text{ Ом} \cdot \text{м}$, а при $T_2 = 400\text{ К}$ - $\rho_2 = 3,67 \cdot 10^3\text{ Ом} \cdot \text{м}$. Якому матеріалу відповідає напівпровідник визначити за відповідною таблицею в додатку Б.

2.2.80 Знаючи рухливість електронів і дірок германію $\mu_n = 0,39\text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ та $\mu_p = 0,19\text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, розрахувати для кожного носія коефіцієнт дифузії D , $\text{м}^2/\text{с}$, пов'язаний з рухливістю μ співвідношенням Ейнштейна.

2.2.81 Час життя неосновних носіїв у полікристалічному германії, який очищено за методом направленої кристалізації дорівнює 5 нс , а в монокристалі, який отримано методом витягання з розплаву, - 300 нс . Знаючи рухливість електронів $\mu_n = 0,39\text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, розрахуйте коефіцієнт дифузії електронів D , $\text{м}^2/\text{с}$ при 300 К для германію та розрахуйте для обох зразків дифузійну довжину L , м електронів.

2.2.82 Власний питомий опір кремнію при 300 К дорівнює 2000 Ом , а рухливість електронів і дірок відповідно 0,14 та

$0,05 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Яку концентрацію носіїв струму має кремній?

2.2.83 Рухливість електронів у германії $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а в сурм'янистому індії $10 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. У скільки разів ЕРС Холла датчика з сурм'янистим індієм більша, ніж з германієм, якщо розміри та умови роботи обох датчиків однакові. Наведіть формулу для розрахунку електричного поля датчика за відомою величиною напруги U .

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

2.2.85 Питомий опір фосфіду галію дорівнює $2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Розрахуйте концентрацію вільних носіїв струму n_i при 300 К . Дані про цей матеріал знайдіть у відповідній таблиці додатку Б.

2.2.86 Розрахуйте ширину забороненої зони напівпровідника і визначте, якому матеріалу вона відповідає (див. додаток Б), якщо відомо, що при $T_1 = 300 \text{ К}$ його питомий опір $\rho_1 = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а при $T_2 = 400 \text{ К}$ - $\rho_2 = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

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

2.2.88 Германій p - та n - типів має однакову концентрацію неосновних носіїв в різних областях p - n переходу (електронів в p -області і дірок в n -області), що дорівнює 10^{11} см^{-3} . Розрахуйте густину струму, який проходить через p - n перехід, якщо дифузійні довжини ($L_n = L_p = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$) неосновних носіїв струму однакові, а до переходу прикладена напруга 1 В в прямому напрямку.

2.2.89 Для власного германія при 20°C та 40°C відомі значення натуральних логарифмів провідності $\ln \sigma_{20} = -26$ та $\ln \sigma_{40} = -25$. Розрахуйте ширину забороненої зони власного германію.

2.2.90 Визначте концентрацію дірок та їх рухливість в германії p -типу провідності, якщо стала Холла $X_p = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{Кл}$, а питомий опір $\rho = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

3 ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

3.1 Короткі теоретичні відомості

Система двох точкових зарядів q , рівних за величиною і протилежних за знаком, називається *електричним диполем* (рис 3.1).

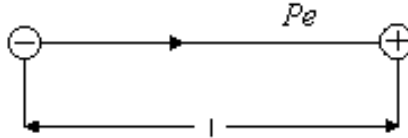


Рисунок 3.1 – Електричний диполь

Електричний дипольний момент визначається за формулою:

$$P_e = ql. \quad (3.1)$$

Електричний дипольний момент є вектором, який направлений від негативного заряду до позитивного.

Електричний момент частинки (атом, молекула, іон, група атомів) знаходиться векторним додаванням окремих моментів диполів, вміщених у частинці.

Речовина називається *нейтральною* або *полярною*, якщо результувальний електричний момент його частинок за відсутності зовнішнього електричного поля E дорівнює відповідно нулю або відмінний від нуля.

Для окремої частинки речовини

$$P_e = \alpha E_i, \quad (3.2)$$

де α , $\Phi \cdot \text{м}^2$ - коефіцієнт поляризації частинки,

E_i , В/м - внутрішнє електричне поле, що діє на частинку.

В загальному випадку $E_i \neq E$ і виражається формулою:

$$E_i = E + \frac{\gamma}{\epsilon_0} P_c, \quad (3.3)$$

де γ - безрозмірний коефіцієнт.

При $\gamma = \frac{1}{3}$ внутрішнє поле називається *полем Лоренца*:

$$E_{in} = E + \frac{1}{\epsilon_0} P_c. \quad (3.4)$$

Поляризація проявляється як утворення в об'ємі діелектрика V відмінного від нуля, індукованого електричного моменту, який дорівнює геометричній сумі $\sum p$ моментів всіх поляризованих молекул діелектрика, що знаходяться в об'ємі V .

Поляризованість P , Кл/м (або електричний момент одиниці об'єму) – величина, яка чисельно характеризує інтенсивність поляризації діелектрика.

У найпростішому випадку однорідного поля (площинного конденсатора) з об'ємом діелектрика між електродами $V = Sh$ поляризованість дорівнює

$$P = \frac{\sum p}{V} = \frac{\sum p}{Sh}, \quad (3.5)$$

а величина $\sum p$ дорівнює добутку поверхневої густини σ зв'язаних електричних зарядів на поверхнях розділів діелектрика й електродів на об'єм діелектрика

$$\sum p = \sigma \cdot S \cdot h, \quad (3.6)$$

звідки

$$P = \sigma. \quad (3.7)$$

Таким чином, поляризація дорівнює поверхневій густині зв'язаних зарядів у діелектрику.

Для більшості діелектриків, а саме, для так званих лінійних діелектриків, поляризованість P прямо пропорційна напруженості електричного поля E в даній точці діелектрика і дорівнює:

$$P = \varepsilon_0 k_e E . \quad (3.8)$$

Безрозмірний параметр діелектрика k_e називається *відносним діелектричним сприйняттям*, а добуток $\varepsilon_0 k_e$ - *абсолютним діелектричним сприйняттям*.

У нелінійних діелектриках (до яких, в певній мірі, відносяться сегнетоелектрики) прямої пропорційності між величинами P та E не спостерігається.

Електричне зміщення (електрична індукція) D вводиться в рівняння електростатики як геометрична сума вектора напруженості електричного поля в даній точці діелектрика, помноженого на електричну сталу, і вектора поляризованості P в тій самій точці для однорідного поля та ізотропного діелектрика.

$$D = \varepsilon_0 E + P . \quad (3.9)$$

З іншого боку, між електричним зміщенням і напруженістю електричного поля в кожній точці в середовищі з діелектричною проникністю ε справедливе співвідношення

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E \frac{Q}{S} , \quad (3.10)$$

де Q - заряд на електроді, який має площу зіткнення S з діелектриком.

Звідки

$$P = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E . \quad (3.11)$$

Співставлення цієї формули з формулою (3.8) дає зв'язок між діелектричною проникністю і діелектричним сприйняттям електроізоляційного матеріалу

$$\varepsilon = 1 + k_e . \quad (3.12)$$

Поляризованість речовини P визначається її структурою і може бути електронною P_e , іонною P_i , дипольною P_θ , причому

$$P = P_e + P_i + P_\partial = n\alpha E_i = n(\alpha_e + \alpha_i + \alpha_\partial)E_i, \quad (3.13)$$

де $\alpha_e + \alpha_i + \alpha_\partial$ - поляризація частинок: електронна, іонна, дипольна, причому

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_\partial, \quad (3.14)$$

$$\alpha_\partial = \frac{P_e^2}{3kT}, \quad (3.15)$$

де k і T - стала Больцмана і абсолютна температура, K .

Швидкість дипольної поляризації визначається часом релаксації:

$$\tau = \frac{1}{2f_0} e^{\frac{W_i}{kT}}, \quad (3.16)$$

який пов'язаний з частотою f зовнішнього електричного поля при максимальному значенні тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_{\max}$ на кривій $tg\delta = \varphi(f)$, що знята при постійній температурі

$$\tau = \frac{1}{2f}, \quad (3.17)$$

де f_0 , $Гц$ - частота власних коливань релаксаційних часток,

W_i - енергія активації.

Рівняння поляризації діелектрика

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{n\alpha}{3\varepsilon_0} \quad (3.18)$$

виявляється справедливим для газів (нейтральних і полярних), рідин (нейтральних і слабо полярних) і нейтральних твердих тіл.

При оптичних частотах ($10^{15} - 10^{16}$) $Гц$ в діелектрику проявляється тільки електронна поляризація, тому що диполі та іони не встигають реагувати на швидкі зміни поля ($P_i, P_\partial = 0$). В цьому випадку справедливе співвідношення Максвела

$$\varepsilon_\infty = \nu^2. \quad (3.19)$$

Якщо ділянка ізоляції з опором R_{i3} , Ом знаходиться під постійною напругою $U, В$, величина діелектричних втрат дорівнює

де I - наскрізний струм витоків через ізоляцію.

$$P = \frac{E^2}{\rho_V} = E^2 \gamma_V, \quad (3.21)$$

γ_V - питома об'ємна провідність, Cm/m .

Однак, частіше за все діелектричні втрати розглядаються не під постійною, а під змінною напругою.

$$P=U^2\omega\,tg\delta\,,\quad (3.22)$$

δ - кут діелектричних втрат.

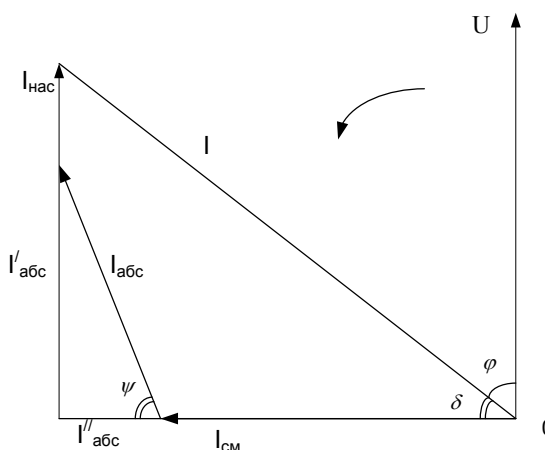


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма струмів у діелектрику з втратами

Тангенс цього кута дорівнює відношенню активного та реактивного компонентів струму, який тече через ізоляцію:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p} \quad (3.23)$$

Діелектрик можна зобразити паралельною і послідовною схемами заміщення (рис. 3.3), в яких тангенс кута діелектричних втрат дорівнює

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_n Z_n} = \omega C_s r_s = \frac{I_a}{I_c} = \frac{U_a}{U_c} = \frac{1}{Q}, \quad (3.24)$$

де Q добротність ізоляції,

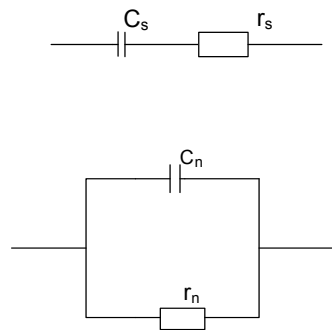


Рисунок 3.3 – Схеми заміщення діелектрика

а діелектричні втрати

$$P_a = U^2 \omega C_n \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C_s \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (3.25)$$

мають одну і ту ж саму величину. Елементи схем пов'язані співвідношенням

$$C_n = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad (3.26)$$

$$r_n = r_s \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right), \quad (3.27)$$

де $C_n, r_n, I_a, I_c, C_s, r_s, U_a, U_c$ - ємності, опори, омичні й ємнісні струми та напруги відповідно паралельній і послідовній схемам заміщення діелектрика;

Q - добротність діелектрика.

Вираз для питомих діелектричних втрат, тобто потужності, яка розсіюється у m^3 діелектрика, має вигляд

$$p = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{Sh} = \frac{U^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon S \operatorname{tg} \delta}{Shh} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2, \text{ Bm} / m^3, \quad (3.28)$$

де V - об'єм діелектрика між площинними електродами, m^3 ;

E - напруженість електричного поля, B / m .

Реактивна складова питомої провідності

$$\gamma_c = \omega \varepsilon_0 \varepsilon, \text{ См} / m. \quad (3.29)$$

Активна складова при даній частоті

$$\gamma_r = \omega \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta, \text{ См} / m. \quad (3.30)$$

Звідки

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma_r}{\gamma_c} = \frac{\varepsilon^n}{\varepsilon}, \quad (3.31)$$

$\varepsilon^n = \varepsilon \operatorname{tg} \delta$ називається коефіцієнтом діелектричних втрат.

Для визначення температурної залежності ε діелектричних матеріалів та ємності C використовують величини температурного коефіцієнта

$$TK\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_t} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.32)$$

і температурного коефіцієнта ємності

$$TKC = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT}. \quad (3.33)$$

Величину $TK\varepsilon$ найчастіше знаходять способом графічного диференціювання кривої $\varepsilon = f(T)$.

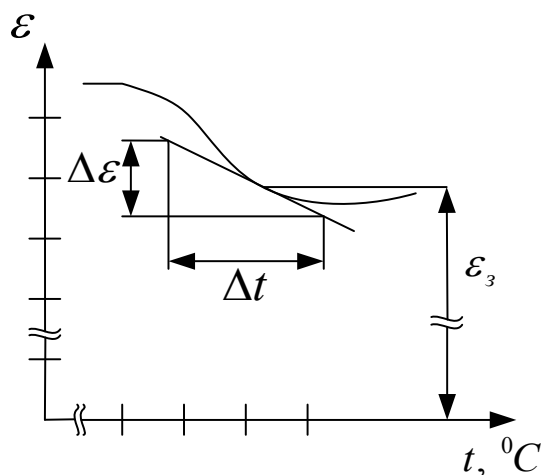


Рисунок 3.4 – Приклад графічного диференціювання

Для визначення $TK\varepsilon$ при температурі t проводять дотичну до кривої в заданій точці та будують на ній довільних розмірів прямокутний трикутник. При цьому треба враховувати масштаб відкладених по координатних осях величин.

Тоді шукана величина

$$TK\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_t} \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (3.34)$$

Умова температурної компенсації ємності $TKC_p = 0$.

При паралельному з'єднанні двох конденсаторів ця умова виконується, якщо

$$C_1 TKC_1 + C_2 TKC_2 = 0. \quad (3.35)$$

При послідовному з'єднанні

$$C_1 TKC_2 + C_2 TKC_1 = 0. \quad (3.36)$$

Температурний коефіцієнт діелектричної проникності суміші

$$TK\varepsilon_c = Y_1 TK\varepsilon_1 + Y_2 TK\varepsilon_2. \quad (3.37)$$

Отже, змішаний діелектрик є придатним для виготовлення термокомпенсованого конденсатора, тобто має $TK\varepsilon_c = 0$ за умови

$$Y_{1k} TK\varepsilon_1 + Y_{2k} TK\varepsilon_2 = 0, \quad (3.38)$$

звідки визначаються відповідні температурні компенсації значення концентрацій γ_{1k} і γ_{2k} .

Для визначення діелектричної проникності ε_c композиційного діелектрика, який є сумішшю двох компонентів, використовують формули:

а) при паралельному з'єднанні

$$\varepsilon_c = Y_1 \varepsilon_1 + Y_2 \varepsilon_2 ; \quad (3.39)$$

б) при послідовному з'єднанні

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{Y_1 \varepsilon_2 + Y_2 \varepsilon_1} ; \quad (3.40)$$

в) при хаотичній суміші компонентів

$$\lg \varepsilon_c = Y_1 \lg \varepsilon_1 + Y_2 \lg \varepsilon_2 ; \quad (3.41)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - діелектричні проникності компонентів;

Y_1, Y_2 - їх об'ємна кількість у суміші.

Для загального випадку змішаного діелектрика, який складається з n компонентів формули (3.37), (3.39), (3.40), (3.41) можуть бути записані у вигляді:

а) для паралельного з'єднання компонентів

$$\varepsilon_c = \sum_{i=1}^n Y_i \varepsilon_i ; \quad (3.42)$$

б) для послідовного з'єднання компонентів

$$\frac{1}{\varepsilon_c} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{\varepsilon_i} ; \quad (3.43)$$

в) для невпорядкованої суміші компонентів

$$\lg \varepsilon_c = \sum_{i=1}^n Y_i \lg \varepsilon_i ; \quad (3.44)$$

$$TK \varepsilon_c = \sum_{i=1}^n Y_i TK \varepsilon_i . \quad (3.45)$$

Електрична міцність діелектрика E_{np} може розглядатися як напруженість електричного поля при досягненні якої в будь-якій точці діелектрика виникає пробій.

Для однорідного електричного поля в діелектрику можна прийняти:

$$U_{np} = E_{np} h, \quad (3.46)$$

де U_{np} - пробивна напруга.

Питомий об'ємний опір діелектрика ρ_V чисельно дорівнює опору куба з ребром 1 м, з досліджуваного матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба; ρ_V виражається в Ом·м.

В разі площинного зразка діелектрика при однорідному полі

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h}, \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (3.47)$$

де R_V - об'ємний опір;

S - площа електрода, м^2 ;

h - товщина зразка, м.

Питомий поверхневий опір ρ_S чисельно дорівнює опору квадрата (будь-якого розміру), який виділяється на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні сторони цього квадрата; ρ_S виражається в омах.

$$\rho_S = R_S \frac{d}{l}, \text{ Ом}, \quad (3.48)$$

де R_S - поверхневий опір зразка матеріалу між електродами шириною d , які поставлені паралельно один одному і віддалені між собою на відстань l .

Знаючи питомий об'ємний опір та питомий поверхневий опір, можна визначити питому об'ємну провідність

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho}, \text{ См/м}, \quad (3.49)$$

а також питому поверхневу провідність

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}, \text{ См}. \quad (3.50)$$

Повна провідність твердого діелектрика, яка відповідна його опору $R_{із}$, складається з об'ємної та поверхневої провідностей.

Для кожного конденсатора або ділянки ізоляції добуток CR не залежить від геометричних розмірів і форми конденсатора та визначається виключно параметрами ρ і ε діелектричного матеріалу.

$$CR = \varepsilon_0 \rho. \quad (3.51)$$

3.2 Питання та задачі

3.2.1 За результатами вимірювання ємності площинного паперового конденсатора з такими геометричними розмірами: товщина діелектрика 20 мкм, розмір обкладинки (12×125) мм, при зміні температури отримані такі дані:

$T, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90
$C, \text{ нФ}$	3,229	3,265	3,294	3,331	3,400	3,481	3,624	4,128

Побудуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T, ^\circ\text{C})$ і знайдіть $TK\varepsilon$ при $t = 60 ^\circ\text{C}$.

3.2.2 За результатами вимірювання ємності циліндричного керамічного конденсатора з такими геометричними розмірами: $D = 4,2$ мм, $d = 4,0$ мм, $C = 30$ мм, де C - довжина циліндра, D і d - зовнішній і внутрішній діаметри циліндра, при зміні температури отримані такі дані:

$T, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90
$C, \text{ нФ}$	252	257	261,3	261,9	270,7	271,3	280,1	283

Побудуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T, ^\circ C)$ і знайдіть $TK\varepsilon$ при $t = 50 ^\circ C$.

3.2.3 За результатами вимірювання ємності площинного слюдяного конденсатора з такими геометричними розмірами: товщина діелектрика 50 мкм, розмір обкладинки (12×12) мм, кількість пластин $n = 18$, при зміні температури отримані такі дані:

$T, ^\circ C$	20	30	40	50	60	70	80	90
$C, нФ$	1.0864	1.0927	1.1004	1104.1	1109.1	1113	1118	1120

Побудуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T, ^\circ C)$ і знайдіть $TK\varepsilon$ при $t = 70 ^\circ C$.

3.2.4 За результатами вимірювання ємності площинного конденсатора з полістиролу з такими геометричними розмірами: товщина діелектрика $d = 20$ мкм, розмір обкладинки (14×35) мм, при зміні температури отримані такі дані:

$T, ^\circ C$	20	30	40	50	60	70	80	0
$C, нФ$	591.7	595.9	598.8	601.5	608	612.1	614.7	16.7

Побудуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T, ^\circ C)$ і знайдіть $TK\varepsilon$ при $t = 40 ^\circ C$.

3.2.5 Дайте означення електронної та електронно-релаксаційної поляризації. Намалюйте графік залежності $\varepsilon = f(T, ^\circ C)$ для вказаних вище видів поляризації. Поясніть характер зміни діелектричної проникності.

3.2.6 Поясніть суть релаксаційних втрат в діелектриках. Наведіть графіки залежності $tg\delta_{op} = f(T, ^\circ C)$ за двох частот f_1 і f_2 ($f_1 < f_2$).

3.2.7 Дайте означення дипольно-релаксаційної поляризації. Нарисуйте графіки залежності $\varepsilon = f(T, ^\circ C)$ для даного виду поляризації. Поясніть характер зміни діелектричної проникності.

3.2.8 Визначте діелектричну проникність складного діелектрика з двох компонентів, розподілених хаотично при об'ємній концентрації першого компонента 32%, другого компонента 68% і величині

діелектричної проникності першого компонента $\varepsilon_1 = 2,7$, другого компонента $\varepsilon_2 = 4,5$.

3.2.9 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 .

3.2.10 Порівняйте величину питомих діелектричних втрат на частоті 50 Гц для неполярної рідини – трансформаторного масла ($\varepsilon = 2,3$, $\text{tg}\delta = 0,001$) і полярної рідини – соволу ($\varepsilon = 5$, $\text{tg}\delta = 0,02$), якщо напруга, прикладена до діелектриків 300 кВ , площа діелектрика між плоскими електродами 1200 мм^2 , відстань між електродами 10 мм .

3.2.11 Визначте величину питомих діелектричних втрат для флогопіту ($\varepsilon = 6$, $\text{tg}\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$) 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 .

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

3.2.13 Конденсатор ємністю $C = 100 \text{ нФ}$, ввімкнений у змінну напругу $U = 100 \text{ В}$ частотою $f = 1 \text{ МГц}$ і утримує в ролі діелектрика кераміку $\text{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-4}$. Визначте діелектричні втрати в цьому конденсаторі.

3.2.14 Що таке сегнетоелектрики? Назвіть сегнетоелектричні матеріали, їхні діелектричні параметри і область використання.

3.2.15 Опишіть суть спонтанної поляризації на прикладі метатитанату барію. Наведіть температурну залежність діелектричної проникності і тангенса кута втрат для метатитанату барію і сегнетової солі.

3.2.16 Дайте означення лінійних і нелінійних діелектриків. Наведіть графіки залежності діелектричної проникності від напруженості електричного поля для лінійних і нелінійних діелектриків.

3.2.17 Нарисуйте залежності ε і $\operatorname{tg}\delta$ від температури для полярних діелектриків, рідин і твердих діелектриків при обох частотах ($f_1 < f_2$). Поясніть характер зміни цих кривих.

3.2.18 Нарисуйте залежності ε і $\operatorname{tg}\delta$ від температури і частоти для неполярних (нейтральних діелектриків). Поясніть характер зміни цих кривих.

3.2.20 Назвіть види поляризації, що викликають втрати енергії в діелектриках. Поясніть сутність видів поляризації.

3.2.21 Дайте означення тих видів поляризації, які не викликають втрат енергії в діелектриках.

3.2.22 В яких діелектриках залежно від типу поляризації спостерігається залежність діелектричної проникності від частоти змінного електричного поля?

3.2.23 В яких діелектриках, як і чому відносна діелектрична проникність залежить від напруженості електричного поля?

3.2.24 Який механізм електропровідності твердих електроізоляційних матеріалів?

3.2.25 Що спостерігається в діелектрику при внесенні його в електричне поле з точки зору діелектричних втрат?

3.2.26 Перелічіть відомі електроізоляційні матеріали на основі слюди природної і синтетичної. Наведіть основні характеристики цих матеріалів ($\varepsilon, \operatorname{tg}\delta, \rho_v$) і нарисуйте графіки залежності E_{np} від товщини діелектрика для вказаних видів слюди.

3.2.27 Синтетична полярна рідина совол ($\varepsilon = 4,5$) при температурі 18°C і частоті 10^5 Гц має $\operatorname{tg}\delta_{\max} = 0,25$. Визначте час релаксації молекули соволу. Вкажіть, як можна зменшити величину $\operatorname{tg}\delta_{\max}$ для соволу за даної частоти.

3.2.28 Площинний конденсатор ємністю $0,3 \text{ мкФ}$, до якого прикладена напруга 500 В , утримує в ролі діелектрика сегнетокераміку Т - 7500 ($\varepsilon = 7500$), поверхня дотику якої з електродом дорівнює 255 мм^2 .

Обчислити: а) напруженість поля; б) поляризованість; в) електричну індукцію.

3.2.29 Між електродами площинного конденсатора знаходиться конденсаторний просочений папір ($\varepsilon = 3,7$). На пластини подається напруга, при якій поверхнева густина зарядів на електродах дорівнює 10^{-3} Кл/м^2 . Означте поверхневу густину зарядів на папері і поясніть, які характеристики конденсатора змінюються внаслідок просочення паперу.

3.2.30 Параметри послідовної схеми заміщення діелектриків при частоті 1 МГц такі: ємність $C_s = 0,1 \text{ мкФ}$, активний опір $R_s = 115 \text{ Ом}$. Визначте ємність і опір C_n для паралельної схеми заміщення діелектрика.

3.2.31 Електронна поляризація атома водню дорівнює $1,66 \cdot 10^{-4}$. Обчисліть відносну діелектричну проникність водню при температурі 0°C і тиску 760 мм рт. ст.

3.2.32 Електронна поляризація атома ксенону дорівнює $8 \cdot 10^{-40}$. Обчисліть діелектричну проникність ксенону при температурі 27°C і тиску 1 атм.

3.2.33 Показник заломлення полярного газу аміаку дорівнює $1,000185$. Чому дорівнює його діелектрична проникність при оптичних частотах?

3.2.34 Амплітудна електрична потужність повітря на електродах, що утворюють однорідне поле, при тиску 760 мм рт. ст. , температурі 20°C і відстані між електродами $h = 0,1 \text{ мм}$, $E_{np \text{ max}} = 2700 \text{ кВ/м}$, а при $h = 1 \text{ мм}$ дорівнює 4500 кВ/м . Обчисліть для обох випадків $U_{np \text{ max}}$ і поясніть, чому змінюється електрична потужність із зміною товщини повітряного проміжку?

3.2.35 До листа поліетилену ($\varepsilon = 2,4$), перпендикулярно до його поверхні, прикладено поле напруженістю 10 кВ/м . Яка поверхнева густина зарядів діелектрика і електрода в місцях їх дотику? Як змінюється поверхнева густина зарядів на електродах, якщо позбутися діелектрика, але зберігати попередню напруженість?

3.2.36 Діелектрична проникність газу при тиску 760 мм рт. ст. і температурах 300 К і 450 К дорівнює відповідно $1,0067$ і $1,0060$. Обчисліть

температурний коефіцієнт діелектричної проникності газу, коефіцієнт поляризації α , кількість молекул в 1 м^3 при вказаних температурах.

3.2.37 Поляризованість керамічного електрету ($\varepsilon = 80$) дорівнює 10^{-6} Кл/м^2 . Яку найменшу потужність поля слід прикласти до електрету, щоб отримати вказану поляризованість?

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

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

3.2.40 Параметри паралельної схеми заміщення діелектрика при частоті 1 МГц такі: ємність $C_n = 0.5\text{ мкФ}$, активний опір $R_n = 320\text{ Ом}$. Знайти ємність C_s і опір R_s послідовної схеми заміщення діелектрика.

3.2.41 Опори діелектрика при напрузі $U = 500\text{ В}$ дорівнюють: об'ємний $R_v = 10^{10}\text{ Ом}$, поверхневий $R_s = 10^{12}\text{ Ом}$. Вирахуйте величину опору витoku (ізоляції) діелектрика R_{iz} і струм витoku діелектрика.

3.2.42 На поверхні діелектрика (рис. 3.5) виділено три ділянки, що мають поверхневі опори $R_{s1} = 10^{12}\text{ Ом}$, $R_{s2} = 7 \cdot 10^{10}\text{ Ом}$, $R_{s3} = 2 \cdot 10^{10}\text{ Ом}$. Чому дорівнює поверхневий опір діелектрика?

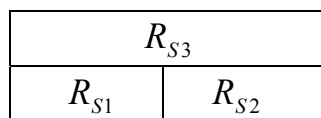


Рисунок 3.5 – Поверхня діелектрика

3.2.43 Площинний конденсатор має розміри, вказані на рис. 3.6 і діелектрик з питомим опором $\rho_v = 10^{11}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, опором витікання (ізоляції) $R_{iz} = 10^9\text{ Ом}$. Визначте величину питомого поверхневого опору ρ_s цього діелектрика. Яка розмірність ρ_s ?

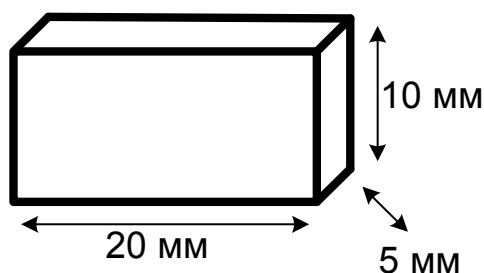


Рисунок 3.6 – Конденсатор

3.2.44 Опір витікання діелектрика $R_{із} = 10^{14}$ Ом. Дайте означення цього опору та запишіть його величину в кілоомах (кОм), мегаомах (МОм), гігаомах (ГОм) і тераомах (ТОм).

3.2.45 Стала часу конденсатора $\tau = RC$. Враховуючи, що R - об'ємний опір, C - ємність площинного конденсатора, виразіть τ через параметри ε і ρ_v діелектрика, що розділяє електроди конденсатора.

3.2.46 Знайдіть величину питомого об'ємного опору діелектрика конденсатора ємністю $C = 320$ нФ, якщо величина об'ємного опору $R = 10^{12}$ Ом, а діелектрична проникність $\varepsilon = 3,5$.

3.2.47 Фторопласт-4 має $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4}$. Чому дорівнює добротність Q конденсатора, діелектриком якого є фторопласт-4.

3.3.48 Назвіть носії зарядів, які утворюють струм витоку в газах, рідких та твердих діелектриках.

3.2.49 Нарисуйте векторну діаграму та схему заміщення нейтрального діелектрика і вкажіть найменування й розмірність всіх використаних при цьому величин. Визначте $\operatorname{tg} \delta$ через активні та реактивні складові діелектрика, а також запишіть вираз для діелектричних втрат P .

3.2.50 Нарисуйте векторну діаграму та схему заміщення полярного діелектрика і вкажіть найменування та розмірність всіх використаних при цьому величин. Визначте $\operatorname{tg} \delta$ через струми діелектрика, а також запишіть вираз для діелектричних втрат P .

3.2.51 Після просочення конденсаторний папір КОН-1 (товщина $h = 20$ мкм) має електричну потужність $E_{np} = 300$ кВ/мм. Визначте пробивну напругу цього паперу.

3.2.52 Товщина повітряного проміжку між плоскими електродами $h = 5$ мм. Яку потрібно прикласти напругу $U_{np \max}$, щоб між електродами при атмосферному тиску проскочила іскра?

3.2.53 Чому величина пробивної напруги U_{np} не характеризує електричну міцність діелектрика?

3.2.54 Для електричної форми пробою наmalюйте залежність електричної міцності E_{np} і напруги пробою U_{np} від: а) температури t^0 ; б) товщини діелектрика h ; в) часу дії t прикладеного поля.

3.2.55 Аркуш паперу пробитий один раз при тепловому пробої, другий раз – при електричному пробої. Які умови пробою треба створити в обох випадках? Які зовнішні ознаки теплової та електричної форм пробою?

3.2.56 Конденсаторний папір марок КОН-1 або КОН-2 при виготовленні паперових конденсаторів просочують конденсаторним маслом. Поясніть, як змінюються при просочуванні ε , $tg\delta$, E_{np} .

3.2.57 Які переваги та недоліки конденсаторного паперу, що використовується в ролі діелектрика? Назвіть відомі вам види конденсаторного паперу, вкажіть ε , $tg\delta$, E_{np} .

3.2.58 Порівняйте властивості двох сортів слюди – мусковіту і флогопіту. Перелічити електроматеріали, виготовлені на основі слюди.

3.2.59 Назвіть різновиди конденсаторної кераміки. Наведіть значення ε і $tg\delta$ для перерахованих сортів радіокераміки.

3.2.60 Що таке електрети, яке їх застосування? Вирахуйте величину заряду на поверхні електрета, діелектрична проникність якого $\varepsilon = 70$, товщина $h_2 = 4$ мм, $h_1 = 0,65$ мм, індукований заряд $= 10^{-7}$ Кл/м².

3.2.61 Визначте температурний коефіцієнт діелектричної проникності складного діелектрика, складеного з двох компонентів, розподілених хаотично при об'ємній концентрації першого компонента 43%, другого компонента 57% і $TK\varepsilon_1 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, $TK\varepsilon_2 = -1500 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

3.2.62 Папір пробивається при напруженості поля 1800 В/м . Два площинних конденсатори з ізолювальним шаром цього паперу товщиною $d = 2,0 \text{ мм}$, один конденсатор ємністю $C_1 = 1200 \text{ нФ}$, другий ємністю $C_2 = 400 \text{ нФ}$, з'єднані послідовно. За якої найменшої напруги буде пробита ця система?

3.2.63 Підрахуйте питомі втрати конденсатора змінної ємності, що використовується в радіотехніці (діелектрик – повітря, $\text{tg} \delta = 10^{-5}$) і працює на частоті 1 МГц при напруженості електричного поля 10 В/мм .

3.2.64 Визначте величину активної та реактивної складових питомої провідності мусковіту та полістиролу на частоті 1 МГц .

3.2.65 Порівняйте коефіцієнти діелектричних втрат для конденсаторного паперу КОН-1, флогопіта та фторопласта-4. Зробіть висновок про можливість використання цих матеріалів на високих частотах.

3.2.66 Двошаровий діелектрик увімкнений у змінну напругу. Напруга на першому шарі $U_1 = 600 \text{ В}$, на другому $U_2 = 1200 \text{ В}$, товщина шарів дорівнює відповідно $h_1 = 1,0 \text{ мм}$, $h_2 = 4,0 \text{ мм}$. Визначити відносну діелектричну проникність другого шару, якщо діелектрична проникність першого шару $\epsilon_1 = 4,5$, а також діелектричну проникність суміші двох компонентів за умови, що вони увімкнені послідовно.

3.2.67 Діелектрик являє собою хаотичну суміш двох матеріалів: тиконд Т-40 і поліетилен. Чому дорівнює діелектрична проникність суміші? Яким повинно бути співвідношення компонентів, щоб $TK\epsilon$ суміші дорівнювало нулю?

3.2.68 Умова задачі аналогічна 3.2.67. Використайте матеріали: тиконд Т-80 і поліхлорвініл.

3.2.69 Умова задачі аналогічна 3.2.67. Використайте матеріали: тиконд Т-150 і поліетилен.

3.2.70 Умова задачі аналогічна 3.2.67. Використайте матеріали: тиконд Т-300 і полівінілхлорид.

3.2.71 Умова задачі аналогічна 3.2.67. Використайте матеріали: тиконд Т-300 і поліхлорвініл.

3.2.72 Діелектрик площинного конденсатора являє собою сполучення двох матеріалів. Побудуйте графік залежності діелектричної проникності суміші двох компонентів від їх об'ємного змісту, якщо вони увімкнені: а) послідовно, б) паралельно. Обидва графіки побудуйте в одній системі координат. За незалежну змінну слід прийняти об'ємний вміст одного з компонентів (від 0 до 100 % з кроком 20 %). Для розв'язання задачі використайте 1 варіант табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Варіант	Діелектрик
1	Поліетилен, поліхлорвініл
2	Полістирол, органічне скло
3	Фторопласт-4, поліхлорвініл
4	Поліетилен, полістирол
5	Полістирол, поліхлорвініл

3.2.73 Побудуйте графік залежності температурного коефіцієнта $TK\varepsilon$ діелектричної проникності від температури, скориставшись методом графічного диференціювання кривої $\varepsilon = f(T, ^\circ C)$. Залежності $\varepsilon = f(T, ^\circ C)$ наведені на рис. 3.7. Як діелектрик використовуйте фарфор.

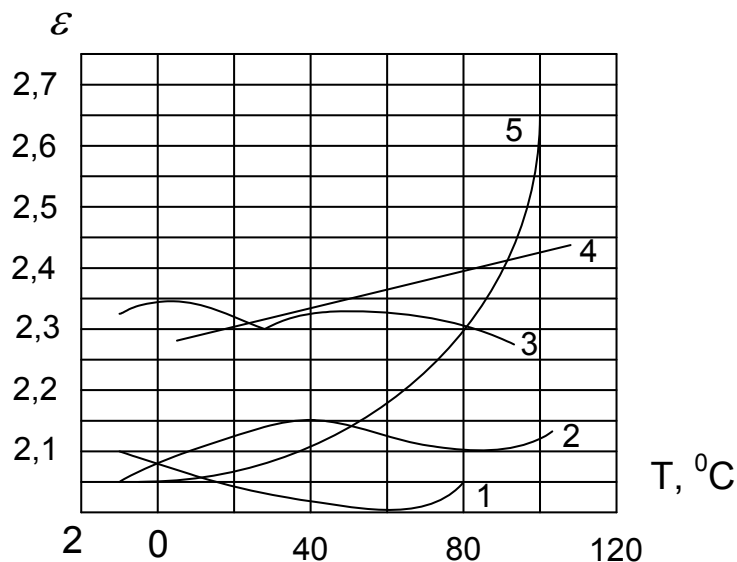


Рисунок 3.7 – Графік температурних залежностей ε для ізоляційних матеріалів, вказаних у таблиці 3.2

Таблиця 3.2

Номер рисунок	на	Діелектрик
1		Полістирол
2		Поліетилентетрафтолат
3		Поліетилен
4		Фарфор
5		Полівінілхлорид

3.2.74 Умова задачі аналогічна 3.2.73. Як діелектрик використайте поліетилен.

3.2.75 Умова задачі аналогічна 3.2.73. Як діелектрик використайте полівінілхлорид.

3.2.76 Умова задачі аналогічна 3.2.73. Як діелектрик використайте полістирол.

3.2.77 Умова задачі аналогічна 3.2.73. Як діелектрик використайте поліетилентетрафтолат.

3.2.78 Площинний повітряний конденсатор утворений двома квадратними пластинами, розташованими одна від одної на відстані $d = 1$ мм. Якою повинна бути ширина кожної з цих пластин, щоб ємність конденсатора була $C = 1$ мкФ? Чому буде дорівнювати площа пластини для отримання такої самої ємності, якщо між пластинами помістити гетинакс?

3.2.79 Еталон ємності номінальної величини 1 мкФ робиться з тонких пластин з прошарками слюди 0,1 мм. Якою повинна бути площа поверхні такого конденсатора, якщо кількість шарів $n = 10$?

3.2.80 Пластини площинного конденсатора ізольовані одна від одної шаром діелектрика. Конденсатор заряджений до різниці потенціалів 1 кВ і відімкнений від джерела напруги. Визначити ε діелектрика, якщо при його вилученні різниця потенціалів між пластинами конденсатора збільшується до 3 кВ.

3.2.81 На двошаровий конденсатор з неоднорідним діелектриком подано змінну напругу U . Шари мають товщину h_1 та h_2 і складаються з різних електроізоляційних матеріалів. Визначте напругу на шарах та

напруженість поля у них і побудуйте графік падіння потенціалу в кожному шарі. Для розв’язання задачі використовуйте варіант 1 з табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Варіант	Перший шар діелектрика	h_1 , мм	Другий шар діелектрика	h_2 , мм	U , кВ
1	Мікалекс	0,5	Поліетилен	1,0	1,0
2	Полістирол	2,0	Мусковіт	1,0	2,0
3	Гетинакс	3,0	Полістирол	1,5	0,5
4	Мусковіт	4,0	Фторопласт-4	2,0	0,5
5	Ультрафарфор	3,0	Тиконд Т-80	1,0	4,0
6	Оргскло	2,0	Тиконд Т-40	3,0	2,5
7	Флогоніт	5,0	Поліхлорвініл	1,0	2,5

3.2.82 Умова задачі аналогічна 3.2.81. Для розв’язання використайте варіант 2.

3.2.83 Умова задачі аналогічна 3.2.81. Для розв’язання використайте варіант 3.

3.2.84 Умова задачі аналогічна 3.2.81. Для розв’язання використайте варіант 4.

3.2.85 Умова задачі аналогічна 3.2.81. Для розв’язання використайте варіант 5.

3.2.86 Умова задачі аналогічна 3.2.81. Для розв’язання використайте варіант 6.

3.2.87 Умова задачі аналогічна 3.2.81. Для розв’язання використайте варіант 7.

4 МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

4.1 Короткі теоретичні відомості

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

Закон основного струму – лінійний інтеграл вектора напруженості H вздовж довільного контуру l дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які пронизують цей контур:

$$\Phi_{\vec{H}_{\text{сум}}} = \sum I.$$

В осерді з незмінними магнітними властивостями та поперечним перерізом закон повного струму має вигляд

$$H_e = \sum IW, \quad (4.1)$$

де W - число витків обмоток.

Під дією напруженості в осерді виникає магнітний потік Φ . За законом електромагнітної індукції та при зміні потоку в обмотці осердя виникає ЕРС

$$e = -W \frac{d\bar{\Phi}}{dt} = \frac{d\psi}{dt}, \quad (4.2)$$

де $\psi = W\Phi$ - потокозчеплення.

При періодичному змінненні магнітного потоку від максимального значення до мінімального, середня за половину періоду $T/2$ величина ЕРС визначається виразом

$$E_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e dt = -\frac{2}{T} W \int_{+\bar{\Phi}_m}^{-\bar{\Phi}_m} d\bar{\Phi} = 4fW\bar{\Phi}_m = 4fWSB_m, \quad (4.3)$$

де S - переріз осердя;

B_m - максимальне значення магнітної індукції;

f - частота перемагнічування.

Середньоквадратичне значення напруги, прикладене до обмотки

$$U = k_\phi U_{cp} \approx k_\phi E_{cp} = 4k_\phi f W S B_m.$$

При синусоїдальній напрузі коефіцієнт форми $k_\phi = 1,11$ та вираз для U має вигляд

$$U = 4,44 f W S B_m. \quad (4.4)$$

Перемагнічування феромагнетиків у змінних магнітних полях, яке призводить до їх нагріву, пов'язане з втратами на гістерезис P_r та вихрові струми P_T , які визначаються відповідними виразами

$$P_r = \eta \cdot f \cdot B_{\max}^n, \quad (4.5)$$

де η - коефіцієнт, залежний від матеріалу;

n - показник ступеня в межах від 1,6 до 2;

$B_{\max}$ - максимальна індукція;

f - частота струму.

$$P_T = \xi \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2, \quad (4.6)$$

Сумарні втрати за цикл перемагнічування лінійно залежать від частоти:

$$W = \frac{P_a}{f} = \frac{P_r}{f} + \frac{P_T}{f}. \quad (4.7)$$

Індуктивність соленоїда, довжина якого достатньо велика порівняно з діаметром:

$$L_0 = \mu_0 \frac{n^2 S}{l}, \quad (4.8)$$

де n - число витків;

l - довжина осердя;

S - площа поперечного перерізу;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - константа.

Намагніченість (магнітний момент одиниці об'єму) речовини, А/м

$$M = \frac{M_v}{V} = \frac{n_v}{V} P_M = n P_M, \quad (4.9)$$

де $V, \text{м}^3$ - об'єм;

n_v - число частинок в одиниці об'єму;

$n, \text{м}^{-3}$ - число магнітних диполів $P_M, \text{А} \cdot \text{м}^2$ в одиниці об'єму.

Для тіл кінцевих розмірів, які мають форму близьку до еліпсоїда обертання (куля, пластина, циліндр) та знаходяться під дією зовнішнього поля $H_e, \text{А/м}$, напруженість поля всередині тіла H_{iT} знаходиться за формулою

$$\bar{H}_{iT} = \bar{H}_e + \bar{H}_T = \bar{H}_e - N_T \bar{M}, \quad (4.10)$$

де поле полюсів в об'ємі тіла

$$\bar{H}_T = -N_T \bar{M} \quad (4.11)$$

називають розмагнічувальним, а N_T - коефіцієнт розмагнічування, що залежить від форми тіла та його розміщення у зовнішньому полі.

Магнітна індукція, Тл в тілі

$$B_{iT} = \mu_0 \bar{H}_e + \mu_0 \bar{M} + \mu_0 \bar{H}_T = \mu_0 \bar{H}_e + \mu_0 M - \mu_0 N_T \bar{M}, \quad (4.12)$$

де μ_0 - магнітна стала.

Зв'язок намагніченості з напруженістю поля всередині тіла

$$M = k_M \bar{H}_{iT}, \quad (4.13)$$

де k_M - безрозмірна величина, яка називається магнітною сприйнятливістю речовини, пов'язана з відносною магнітною проникністю μ речовини співвідношенням

$$\mu = 1 + k_M. \quad (4.14)$$

З формул (4.10) та (4.13) одержуємо

$$\bar{H}_{iT} = \frac{\bar{H}_e}{1 + N_T k_M}; \quad (4.15)$$

$$B_{iT} = \mu_0 \bar{H}_e \frac{1 + k_M}{1 + N_T k_M}. \quad (4.16)$$

Котушка з числом витків W , намотаних рівномірно в один шар на замкнуте осердя, магнітна проникність якого μ , втрати та середня силова лінія l_{cp} , м, має індуктивність L , Гн.

$$L = \frac{\mu_0 \mu W^2 S}{l_{cp}} = \mu L_0, \quad (4.17)$$

де індуктивність L_0 , Гн котушки без осердя

$$L_0 = \frac{\mu_0 W^2 S}{l_{cp}}. \quad (4.18)$$

Котушка, яка має малу повітряну щілину l_1 ($l_{cp} = l_1 + l_2$, $l_2 \ll l_1$, де l_2 - довжина осердя вздовж силової лінії) має індуктивність

$$L_T = \mu_0 L_0 \quad (4.19)$$

та добротність

$$Q_T = Q(1 + N_T N_\mu), \quad (4.20)$$

де $\mu_T = \frac{B_{iT}}{\mu_0 H_e}$ - відносна магнітна провідність магнітопроводу, який має повітряну щілину l_1 , а Q - добротність котушки із замкнутим осердям, $l_1 = 0$.

Відносна магнітна проникність є відношенням магнітної індукції B котушки, яка має осердя з магнетика, до магнітної проникності тієї самої котушки, яка має замість магнетика вакуум

$$\mu = \frac{B}{B_e}. \quad (4.21)$$

Залежно від способу визначення та напруженості магнітного поля H розрізняють магнітні проникності, які визначаються за основною кривою намагнічування $OABV_S$ (рис. 4.1):

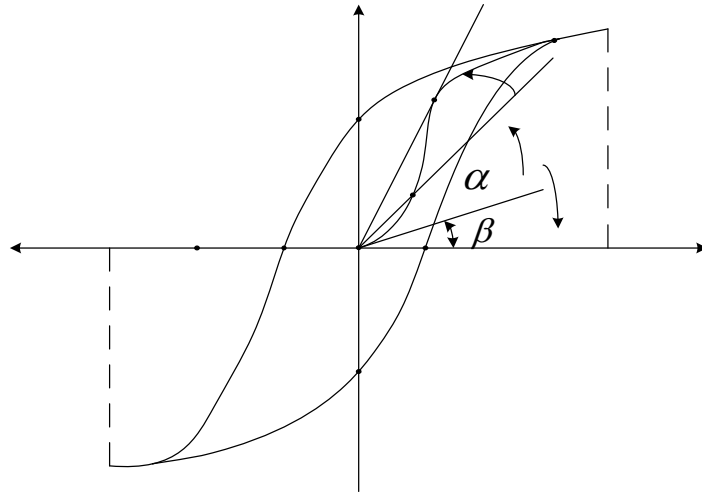


Рисунок 4.1 – Петля гістерезису

а) нормальну μ , яка подається в довідниках і визначається тангенсом кута α , який утворено прямою OA , проведеною в точку A з початку координат

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu_0}; \quad -H_S \quad -H_M \quad (4.22)$$

б) початкову μ_H , яка визначається тангенсом кута нахилу дотичної до кривої намагнічування в початку координат (тобто коли $H \rightarrow 0$)

$$\mu_H = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\mu_0}; \quad -H_C \quad 0 \quad (4.23)$$

в) диференційну

$$\mu_d = \frac{dB}{\mu_0 dH} = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\mu_0}; \quad -B_S \quad (4.24)$$

г) оборотну (реверсивну) μ_p , яка визначається тангенсом нахилу часткової петлі гістерезису в деякій точці основної кривої намагнічування

при одночасній дії постійного поля H та змінного поля з амплітудою $H_m \ll H$

$$\mu_p = \frac{tg\varphi}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H_m \rightarrow 0} \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m}. \quad (4.25)$$

Комплексна магнітна проникність $\tilde{\mu}$ враховує індуктивність та магнітні втрати магнітопроводу, пропорційні відповідно μ та $\mu tg\delta_\mu$ і визначає збіг за фазою комплексів $B_m = B_m e^{j\tau_0}$ та $H_m = H_m e^{j\delta_\mu}$, де

$$\tilde{\mu} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \mu - j\mu tg\delta = \mu - \tau j\mu''; \quad (4.26)$$

$$tg\delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} = \frac{R_\mu}{\omega L}. \quad (4.27)$$

Магнітний момент ізолюваного атома – це сума магнітних моментів електронів (орбітального P_{mo} і спінового P_{mc}) та ядра P_{ma} .

Електрон, що обертається навколо ядра на орбіті радіусом r з кутовою частотою ω , еквівалентний витку зі струмом I , A та площею S , m^2 і має орбітальний магнітний момент P_{mo} , напрямок якого збігається з напрямком одиничної нормалі $\bar{n}$ до площі витка (рис. 4.2)

$$\bar{P}_{mo} = IS\bar{n} = qf_0\pi r^2\bar{n} = \frac{qr^2}{2}\omega_0\bar{n} = -\frac{qr^2}{2}\omega_0. \quad (4.28)$$

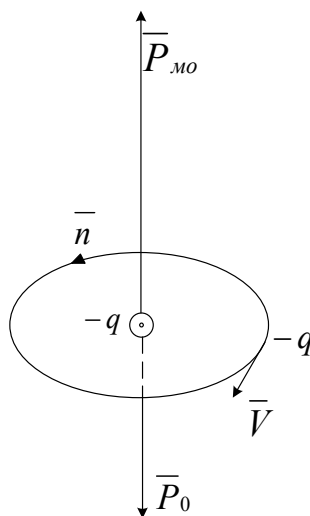


Рисунок 4.2 – До визначення орбітального магнітного моменту

Одиницями вимірювання магнітних моментів є величини:

а) магнетон Бора, $A \cdot m^2 = Дж / Тл$ для електронів

$$P_{\text{мв}} = \frac{q}{2m} \cdot \frac{n}{2\pi} = 9,27 \cdot 10^{-24}, A \cdot m^2; \quad (4.29)$$

б) ядерний магнетон для ядер

$$P_{\text{мя}} = \frac{P_{\text{мв}}}{1836}. \quad (4.30)$$

Частинки, з яких складається атом, мають не тільки магнітні $P_{\text{мх}}$, а й механічні моменти P_x , $Дж \cdot c$

$$P_{\text{мх}} = \pm \gamma_x \bar{P}_x, \quad (4.31)$$

де $\gamma_x, 1/Тл \cdot c$ - гіромагнітне відношення.

Для орбітальних моментів електрона

$$P_{\text{мо}} = -\gamma_0 P_0 \quad (4.32)$$

і спінових моментів електрона

$$P_{\text{мс}} = -\gamma_c P_c, \quad (4.33)$$

де

$$\gamma_0 = \frac{q}{2m} = 8,85 \cdot 10^{10}, 1/Тл \cdot c; \quad (4.34)$$

$$\gamma_c = 2\gamma_0 = 17,7 \cdot 10^{10}, 1/Тл \cdot c. \quad (4.35)$$

4.2 Задачі та запитання

4.2.1 Опишіть процес намагнічування феромагнітних матеріалів. Якими параметрами вони характеризуються в постійних та змінних полях?

4.2.2 Призначення магнітних матеріалів та вимоги до них. Назвіть десяток таких матеріалів, вкажіть їхні основні магнітні властивості.

4.2.3 Опишіть залізо-нікелеві сплави з високою магнітною проникністю. Вкажіть основні області їхнього застосування.

4.2.4 Опишіть основні властивості електротехнічної сталі. Наведіть приклади маркування цієї сталі та поясніть їх призначення.

4.2.5 Опишіть явище магнітострикції. В яких матеріалах воно виражене дуже сильно та для якої мети це явище використовується?

4.2.6 Що таке пармалой, пермінвар, альсифер? Які їхні властивості та області застосування?

4.2.7 Що таке текстуровані магнітні матеріали? Які їхні особливості та властивості?

4.2.8 Магнітні параметри карбонільних, альсиферових та інших магнітодіелектриків. Области їхнього застосування.

4.2.9 Як впливає концентрація кремнію на електричні, магнітні та механічні властивості електротехнічної сталі?

4.2.10 Що являють собою ферити? Основні властивості та області застосування магнітом'яких та магнітотвердих феритів.

4.2.11 Як залежить відносна магнітна проникність магнітних матеріалів від температури, інтенсивності магнітного поля та його частоти?

4.2.12 Яку інформацію несе петля гістерезису про властивості магнітного матеріалу?

4.2.13 Які види втрат виникають у феромагнітних матеріалів і як вони оцінюються? Фізична суть виникнення магнітних втрат. Від яких чинників вони залежать?

4.2.14 Яка природа магнітних властивостей різних матеріалів? Наведіть класифікацію магнітних матеріалів залежно від їхніх магнітних властивостей.

4.2.15 Якими причинами зумовлений різний характер температурних залежностей магнітної проникності магнітного матеріалу, вимірюваної в слабкому та сильному магнітному полі?

4.2.16 Наведіть основні характеристики феромагнетиків залежно від температури та напруженості зовнішнього магнітного поля.

4.2.17 Чому в області насичення феромагнетику намагніченість матеріалу зростає із зростанням напруженості магнітного поля? Як впливає температура на зміну намагніченості в області технічного насичення?

4.2.18 Дайте поняття магнітної сприйнятливості та її зв'язок з магнітною проникністю речовини. Від яких чинників залежить магнітна проникність?

4.2.19 Поясніть, як та чому змінюється індукція насичення феромагнетиків при підвищенні температури?

4.2.20 Дайте поняття магнітних доменів. Як пов'язана доменна структура з кривою намагнічування в процесі намагнічування феромагнетиків?

4.2.21 Чим визначаються напрямки векторів спонтанних намагнічувань в доменах та розташування доменних кордонів при відсутності зовнішнього магнітного поля?

4.2.22 У чому полягає суть гістерезисних явищ у магнітних матеріалах?

4.2.23 Як впливає температура на енергію магнітної кристалічної анізотропії? Чому феромагнетик розбивається на домени? Чим визначаються розміри доменів та товщина доменних стінок?

4.2.24 Наведіть класифікацію магнітних матеріалів за видом петлі гістерезису.

4.2.25 Основні види втрат у магнітних матеріалах та їх залежність від частоти прикладеного поля та властивостей матеріалів? Які шляхи зниження цих втрат?

4.2.26 Поясніть, як впливає магнітна анізотропія та магнітострикційна деформація на значення початкової магнітної проникності феромагнітних матеріалів.

4.2.27 Магнітом'які матеріали, їхні властивості та області застосування.

4.2.28 Магнітодіелектрики, їхні властивості, області застосування та технологія виробництва.

4.2.29 Високочастотні магнітні матеріали, їх властивості та області застосування.

4.2.30 Магнітні матеріали з прямокутною петлею гістерезису (ППГ), їхні властивості та області застосування.

4.2.31 У чому полягає явище магнітострикції, в яких феромагнітних матеріалах воно проявляється та для яких цілей використовується?

4.2.32 З яких феромагнітних матеріалів виготовляють постійні магніти? Які основні властивості повинні мати ці матеріали?

4.2.33 Чи можна у високочастотних колах змінного струму використовувати осердя з електротехнічної сталі? Дайте обґрунтовану відповідь.

4.2.34 Назвіть основні механізми намагнічування феромагнетиків, яке веде до нелінійної залежності магнітної індукції від напруженості магнітного поля.

4.2.35 Чим пояснити магнітні властивості різних матеріалів?

4.2.36 Як класифікувати матеріали відповідно до їхніх магнітних властивостей?

4.2.37 Які матеріали відносяться до діамагнетиків, їхні магнітні властивості?

4.2.38 Які матеріали відносяться до парамагнетиків, їхні властивості?

4.2.39 Які матеріали відносяться до феромагнетиків, їхні властивості?

4.2.40 Які магнітні властивості мають антиферомагнетики?

4.2.41 Які матеріали використовуються в електротехніці як магнітні матеріали та як вони класифікуються?

4.2.42 Які показники властивостей магнітних матеріалів є основними, а які характеризують їхні додаткові властивості в змінних магнітних полях?

4.2.43 Від яких чинників залежить проникність магнітних матеріалів?

4.2.44 Чи можуть феромагнітні домени орієнтуватися за напрямком зовнішнього магнітного поля?

4.2.45 Як пов'язані магнітні властивості матеріалів з їхньою структурою?

4.2.46 Як пов'язано доменну структуру з кривою намагнічування?

4.2.47 Як та чому у магнітних матеріалах виникають гістерезисні явища?

4.2.48 Чому при циклічному перемагнічуванні магнітних матеріалів виникають магнітні втрати? Які механізми виникнення магнітних втрат?

4.2.49 Якими способами зменшуються магнітні втрати в магнітних матеріалах?

4.2.50 Як проявляються анізотропні властивості магнітних матеріалів?

4.2.51 Що таке магнітна текстура та як вона пов'язана з властивостями магнітних матеріалів?

4.2.52 Явище магнітострикції у магнітних матеріалах та його технічне використання.

4.2.53 Які магнітні матеріали мають високе значення магнітної проникності в слабких магнітних полях?

4.2.54 Як впливає на властивості магнітних матеріалів механічна та термічна обробка?

4.2.55 Які негативні та позитивні особливості мають ферити порівняно з класичними феромагнетиками?

4.2.56 Як впливає на властивості феритів температура?

4.2.57 Назвіть властивості магнітних матеріалів з прямокутною петлею гістерезису, які забезпечили їм широке технічне використання.

4.2.58 Які матеріали використовуються для постійних магнітів?

4.2.59 До якого класу за магнітними властивостями можна віднести напівпровідники кремній, германій та хімічні з'єднання типу $A^{III}B^V$?

4.2.60 Чому діамагнетики намагнічуються протилежно напрямку вектора напруженості зовнішнього магнітного поля? Як впливає температура на діамагнітну сприйнятливість?

4.2.61 Обмотку осердя підключено до мережі змінного струму 50 В частотою 400 Гц . Переріз осердя $0,16\text{ см}^2$, число витків 1600 . Визначте амплітуду магнітної індукції в осерді.

4.2.62 Визначте напругу змінного струму, прикладеного до обмотки дроселя, при якому відбувається зміна магнітної індукції в осерді з амплітудою 1 Тл , якщо частота джерела живлення 50 Гц , число витків 1000 , переріз осердя 10 см^2 .

4.2.63 Обмотку осердя, розраховану на напругу 127 В при частоті 50 Гц , під'єднали під напругу 200 В з частотою 400 Гц . Як зміниться амплітуда магнітної індукції?

4.2.64 Амплітуда магнітної індукції в осерді дроселя, підключеного до синусоїдної напруги 141 В та частотою 400 Гц , дорівнює 1 Тл , переріз осердя - $0,16\text{ см}^2$. Визначте амплітуду магнітної індукції у тому самому осерді, якщо число витків дорівнює 3000 .

4.2.65 Втрати на гістерезис у сталевому осерді дроселя, підключеного до джерела змінного струму 120 В та частотою 40 Гц становлять 100 Вт . Визначте втрати на гістерезис: а) при незмінній частоті 40 Гц та напрузі 150 В ; б) при незмінній напрузі 120 В та частоті 400 Гц .

4.2.66 Для визначення втрат у сталі осердя його обмотку підключили до кола постійного струму. Її опір складав $1,75\text{ Ом}$. Потім до обмотки підключили змінну напругу. При цьому вольтметр показав 120 В , ватметр - 700 Вт , а амперметр - 2 А . Нехтуючи потоком розсіювання, визначте втрати у сталі осердя.

4.2.67 В осерді трансформатора сумарні питомі магнітні втрати на гістерезис та вихрові струми при частотах 1 та 2 кГц відповідно становлять 2 та 6 Вт/кг . Розрахуйте магнітні втрати на вихрові струми в осерді на частоті 2 кГц .

4.2.68 В осерді трансформатора на частоті 50 Гц втрати на гістерезис при індукції магнітного поля 0,1 та 0,5 Тл відповідно складають 0,15 та 1,97 Вт/кг . Визначити втрати на гістерезис на частоті 200 Гц при індукції магнітного поля 0,6 Тл .

4.2.69 Знайдіть індуктивність соленоїда, який 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 $\mu = 400$?

4.2.70 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 $\mu = 500$.

4.2.71 Кільцеве феритове осердя з середнім діаметром $l = 25 \text{ мм}$ має повітряний проміжок довжиною 1 мм . При пропусканні 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.

4.2.72 За кривою намагнічування пермалою, заданій на графіку (рис. 4.3), визначте залежність статичної та динамічної магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля. Поясніть характер одержаної залежності.

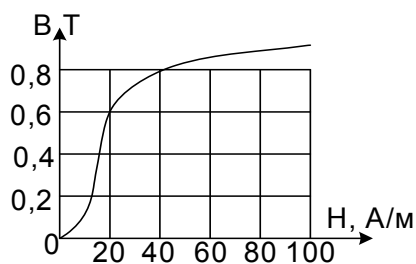


Рисунок 4.3 – До визначення магнітної проникності фериту

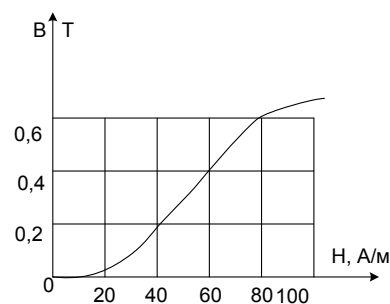


Рисунок 4.4 – До визначення магнітної проникності технічного заліза

4.2.73 За основною кривою намагнічування технічного заліза, наведеною на рис. 4.4, визначте максимальні статичну та динамічну проникності.

4.2.74 Первинна обмотка трансформатора знаходиться під дією напруги 100 В з частотою 50 Гц . Переріз осердя трансформатора 2 см^2 , число витків обмотки 1250 . Визначте амплітуду магнітної індукції в осерді.

4.2.75 При напруженості магнітного поля $H = 10^4\text{ А/м}$ магнітна індукція у вісмуті $B = 12,564\text{ мТл}$. Визначте магнітну сприйнятливість K_n речовини. Який висновок можна зробити з природи намагнічування?

4.2.76 В однорідному магнітному полі з індукцією B_o перпендикулярно магнітному потоку знаходиться пластина з однорідного ізотропного феромагнетика з магнітною проникністю μ . Визначте магнітну індукцію B_i та напруженість магнітного поля H_i .

4.2.77 Опір провідника при температурі $T_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ та $T_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ відповідно дорівнюють $6,1\text{ Ом}$ та $8,12\text{ Ом}$. Визначте середній температурний коефіцієнт питомого опору та до якого металу він належить. Чому дорівнює переріз провідника при температурі T_2 , якщо його довжина 1000 м ?

4.2.78 Обмотка осердя підключена до джерела змінного струму 100 В та частотою 800 Гц . Перетин сталі осердя $0,5\text{ см}^2$, число витків 1000 . Визначте амплітуду магнітної індукції осердя.

4.2.79 Питомий опір мідних струмопровідних жил кабелю не може бути вище за $0,0148\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$. Визначте, на скільки можна зменшити фактичний перетин жили $S = 20\text{ мм}^2$ за умови, що питомий опір дроту, який йде на виготовлення, дорівнює $0,017\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$.

4.2.80 Визначте напругу змінного струму, яку прикладено до обмотки трансформатора, при якій відбувається зміна магнітної індукції в осерді з амплітудою $1,2\text{ Тл}$, якщо частота джерела живлення 100 Гц , число витків 500 , переріз осердя 7 см^2 .

4.2.81 При напруженості магнітного поля $H = 10^4\text{ А/м}$ магнітна індукція у вісмуті $B = 12,56\text{ мТл}$. Визначте магнітну сприйнятливість K_m речовини. Яка природа намагніченості вісмуту?

4.2.82 Обмотку осердя, розраховану на 100 В з частотою 400 Гц , підключили до напруги 150 В з частотою 50 Гц . Що станеться з амплітудою магнітної індукції?

4.2.83 Кільцеве феритове осердя з середнім діаметром $l = 30\text{ мм}$ має повітряний проміжок довжиною 2 мм . При пропусканні струму $0,2\text{ А}$

через обмотку осердя, яка має 600 витків, у проміжку виникає магнітна індукція $B_0 = 0,12 \text{ Тл}$. Визначте магнітну проникність фериту.

4.2.84 Амплітуда магнітної індукції в осерді дроселя, підключеного до синусоїдної напруги з амплітудою 141 В та частотою 400 Гц , дорівнює 1 Тл , переріз осердя $0,15 \text{ см}^2$. Визначте амплітуду магнітної індукції у тому самому осерді за числом витків 2000.

4.2.85 Втрати на гістерезис в осерді трансформатора, підключеного до джерела з напругою 150 В та частотою 60 Гц , складають 135 Вт . Визначте втрати на гістерезис: а) при незмінній частоті 60 Гц та напрузі 170 В ; б) при незмінній напрузі 150 В та частоті 300 Гц .

4.2.86 З метою визначення втрат в осерді його обмотку спочатку підключили до джерела постійного струму, і її опір дорівнював $1,63 \text{ Ом}$. Потім до обмотки підвели змінну напругу, і вольтметр показав 112 В , амперметр $2,13 \text{ А}$, ватметр 76 Вт . Визначте втрати в сталі та $\cos \varphi$.

4.2.87 В осерді трансформатора сумарні питомі магнітні втрати на гістерезис та вихрові струми на частотах 2 та 3 кГц відповідно складали 4 та 9 Вт/кг . Розрахуйте магнітні втрати на вихрові струми в осерді на частоті 3 кГц .

4.2.88 В осерді трансформатора на частоті 100 Гц втрати на гістерезис при індукції магнітного поля $0,2$ та $1,0 \text{ Тл}$ складають відповідно $0,3$ та 4 Вт/кг . Визначте втрати на гістерезис на частоті 400 Гц при індукції магнітного поля $1,3 \text{ Тл}$.

4.2.89 Знайдіть індуктивність соленоїда, який має 400 витків, що намотані на діелектричну основу довжиною 60 мм . Площа перерізу основи $S = 60 \text{ мм}^2$. Як зміниться індуктивність котушки, якщо до неї введено циліндричне феритове осердя, що має магнітну проникність $\mu = 800$?

4.2.90 Опір провідника при температурі $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ та $T_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ відповідно дорівнює 5 та $6,8 \text{ Ом}$. Визначте середній температурний коефіцієнт питомого опору та якому металу він відповідає. Чому дорівнює переріз провідника при температурі $100 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо його довжина 500 м ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники – М.: Высшая школа, 1986.
2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Электрорадиоматериалы /Под ред. Б.М. Тареева – М.: Высшая школа, 1978.
4. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков – М.: Металлургия, 1988.
5. Шалимова К.В. Физика полупроводников – М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов – М.: Энергоиздат, 1982.
7. Преображенский А.А. Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы – М.: Высшая школа, 1986.
8. Мишин Д.Д. Магнитные материалы – М.: Высшая школа, 1981.
9. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева. В 3 т. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

Додаток А

Властивості провідників

Таблиця А.1 - Властивості деяких металів при 20°C

Метал	Густина ρ , 10^3 кг/м^3	Температура плавлення $T_{\text{пл}}$, °C	Питома теплоємність C , Дж/кгК	Коефіцієнт теплопровідності, k , Вт/(мК)	Температурний коефіцієнт лінійного розширення α_l , 10^{-6} К^{-1}	Температура Дебая	Модуль пружності ГПа	Питомий опір ρ , мОм м	Температурний коефіцієнт опору α_p , 10^{-3} К^{-1}	Робота виходу A , еВ	Коефіцієнт термоЕРС $\epsilon_{\text{терм}}$, мкВ/К	Температура надпровідності $T_{\text{напр.}}$, К
Ag	10.5	961	235	453	18.6	225	80	0.015	4.1	4.3	1.5	-
Al	2.7	660	923	218	21	428	71	0.027	4.1	4.3	-1.3	1.196
Au	19.3	1063	134	312	14	165	78	0.023	3.95	4.3	1.5	-
Ba	3.75	710	285	-	19		13	0.5	3.6	2.5	-	-
Be	1.84	1280	1800	184	12		287	0.041	6.6	3.9	-3	0.03
Bi	9.8	271	126	8.4	13.3		34	1.16	4.2	4.4	-75	-
Ca	1.53	851	650	98	18.5		20	0.04	4	2.8	-	-
Cd	8.65	321	231	93	29		62	0.074	4.2	4.1	2.1	0.52
Co	8.85	1500	445	68	13.5	445	209	0.064	6	4.4	-20.1	-
Cr	7.19	1900	462	89	6.2	630	245	0.13	2.4	4.6	18	-
Cs	1.9	28.5	220	18	97		1.8	0.19	5.03	1.9	0.2	-
Cu	8.92	1083	386	406	16.6	343	129	0.017	4.33	4.4	1.8	-
Fe	7.87	1540	453	73	10.7	470	211	0.097	6.25	4.3	16.6	-
Ga	5.92	30	336	29	18.1	320	-	0.136	3.9	4	-	1.087
Gd	7.89	1310	-	8.8	9.7		56	1.4	1.8	3.1	-	-
Hf	13.3	2220	138	22	5.9		78	0.351	3.8	3.5	6	0.35
Hg	13.5	-39	138	7.9	182		-	0.958	0.9	4.5	8.1	4.153 (α)
In	7.3	156	239	72	28.4	108	11	0.09	4.9	3.8	-	3.405
K	0.86	63.5	754	97	83.3		-	0.065	5.8	2.2	-12	-
La	6.18	920	188	14	5.2		39	0.568	2.2	3.3	2	4.9 (α)
Li	0.53	180	3285	71	56		4.9	0.086	4.5	2.4	12.2	-
Mg	1.74	651	1040	170	27		44	0.045	4	3.6	4.5	-
Mn	7.44	1244	477	67	22.3	410	198	1.85	1	3.8	-9.5	-
Mo	10.2	2620	272	150	5.3	450	294	0.05	4.33	4.3	6.3	0.93
Na	0.97	98	1220	134	72		10	0.042	5.5	2.4	-8.7	-
Nb	8.57	2500	268	50	7.2		100	0.15	3.9	4	-0.7	9.2
Ni	8.96	1453	440	76	13.2	450	196	0.068	6.7	4.5	-19.3	-
Os	22.5	3000	129	-	4.6		580	0.095	4.2	4.7	-4	0.71
Pb	11.3	327	130	35	28.3		16	0.19	4.2	4	-1.2	7.2
Pd	12	1550	243	71	9.5		121	0.108	3.6	4.8	-10.3	-
Ph	12.5	1970	247	88	8.5		275	0.043	4.3	4.8	1.6	-
Pt	21.5	1770	134	71	9.5	240	170	0.098	3.9	5.3	-5.1	-
Rb	1.53	39	335	36	90		2.4	0.12	6	2.1	-8.2	-
Re	21	3180	138	52	6.7		465	0.214	3.2	5	-7.5	1.7
Ru	12.4	2250	239	-	9.1		472	0.075	4.5	4.6	-1.4	0.47
Sn	7.29	232	226	63	23	200	54	0.113	4.5	4.4	-1.1	3.72
Sr	2.63	770	737	-	21		16	0.227	4	2.4	-	-
Ta	16.6	3000	150	50	6.6		177	0.124	3.8	4.1	-2.5	4.5
Th	11.6	1750	113	37	11.5		79	0.13	3.4	3.4	-3	1.37
Ti	4.52	1670	550	22	8.1	420	104	0.47	5.5	4	4.5	0.39
Tl	11.9	303	147	35	28		8	0.18	5.2	3.7	0.4	2.39
U	19.1	1130	-	27	14		208	0.3	2.7	3.3	8.3	0.7
V	6.11	1900	503	31	8.3	380	147	0.248	3.6	4.1	0.9	5.13
W	19.3	3400	142	167	4.4	400	407	0.055	5	4.5	2	0.01
Zn	7.14	419	336	113	30	327	92	0.059	4.1	4.3	1.5	0.88
Zr	6.5	1855	277	30	6.3		68	0.41	4.4	3.9	5.2	0.55

Додаток Б
Властивості напівпровідників

Таблиця Б.1 – Основні параметри деяких напівпровідників

Параметри	Напівпровідник			
	Ge	Si	Se	GaAs
Період кристалічної ґратки, нм	0,566	0,542	0,436	0,565
Густина, (20°C) г/м^3	5,3	2,3	4,8	5,317
Теплопровідність C , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	55	80	3	55
	333	710	330	
Температура плавлення $T_{\text{плав}}$, $^{\circ}\text{C}$	936	1414	220	
Питомий опір ρ , $\text{Ом}\cdot\text{м}$	0,47	$2\cdot 10^3$		
Власна концентрація носіїв заряду n_i , м^{-3}	$2,5\cdot 10^{19}$	10^{16}		
Діелектрична проникність статична оптична	16	12,5	6,3	12,85
				10,88
Ширина забороненої зони, eV 300 K 0 K	0,665	1,12	2,0	1,423
	0,746	1,165	2,5	
Ефективна маса густини станів зони провідності, m_0				0,065
Рухливість електронів μ_n , $\text{м}^2 / (\text{В}\cdot\text{с})$	0,39	0,14	-	0,8
Ефективна маса густини станів валентної зони важкі дірки, m_0 легкі дірки, m_0				0,5
				0,088
Рухливість дірок μ_p , $\text{м}^2 / (\text{В}\cdot\text{с})$	0,19	0,05	$2\cdot 10^{-5}$	0,032
Робота виходу, eV	4,8	4,3	2,85	

Таблиця Б.2 - Ширина забороненої зони деяких напівпровідникових матеріалів

Матеріал	Структура кристалічної ґратки	$E_g, \text{ eV},$ (300 K)	eV/K	$E_g, \text{ eV},$ (77 K, оптич.)	$E_g, \text{ eV},$ (0 K)
Ge	Алмаз	0,66	$3,9 \cdot 10^{-4}$	0,74	0,75
Si	Алмаз	1,12	$2,8 \cdot 10^{-4}$	1,16	1,14
α -SiC	Гексагональна, 6Н	3,02			
SiC	Гексагональна, 4Н	3,3			
GaN	Вюрцит	3,40	$3,9 \cdot 10^{-4}$		
AlP	Сфалерит	2,45	$2,6 \cdot 10^{-4}$		
GaP	Сфалерит	2,26	$4,7 \cdot 10^{-4}$		2,4
InP	Сфалерит	1,35	$2,8 \cdot 10^{-4}$	1,4	
AlAs	Сфалерит	2,16	$4,0 \cdot 10^{-4}$		
GaAs	Сфалерит	1,43	$4,0 \cdot 10^{-4}$	1,52	1,53
InAs	Сфалерит	0,36	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,43	0,45
AlSb	Сфалерит	1,58	$3,5 \cdot 10^{-4}$		1,70
GaSb	Сфалерит	0,72	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,80	0,80
InSb	Сфалерит	0,18	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,22	0,25
ZnS	Сфалерит	3,67	$5,3 \cdot 10^{-4}$		
ZnS	Вюрцит	3,74	$3,8 \cdot 10^{-4}$		
CdS	Вюрцит	2,53	$4,9 \cdot 10^{-4}$		
ZnSe	Сфалерит	2,73	$7,2 \cdot 10^{-4}$		
CdSe	Вюрцит	1,85	$4,1 \cdot 10^{-4}$		
ZnTe	Сфалерит	2,23			
CdTe	Сфалерит	1,51	$4,1 \cdot 10^{-4}$		
HgTe	Типу NaCl	0,08			
PbS	Типу NaCl	0,39	$3,3 \cdot 10^{-4}$		
PbSe	Типу NaCl	0,27	$4,0 \cdot 10^{-4}$		
PbTe	Типу NaCl	0,32	$4,3 \cdot 10^{-4}$		
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$		1,80			
Al_2O_3		5,8, 7,0			
C	Алмаз	5,20			
α -Sn	Алмаз	0,08			
TiO_2		3,67			
SnO_2		3,71			
$\text{SnO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$		3,5-4,0			
BaTiO_3		3,0-3,1			
PbTiO_3		3,0			
Cd_2SnO_4		2,9			

Таблиця Б.3 - Рухливості носіїв деяких напівпровідникових матеріалів

Матеріал	Рухливість μ , $\text{м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$	
	електронів	дірок
Ge	$4500(T/300)^{-1,6}$	$3500(T/300)^{-2,33}$
Si	$1300(T/300)^{-2,0}$	$500(T/300)^{-2,7}$
AlSb	$200(T/300)^{-2,0}$	$400(T/300)^{-1,8}$
GaSb	$4000(T/300)^{-2,0}$	$1400(T/300)^{-0,9}$
InSb	$78000(T/300)^{-1,6}$	$750(T/300)^{-2,1}$
GaAs	$8500(T/300)^{-1,0}$	$420(T/300)^{-2,1}$
InAs	$33000(T/300)^{-1,2}$	$460(T/300)^{-2,3}$
InP	$4600(T/300)^{-2,0}$	$150(T/300)^{-2,4}$
GaP	$110(T/300)^{-1,5}$	$75(T/300)^{-1,5}$
PbS	$500(T/300)^{-2,5}$	$500(T/300)^{-2,5}$
PbTe	$1400(T/300)^{-2,5}$	$1400(T/300)^{-2,5}$
PbSe	$2000(T/300)^{-2,5}$	$2000(T/300)^{-2,5}$
Алмаз	1800 (300 K)	1200 (300 K)
AgCl	50 (300 K)	-
KBr	100 (300 K)	-

Додаток В
Властивості діелектриків

Таблиця В.1 – Питомий об’ємний опір деяких діелектриків

Матеріали	$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$
Поліетилен	$10^{13} - 10^{15}$
Полістирол	$10^{14} - 10^{15}$
Політетрафторетилен	$10^{15} - 10^{16}$
Полівініл хлору	$10^{13} - 10^{14}$
Поліметилметакрилат	$10^{11} - 10^{12}$
Поліаміди	$10^{11} - 10^{12}$
Епоксидні смоли	$10^{12} - 10^{13}$
Фенол формальдегідні	$10^{11} - 10^{12}$
Поліефірні	$10^{11} - 10^{14}$
Кремнійорганічні	$10^{12} - 10^{14}$
Мекалекс	$10^{10} - 10^{12}$

Додаток Г

Властивості магнітних матеріалів

Таблиця Г.1 – Магнітні властивості деяких магнітних матеріалів

Магнітний матеріал	Магнітна проникність		Магнітний матеріал	Коерцитивна сила, А/м	Залишкова індукція	Індукція насиченості, Тл	Температура Кюрі, °С
	Початкова	Максимальна					
Технічно чисте залізо	250-400	3500-4500	50-100	2,0	2,18	770	$0,1 \cdot 10^{-6}$
Електро-технічна сталь	200-600	3000-8000	10-65	0,5-1,9	1,95-2,02	740-760	$0,25-0,6 \cdot 10^{-6}$
Низько-нікелевий пермалой	1500-1400	15000-60000	5-32	0,3-0,5	1,0-1,6	400-500	$0,45-0,9 \cdot 10^{-6}$
Високо-нікелевий пермалой	7000-10000	50000-300000	0,65-5	0,5-0,7	0,65-1,05	400-600	$0,16-0,8 \cdot 10^{-6}$
Супермалой	100000	1500000	0,3	-	0,8	400	$0,6 \cdot 10^{-6}$
Низько-частотний ферит марки: 20000 НМ	15000	35000	0,24	0,11	0,35	110	0,001
6000 НМ	48000-8000	10000	8	0,11	0,35	130	0,1
2000 НМ	1500-2300	3500	24	0,13	0,38	200	0,5
1000 НМ	1800-2400	6000	8	0,10	0,25	70	10
600 НМ	500-800	1500	40	0,12	0,28	110	10^2
400 НМ	320-500	600	56	0,13	0,26	120	10^3
Високо-частотний ферит марки: 100 ВЧ	80-120	280	300	0,15	-	400	10^5
20 ВЧ	16-24	45	1000	0,1	-	450	10^{-6}
Магніто-діелектрики на основі: альсіфера	20-90	-	400-500	0,02-0,05	-	-	$(1-10) \cdot 10^{-4}$
молібденового пермалою	60-250	-	100	0,01-0,02	-	-	-

Навчальне видання

**Юрій Степанович Кравченко, Людмила Вікторівна Крилик,
Євген Олександрович Смольков**

**МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ:
ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ**

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор Старічек Т.О.

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12. 2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7х42¼
Друк різнографічний
Тираж прим.

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум.друк.арк

Зам. №

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12. 2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ