

Міністерство освіти і науки України
Інженерний навчально-науковий інститут
Запорізького національного університету

М.В. Світанько

ФІЗИКА

Методичні рекомендації до практичних занять
для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня
за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної
програми «Мікро- та наносистемна техніка»

Міністерство освіти і науки України
Інженерний навчально-науковий інститут
Запорізького національного університету

М.В. Світанько

ФІЗИКА

Методичні рекомендації до практичних занять
для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня
за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної
програми «Мікро- та наносистемна техніка»

Затверджено
Вченою
радою ЗНУ
Протокол № 11
від 23.06.2021

Запоріжжя
2021

УДК 378.147

С

Світанько М.В. Фізика. Методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 33 с.

Методичні рекомендації до практичних занять з дисципліни «Фізика» розроблено для студентів денної та заочної форм навчання інженерно-технічних спеціальностей та освітньо-професійних програм Інженерного навчально-наукового інституту. Запропоновані приклади розв'язання задач по аналізу властивостей електричного поля, явища переносу заряду, характеристик основних компонентів електричних схем на прикладі моделей пасивних елементів, властивостей напівпровідникових матеріалів та р-п переходу.

Рецензент

В.Л. Коваленко, доктор технічних наук, завідувач кафедри електротехніки та енергоефективності Інженерного навчально-наукового інституту ЗНУ

Відповідальний за випуск

Т.В. Критська, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем Інженерного навчально-наукового інституту ЗНУ.

Зміст

	Стор.
Вступ	4
1. Основні поняття електричного поля.....	6
Приклади розв'язання задач для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.....	10
Практичні завдання	12
2. Електричний струм.....	13
Приклади розв'язання задач для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.....	17
Практичні завдання	18
3. Електричні коливання	19
Приклади розв'язання задач для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.....	22
Практичні завдання	22
4. Властивості р-п – переходу.....	23
Приклади розв'язання задач для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.....	28
.....	29
Практичні завдання	30
Питання для повторення та актуалізації знань	33
Література.....	

Вступ

Метою викладання дисципліни «Фізика» є надання студентам повної уяви про такі поняття, як простір та час, взаємодію різних фізичних тіл та систем, використання основних законів механіки, молекулярної фізики, електрики та магнетизма до конкретних умов промислового виробництва.

Основними **завданнями** вивчення дисципліни «Фізика» є формування у студентів сучасного світогляду на процеси, які відбуваються в галузі природничих наук, розуміння про розвиток та еволюцію нових напрямків науки та техніки, процесів модернізації виробництва та створення новітніх технологій.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен:

знати:

- основні фізичні закономірності, що проходять у різних системах;
- принципи зв'язку фізичних величин із конкретними умовами проведення експерименту та моделювання фізичних процесів;
- принципи практичного застосування фізичних законів та формул до встановлених практичних завдань.

вміти:

- орієнтуватись в різних галузях науки і техніки, чітко уявлять хід різноманітних фізичних процесів в умовах сучасного виробництва;
- володіти технікою фізичного експерименту;
- проводити розрахунки параметрів електричних полів, ємності конденсаторів, опору провідників у різних типах їх з'єднань,
- розраховувати параметри коливальних контурів, досліджувати резонансні явища, аналізувати фізичні процеси, що виникають в області просторового заряду p - n переходу,

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких **компетентностей**:

- ЗК8. Навички міжособистісної взаємодії.
- ЗК9. Здатність працювати в команді.
- К10. Навички здійснення безпечної діяльності.
- ЗК14. Здатність зберігати та примножувати моральні, культурні, наукові цінності і досягнення суспільства на основі розуміння історії та закономірностей розвитку предметної області, її місця у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій, використовувати різні види та форми рухової активності для активного відпочинку та ведення здорового способу життя.

Методичні рекомендації містять індивідуальні контрольні завдання з курсу «Фізика» та приклади розв'язання завдань кожної теми. Для підготовки до лекцій, практичних занять та самостійного засвоєння матеріалу студенти можуть використати теоретичні відомості з курсу та приклади вирішення задач.

Виконання кожного практичного завдання складається з двох етапів.

1. Вивчення теоретичного матеріалу, аналіз приведених прикладів розв'язання задач.

2. Виконання розрахунків практичних задач, їхній аналіз, оформлення звіту з практичної роботи.

У процесі підготовки до практичного заняття студент повинен чітко усвідомити собі кінцеву мету згідно з вивчаємою темою, виконати необхідні розрахунки.

Звіт, підготовлений до практичного заняття, повинний містити назву і мету заняття, розрахунки.

Оформлення результатів рішення задач виконується відповідно до вимог ЕСКД до текстових документів.

Перед виконанням кожного практичного завдання викладач, опитує студентів згідно з матеріалами та уявами розглядаємої теми. Непідготовлені студенти не допускаються до виконання практичного завдання, а вивчають в лабораторії не засвоєний ними матеріал по літературі, яка рекомендується.

1. Основні поняття електричного поля

Метою вивчення теми є закріплення теоретичних знань і придбання практичних навиків розв'язання задач дослідження електричного поля.

Ключові терміни та поняття: електричний заряд, електричне силове поле, напруженість поля, характеристики електричного поля, потенціал, електроємність, конденсатори

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти властивості існування зарядів.
2. Засвоїти поняття електричного поля.
3. Засвоїти принципи розрахунку параметрів конденсаторів.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

1.1 Електрична взаємодія.

Існування електричних зарядів - одна з основних властивостей природи. Заряди бувають двох видів – позитивні і негативні. Найменший заряд – це заряд електрона $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, маса електрона

$$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ êã.}$$

У будь-якому фізичному тілі – атомі, молекулі, а також у системах атомів і молекул – позитивний і негативний заряди скомпенсовані.

Закон взаємодії зарядів встановив на досліді Кулон (1785р.). Він довів, що сила взаємодії зарядів пропорційна добутку цих зарядів та обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e} \quad (1.1)$$

Закон припускає, що однойменні заряди відштовхуються, а різнойменні притягуються, r - відстань між зарядами,

$$\vec{e} = \frac{\vec{r}}{r}, \quad (1.2)$$

e - одиничний вектор, який спрямований від заряду 1 до заряду 2,

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\hat{H}^2}{\hat{E}\hat{e}^2}, \quad \epsilon_0 - \text{електрична стала}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\hat{E}\hat{e}^2}{\hat{H}^2}.$$

Кулон – одиниця заряду в системі СІ: 1 Кулон - це заряд, що проходить за 1с через поперечний переріз провідника при силі струму 1 Ампер (А)

$$1\text{Кл} = 1\text{А} \cdot \text{с}$$

1.2 Електричне силове поле. Напруженість поля. Характеристики електричного поля.

Для дослідження електричної взаємодії вводять поняття електричного поля. Під електричним полем у фізиці розуміють простір, кожній точці якого властива силова характеристика, яка називається напруженістю поля \vec{E} , яка

визначає силу, що діє на точковий заряд. Тоді сила, що діє на деякий “пробний” заряд q дорівнюватиме

$$\vec{F} = q\vec{E}, \quad (1.3)$$

де сила визначається за законом Кулона

Електричне поле є векторним полем. Це поле підлягає принципу суперпозиції: поле системи зарядів дорівнює векторній сумі полів, створених кожним з цих зарядів окремо:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i, \quad (1.4)$$

$$\text{де } \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r^2} \vec{e}, \quad (1.5)$$

E - напруженість поля i -го заряду в заданій точці простору.

Електричне поле можна зобразити графічно за допомогою силових ліній. Силова лінія – це лінія, дотична до якої в кожній точці збігається з напрямком вектора напруженості електричного поля E .

1.3. Потенціал електричного поля

Електростатичне поле – це поле нерухомих зарядів. Напруженість такого поля не залежить від часу. Це свідчить про те, що електростатичне поле – це поле консервативних сил.

Робота з переміщення заряду в такому полі не залежить від форми шляху, а залежить від місця розташування початкової та кінцевої точки шляху. Введемо роботу з переміщення точкового заряду.

Робота з переміщення заряду q дорівнює

$$A_{12} = \int_1^2 F_e dl, \quad (1.6)$$

де $F_e = qE_e$ - проекція електричної сили на напрямок руху.

Тоді роботу можна записати у вигляді

$$A_{12} = q \int_1^2 E_e dl = qU_{12}$$

Тут використана різниця потенціалів або напруга

$$U_{12} = \int_1^2 E_e dl, \quad (1.7)$$

яка має сенс роботи з переміщення точкового заряду з точки 1 у точку 2 (рис. 1.1).

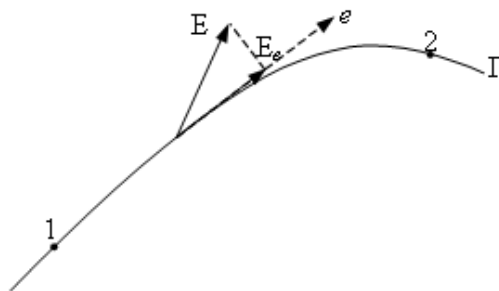


Рисунок 1.1 – До визначення різниці потенціалів

Умови консервативності електричного поля визначає рівняння

$$\oint_{\vec{A}} \vec{E}_e d\vec{l} = 0, \quad (1.8)$$

де E_e - тангенціальна складова напруженості електричного поля.

Справді, умова (1.8) означає, що різниця потенціалів не залежить від форми шляху, що дає можливість ввести поняття потенціалу електричного поля.

З рівняння (1.8) виходить, що кожна точка електричного поля характеризується потенціалом φ , який чисельно дорівнює роботі з переміщення точкового заряду, взятого зі знаком мінус, з нескінченності у задану точку простору (рис. 1.2):

$$\varphi(\mathbf{r}) = - \int_{-\infty}^{\mathbf{r}} \vec{E}_e d\vec{l}. \quad (1.9)$$

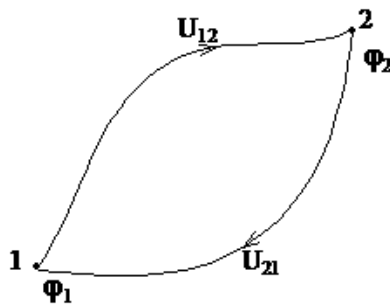


Рисунок 1.2 – До визначення потенціалу електричного поля

Завдяки невизначеності початку відліку, фізичний зміст має лише різниця потенціалів (напруга) U_{12} :

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = - \int_{-\infty}^1 \vec{E}_e d\vec{l} + \int_{-\infty}^2 \vec{E}_e d\vec{l} = \int_1^2 \vec{E}_e d\vec{l} \quad (1.10)$$

Одиниця різниці потенціалів у системі СІ є вольт (В):

$$[U_{12}] = B = \frac{\text{А}\cdot\text{м}}{\text{К}\cdot\text{м}}.$$

1.4 Електроємність. Конденсатори.

Електроємністю називають здатність провідника накопичувати електричні заряди. Виявлено, що заряд, накопичений на поверхні провідника, пропорційний різниці потенціалів (спаду напруги) між поверхнею даного провідника і найближчими провідниками, розташованими у просторі:

$$Q = CU \quad (1.11)$$

Коефіцієнт пропорційності у співвідношенні (1.11) C називається ємністю. Ємність провідника вимірюється у фарадах

$$[C] = \frac{K_e}{B} = \hat{O},$$

та чисельно дорівнює заряду, який необхідно надати провіднику, щоб змінити його потенціал на одиницю.

Фарада – ємність такого провідника, потенціал якого змінюється на 1В при наданні йому заряду в 1Кл.

Поняття ємності використовують для характеристики конденсаторів.

Пару провідників, між якими існує напруга, а силові лінії, що виходять із одного провідника, закінчуються на іншому, називають конденсатором

Конденсатор, що складається з двох провідників у вигляді концентричних сфер, називається сферичним конденсатором. Дві паралельні провідні пластини називають плоским конденсатором. При цьому припускається, що розсіюванням поля на межі конденсатора можна знехтувати. Провідники, що створюють конденсатор, називають його обкладками.

Ємність конденсатора простої форми можна обчислити. Для цього припускають, що на кожній з обкладок знаходиться деякий заряд q , і обчислюють різницю потенціалів між обкладками.

Обчислимо енергію зарядженого конденсатора (рис. 1.3).

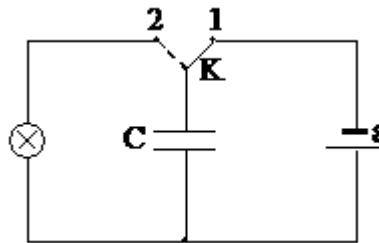


Рисунок 1.4 – Схема розряду конденсатора

При замиканні ключа в положення 2 конденсатор розряджається. Позначимо через U миттєве значення напруги на його обкладках у процесі розрядки. Робота електричних сил при цьому дорівнює

$$dA = U dq,$$

де dq - кількість заряду.

Використовуючи визначення $q = CU$, $dq = CdU$, для роботи dA одержимо

$$dA = CUdU. \quad (1.12)$$

Повну роботу, що дорівнює енергії конденсатора, знайдемо, проінтегрувавши вираз (1.12):

$$A = W = C \cdot \int_0^U u du = \frac{1}{2} CU^2. \quad (1.13)$$

Вираз для енергії зарядженого конденсатора можна подати в одному з таких виглядів:

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2C} q^2 = \frac{1}{2} qU.$$

Енергія конденсатора зосереджена в його електричному полі, тобто у просторі між його обкладками. Розглянемо плоский конденсатор. Його енергія

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_0 S}{d} \right) U^2. \quad (1.14)$$

Вважаючи, що напруженість поля конденсатора дорівнює

$$E = \frac{U}{d},$$

приведемо (1.14) до вигляду

$$W = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 s \cdot U^2 \cdot d}{d^2} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \cdot s \cdot d.$$

Враховуючи, що $s \cdot d = V$ - об'єм між обкладками, знайдемо густину енергії поля $u = \frac{W}{V}$:

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2.$$

Тоді повну енергію можна записати через об'ємний інтеграл

$$W = \int \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} dV$$

Якщо заряд розподілений по об'єму з густиною ρ , то повна енергія визначається інтегралом

$$W = \frac{1}{2} \int U \rho \cdot dV.$$

Приклади розв'язання задач для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

Задача 1. Визначити потенціал φ в точці r , якщо напруженість електричного поля $E(r)$ змінюється по закону E_0/x^2 , де E_0 – постійна величина, x – відстань.

Розв'язання.

$$\varphi(r) = - \int_{-\infty}^r E_e dx = - \int_{-\infty}^r \frac{E_0}{x^2} = - \frac{E_0}{x}$$

Задача 2. Розрахувати ємність плоского конденсатора, який має дві пластини з площею кожної, рівної по 5 см^2 та відстані між ними 1 мм , якщо діелектриком ε : 1) повітря; 2) титанат барію.

Розв'язання.

Ємність плоского конденсатора визначається:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d},$$

де - ε_0 – електрична стала, ε_r – діелектрична проникність речовини (для повітря $\varepsilon_r=1$, для титанату барію $\varepsilon_r=80$), S – площа пластини, d – відстань між пластинами.

$$C_{\text{титанат}} = \frac{(8,85 \times 10^{-12} * 1 * 5 \times 10^{-4})}{1 \times 10^{-3}} = 4,425 \times 10^{-12} \text{ Ґ}$$

$$C_{\text{бат}} = \frac{(8,85 \times 10^{-12} * 80 * 5 \times 10^{-4})}{1 \times 10^{-3}} = 354 \times 10^{-12} \text{ Ф}$$

Якщо пластини мають різні розміри, тоді беріть пластину з меншою площею.

Задача 3. Є конденсатори з ємностями $C_1=2$ мкФ, $C_2=3$ мкФ, $C_3=5$ мкФ. Розрахувати еквівалентні ємності, напругу на кожному конденсаторі, заряди та енергію кожного конденсатора, якщо конденсатори з'єднано: 1) паралельно; 2) послідовно. Напруга джерела $U=100$ В.

Розв'язання.

Для паралельного з'єднання:

$$C_{\text{екв}} = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 3 + 5 = 10 \text{ мкФ} = 1 \times 10^{-5} \text{ Ф}$$

Напруга U на кожному конденсаторі дорівнює 100 В

Розрахуємо заряди конденсаторів та всієї батареї:

$$Q = C U_c$$

$$Q_1 = C_1 U_c = 2 \times 10^{-6} * 100 = 2 \times 10^{-4} \text{ Кл,}$$

$$Q_2 = C_2 U_c = 3 \times 10^{-6} * 100 = 3 \times 10^{-4} \text{ Кл,}$$

$$Q_3 = C_3 U_c = 5 \times 10^{-6} * 100 = 5 \times 10^{-4} \text{ Кл}$$

$$Q_{\text{екв}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (200 + 300 + 500) \times 10^{-4} = 1 \times 10^{-3} \text{ Кл}$$

Енергія конденсаторів:

$$W_1 = \frac{C_1 U_{c_1}^2}{2} = \frac{2 \times 10^{-6} * 100^2}{2} = 0,01 \text{ Дж}$$

$$W_2 = \frac{C_2 U_{c_2}^2}{2} = \frac{3 \times 10^{-6} * 100^2}{2} = 0,015 \text{ Дж}$$

$$W_3 = \frac{C_3 U_{c_3}^2}{2} = \frac{5 \times 10^{-6} * 100^2}{2} = 0,025 \text{ Дж}$$

Загальна енергія $W_e = W_1 + W_2 + W_3 = 0,01 + 0,015 + 0,025 = 0,05$ Дж

Для послідовного з'єднання:

$$\frac{1}{C_{\text{екв}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} = 1,03333 \left(\frac{1}{\text{Ф}} \right)$$

$$C_{\text{екв}} = \frac{1}{1,03333} = 0,96774 \text{ мкФ} = 0,96774 \times 10^{-6} \text{ Ф}$$

Розрахуємо заряд батареї:

$$Q = C_{\text{екв}} * U_c = 0,96774 \times 10^{-6} * 100 = 96,774 \times 10^{-6} \text{ Ф}$$

Розрахуємо напругу на кожному конденсаторі:

$$U_{c_1} = \frac{Q}{C_1} = \frac{96,774 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-6}} = 48,386 \text{ В}$$

$$U_{c_2} = \frac{Q}{C_2} = \frac{96,774 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-6}} = 32,259 \text{ В}$$

$$U_{C_3} = \frac{Q}{C_3} = \frac{96,774 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-6}} = 19,355 \text{ В}$$

Розрахуємо енергію кожного конденсатора:

$$W_1 = \frac{C_1 U_{C_1}^2}{2} = \frac{2 \times 10^{-6} * 48,486^2}{2} = 2,341 \times 10^{-3} \text{ Дж}$$

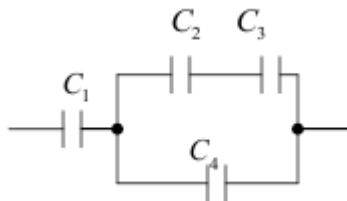
$$W_2 = \frac{C_2 U_{C_2}^2}{2} = \frac{3 \times 10^{-6} * 32,259^2}{2} = 1,561 \times 10^{-3} \text{ Дж}$$

$$W_3 = \frac{C_3 U_{C_3}^2}{2} = \frac{5 \times 10^{-6} * 19,355^2}{2} = 0,96774 \times 10^{-3} \text{ Дж}$$

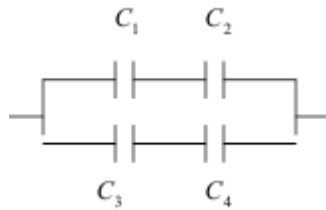
$$W_e = W_1 + W_2 + W_3 = (2,341 + 1,561 + 0,96774) \times 10^{-3} = 4,8386 \times 10^{-3} \text{ Дж}$$

Практичні завдання.

1. Два заряди по 4×10^{-8} Кл розділені слюдою товщиною 1 см і взаємодіють з силою $1,8 \times 10^{-2}$ Н. Визначити діелектричну проникність слюди.
2. В деякій точці поля на заряд 10^{-7} Кл діє сила 4×10^{-2} Н. Знайти напруженість поля в цій точці.
3. Напруженість електричного поля між двома великими металевими пластинками на повинна перевищувати $2,5 \times 10^4$ В/м. Визначити відстань між пластинками, якщо до них буде подана напруга 5000 В.
4. Яку роботу треба здійснити, щоб два заряди 4×10^{-6} Кл і 8×10^{-6} Кл, які розташовані у вакуумі на відстані 0,8 м один від одного, наблизилися до 0,2 м?
5. Потенціальна енергія заряду 2 нКл в електричному полі дорівнює 6 мкДж. Чому дорівнює потенціал поля в цій точці?
6. Визначити електроємність батареї конденсаторів, якщо $C_1 = C_2 = 2$ мкФ, $C_3 = C_4 = 2$ мкФ.



7. Визначити електроємність батареї конденсаторів, якщо $C_1 = 1$ мкФ, $C_2 = 2$ мкФ, $C_3 = 1$ мкФ, $C_4 = 3$ мкФ.



8. Напруженість електричного поля конденсатора ємністю $0,8\text{мкФ}$ дорівнює 100 В/м . Визначити енергію конденсатора, якщо відстань між пластинками дорівнює 1мм .

9. При наданні конденсатору заряду $5 \times 10^{-6}\text{Кл}$ його енергія дорівнює $0,01\text{Дж}$. Визначити напругу на його пластинках.

10. Визначити ємність конденсатора, пластинками якого являються металеві листи площею 50 см^2 , які прокладені 14 листами паперу товщиною $0,02\text{ мм}$.

2. Електричний струм

Метою вивчення теми є закріплення теоретичних знань і придбання практичних навиків розв'язання задач дослідження електричного струму.

Ключові терміни та поняття: закон Ома, провідник, електрорушійна сила, робота, потужність, постійний струм, послідовне з'єднання провідників, паралельне з'єднання провідників, напруга.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти обґрунтування закону Ома.
2. Засвоїти обґрунтування електрорушійної сили.
3. Засвоїти поняття роботи і потужності постійного струму.
4. Засвоїти розрахунок параметрів при послідовному і паралельному з'єднанні провідників.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

2.1 Закон Ома.

Електричний струм – це спрямований рух електронів у провіднику. Для характеристики електричного струму вводять дві основні величини – густина струму та сила струму.

Густина струму дорівнює величині заряду, який проходить за одиницю часу крізь одиничний поперечний переріз провідника. Якщо n - це концентрація електронів, v - їх швидкість у напрямку струму, то вектор густини струму дорівнюватиме

$$\vec{j} = ne\vec{V}. \quad (2.1)$$

Силою струму називають потік вектора густини струму крізь поперечний переріз площею s :

$$J = \int_s \vec{j}_n dS. \quad (2.2)$$

Одиницею сили струму є ампер (А). Один ампер – це сила струму, при якій крізь поперечний переріз провідника проходить заряд 1Кл за час 1с.

Якщо провідником тече струм, то потенціал в різних точках провідника неоднаковий, а поверхня не є еквіпотенціальною. Якщо між точками a і b (рис. 2.1) тече струм, то між цими точками існує напруга, яка тим більша, чим ближча точка c до другого кінця дроту.

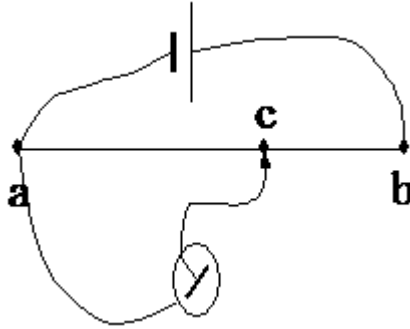


Рисунок 2.1 – Падіння напруги повздовж провідника з струмом

Тобто за наявності струму існує спад напруги вздовж провідника. Спад напруги означає, що існує тангенційна складова напруженості електричного поля E_t , спрямована вздовж провідника (рис. 2.2).

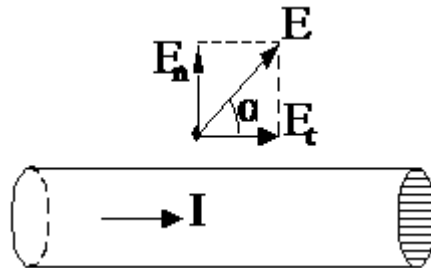


Рисунок 2.2 – Електричне поле провідника з струмом

Для підтримки електричного струму треба постійно виконувати роботу з подолання сил опору, які виникають при спрямованому русі електронів через зіткнення електронів з атомними залишками та атомами домішок у провіднику.

Для провідників існує однозначна залежність між напругою U , прикладеною до кінців провідника, та силою струму в ньому:

$$J = f(U). \quad (2.3)$$

Ця залежність називається вольт-амперною характеристикою даного провідника. Для металів ця залежність пропорційна і має назву закону Ома:

$$J = GU. \quad (2.4)$$

Коефіцієнт пропорційності G називається електропровідністю провідника, а величина обернена електропровідності називається електричним опором R :

$$R = \frac{1}{G}. \quad (2.5)$$

Одиниця опору називається Ом. 1 Ом – це опір такого провідника, в якому при напрузі між його кінцями в 1 В виникає струм силою 1А:

$$1 \text{ Ом} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

Для провідників у вигляді циліндра опір визначається за формулою

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.6)$$

де l - довжина провідника, S - його поперечний переріз, ρ - питомий опір даної речовини.

2.2. Сторонні сили. Електрорушійна сила.

Електростатичне поле завжди переміщує заряди так, щоб різниця потенціалів зменшувалась. В результаті цього електростатичне поле (поле конденсаторів) не може бути джерелом постійного струму. Справді, наявність струму буде супроводжуватись переходом зарядів з однієї обкладки на іншу так, що заряди обкладок будуть зменшуватись. При замкненні такого кола різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ дорівнюватиме нулю:

$$\oint E dl = 0. \quad (2.7)$$

Для того, щоб одержати постійний струм, на заряди в електричному колі повинні діяти сили, які відрізнялись би від сил електростатичного поля. Такі сили називаються *сторонніми силами*. Будь-який пристрій, в якому виникають сторонні сили, називається джерелом струму. Якщо позначити напруженість поля сторонніх сил E^x , то робота з переміщення точкового заряду в замкненому контурі під дією сторонніх сил, називається *електрорушійною силою* та дорівнюватиме

$$\mathcal{E} = \oint_A E^x dl. \quad (2.8)$$

Електрорушійна сила вимірюється за напругою на клеммах розімкненого джерела струму. Тоді на ділянці кола (рис. 2.3) на заряд діятиме сила

$$F = eE_\tau + eE^x,$$

де E_τ - електростатичне поле, а E^x - поле сторонніх сил.

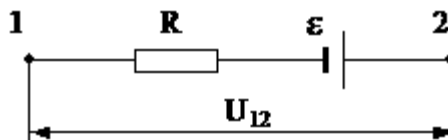


Рисунок 2.3 – Напруга на ділянці кола

Робота, що виконується з переносу заряду на ділянці кола дорівнюватиме

$$A_{12} = e \int_1^2 E_\tau dl + e \int_1^2 E^x dl = e (\varphi_1 - \varphi_2) + e \cdot \mathcal{E}_{12} = eU_{12}, \quad (2.9)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_\tau dl$ - різниця потенціалів на ділянці кола,

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 E^x dl,$$

де E^x - е.р.с. сторонніх сил, а

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} - \text{спад напруги на ділянці кола.}$$

Очевидно, що для замкненого кола різниця потенціалів дорівнює нулю:

$$\oint E_r dl = 0,$$

а спад напруги дорівнюватиме е.р.с.:

$$U = \varepsilon.$$

Таким чином, спадом напруги на ділянці кола називається величина, яка чисельно дорівнює роботі електростатичних та сторонніх сил при переміщенні точкового позитивного заряду.

За відсутності сторонніх сил на ділянці кола напруга U_{12} співпадає з різницею потенціалів

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Закон Ома для розімкненого кола має вигляд

$$J = \frac{U_{12}}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R}, \quad (2.10)$$

де R - повний опір кола, який включає внутрішній опір джерела струму.

Якщо розглянути коло, в якому діє е.р.с., то закон Ома для замкненого кола набуває вигляду:

$$J = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (2.11)$$

де r - внутрішній опір джерела струму.

2.3 Робота і потужність постійного струму. Закон Джоуля-Ленца.

Електричний струм виконує роботу при переміщенні заряду по колу. Якщо на деякій ділянці кола існує напруга U , то за час t через цю ділянку кола пройде заряд $q = Jt$, і робота електричного струму на цій ділянці дорівнюватиме

$$A = qU = UJt.$$

Потужність струму, тобто робота за одиницю часу, дорівнює

$$P = \frac{A}{t} = JU.$$

Якщо врахувати закон Ома, то робота електричного струму дорівнюватиме

$$A = RJ^2t. \quad (2.12)$$

Цей закон називається *законом Джоуля-Ленца*.

При проходженні струму через нерухомі провідники, робота струму витрачається на нагрів провідника. Кількість теплоти, що виділяється у провіднику при проходженні через нього електричного струму, згідно з законом Джоуля-Ленца, дорівнює

$$Q = RJ^2t \quad (2.13)$$

Одиниця потужності – Ватт (Вт)

$$[P] = \text{Ватт} = \frac{\dot{A}e}{\tilde{n}}.$$

2.4 Послідовне і паралельне з'єднання провідників.

Розглянемо послідовне з'єднання опорів (рис. 2.4). Струм J в усіх резисторах однаковий, спад напруги на кожному опорі дорівнює

$$U_1 = JR_1, \quad U_2 = JR_2.$$

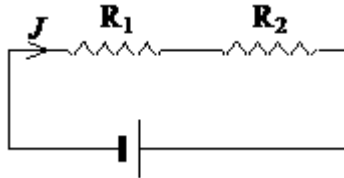


Рисунок 2.4 - Послідовне з'єднання провідників

Повний спад напруги дорівнює сумі:

$$U = U_1 + U_2 = J(R_1 + R_2).$$

Порівнюючи з законом Ома $U = JR$, одержимо повний опір при послідовному з'єднанні

$$R = R_1 + R_2.$$

При паралельному з'єднанні (Рис. 2.5) напруга між точками a і b однакова $U_1 = U_2 = U$, а струм у точці a розгалужується

$$J = J_1 + J_2. \quad (2.14)$$

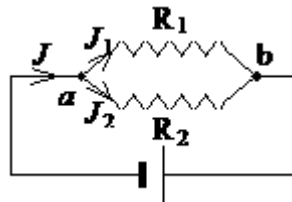


Рисунок 2.4 - Паралельне з'єднання провідників

Тоді спад напруги на опорах R_1 і R_2 дорівнює

$$U_1 = J_1 R_1, \quad U_2 = J_2 R_2, \quad (U_1 = U_2 = U) \quad (2.15)$$

Враховуючи визначення струмів із (2.14)

$$J_1 = \frac{U}{R_1}, \quad J_2 = \frac{U}{R_2},$$

для повного струму одержуємо

$$J = J_1 + J_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{U}{R},$$

де R - повний опір паралельного кола:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Приклади розв'язання задач для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

Задача 1. Визначити опір провідника із ніхрому довжиною 10 м та площею поперечного перерізу $0,1 \text{ мм}^2$, якщо питомий опір ніхромового провідника

$1,1 \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Розв'язання.

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1,1 \times 10^{-6} * 10}{0,1 \times 10^{-6}} = 110 \hat{\Omega}$$

Задача 2. Розрахувати опір тисячі витків мідного проводу діаметром 0,2 мм, намотаного на котушку із середнім діаметром 6 см.

Розв'язання. Визначимо довжину проводу (довжина одного витка $l_0 = \pi D_c$, де D_c – діаметр каркаса котушки, на який намотано котушку,

$$l_0 = \pi D_c = 3,14 * 0,06 = 0,01884 \hat{\text{м}} :$$

$$l = l_0 N = 0,01884 * 1000 = 18,84 \hat{\text{м}} .$$

Розрахуємо площу поперечного перерізу провідника:

$$S = \frac{\pi D_{\text{пр}}^2}{4} = \frac{3,14 * 0,2^2}{4} = 0,0314 \hat{\text{мм}}^2 \text{ (} D_{\text{пр}} \text{ – діаметр провідника)}.$$

Опір котушки:

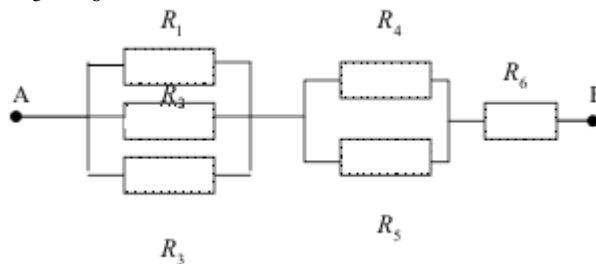
$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1,75 \times 10^{-8} * 18,84}{0,0314 \times 10^{-6}} = 10,5 \hat{\Omega}$$

Практичні завдання.

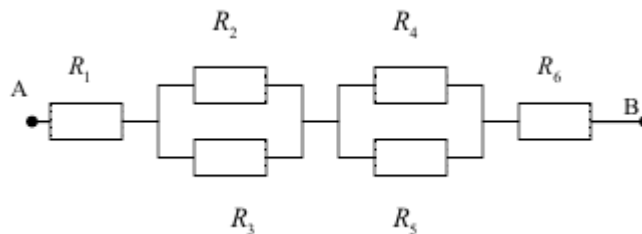
1. Визначити площу поперечного перерізу алюмінієвого провідника, в якому при силі струму 1,5 А падіння напруги складає 9 В. Довжина провідника 5 м.
2. В провіднику, довжина якого 14 м і діаметр 2 мм, встановлюється струм 2 А при нарузі 18 В. Визначити питомий опір провідника і визначити по таблиці назву матеріалу.
3. Допустимий струм для ізольованого мідного провідника площею поперечного перерізу 1 мм^2 при довготривалій роботі складає 11 А. Скільки метрів такої проволони, можна включити в коло з напругою 110 В?
4. Визначити опір електричного паяльника потужністю 300 Вт, включеного в мережу напругою 220 В.
5. Електричний двигун, обмотка якого має опір 1 Ом, працює від сітки з напругою 120 В при струмові 10 А. Яку потужність споживає двигун?

6. Електрична праска потужністю 400 Вт вмикається в коло з напругою 220 В. Визначити силу струму в нагрівальному елементі праски і його опір.

7. Визначити загальний струм, якщо напруга між точками А та В дорівнює 200 В. $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=40$ Ом



8. Визначити загальний струм, якщо напруга між точками А та В дорівнює 300 В. $R_1=15$ Ом, $R_2=R_3=60$ Ом, $R_4=20$ Ом, $R_5=R_6=40$ Ом



9. ЕРС джерела електричної енергії дорівнює 100В. При зовнішньому опорі 40 Ом сила струму в колі 2А. Знайти падіння напруги всередині джерела і його внутрішній опір.

10. ЕРС джерела струму дорівнює 220 В, внутрішній опір 2,5 Ом. Який треба взяти опір зовнішньої ділянки кола, щоб сила струму дорівнювала б 8 А?

3. Електричні коливання

Метою вивчення теми є закріплення теоретичних знань і придбання практичних навиків розв'язання задач по розрахунку параметрів коливальних електричних контурів.

Ключові терміни та поняття: математична модель, формальна модель, фізична модель, електрична модель, фізико-топологічна модель, технологічна модель.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти методику визначення опору провідника за заданими параметрами.

2. Засвоїти методику розрахунку параметрів котушок індуктивності

3. Засвоїти методику розрахунку сили струму в колі, падіння напруги, активного опору та індуктивності.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

3.1. Коливальний електричний контур.

Розглянемо електричний контур, що має конденсатор з ємністю C та соленоїд з індуктивністю L . Припустимо, що ми зарядили конденсатор при

розімкненому контурі. Між пластинами конденсатора виникає електричне поле E , з енергією

$$U = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2. \quad (3.1)$$

Замкнемо контур. Конденсатор почне розряджатися, а його електричне поле буде зменшуватися.

Одночасно в контурі виникає електричний струм завдяки розряду конденсатора, а в соленоїді виникає магнітне поле. Через деякий час, що дорівнює четвертій частці періоду коливань, конденсатор розряджається повністю й електричне поле зникає, а магнітне поле досягає максимуму. При цьому енергія електричного поля переходить в енергію магнітного поля

$$U = \frac{1}{2\mu_0} B^2. \quad (3.2)$$

У подальший момент часу магнітне поле зменшується, що породжує струм самоіндукції, який спрямований у тому ж напрямку, що і струм розряду конденсатора. Таким чином, конденсатор перезаряджається і між пластинами з'являється електричне поле протилежного напрямку. За час, що дорівнює половині періоду коливань, магнітне поле зникає зовсім, електричне поле досягає максимального значення, при цьому енергія магнітного поля перетворюється в енергію електричного поля. Процес розрядження конденсатора повторюється нескінченно, а з ним і коливання заряду та струму в контурі (за умови, що опір провідників дорівнює нулю).

Виведемо рівняння вільних коливань в електричному контурі. Згідно з законом збереження енергії (другий закон Кірхгофа) сума спадів напруги в контурі дорівнює сумі е.р.с. Спад напруги на конденсаторі

$$U_c = \frac{q}{C}, \quad (3.3)$$

а е.р.с. самоіндукції

$$\varepsilon_c = -L \frac{dJ}{dt}. \quad (3.4)$$

Тоді закон збереження енергії в контурі матиме вигляд:

$$\frac{q}{C} = -L \frac{dJ}{dt}. \quad (3.5)$$

Перетворюючи це рівняння відносно заряду q :

$$J = \frac{dq}{dt},$$

одержуємо

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0,$$

або

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0. \quad (3.6)$$

Вираз

$$\omega_o^2 = \frac{1}{LC}, \quad (3.7)$$

ω_o має сенс частоти вільних коливань, а рівняння (3.6) збігається з рівнянням гармонічних коливань

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_o^2 q = 0, \quad (3.8)$$

розв'язок якого визначається гармонічною функцією:

$$q = A \cdot \cos(\varpi_o + \varphi) \quad (3.9)$$

Враховуючи початкові умови:

$$q(t=0) = q_o, \quad j = \left(\frac{dq}{dt} \right)_{t=0} = 0,$$

розв'язок (3.8) має вигляд

$$q = q_o \cdot \cos \varpi_o t \quad (3.10)$$

Таким чином, заряд в електричному контурі змінюється за гармонічним законом де q_o - амплітуда коливань. Повний заряд конденсатора,

$$\varpi_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.11)$$

власна частота коливань контура, період коливань контура T визначається формулою:

$$T = \frac{2\pi}{\varpi_o} = 2\pi\sqrt{LC} \quad (3.12)$$

Напруга на конденсаторі

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{q_o}{C} \cos \varpi_o t = U_o \cos \varpi_o t \quad (3.13)$$

де $U_o = \frac{q_o}{C}$ - амплітуда напруги, яка дорівнює початковій напрузі на конденсаторі.

Сила струму в контурі визначається рівнянням

$$J = -\frac{dq}{dt} = q_o \varpi_o \sin \varpi_o t = J_o \sin \varpi_o t \quad (3.14)$$

де $J_o = q_o \varpi_o$ - амплітуда струму. Знак мінуса у рівнянні (3.14) обраний тому, що напрямок струму відповідає зменшенню заряду конденсатора.

Тому що $\sin(\varpi_o t) = \cos(\varpi_o t - \frac{\pi}{2})$, то коливання струму

$$J = J_0 \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.15)$$

відстають від коливання заряду на $\frac{\pi}{2}$.

Приклади розв'язання задач для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

Задача 1. Визначити опір провідника із ніхрому довжиною 10 м та площею поперечного перерізу $0,1 \text{ мм}^2$, якщо питомий опір ніхромового провідника

$1,1 \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Розв'язання.

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1,1 \times 10^{-6} * 10}{0,1 \times 10^{-6}} = 110 \hat{\text{Ом}}$$

Задача 2. Розрахувати опір тисячі витків мідного проводу діаметром 0,2 мм, намотаного на котушку із середнім діаметром 6 см.

Розв'язання.

Визначимо довжину проводу (довжина одного витка $l_0 = \pi D_k$, де D_k – діаметр каркаса котушки, на який намотано котушку,

$$l_0 = \pi D_k = 3,14 * 0,06 = 0,01884 \hat{\text{м}} :$$

$$l = l_0 N = 0,01884 * 1000 = 18,84 \hat{\text{м}} .$$

Розрахуємо площу поперечного перерізу провідника:

$$S = \frac{\pi D_{\text{пр}}^2}{4} = \frac{3,14 * 0,2^2}{4} = 0,0314 \hat{\text{мм}}^2 ,$$

де ($D_{\text{пр}}$ – діаметр провідника)

Опір котушки:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1,75 \times 10^{-8} * 18,84}{0,0314 \times 10^{-6}} = 10,5 \hat{\text{Ом}}$$

Практичні завдання.

1. Яку індуктивність треба включити в коливальний контур, що при ємності в 2 мкФ отримати звукову частоту 1000 Гц? Опором контуру знехтувати.

2. Котушку, індуктивність якої складає 3×10^{-5} Гн, приєднано до плоского конденсатора з площею пластин 100 см^2 і відстанню між ними 0,1 мм. Чому дорівнює діелектрична проникність середовища, яке заповнює простір між пластинами, якщо контур резонує на хвилю довжиною 750 м?

3. Рівняння зміни різниці потенціалів з часом на обкладинках конденсатора в коливальному контурі представлено у наступному вигляді: $U(t) = 50 \cos 10^4 \pi t \text{ В}$. Ємність конденсатора 10^{-7} Ф. Знайти: 1) період коливань; 2) індуктивність

контур; 3) закон, за яким змінюється струм в контурі; 4) довжину хвилі, яка відповідає цьому контуру.

4. Котушка довжиною 50 см та площею поперечного перерізу 10 см^2 підключена до кола змінного струму з частотою 50 Гц. Число витків котушки $N=3000$. Знайти активний опір котушки, якщо відомо, що зсув фаз між напругою та струмом дорівнює 60° .

5. Два конденсатора ємністю $C_1=0,2 \text{ мкФ}$ та $C_2=0,1 \text{ мкФ}$ підключено послідовно в коло змінного струму напругою 220 В та частотою 50 Гц. Знайти: 1) силу струму в колі; 2) падіння потенціалу на першому та на другому конденсаторі.

6. Обмотка котушки складається з 500 витків мідного дроту з площею поперечного перерізу в 1 мм^2 . Довжина котушки 50 см, діаметр котушки 5 см. При якій частоті змінного струму повний опір котушки буде вдвічі більше її активного опору.

7. Котушка довжиною 24 см та радіусом 2 см має обмотку із 1000 витків мідного дроту площею поперечного перерізу 1 мм^2 . Котушку підключено в коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку частину повного опору котушки складає: 1) активний опір; 2) індуктивний опір.

8. В коло змінного струму напругою 220 В та частотою 50 Гц включено послідовно ємність $35,4 \text{ мкФ}$, активний опір 100 Ом та індуктивність $0,7 \text{ Гн}$. Знайти силу струму в колі і падіння напруги на ємності, омичному опорі та індуктивності.

9. Індуктивність $L=2,26 \times 10^{-2} \text{ Гн}$ та активний опір R включені паралельно в коло змінного струму з частотою 50 Гц. Знайти величину R , якщо відомо, що зсув фаз між напругою та струмом дорівнює 60° .

10. Активний опір R та індуктивність L з'єднано паралельно та підключено до кола змінного струму напругою 127 В та частотою 50 Гц. Знайти активний опір та індуктивність, якщо відомо, що потужність, яка поглинається колом, дорівнює 404 Вт , а зсув фаз між напругою і струмом дорівнює 60° .

4. Властивості р-п переходу

Метою вивчення теми є закріплення теоретичних знань і придбання практичних навиків розв'язання задач по розрахунку параметрів р-п переходу.

Ключові терміни та поняття: напівпровідник, концентрація, електрони, дірки, дифузія, дрейф, потенційний бар'єр, пряме включення, зворотне включення.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти методику вимірювання електричних параметрів р-п переходу.

2. Засвоїти методику розрахунку бар'єрної ємності р-п переходу

3. Засвоїти використання математичної моделі р-п переходу для аналізу вольт-амперної характеристики.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

4.1 Пряме і зворотне включення р-п переходу

Однорідні напівпровідники знаходять вельми вузьке використання. Наприклад, вони безпосередньо використовуються лише у вигляді різного роду резисторів. Принцип дії більшості напівпровідникових приладів заснований на фізичних явищах, що відбуваються в області контакту твердих тіл. На даний момент переважно використовуються контакти типа: напівпровідник - напівпровідник, метал - напівпровідник, метал - діелектрик - напівпровідник. Якщо перехід створюється між напівпровідниками n-типа і р-типа, то його називають електронно-дірковий або р-п переходом. Електронно-дірковий перехід створюється в одному кристалі напівпровідника з використанням достатньо складних технологій.

Розглядатимемо р-п перехід, в якому концентрації донорів і акцепторів змінюються стрибком на границі розділу областей двох типів напівпровідника. Рівноважна концентрація дірок в р-області значно перевищує їх концентрацію в n-області. Аналогічно це справедливо і для електронів n-області. Нерівномірний розподіл концентрацій однойменних носіїв зарядів в кристалі призводить до виникнення дифузії електронів із n-області в р-область і дірок із р-області в n-область. Такий рух створює дифузійний потік електронів і дірок. Електрони і дірки, переходячи через границю контакту двох областей, залишають в приконтатній області діркового напівпровідника некомпенсований заряд негативних іонів акцепторних домішок, а в електронному напівпровіднику - некомпенсований заряд позитивних донорних іонів. Таким чином, електронний напівпровідник заряджається позитивно, а дірковий - негативно. У міру того як носії заряду переходять через границю розділу між областями, заряд обох областей зростає. Іншими словами, область n набуває позитивного заряду із-за втрати електронів. Відповідно область р стає негативно зарядженою із-за дірок, що рекомбінували. В результаті поблизу р-п границі утворюється електричне поле, направлене так, щоб перешкодити подальшій дифузії носіїв заряду між двома областями. Цьому полю відповідає різниця потенціалів U_k між р- і n- областями, яка називається контактною або бар'єрною різницею потенціалів.

Завдяки присутності поля, що діє на всі заряди, які знаходяться в околиці р-п переходу, діє сила, направлена убік, протилежний від границі розділу областей для основних носіїв заряду, і, навпаки, до границі - для неосновних носіїв заряду. Під дією цієї сили неосновні носії заряду починають рухатися через границю розділу двох середовищ в напрямі, зворотному руху основних носіїв заряду (відбувається дрейф неосновних носіїв заряду). Врешті-решт між цими двома потоками встановлюється рівновага: кількість основних носіїв заряду, що пересікають границю, дорівнює компенсуючому потоку неосновних носіїв, що пересікають границю під дією електричного поля. У цьому рівноважному стані сумарний струм (дифузії і дрейфу) через границю,

яка розділяє p і n області, дорівнює нулю. Тобто, $I_{диф} + I_{др} = 0$. Область об'ємних зарядів називають збідненим шаром (або затримуючим шаром), маючи на увазі різке зниження концентрації рухливих носіїв заряду в обох її частинах за рахунок рекомбінації.

В більшості випадків p - n перехід можна ідеалізувати так, як показано на рисунку 4.1.

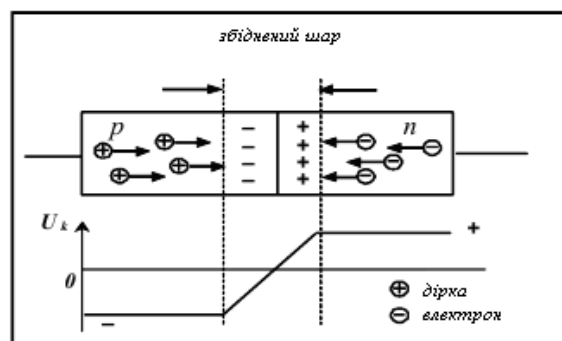


Рисунок 4.1 – Електрична структура p - n – переходу у стані рівноваги

Важливими параметрами p - n переходу є:

- висота потенційного бар'єру (контактна різниця потенціалів U_k), яка залежить, як від матеріалу, з якого виготовлений кристал напівпровідника, так і від температури кристала, точніше, від концентрації неосновних (теплових, оскільки має місце теплове походження) носіїв вільних зарядів;

- ширина p - n переходу (збіднений шар). Відомо, що на ширину збідненого шару (затримуючого шару) істотно впливає концентрація домішкових атомів. Цим фактом часто користуються для надання напівпровідниковим приладам необхідних властивостей.

4.2 Пряме включення електронно-діркового переходу

Прикладемо зовнішню напругу до p - n структури (рис. 4.2). Якщо до p -області прикладений плюс, а до n -області мінус, то швидкість дифузії основних носіїв заряду зростає. У такій ситуації говорять, що p - n перехід має пряме зміщення. Оскільки опір p - n переходу значно перевищує опір нейтральних p - і n -областей, то зовнішня напруга майже повністю падає на цьому переході.

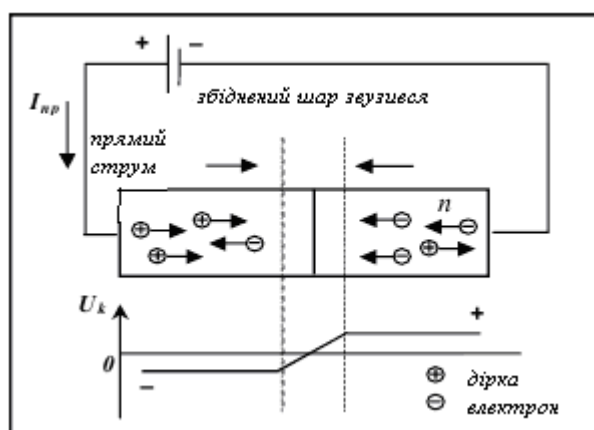


Рисунок 4.2 - Пряме включення р-п переходу
Зворотнє включення р-п переходу

Пряма напруга створює в переході зовнішнє електричне поле, направлене назустріч дифузійному. Напруженість результуючого поля падає, висота потенційного бар'єру зменшується, швидкість дифузії основних носіїв заряду зростає, в зовнішньому ланцюзі виникає прямий струм $I_{пр}$, перехід відкривається.

При включенні р-п переходу у зворотному напрямі (рис. 4.3) зовнішня зворотна напруга створює електричне поле, яке співпадає по напрямку з дифузійним, що призводить до зростання потенційного бар'єру і збільшення ширини збідненого шару.

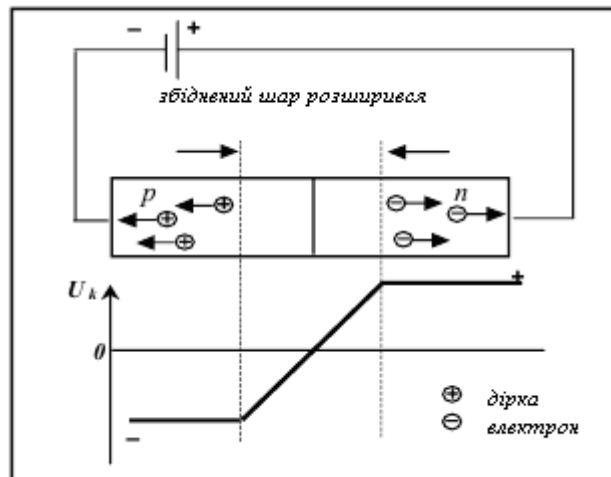


Рисунок 4.3 – Зворотнє включення р-п переходу

Швидкість дифузії зменшується, говорять, що р-п перехід має зворотний зсув. При зворотному зсуві результуючий струм з'являється за рахунок міграції неосновних носіїв заряду через границю розділу областей під дією внутрішнього поля. Але цей струм дуже малий, тому що кількість неосновних носіїв заряду в кожній області невелика.

Зростання потенційного бар'єру зменшує дифузійні струми основних носіїв заряду (менше їх число долає збільшений потенційний бар'єр). Для неосновних носіїв заряду поле в р-п переході залишається прискорюючим, і тому дрейфовий струм не зміниться.

Зменшення дифузійного струму призведе до порушення сталої рівноваги. Через перехід проходить результуючий струм, який визначається, в основному, струмом дрейфу неосновних носіїв заряду. Цей струм дуже малий, майже дорівнює нулю.

4.2 ВАХ р-п переходу

Вольт-амперна характеристика діода (рис. 4.4) залежність струму, що протікає через діод від прикладеної до нього напруги) описується виразом:

$$i = i_0 \exp\left(\frac{U}{\varpi t} - 1\right) \quad (4.1)$$

де: I_S – значення струму насичення, теплового (I_0) або зворотного ($I_{звор}$) струму; U_d – напруга на р-п переході (на діоді); $\phi_t = kT/q$ – тепловий потенціал, рівний контактній різниці потенціалів на границі р-п переходу за відсутності зовнішньої напруги (при нормальній температурі $\phi_t = 0.025V$); k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, q – заряд електрона.

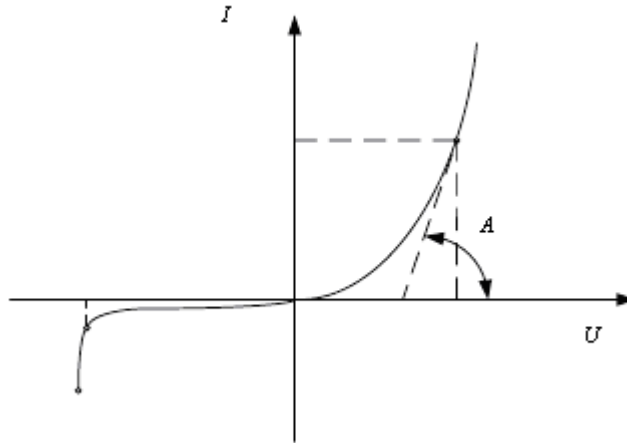


Рисунок 4.4 – ВАХ діода

Напівпровідниковий діод характеризується статичним і диференціальним (динамічним) опором, які легко визначити по ВАХ. Диференціальний опір (R_d) чисельно дорівнює відношенню нескінченно малого приросту напруги до відповідного приросту струму в заданому режимі роботи діода і може бути визначений графічно як котангенс кута A на ВАХ:

$$R_d = \frac{dU}{dI} = \frac{\phi_t}{(I_{i\partial} + I_{\partial i\partial})} \quad (4.2)$$

При умові $I_{пр} \gg I_{звор}$ $R_d = \frac{\phi_t}{I_{i\partial}}$

Статичний опір ($R_{ст}$) чисельно дорівнює відношенню напруги на елементі U до струму I , що пройшов через цей елемент. При прямому включенні джерела живлення збіднена зона в напівпровіднику звужується, а при значній напрузі майже зовсім пропадає (прямий зсув) – пряма гілка ВАХ діода. При цьому на р-п переході присутнє постійне падіння напруги ((0,1-0,2) В - для германію і 0,6В – для кремнію).

Струм через діод в даному випадку можна визначити по формулі:

$$I_{i\partial} = \frac{(E - U_{i\partial})}{R} \quad (4.3)$$

При зворотному включенні джерела живлення збіднена область р-п переходу збільшується, розширюючи кордон розділу і тим самим перешкоджає проходженню струму (зворотна гілка ВАХ р-п переходу). Тут відбувається зворотній зсув р-п переходу.

Струм через діод визначається як:

$$I_{\zeta\hat{a}\hat{i}\hat{d}} = \frac{(E - U_{\zeta\hat{a}\hat{i}\hat{d}})}{R} \quad (4.4)$$

Дифузійна ємність виникає поблизу контактного шару р-п переходу за рахунок зміни заряду, викликаної зміною прямої напруги. Залежність Сдиф від значення прямого струму Iпр має вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} &= \frac{q}{kT} (I_{i\hat{d}} + I_{i\hat{a}\hat{d}}) \tau_{\hat{d}}, \\ \tilde{N}_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} &= \frac{q}{kT} (I_{i\hat{d}} + I_{\zeta\hat{a}\hat{i}\hat{d}}) \tau_{\hat{d}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

де τ_p – час життя дірок в базі діода (у переході п-типа).

Дифузійна ємність буде тим більшою, чим більше прямий струм через перехід і чим більше час життя неосновних носіїв заряду в області бази діода (область з меншою концентрацією носіїв, п-область). Дифузійна ємність стає рівною нулю при $I_{пр} = -I_{звор}$. На зовнішніх затискачах $C_{диф}$ дає ємнісне фазове зрушення між струмом і напругою.

Бар'єрна ємність виникає при зворотній напрузі на переході і зумовлена зміною в ньому об'ємного заряду. $C_{заг} = C_{диф} + C_{бар}$. $C_{диф} > C_{бар}$ (по абсолютній величині).

В загальному вигляді бар'єрна ємність може бути представлена:

$$C_{\hat{a}\hat{a}\hat{d}\hat{d}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i S_{p-n}}{W}, \quad (4.6)$$

де S_{p-n} – площа р-п переходу, W – величина області просторового заряду р-п переходу, ϵ_i – діелектрична проникність напівпровідника.

Також величину бар'єрної ємності для різкого р-п переходу можна представити:

$$C_{\hat{a}\hat{a}\hat{d}\hat{d}} = \frac{\sqrt{2qN_a \epsilon_i \epsilon_0}}{2\sqrt{\phi_{\hat{E}} - U_{\hat{A}}}} = \frac{\hat{E}}{\sqrt{\phi_{\hat{E}} - U_{\hat{A}}}}, \quad (4.7)$$

де N_b – концентрація домішок у високоомній області р-п переходу, ϕ_k – значення потенціального бар'єру.

Приклади розв'язання задач для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

Задача 1. Германієвий напівпровідниковий діод, який має зворотній струм насичення 25 мкА, працює при прямій напрузі, яка дорівнює 0,1 В та $T=300$ К. Визначити: а) опір діода постійному струму R_0 ; б) диференційний опір R_d .

Розв'язання.

Знайдемо струм при прямій напрузі:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{U_{\hat{A}}}{\phi_t}\right) - 1 \right) = 25 \times 10^{-6} \left(\exp\left(\frac{1,6 \times 10^{-19} * 0,1}{(1,38 \times 10^{-23} * 300)}\right) - 1 \right) = 1,17 \times 10^{-3} \text{ А}$$

постійному струму: $R_0 = \frac{U_{\hat{A}}}{I} = \frac{0,1}{1,17 \times 10^{-3}} = 85 \hat{\Omega}$

Диференційний опір:

$$R_{\bar{A}}^{-1} = \frac{dI}{dU} = I_0 \left(\frac{q}{kT} \right) \exp\left(\frac{qU_{\bar{A}}}{kT} \right) = 25 \times 10^{-6} * (38,6) * 48 = 46 \times 10^{-3} \tilde{N}\hat{i}$$

$$R_{\bar{A}} = \frac{1}{46 \times 10^{-3}} = 21,6 \hat{i}$$

Або приблизно, з урахуванням того, що $I \gg I_0$, $R_{\bar{A}}^{-1} = \frac{dI}{dU} = \frac{q}{kT} (I_0 + I) \approx \frac{qI}{kT}$

$$\text{звідки } R_{\bar{A}} \approx \frac{kT}{qI} = \frac{1,38 \times 10^{-23} * 300}{1,6 \times 10^{-19} * 1,17 \times 10^{-3}} = 22 \hat{i}$$

Задача 2. Бар'єрна ємність діода дорівнює 200 пФ при зворотній напрузі 2 В. Яку зворотню напругу треба прикласти до діода, щоб зменшити ємність до 50 пФ, якщо контактна різниця потенціалів дорівнює 0,82 В.

Розв'язання.

Величину бар'єрної ємності можна представити наступним чином:

$$C = \frac{K}{\sqrt{U_{\bar{A}} + \varphi_e}}$$

При $U_{\bar{A}} = 2$ В ємність $C = 200$ пФ, тоді

$$K = 200 \times 10^{-12} (2 + 0,82)^{1/2} = 3,35 \times 10^{-10} \text{ пФ} \cdot \text{В}^{1/2}$$

Знаходимо зворотню напругу, при якій $C = 50$ пФ:

$$50 \times 10^{-12} = \frac{3,35 \times 10^{-10}}{(U_{\bar{A}} + 0,82)^{1/2}}, U_{\bar{A}} = 44,1 \text{ В.}$$

Практичні завдання.

1. Розрахувати пряму напругу на р-п – переході при струмі діода 1 мА, якщо зворотній струм насичення I_0 при $T = 300$ К дорівнює: а) 1 мкА; б) 1 нА.
2. Струм, який протікає в ідеальному р-п – переході при великій зворотній напрузі та $T = 300$ К, дорівнює 2×10^{-7} А. Знайти струм, який протікає при прямій напрузі, яка дорівнює 0,1 В.
3. Германієвий сплавний р-п – перехід має зворотній струм насичення $I_0 = 1$ мкА, а кремнієвий з такими ж розмірами – струм $I_0 = 10^{-8}$ А. Розрахуйте та порівняйте прямі напруги на переходах при $T = 293$ К, якщо через кожний діод протікає струм 100 мА.
4. Розрахувати та побудувати ВАХ ідеального напівпровідникового діода при $T = 300$ К, якщо зворотній струм насичення діода $I_0 = 10$ мА, припустивши, що діод має омичний опір р- та п- областей, рівною 25 Ом. Розрахунок провести в інтервалі напруг від 0 до – 10 В (через 1 В) та від 0 до 0,2 В (через 0,05 В).
5. Діод має зворотній струм насичення $I_0 = 10$ мкА, напруга, прикладена до діода, дорівнює 0,5 В. Користуючись спрощеним рівнянням ВАХ діода, знайти відношення прямого струму до зворотного при $T = 300$ К.

6. В ідеальному р-п – переході пряма напруга 0,1 В викликає деякий струм носіїв заряду при $T=300$ К. Яку потрібно прикласти пряму напругу, щоб струм збільшився у 2 рази?
7. Для ідеального р-п – переходу при $T=300$ К визначити: 1) яку напругу необхідно прикласти до переходу, що отримати прямий струм, дорівнює зворотному струму насичення I_0 ; 2) яку зворотну напругу необхідно прикласти до переходу для отримання струму, в 100 разів більше, ніж зворотний струм насичення I_0 .
8. При $T=300$ К зворотній струм насичення ідеального германієвого діода $I_0=30$ мкА. Знайти диференційний опір діода при прямій та зворотній напругах, рівних 0,2 В.
9. Розрахувати бар'єрну ємність германієвого напівпровідникового діода з площею поперечного перерізу р-п – переходу $S=1$ мм² та з шириною області, збідненої носіями заряду, рівною 2×10^{-4} см.
10. Знайти бар'єрну ємність германієвого р-п – переходу, якщо питомий опір р-області $\rho_p=3,5$ Ом*см, контактна різниця потенціалів $\phi_k=0,35$ В, прикладена зворотна напруга дорівнює 5 В, а площа поперечного перерізу р-п – переходу $S=1$ мм².

Питання для повторення та актуалізації знань

1. Електричне поле, елементарний заряд.
2. Закон Кулона.
3. Силові лінії електричного поля.
4. Напруженість електричного поля.
5. Принцип суперпозиції електричного поля.
6. Робота по переміщенню точкового заряду.
7. Потенціальна енергія електричного поля.
8. Потенціал електричного поля.
9. Різниця потенціалів.
10. Еквіпотенціальні поверхні.
11. Зв'язок між напруженістю і потенціалом електричного поля.
12. Провідники у електричному полі.
13. Індуковані заряди.
14. Ефект екранування.
15. Електроємність.
16. Конденсатори.
17. Напівпровідникові конденсатори.
18. Ємність плоского конденсатора.
19. Види з'єднань конденсаторів.
20. Енергія плоского конденсатора.
21. Енергія електричного поля.
22. Постійний струм.
23. Сила струму.
24. Вектор густини струму.

25. Сторонні сили.
26. Електрорушійна сила (ЕРС).
27. Види джерел струму.
28. Падіння напруги, фізичний сенс падіння напруги.
29. Закон Ома для однорідного провідника.
30. Опір провідника.
31. Питомий опір провідника.
32. Температурний коефіцієнт опору.
33. Закон Ома для ділянки кола.
34. Закон Ома для замкненого кола.
35. Зв'язок між вектором густини струму та напруженістю електричного поля.
36. Питома провідність.
37. Види з'єднань провідників.
38. Амперметр.
39. Вольтметр.
40. Шунтування.
41. Розгалужені кола.
42. Закон Кірхгофа для розгалужених кіл.
43. Нерозгалужені кола.
44. Закон Кірхгофа для нерозгалужених кіл.
45. Коливальний контур.
46. Коливання енергії у контурі.
47. Вільні електричні коливання.
48. Період коливань у контурі, формула Томсона.
49. Частота коливань.
50. Фаза коливань, початкова фаза коливань.
51. Диференційне рівняння вільних електричних коливань та його розв'язок.
52. Коливання заряду у контурі.
53. Коливання сили струму у контурі.
54. Згасаючі коливання.
55. Рівняння балансу контуру із опором.
56. Диференційне рівняння згасаючих коливань.
57. Амплітуда згасаючих коливань.
58. Коефіцієнт опору.
59. Логарифмічний декремент згасаючих електричних коливань.
60. Коефіцієнт згасання.
61. Вимушені електричні коливання.
62. Диференційне рівняння згасаючих коливань та його розв'язок.
63. Коливання струму у контурі із вимушеною ЕРС.
64. Коливання напруги у контурі із вимушеною ЕРС.
65. Зсув фаз у контурі із вимушеною ЕРС.
66. Резонанс напруг у контурі.
67. Резонанс струмів у контурі.
68. Векторна діаграма напруг у контурі.

69. Векторна діаграма струмів у контурі.
70. Добротність коливального контуру.
71. Змінний струм.
72. Змінна напруга.
73. Генератори змінного струму.
74. Опір у колі змінного струму.
75. Індуктивність у колі змінного струму.
76. Ємність у колі змінного струму.
77. Індуктивний опір.
78. Ємнісний опір.
79. Повний опір у колі змінного струму.
80. Закон Ома у колі змінного струму.
81. Ефективне значення струму.
82. Ефективне значення напруги.
83. Потужність у колі змінного струму.
84. Коефіцієнт потужності.
85. Робота у колі змінного струму.
86. Електромагнітні хвилі.
87. Довжина електромагнітної хвилі.
88. Швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль.
89. Шкала електромагнітних хвиль.
90. Принципи радіозв'язку.
91. Рівняння Шредінгера.
92. Стаціонарне рівняння Шредінгера.
93. Рух вільної частинки.
94. Частинка в одновимірній прямокутній потенціальній ямі.
95. Потенціальний бар'єр.
96. Проходження частинки через потенціальний бар'єр.
97. Ефект тунелювання.
98. Тунельні діоди.
99. Рівняння Шредінгера для атома водню.
100. Елементи зонної теорії твердих тіл.
101. Заборонена зона.
102. Рівень Фермі.
103. Енергія Фермі.
104. Метали в зонній теорії.
105. Діелектрики в зонній теорії.
106. Напівпровідники в зонній теорії.
107. Напівпровідникові прилади (діод, транзистор, мікросхеми).

Література

1. Чолпан П. П. Фізика : підручник. Київ : Вища школа, 2003. 567 с.
2. Цветкова О. В. Курс фізики у визначеннях, прикладах і задачах : навчальний посібник / О. В. Цветкова, В. Г. Єфременко. – Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2018. – 146 с.
3. Конспект з фізики для студентів скороченої форми навчання / О. Крамар.- Тернопіль : Центр оперативної поліграфії, 2018. 128 с. URL : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/27376>
4. Лисенко О. В. Розв'язування задач із фізики: електрика та магнетизм: навчальний посібник. / О. В. Лисенко, Г. А.Олексієнко. Суми, Сумський державний університет, 2017 — 287 с.
5. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Хрипко С.Л. Моделювання в електроніці: методичні вказівки до лабораторних робіт. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 98 с.
6. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Хрипко С.Л. Моделювання та проектування мікро- та наносистем: Методичні рекомендації до самостійної роботи. Запоріжжя : ЗНУ, 2019. 45 с.