

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

ЕЛЕКТРИКА

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт з курсу фізики**

Під редакцією О.О. Мочалова, В.М. Шенкевича

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2007

УДК 53: 537

Електрика: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу фізики / Під ред. *О.О. Мочалова, В.М. Шенкевича*. – Миколаїв: НУК, 2007. – 40 с.

Кафедра фізики

Описано лабораторні роботи з електрики, які виконуються в лабораторіях кафедри фізики на базі сучасного обладнання. Кожна лабораторна робота містить короткі теоретичні відомості, опис установки в цілому і окремих приладів, методику виконання та контрольні запитання.

Призначені для студентів усіх факультетів.

Розробили викладачі кафедри фізики: Ж.Ю. Буруніна (Е-2), Н.І. Коваль (Е-7), С.С. Коваль (Е-10), В.В. Кондратенко (Е-4), А.Д. Кулік (Е-7), О.О. Мочалов (Е-5), В.П. Сипко (Е-6), Л.І. Стратієнко (Е-4), Л.І. Титюченко (Е-1), Т.А. Ткаченко (Е-9), М.В. Ушкац (Е-8), В.М. Шенкевич (Е-3, Е-5).

Рецензент канд. фіз.-мат. наук, доц. А.М. Кузнєцов

© Видавництво НУК, 2007

Лабораторна робота Е-1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Мета роботи: експериментальне дослідження і графічне зображення електростатичного поля.

Електростатичні поля, які створюються нерухомими сталими зарядами, характеризуються в кожній точці напруженістю і потенціалом. Графічно електростатичне поле можна зобразити поверхнями однакового потенціалу та лініями напруженості. Поверхня, в кожній точці якої потенціали однакові, називається *поверхнею рівного потенціалу* (еквіпотенціальною поверхнею). Лінія, в кожній точці якої напруженість спрямована по дотичній, називається *лінією напруженості* (силовою лінією). Лінії напруженості в кожній точці поля перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь.

Експериментально можна визначити еквіпотенціальні поверхні, побудувати силові лінії поля й отримати поле, створюване зарядами будь-якої конфігурації.

У даній роботі електростатичне поле наближено імітується стаціонарним електричним полем в електропровідному папері з великим електричним питомим опором. Чим вищий опір паперу, тим менша відмінність електростатичного й електричного полів у ньому.

Вивчення електричного поля в електропровідному папері становить значний інтерес, оскільки дозволяє розв'язати ряд задач методом моделювання за допомогою аналогії. Так, наприклад, плоска картина обтікання будь-якого профілю нестискуваною рідиною має такий же вигляд, як і картина електростатичного поля, отриманого на папері, в якому вирізаний цей профіль.

Для експериментального знаходження поверхонь рівного потенціалу використовують мостову схему, в якій два резистори замінені провідним папером (рис. 1.1). У ділянку BD ввели щуп, з'єднаний з гальванометром G . Джерело струму ϵ створює різницю потенціалів на ділянках

ABC і ADC . Точки B і D підбираються студентом. За допомогою реостата R у схемі встановлюється певна стала напруга (кілька вольт).

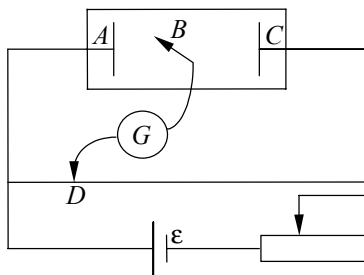


Рис. 1.1

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему за рис. 1.1.

2. Під електропровідний папір підкласти аркуш чистого паперу такого ж формату і притиснути гвинтами електроди. Перенести на аркуш профіль, вирізаний в електропровідному папері.

3. Рухомий контакт реостата установити приблизно в його середній частині.

4. Установити контакт реохорда D у точці, яка знаходиться на відстані 5 см від початку реохорда.

5. При проведенні щупом по електропровідному паперу знайти на ньому ряд точок, потенціали яких рівні потенціалу точки D . При цьому струм у гальванометрі повинен бути відсутнім. Проколоти папір щупом у знайдених точках. Якщо з'єднати між собою ці точки, то отримаємо еквіпотенціальну лінію.

6. Перемістивши рухомий контакт реохорда в нове положення, знайти наступну еквіпотенціальну лінію. Пересуваючи повзунок реохорда на 4...5 см, пройти таким чином все поле між електродми A і C . Після цього вийняти аркуш чистого паперу з проколами, обвести еквіпотенціальні лінії та побудувати кілька ліній напруженості, стрілками вказавши напрямок. Відстані між лініями напруженості слід вибирати однаковими, як для однорідного поля.

Примітка. Електропровідний папір проколювати тільки при відсутності струму в гальванометрі. Положення рухомого контакту на реостаті в процесі роботи не змінювати.

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке електростатичне поле? Якими величинами воно характеризується?

2. Що таке напруженість електростатичного поля? Як будують лінію напруженості?

3. Що називається потенціалом? Що таке еквіпотенціальна поверхня?

4. Який зв'язок між напруженістю електростатичного поля і потенціалом?
5. Визначте кут між лініями напруженості та екіпотенціальними лініями.
6. Для чого в даній роботі використовується реохорд?
7. З якою метою в схему включено реостат?
8. Як можна розрахувати напруженість в кожній точці поля?
9. Чим зумовлена похибка у визначенні екіпотенціальної лінії?

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 228–233, 240–244.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 27–60, 105–115.
3. Савельев І.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – С. 15–26.

Лабораторна робота Е-2

ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

Мета роботи: розрахунок електроємності конденсаторів методом порівняння.

Для зарядження різних за формою провідників до однакового потенціалу їм необхідно надати різні заряди. Ця властивість провідників характеризується величиною, яку називають електроємністю

$$C = q / \phi,$$

тобто електроємність чисельно дорівнює заряду q , який необхідно надати провіднику для того, щоб підняти його потенціал на одиницю.

Величина C залежить від форми зовнішньої поверхні провідника, його лінійних розмірів, розміщення провідника відносно інших провідників і від величини діелектричної проникності оточуючого середовища ϵ . Електроємність конденсаторів дорівнює відношенню величини заряду до різниці потенціалів $\phi_1 - \phi_2$ між пластинами:

$$C = q / U, \tag{2.1}$$

де $U = \phi_1 - \phi_2$.

Якщо записати вираз (2.1) для двох конденсаторів (відомої і невідомої)

мої ємності), заряджених до однакової різниці потенціалів, то можна отримати співвідношення

$$C_x = C_{et} \frac{q_x}{q_{et}}, \quad (2.2)$$

де C_{et} і q_{et} , C_x і q_x – ємність і заряд відповідно еталонного і досліджуваного конденсаторів.

У даному випадку співвідношення зарядів визначається за допомогою балістичного гальванометра, що являє собою прилад магнітоелектричної системи з рухомою частиною на підвісі. Робота гальванометра основана на взаємодії магнітного поля, створюваного постійним магнітом зі струмом, що проходить по обмотці рамки. Внаслідок взаємодії виникає обертаючий момент, що відхиляє рухому частину приладу.

Балістичний гальванометр відрізняється від звичайного гальванометра магнітоелектричної системи тим, що його рухома частина більш масивна і має більший момент інерції. Якщо через гальванометр пропускати короточасний струм (час проходження струму значно менший, ніж період коливань підвісної системи), то кут повороту γ його підвісної системи буде пропорційний не струму, а імпульсу струму q , тобто кількості електрики, що проходить через гальванометр:

$$\gamma = \beta q, \quad (2.3)$$

де β – балістична стала гальванометра (величина, чисельно обернена величині заряду, який відхиляє систему на одиничний кут).

Зарядивши еталонний конденсатор ємністю C_{et} до деякої напруги U , розрядимо його через гальванометр. У цьому випадку вираз (2.3) матиме вигляд:

$$\gamma_{et} = \beta q_{et}. \quad (2.4)$$

Якщо те ж саме проробити з конденсатором невідомої ємності C_x (при тій же напрузі), то

$$\gamma_x = \beta q_x. \quad (2.5)$$

З рівнянь (2.2), (2.4) і (2.5) отримаємо робочу формулу для визначення ємності

$$C_x = C_{et} \frac{\gamma_x}{\gamma_{et}}. \quad (2.6)$$

Для визначення ємності конденсатора описаним методом збирають схему, зображену на рис. 2.1. Коли двополюсний перемикач К перебуває

в крайньому лівому положенні, відбувається зарядження конденсатора K_d від батареї Б. Напруга регулюється потенціометром П. Коли перемикач К перебуває у крайньому правому положенні, то конденсатор K_d розряджається через гальванометр G . Паралельно гальванометру підключено ключ K_1 , який допомагає швидко зупинити рухому частину гальванометра. Цей ключ потрібно замикати на короткий час у той момент, коли "зайчик" (світлова пляма на шкалі гальванометра) проходить через положення рівноваги.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему за рис. 2.1.
2. Увімкнути освітлення шкали гальванометра і встановити "зайчик" на нульову позначку шкали.
3. За допомогою двополюсного перемикача К обкладки конденсатора K_d підключити до точок C і D , потенціали яких дорівнюють потенціалам точок A і B потенціометра.
4. Підібрати і зафіксувати рухомим контактом потенціометра напругу U . За допомогою вольтметра слідкувати за тим, щоб вона залишалась сталою протягом всього експерименту.
5. Перемикаючи ключ К, замкнути контакти E і F та розрядити конденсатор через балістичний гальванометр, при цьому зафіксувати максимальне відхилення "зайчика" за шкалою гальванометра. Такі вимірювання провести для кожного конденсатора по п'ять разів.
6. За формулою (2.6) визначити загальну ємність досліджуваних конденсаторів, ємність кожного з них окремо та їх паралельного і послідовного з'єднань.
7. Експериментально визначені величини ємностей паралельного і послідовного з'єднань конденсаторів перевірити за формулами:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2; \quad C_{\text{посл}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (2.7)$$

8. Порівняти величини ємностей паралельного і послідовного з'єднань конденсаторів, отримані за формулами (2.6), (2.7). Похибку для γ розрахувати методом середнього, для C – методом диференціювання натурального логарифма функції.

Результати вимірювань і обчислень занести до табл. 2.1 і 2.2.

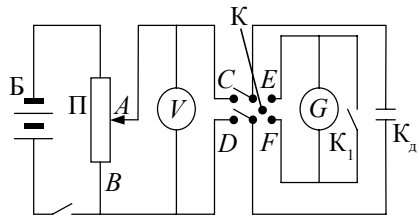


Рис. 2.1

Таблиця 2.1

№ з/п	C_{et}			C_1			C_2		
	γ	$\gamma_{сер}$	$\Delta\gamma$	γ	$\gamma_{сер}$	$\Delta\gamma$	γ	$\gamma_{сер}$	$\Delta\gamma$

Таблиця 2.2

№ з/п	$C_{пар}$			$C_{посл}$		
	γ	$\gamma_{сер}$	$\Delta\gamma$	γ	$\gamma_{сер}$	$\Delta\gamma$

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке електроємність? В яких одиницях вона вимірюється?
2. Що називають конденсатором? Від чого залежить його ємність?
3. Сформулювати закони паралельного і послідовного з'єднання конденсаторів.
4. Пояснити будову і принцип дії балістичного гальванометра.
5. Яка фізична величина вимірюється за допомогою балістичного гальванометра?
6. Яким методом у даній роботі вимірюється ємність конденсатора?
7. Вивести робочу формулу для розрахунку ємності конденсатора.
8. Як у роботі визначається похибка визначення ємності?

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 253–259, 338–341.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 60–64, 281–283.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 82–86, 125–130.

Лабораторна робота Е-3

ВИГОТОВЛЕННЯ ВОЛЬТМЕТРА З ЗАДАНОЮ МЕЖЕЮ ВИМІРЮВАННЯ

Мета роботи: ознайомлення з будовою і принципом дії приладів магнітоелектричної системи, розраховування додаткового опору для розширення меж вимірювання вольтметра.

Робота приладів магнітоелектричної системи основана на взаємодії сильного магнітного поля постійного магніту зі слабким магнітним полем рамки, по якій проходить вимірюваний струм. Магнітна система вимірювального механізму (рис. 3.1) складається з сильного постійного магніту I з висококоерцитивної сталі, магнітопроводів 2 , полюсних наконечників 3 і нерухомого осердя 5 , виготовлених з м'яких магнітних матеріалів. Полюсні наконечники і циліндричне осердя дають змогу в малому зазорі між ними отримати однорідне радіальне магнітне поле. Між полюсними наконечниками і осердям розміщується рухома рамка (котушка) 4 , що являє собою легкий алюмінієвий каркас прямокутної форми, на який намотано тонкий мідний або алюмінієвий дріт діаметром $0,03 \dots 0,2$ мм. З рамкою з обох боків скріплені півосі 6 . Ця система забезпечує вільне обертання рамки навколо осердя, а отже, і відхилення скріпленої з нею стрілки 9 відносно шкали. Струм до рамки підводиться через затискачі 8 і дві спіральні пружини 7 , які створюють протидійний механічний момент. При проходженні струму I через рамку на неї діє обертаючий момент

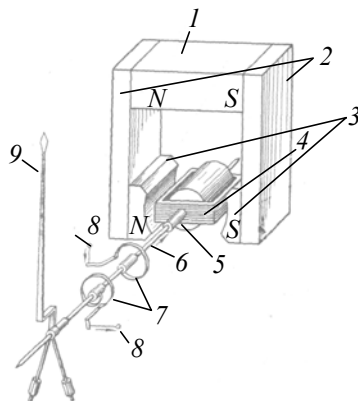


Рис. 3.1

$$\vec{M}_1 = \left[\begin{matrix} \vec{P}_m & \vec{B} \end{matrix} \right]; \quad M_1 = NISB \sin \alpha = K_1 I, \quad (3.1)$$

де $P_m = NIS$ – магнітний момент струму; N – кількість витків рамки; B – магнітна індукція; S – площа рамки; α – кут між P_m і B , у даному випадку дорівнює $\pi/2$; K_1 – коефіцієнт пропорційності. Цей момент урівноважується протидійним обертаючим моментом, що виникає при деформації спіральних пружин при повороті рамки на кут φ , тобто

$$M_2 = K_2 \varphi, \quad (3.2)$$

де K_2 – стала деформації кручення пружини. Якщо $M_1 = M_2$, стрілка фіксується на якійсь поділці шкали. Тоді $K_1 I = K_2 \varphi$, звідки

$$\varphi = \frac{K_1}{K_2} I = KI. \quad (3.3)$$

Отже, з формул (3.1)–(3.3) видно, що кут повороту рамки пропорційний силі струму. Коефіцієнт пропорційності K залежить від конструкції приладу. Завдяки високій чутливості рамки її можна використовувати як гальванометр G або міліамперметр mA . При паралельному ввімкненні до рамки опору (шунта) прилад використовують як амперметр постійного струму, при послідовному ввімкненні додаткового опору – як вольтметр.

Величину додаткового опору R_D можна розрахувати, записавши закон Ома для ділянки кола

$$I_0(R_G + R_D) = U_0, \quad (3.4)$$

де R_G – опір рамки (гальванометра); I_0 і U_0 – ціна поділки гальванометра і виготовлюваного вольтметра. При цьому U_0 потрібно розрахувати за формулою

$$U_0 = U/N, \quad (3.5)$$

де U – задана межа вимірювання (задається викладачем), В; N – число поділок шкали гальванометра.

Ціна поділки гальванометра I_0 визначається експериментально, порівнянням його показань з показаннями контрольного міліамперметра. Для цього складається схема (рис. 3.2). Оскільки гальванометр увімкнено послідовно з контрольним міліамперметром, то струм у всьому колі однаковий. Якщо I_k – показання контрольного міліамперметра в амперах, а N_1 – відповідне число поділок шкали гальванометра, то

$$I_0 = I_k/N_1. \quad (3.6)$$

Додатковий опір R_D розраховують за формулою (3.4), записаною у вигляді

$$R_D = \frac{U_0}{I_0} - R_G. \quad (3.7)$$

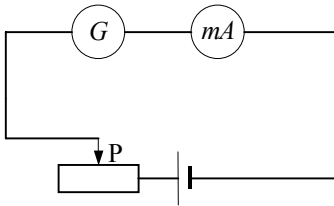


Рис. 3.2

Порядок виконання роботи

1. Визначити опір гальванометра R_G за допомогою приладу.
2. Скласти коло за рис. 3.2.
3. Змінюючи силу струму в колі за допомогою реостата P , визначити чотири-п'ять показань контрольного міліамперметра і відповідне число поділок шкали гальванометра N_1 . Розрахувати середнє значення I_0 і за формулою (3.7) обчислити додатковий опір R_D .

4. Скласти коло за рис. 3.3 і на магазині опорів набрати R_D .

5. Змінюючи потенціометром Π напругу в колі, записати показання шкали гальванометра і контрольного вольтметра. Показання оформити у вигляді таблиці.

6. Побудувати графік залежності показань виготовленого вольтметра (в поділках шкали) від показань контрольного. З графіка визначити ціну поділки U_0 і порівняти її з отриманою за формулою (3.5).

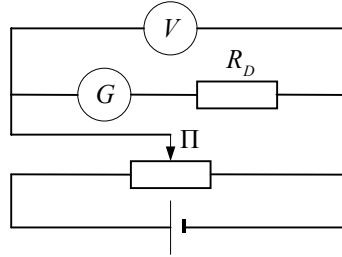


Рис. 3.3

Контрольні запитання і завдання

1. Яке явище лежить в основі роботи приладів магнітоелектричної системи?

2. Що таке клас точності приладу? Як його визначити? Як знайти похибку приладу за допомогою класу точності?

3. Поясніть умовні позначення на шкалі вимірювального приладу.

4. Як з гальванометра можна зробити вольтметр з заданою межею вимірювань?

5. Як визначити ціну поділки гальванометра?

6. Що називають межею вимірювань вольтметра?

7. Як визначити ціну поділки отриманого вольтметра?

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 228–233, 240–244.

2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 110–115, 126–133.

3. Савельєв І.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 15–26.

Лабораторна робота Е-4

ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПРИЛАДУ ЗА ДОПОМОГОЮ МІСТКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: ознайомлення з класичним методом вимірювання опору за допомогою мостової схеми.

Мостова схема постійного струму складається з опорів R_x , R_m , r_1 і r_2 , які утворюють замкнутий контур. До однієї з діагоналей підключено

джерело струму ϵ , до другої – гальванометр G . Процес вимірювань пов'язаний з необхідністю досягнення відсутності проходження струму через гальванометр.

При довільному співвідношенні опорів, які складають мостову схему, через гальванометр повинен проходити струм. Але існує певне співвідношення між опорамі, при якому сила струму, що проходить через гальванометр, стає рівною нулю, хоча при цьому у всіх інших ділянках схеми вона нулю не дорівнює. Це співвідношення має такий вигляд:

$$\frac{R_x}{R_m} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (4.1)$$

У даній роботі використовується мостова схема (рис. 4.1), що складається з мілівольметра, опір R_x якого визначається в експерименті, магазина опорів R_m ; реохорда AB , плечі якого l_1 і l_2 мають відповідно опір r_1 і r_2 ; потенціометра Π ; ключа K і джерела струму ϵ .

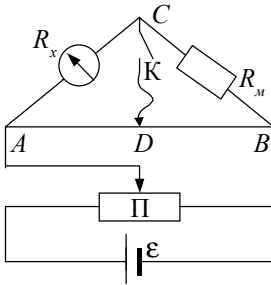


Рис. 4.1

Струм в точці A розділяється і проходить по ділянках ACB і ADB . Стрілка мілівольметра зупиниться навпроти певної поділки шкали. Якщо при цьому потенціали точок C і D різні, то при замиканні ключа K частина струму піде через CD і сила струму в мілівольметрі зміниться (стрілка змінить своє положення). При однакових потенціалах точок C і D замикання ключа не спричинить зміну сили струму через мілівольметр (положення

стрілки не зміниться). Таким чином буде виконуватись співвідношення (4.1), яке можна замінити наступним:

$$R_x = R_m \frac{r_1}{r_2} = R_m \frac{l_1}{l - l_1}, \quad (4.2)$$

де $l - l_1 = l_2$.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему за рис. 4.1.
2. Набрати опір магазину R_m (приблизно 20 Ом).
3. Після перевірки схеми потенціометром Π створити між точками A і C таку напругу, при якій стрілка гальванометра відхилитиметься на середину шкали.

4. Установити контакт D у середній частині реохорда (23...27 см).

5. Замкнути на короткий час ключ K . Якщо стрілка гальванометра змінює своє положення, змінити опір R_m і знову замкнути ключ. При сталому положенні стрілки занести величини R_m , l_1 і l_2 до таблиці.

N з/п	R_m	l_1	$l_2 = l - l_1$	R_x	ΔR_x

6. Якщо зміною опору R_m не вдається досягти сталих показань гальванометра, змінити положення контакту D .

7. Провести вимірювання для п'яти різних положень D у середній частині реохорда.

8. Розрахувати за формулою (4.2) R_x для всіх положень D , знайти $R_{\text{ср}}$, $\Delta R_{\text{ср}}$. Обчислити відносну похибку.

9. Дані вимірювань і результати обчислень занести до таблиці.

Контрольні запитання і завдання

1. Що називають електричним опором провідника?

2. Накреслити класичну мостову схему. Чим вона відрізняється від модифікованої схеми, яку використано в даній роботі?

3. Сформулювати закони постійного струму.

4. При якій умові співвідношення $\frac{R_x}{R_m} = \frac{r_1}{r_2}$ справедливе?

5. Що таке магазин опорів?

6. Чому відношення опорів r_1 і r_2 можна замінити відношенням l_1 і l_2 ?

7. Чи зміниться умова рівноваги містка, якщо мілівольтметр і магазин опорів поміняти місцями?

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 263–274.

2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 110–115, 126–133.

3. Савельев І.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 99–105.

Лабораторна робота Е-5

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ ПРОВІДНИКІВ І НАПІВПРОВІДНИКІВ

Мета роботи: експериментальна перевірка залежності опору провідників та напівпровідників від температури; визначення температурних коефіцієнтів опору.

Тверді тіла за електричними властивостями поділяють на три класи: метали, напівпровідники і діелектрики (ізолятори). Властивість провідника проводити електричний струм характеризують його питомим опором, величина якого визначається хімічною природою провідника, і фізичними умовами, зокрема температурою. Для більшості металів питомий опір зростає приблизно за лінійним законом $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, а

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (5.1)$$

де ρ_0 – питомий опір при $0\text{ }^\circ\text{C}$; α – температурний коефіцієнт; t – температура за шкалою Цельсія.

Температурним коефіцієнтом опору провідника називають відносну зміну питомого опору провідника при зміні його температури на один градус:

$$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho t} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 t} = \frac{R - R_0}{R_0 t}. \quad (5.2)$$

При дуже низьких температурах спостерігається відхилення від лінійної залежності.

Температурний коефіцієнт провідника визначається як середнє арифметичне температурних коефіцієнтів

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i}{N},$$

де

$$\alpha_i = \frac{R_{X_{i+1}} - R_{X_i}}{R_{X_i} t_{i+1} - R_{X_{i+1}} t_i}; \quad (5.3)$$

де R_{X_i} , α_i – опір та температурний коефіцієнт відповідно при i -й температурі; N – число точок температурної залежності.

Напівпровідники займають проміжне місце між провідниками та ізоляторами за величиною питомої електропровідності. Основною і характерною властивістю напівпровідників є залежність їх електропровідності від різних факторів: температури, освітлення, тиску і т. д. Електропровідність напівпровідників різко зростає при підвищенні температури, тоді як у металів вона зменшується.

У металах навіть при найнижчих температурах є велика кількість ($\sim 10^{29} \text{ м}^{-3}$) вільних електронів. Тепловий рух в утворенні електронів провідності металів несуттєвий і концентрація електронів провідника практично не залежить від температури. Дослідами встановлено, що електропровідність металу зменшується при збільшенні температури. Це легко пояснити, аналізуючи формулу для питомої електропровідності

$$\sigma = neu, \quad (5.4)$$

де n – концентрація носіїв струму (незмінна для металів); e – елементарний заряд; u – рухливість носіїв струму, або середня швидкість, яку носій струму набуває в електричному полі, напруженість якого дорівнює одиниці. Рухливість зменшується при підвищенні температури.

У напівпровідниках концентрація носіїв струму змінюється в дуже широких межах у залежності від температури. На рис. 5.1 показана енергетична модель напівпровідника з зображеними на ній значеннями енергій, які можуть набувати електрони в напівпровіднику. Ці значення утворюють зони провідності і валентну, які відділені одна від одної інтервалом заборонених значень – забороненою зоною.

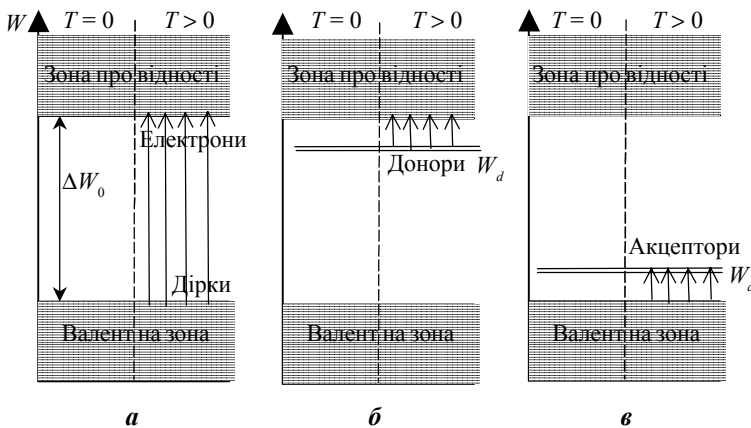


Рис. 5.1

Ширина забороненої зони становить ΔW_0 . Якщо у напівпровідниках рівні валентної зони повністю зайняті електронами, то зона заповнена. Тому для того, щоб збільшити енергію електрона, йому слід надати енергію, не меншу, ніж ΔW_0 . Для цього можна використати, наприклад, нагрівання напівпровідника. При нагріванні виникають (див. рис. 5.1,а) носії струму – електрони і "дірки". Їх концентрація зростає при підвищенні температури за законом

$$n \sim e^{-\Delta W_0/2kT}, \quad (5.5)$$

де ΔW_0 – ширина забороненої зони; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

Провідність, яка виникає при переході електронів з верхніх рівнів валентної зони в зону провідності, називається *власною*.

Якщо в основній кристалічній решітці напівпровідника є атоми домішок, то в забороненій зоні утворюються локальні енергетичні рівні. На рис. 5.1,б,в зображені два випадки, коли домішкові рівні розміщені біля дна зони провідності і біля валентної зони. В першому випадку електрони домішкових рівнів при нагріванні можуть бути "закинутими" до зони провідності, тобто вони можуть відриватись від домішкових атомів і рухатись вільно в межах кристалу. Так виникає домішкова електронна провідність. Необхідна для цього енергія ΔW_d – енергія іонізації донорів – дорівнює інтервалу від домішкового рівня до дна зони провідності. Вона набагато менша за енергію збудження власної провідності. Домішки, які постачають електронами зону провідності, називаються *донорами*, а їх рівні – *донорними рівнями*. В такому випадку концентрація електронів провідності змінюється за законом

$$n \sim e^{-\Delta W_d/2kT}. \quad (5.6)$$

На рис. 5.1,в зображено випадок, коли локальні, незаповнені електронами рівні розміщуються біля валентної зони. При тепловому збудженні саме на ці рівні будуть переходити електрони з валентної зони. Носіями струму будуть "дірки" валентної зони і тому електропровідність називають *дірковою*. Домішки, які захоплюють електрони з валентної зони, називають *акцепторами*, а їх енергетичні рівні – *акцепторними*. Концентрація дірок провідності зростає з підвищенням температури за законом

$$n \sim e^{-\Delta W_a/2kT}, \quad (5.7)$$

де ΔW_a – енергія іонізації акцепторів.

Енергетична схема для ізоляторів має подібний вигляд, тільки ширина забороненої зони для них у кілька разів більша.

Відповідно до формул (5.4) і (5.5) питома електропровідність

$$\sigma = \sigma_1 e^{-\Delta W_0/2kT}. \quad (5.8)$$

Для даного зразка σ_1 можна вважати сталою, оскільки рухомість носіїв струму залежить від температури значно слабкіше (степенева функція температури), ніж їх концентрація (експонента з показником $-\Delta W_0/2kT$, у більшості випадків значно більшим від одиниці). При наявності домішок у напівпровідниках провідність при низьких температурах головним чином здійснюється електронами і дірками домішок. Енергія їх іонізації значно менша від ширини забороненої зони. У такому випадку, виходячи з формул (5.6), (5.7), питома електропровідність

$$\sigma = \sigma_2 e^{-\Delta W/2kT}, \quad (5.9)$$

де ΔW – енергія іонізації домішок, яка дорівнює ΔW_d або ΔW_a .

Величину σ_2 , як і σ_1 , можна вважати сталою при умові, що $\Delta W \gg 2kT$. При підвищенні температури концентрація домішкових носіїв струму швидко стає насиченою (незмінною). Це відповідає повному спустошенню донорних рівнів і повній заселеності акцепторних рівнів. При подальшому підвищенні температури починає проявляти себе власна провідність напівпровідників. Тому загальна електропровідність складається з двох складових частин – власної і домішкової:

$$\sigma = \sigma_1 e^{-\Delta W_0/2kT} + \sigma_2 e^{-\Delta W/2kT}. \quad (5.10)$$

При низьких температурах більшим є другий доданок (домішкова провідність), при високих – перший (власна провідність).

Відповідно до формул (5.8)–(5.10) для напівпровідників питома електропровідність і обернена їй величина – питомий електричний опір – значно залежать від температури. Це і є надзвичайно цінною властивістю напівпровідникових терморезисторів, яка широко використовується в науці та промисловості.

Терморезистор – це теплозалежний резистор, виготовлений з напівпровідника, що має великий від'ємний температурний коефіцієнт

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT}. \quad (5.11)$$

Використання терморезисторів як термометрів опору має значні переваги в порівнянні з іншими термометрами опору, наприклад, пла-

тиновими. Цими перевагами є:

малі розміри терморезисторів (до кількох десятих часток міліметра);
мала теплова інерційність;

можливість вимірювання температури поверхні невеликих об'єктів,
матеріал яких має погану теплопровідність.

Відносно нескладні прилади з терморезисторами роблять можливими вимірювання температури з точністю до $0,0005^\circ$. Терморезистори використовуються також у реле часу, стабілізаторах напруги та інших пристроях електронної техніки й автоматики.

Використаний у роботі терморезистор типу ММТ-4 (рис. 5.2) виготовлений з оксидів марганцю і міді (MnO_4 і CuO). Напівпровідниковий стрижень 1 міститься в литому металевому герметичному корпусі 8 циліндричної форми з червоної міді. Металевий контакт 2 на напівпровідниковому стрижні впаяний у корпус за допомогою олов'яно-свинцевого сплаву 4 і, таким чином, є одним з його виводів. Для підключення терморезистора в схему до його корпусу припаяно дріт 3. Другий вивід 6 від верхнього кінця терморезистора виходить з корпусу через скляний ізолятор 7. Для покращення теплопередачі між внутрішніми стінками корпусу терморезистора і напівпровідниковим стрижнем на останній намотана мідна фольга 5.

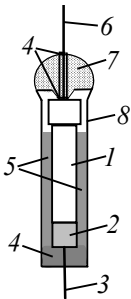


Рис. 5.2

Основною характеристикою терморезистора є температурна залежність його опору. В робочому діапазоні температур вона визначається виразом

$$R_T = Ae^{B/T}, \quad (5.12)$$

де R_T – величина опору, що відповідає температурі T ;
 A – стала, що визначається фізичними властивостями матеріалу і геометрією терморезистора; B – стала, що характеризує властивості напівпровідника і визначає його теплову активність. Із порівняння формул (5.8) і (5.12) видно, що ця величина пропорційна ширині забороненої зони напівпровідника.

Визначивши експериментально опір терморезистора для температур T_1 і T_2 , можна розрахувати величину B :

$$\ln \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}} = B \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (5.13)$$

звідси

$$B = \frac{T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} \ln \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}}. \quad (5.14)$$

Температурний коефіцієнт опору α_T , який визначається виразом (5.11), розраховують за наступною формулою:

$$\alpha_T = -\frac{B_{\text{ср}}}{T^2}. \quad (5.15)$$

Досліджувані провідник і терморезистор опущено в металевий стакан з мінеральним маслом, який у свою чергу розміщено в скляній посудині з водою. Нагрівання води здійснюється електричним нагрівачем з магнітною мішалкою. Температуру вимірюють звичайним ртутним термометром, опір провідника і напівпровідника – електронними цифровими приладами безпосередньо.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з установкою.
2. Увімкнути прилади і прогріти їх протягом 3...5 хв.
3. Виміряти опори при кімнатній температурі.
4. Увімкнути нагрівач і, змінюючи температуру через 3...5 °С (задається викладачем), повторити вимірювання в інтервалі температур від кімнатної до 90 °С.
5. Оформити таблицю даних вимірювань.
6. Розрахувати температурний коефіцієнт опору провідника за формулою (5.3). Похибку визначити за методом середнього.
7. Побудувати графік залежності $\ln(R_T) = f(T)$.
8. За формулою (5.14) розрахувати сталу B для чотирьох-п'яти температур, указаних викладачем. Усереднити результати.
9. Використовуючи формулу (5.15), визначити α_T .
10. Побудувати графік залежності $\alpha_T = f(T)$.

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке температурний коефіцієнт опору?
2. Побудувати енергетичну схему провідника, напівпровідника і діелектрика. Чим вони відрізняються? Як утворюються?
3. Як залежить опір провідника від температури?
4. Що таке відносна зміна опору провідника?
5. Як утворюється електронний газ?

6. Що називають шириною забороненої зони?
7. Що таке донори й акцептори?
8. Що називають власною і домішковою провідністю? Як вони залежать від температури?
9. Поясніть принцип роботи терморезистора.

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 265–267, 279–294.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 135–153, 156–168.
3. Савельєв І.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 220–226.
4. Савельєв І.В. Курс общей физики: В 3 т. – М.: Наука, 1982. – Т. 3. – С. 183–188, 199–206.

Лабораторна робота Е-6

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦІЇ

Мета роботи: ознайомлення з компенсаційним методом вимірювання ЕРС, визначення ЕРС за допомогою потенціометра.

Робота струму в замкнутому колі виконується силами неелектростатичного походження – так званими *сторонніми силами*. Сторонні сили характеризуються роботою, яку вони здійснюють над рухомими зарядами. Величина, яка дорівнює відношенню роботи A сторонніх сил до позитивного заряду при його переміщенні вздовж усього електричного кола, називається *електрорушійною силою* $\varepsilon = A/q$.

Для кола, що складається з джерела струму з ЕРС ε , внутрішнього опору r і зовнішнього опору R , можна записати

$$\varepsilon = IR + Ir = U + Ir,$$

де I – сила струму в колі; U – напруга на полюсах джерела струму. З цієї формули видно, що звичайним вольтметром виміряти точно ЕРС неможливо.

Найбільш точним методом вимірювання ЕРС є компенсаційний метод, який зводиться до порівняння ЕРС двох джерел: еталонного і досліджуваного. Суть методу полягає в урівноваженні (компенсації) вимірюваної ЕРС відомою напругою, при цьому струм через досліджуване джерело струму не проходить.

На рис. 6.1 зображена компенсаційна схема, яка використовується в роботі. Допоміжна батарея з ЕРС ϵ_0 більшою, ніж невідома ЕРС досліджуваного джерела ϵ_x та еталонна ЕРС ϵ_n , створює сталий струм у колі реохорда AB . Досліджуване джерело ϵ_x одним полюсом підключене до точки A , а другим – через гальванометр G і опір R до рухомого контакту C реохорда. Компенсація можлива лише у випадку, коли допоміжна ϵ_0 і одна з порівнюваних ЕРС увімкнені в коло назустріч одна одній. Напруга на реохорді більша, ніж ϵ_x , тому завжди можна підібрати плече реохорда AC з такою довжиною l_x (з опором R_x), щоб через гальванометр струм не проходив ($I_G = 0$).

З другого закону Кірхгофа для контура ACE_xA запишемо

$$\epsilon_x = IR_x. \quad (6.1)$$

Якщо перемкнути ключ P на еталонне джерело ϵ_n , то компенсація відбудеться при другому положенні C (l_n, R_n), для якого

$$\epsilon_n = IR_n. \quad (6.2)$$

Розділивши (6.1) на (6.2), отримаємо

$$\epsilon_x / \epsilon_n = R_x / R_n. \quad (6.3)$$

Оскільки опір однорідного каліброваного дроту реохорда пропорційний його довжині, то з формули (6.3)

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_n l_x}{l_n}. \quad (6.4)$$

Отже, вимірювання зводяться до визначення довжин плечей реохорда, при яких струм, який проходить через гальванометр дорівнює нулю. В роботі використовується ртутно-кадмієвий нормальний елемент, ЕРС якого $\epsilon_n = 1,0186$.

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за рис. 6.2. При складанні слід звернути увагу на по-

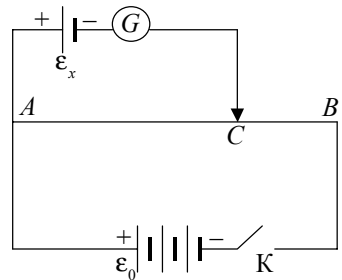


Рис. 6.1

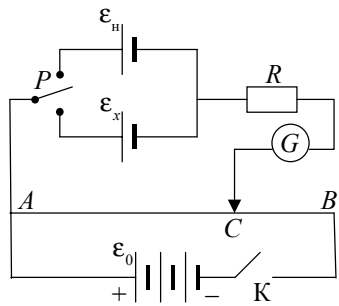


Рис. 6.2

лярність з'єднання всіх елементів. Після перевірки схеми викладачем приступити до вимірювань.

2. Установити рухомий контакт C у середній частині реохорда.

3. Замкнути ключ K . На короткий час за допомогою перемикача P приєднати до кола досліджуваний елемент i , переміщуючи рухомий контакт реохорда C , досягти відсутності проходження струму в колі гальванометра. Записати значення I_x у самостійно складену таблицю. Провести дослід з нормальним елементом. Записати \ln у таблицю значення.

4. Повторити вимірювання за п. 3 не менше п'яти разів. Обчислити значення ϵ_x за формулою (6.4). Відносну похибку розрахувати методом диференціювання натурального логарифма функції.

5. Визначити ϵ_x за допомогою потенціометра $P-307$ (інструкція для користування потенціометром ϵ в лабораторії) і порівняти з розрахованим.

Контрольні запитання і завдання

1. Що таке ЕРС джерела струму?
2. На чому оснований метод компенсації?
3. Чим компенсується ЕРС елемента ϵ_n ?
4. Чому елементи ϵ_x і ϵ_0 у схемі підключаються полюсами назустріч один одному?
5. Яка послідовність вмикання ключа K і перемикача P ?
6. Як визначити момент компенсації?
7. Чому в коло гальванометра вмикається великий опір?
8. Записати закон Ома для неоднорідного кола.
9. Яким методом визначається похибка в даній роботі?
10. Чому не можна на довгий час залишати акумулятор і елементи ввімкненими?

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 268–274.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 105–120, 126–133, 224–230.
3. Савельєв И.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 97–105.

Лабораторна робота Е-7

ГРАДУЮВАННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ ТЕРМОПАРИ

Мета роботи: ознайомлення з компенсаційним методом вимірювання ЕРС; визначення сталої термопари.

Провідність металів пояснюється наявністю в них вільних електронів – частини валентних електронів, які утворюють електронний газ. Кількість вільних електронів у металах велика ($10^{21} \dots 10^{23} \text{ см}^{-3}$) і не залежить від температури.

При контакті двох різнорідних металевих провідників у місці їх з'єднання утворюється контактна різниця потенціалів, зумовлена двома причинами. Для з'ясування цих причин розглянемо контакт двох різних металів A і B .

При хаотичному тепловому русі електрони будуть переходити через поверхню контакту з A у B і навпаки. Але оскільки $A_A \neq A_B$, то умови такого переходу будуть різними. Якщо, наприклад, $A_A > A_B$, то зрозуміло, що при однакових інших умовах електронам важче вийти з металу A , ніж з металу B , тому в металі A утвориться їх надлишок, а в металі B – нестача. Так виникає зовнішня контактна різниця потенціалів, зумовлена різницею робіт виходу:

$$U'_{AB} = -\frac{A_A - A_B}{e}, \quad (7.1)$$

де e – заряд електрона, A_A, A_B – відповідна робота виходу.

Другою причиною виникнення контактної різниці потенціалів є різниця концентрацій електронів у різних металах. Ця різниця приводить до переважання дифузії електронів в одному напрямку. Дифузія буде продовжуватись до тих пір, поки в місці контакту не встановиться різниця потенціалів U''_{AB} , що запобігатиме переходу електронів. У класичній електронній теорії металів внутрішня різниця потенціалів

$$U''_{AB} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (7.2)$$

де n_{0A} і n_{0B} – концентрація електронів у металах A і B ; T – температура контакту; k – стала Больцмана.

З формул (7.1), (7.2) повна контактна різниця потенціалів

$$U_{AB} = -\frac{A_A - A_B}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}. \quad (7.3)$$

У замкнутому колі, що складається з двох або кількох різних металів, усі спаї яких перебувають при однаковій температурі, алгебраїчна сума контактних різниць потенціалів дорівнює нулю. Якщо з двох різно-рідних металів скласти коло і місця контактів тримати при різних температурах T_1 і T_2 , то за рахунок внутрішньої різниці потенціалів у колі виникне ЕРС, яку називають термоелектричною. Таке з'єднання різно-рідних провідників називають *термопарою*. Для термопари ЕРС

$$\varepsilon = C(T_2 - T_1), \quad (7.4)$$

де C – стала термопари (питома термоЕРС) – термоЕРС, яка виникає при різниці температур спаїв 1 К. З формули (7.3) при умові $\frac{A_A - A_B}{e} = 0$

(замкнуте коло) маємо $C = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}$. Стала C у різних пар металів і у

даної пари для різних температурних інтервалів має різні значення, тому для вимірюваних термопар складаються таблиці.

Термопари мають малу потужність і низький ККД, тому використовуються головним чином для вимірювання і контролю сталості температури в широких межах. Найбільше поширення отримали такі термопари, як мідь-константан, константан-залізо, хромель-алюмель та ін.

ТермоЕРС найчастіше вимірюють методом компенсації. При такому вимірюванні на результати не впливає довжина з'єднувальних дротів, оскільки в момент компенсації струм у колі термопари відсутній.

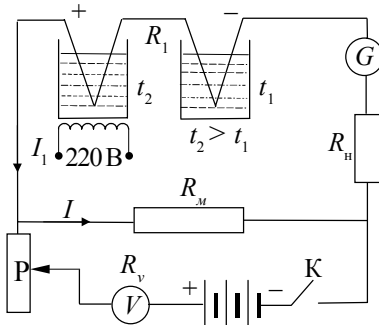


Рис. 7.1

Метод компенсації ґрунтується на другому законі Кірхгофа (рис. 7.1). При замиканні ключа K на ділянці з відомим опором R_m і на паралельній їй ділянці термопари з'являється падіння напруги U , величину якого можна регулювати за допомогою реостата P . Оскільки при температурі спаїв термопари t_1 і t_2 ($t_2 > t_1$) в ній виникає термоЕРС, напрямком якої протилежний падінню напруги U ,

створюваному на ділянці батареєю, то за другим законом Кірхгофа

$$I_1(R_n + R_1) + IR_m = \varepsilon. \quad (7.5)$$

Можна підібрати такий опір реостата, що падіння напруги від батареї може компенсувати термоЕРС. Очевидно, що в даному випадку струм I_1 , який проходить через гальванометр, дорівнює нулю. Отже, вираз (7.5) можна записати як

$$\varepsilon = IR_M. \quad (7.6)$$

Величину струму I можна розрахувати за показаннями вольтметра V :

$$I = \frac{U_v}{R_v}. \quad (7.7)$$

Підставляючи (7.7) у (7.6), отримаємо

$$\varepsilon = \frac{U_v}{R_v} R_M, \quad (7.8)$$

де R_v – опір вольтметра (написаний на приладі); R_M – опір магазину (0,1...0,4 Ом, виставляється на магазині опорів); U_v – показання вольтметра.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричну схему за рис. 7.1. Повністю ввести опір реостата.

2. Виміряти температуру холодного спаю.

3. Після перевірки схеми викладачем чи лаборантом увімкнути нагрівач (електроплитку) і почати нагрівання одного зі спаїв термопари. При цьому стрілка гальванометра буде зміщуватись від нуля. Через кожні 5 °С реостатом досягати відсутності проходження струму в колі термопари (гальванометр повинен показувати нуль), і записувати показання вольтметра.

4. Дослід повторити при нагріванні не менше семи-восьми разів. Дані занести до таблиці.

5. За формулою (7.8) визначити величину термоЕРС і побудувати графік залежності ε від різниці температур холодного і гарячого спаїв: $\varepsilon = f(\Delta t)$.

6. За графіком визначити кутівий коефіцієнт прямої, чисельно рівний сталій термопари:

$$C = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}. \quad (7.9)$$

7. Обчислити чотири-п'ять значень C , вважаючи, що

$$C = \frac{\varepsilon_i}{\Delta t_i}. \quad (7.10)$$

8. Порівняти величини C , обчислені за формулами (7.9) і (7.10). Отримані результати занести до таблиці.

№ з/п	t_1	t_2	$\Delta t = t_2 - t_1$	U_v	R_m	R_v	ТермоЕРС ε
1							

Контрольні запитання і завдання

1. Чим зумовлена контактна різниця потенціалів?
2. Причини виникнення ЕРС термопари.
3. Що називають термопарою? Як її використовують?
4. У чому полягає компенсаційний метод визначення ЕРС?
5. З якою метою в схемі використовують реостат?
6. Що таке стала термопари? Від чого вона залежить?
7. Для чого в колі служить опір R_{II} ?

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 228–233, 240–244.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 168–178, 190–194.
3. Савельев І.В. Курс общей фізики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 15–26.

Лабораторна робота Е-8

ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ МІСТКА ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: ознайомлення з містком змінного струму і методами визначення основних характеристик діелектриків.

При ввімкненні конденсатора в коло змінного струму він чинить опір проходженню електричного струму. Цей опір можна розрахувати за формулою

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (8.1)$$

де X_C – ємнісний опір конденсатора, ємність якого C ; ω – циклічна частота змінного струму.

Ємнісний опір кола можна виміряти за допомогою містка Уїтстона, ввімкнутого в коло змінного струму. В схемі рис. 8.1 C_0 і C_x – конденса-

тори, що мають ємнісні опори X_{C_0} і X_{C_x} , R_0 – відомий активний опір, R_1 – змінний опір (магазин опорів). До кола між точками A і B підключили джерело змінного струму. Зміною опору R_1 досягають рівності потенціалів точок D і F . Визначають момент рівності потенціалів цих точок за показаннями приладу, ввімкненого між ними. При врівноваженні містка виконуються наступні рівності:

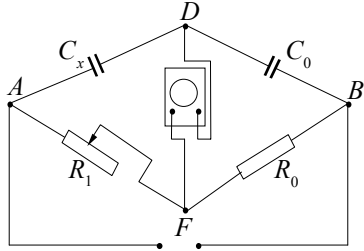


Рис. 8.1

$$\frac{U_{AD}}{X_{C_0}} = \frac{U_{DB}}{X_{C_x}}; \quad \frac{U_{AF}}{R_1} = \frac{U_{BF}}{R_0}. \quad (8.2)$$

Оскільки $U_{DF} = 0$, то $U_{AF} = U_{AD}$ і $U_{DB} = U_{BF}$. Тоді зі співвідношення (8.2) з урахуванням (8.1) отримаємо

$$\frac{U_{AD}}{U_{DB}} = \frac{X_{C_0}}{X_{C_x}} = \frac{C_x}{C_0}; \quad \frac{U_{AF}}{U_{BF}} = \frac{R_1}{R_0}; \quad \frac{U_{AD}}{U_{DB}} = \frac{U_{AF}}{U_{BF}},$$

звідки

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{R_1}{R_0}. \quad (8.3)$$

З цієї рівності отримаємо

$$C_x = C_0 \frac{R_1}{R_0}. \quad (8.4)$$

Якщо C_x – плоский конденсатор, то

$$C_x = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (8.5)$$

де S – площа пластини конденсатора; d – товщина діелектрика, який заповнює простір між пластинами, ϵ – його діелектрична проникність.

Формули (8.4) і (8.5) дають нам можливість записати

$$\epsilon = \frac{R_1 C_0 d}{R_0 \epsilon_0 S}. \quad (8.6)$$

Якщо ми знаємо R_0 , R_1 , C_0 , d і S , то, підставивши їх у формулу (8.6), визначимо величину ϵ . Експериментальна установка є містком Уїтстона, в якому R_0 і C_0 – еталонні активний опір і конденсатор відповідно; R_1 – магазин опорів; C_x – плоский конденсатор, простір між пластинами якого заповнює досліджуваний діелектрик. У діагональ містка DF увімкнули осцилограф, а в діагональ AB – джерело змінної ЕРС з частотою 50 Гц.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему за рис. 8.1
2. За допомогою магазину опорів виставити мінімальну амплітуду коливань струму на осцилографі. Цю операцію повторювати, поступово збільшуючи чутливість осцилографа до максимальної.
3. Досягнувши нульової амплітуди коливань струму в діагоналі при найбільшій чутливості осцилографа, визначити R_1 за показаннями магазину опорів.
4. Лінійкою виміряти площу пластин конденсатора S .
5. Мікрометром виміряти товщину діелектрика d (не менше трьох разів у різних точках).
6. За відомими значеннями R_0 , R_1 , C_0 , d і S за формулою (8.6) визначити діелектричну проникність даного діелектрика.
7. Похибку вимірювань визначити методом диференціювання логарифма функції.

Контрольні запитання і завдання

1. Яку фізичну величину називають діелектричною проникністю? Що таке діелектрик?
2. Що таке змінний струм? Якими величинами він характеризується?
3. Який опір чинить конденсатор проходженню змінного струму? Від чого залежить цей опір?
4. Чому в схемі на ділянці DB потрібно увімкнути саме конденсатор, а не активний опір?
5. Для чого в схемі осцилограф?
6. Чому конденсатор проводить змінний струм і не проводить постійний?
7. Запишіть закон Ома для кола змінного струму.
8. Чим відрізняється циклічна частота від частоти коливань?

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 228–233, 240–244.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 110–115, 126–133, 366–371, 381–386.
3. Савельев І.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 15–26.

Лабораторна робота Е-9

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЬОХЕЛЕКТРОДНОЇ ВАКУУМНОЇ ЛАМПИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОСЦИЛОГРАФА

Мета роботи: ознайомлення з роботою вакуумного триода і з методом отримання його статичних характеристик за допомогою осцилографа.

У сучасній техніці широко використовуються електровакуумні прилади – радіолампи, електронно-променеві трубки, фотоелектронні помножувачі, вакуумні фотоелементи. Дія цих приладів ґрунтується на проходженні електричного струму у вакуумі. Струм утворюється рухом електронів, які вилетіли з катода, в напрямку анода під дією електричного поля.

При відсутності анодної напруги навколо розжареного катода утворюється так звана електронна хмара, яка утворює просторовий негативний заряд – явище термоелектронної емісії. У стані термодинамічної рівноваги число електронів, які вилетіли з катода, дорівнює числу електронів, що повертаються в метал. При цьому густина електронної хмари залежить від температури катода.

Трьохелектродні лампи, крім катода К, містять ще два електроди – анод А і сітку С (рис. 9.1). Між катодом і анодом за допомогою батареї B_a створюють електричне поле, під дією якого і відбувається спрямований рух електронів, тобто електричний струм у вакуумі. Це анодний струм I_a . Величина анодного струму визначається різницею потенціалів між катодом і анодом – анодною напругою і кількістю електронів, що покидають катод внаслідок електронної емісії.

Якщо на сітку подається деякий потенціал відносно катода (так звана сіткова напруга), то в просторі між катодом і сіткою створюється додаткове до основного електричне поле, яке суттєво впливає на величину анодного струму. Сітка розміщена близько до катода, тому незначна зміна потенціалу на ній може значно підсилити або, навпаки, зовсім припинити проходження струму через триод.

Залежність між напругою на електродах триода й анодним струмом

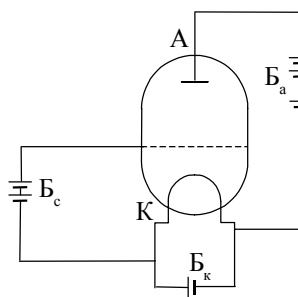


Рис. 9.1

лампи називають *характеристикою лампи*. Для тріода визначають дві характеристики:

а) анодну, що виражає залежність анодного струму від анодної напруги при незмінному потенціалі сітки. Кожному потенціалу сітки відносно катода відповідає своя анодна характеристика;

б) анодно-сіткову, що виражає залежність анодного струму від напруги на керувальній сітці при сталій анодній напрузі.

З характеристик тріода можна визначити його основні параметри: коефіцієнт підсилення μ , крутість сіткової характеристики S і внутрішній опір R .

Коефіцієнт підсилення μ показує, у скільки разів на величину анодного струму сіткова напруга діє сильніше, ніж анодна. Чисельно він дорівнює відношенню приросту анодної напруги до приросту сіткової, яка спричинює такий же приріст анодного струму:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}. \quad (9.1)$$

Крутість сіткової характеристики тріода S визначається на лінійній частині анодно-сіткової характеристики і показує, на скільки міліампер змінюється анодний струм при зміні сіткової напруги на один вольт:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \text{ мА/В}. \quad (9.2)$$

Внутрішній опір R – це відношення зміни анодної напруги до зміни анодного струму при сталій напрузі на сітці:

$$R = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}. \quad (9.3)$$

При цьому напруга вимірюється у вольтах, а анодний струм – у міліамперах. Всі три параметри пов'язані між собою співвідношенням $\mu = SR$.

На практиці характеристики електронних ламп отримують за допомогою осцилографа. На його екрані можна спостерігати в певному масштабі готові характеристики тріода, побудовані за допомогою нескладної схеми.

Основною частиною осцилографа є електронно-променева трубка. Її будова схематично зображена на рис. 9.2. Електрони в процесі термічної емісії покидають розігрітий катод I і під дією електричного поля

між катодом та першим анодом 3 рухаються вздовж осі трубки в напрямку екрана. Між катодом і першим анодом розміщений керуючий електрод (модулятор) 2. Змінюючи потенціал модулятора відносно катода, можна змінювати кількість електронів, що пролітають до екрана, тобто змінювати яскравість сигналу на екрані. За першим розміщений другий анод 4, який має деякий потенціал відносно першого. Величина цього потенціалу, а також форма і взаємне розташування анодів підібрані таким чином, щоб у проміжку між анодами на електрон діяла сила, спрямована до осі трубки. Під дією цієї сили електронний пучок "стягується" в тонкий електронний промінь. Далі вздовж осі трубки розташовані перпендикулярно дві пари відхильних пластин 5 і 6. Якщо на пару пластин подати різницю потенціалів, то на електронний промінь буде діяти сила, яка змінюватиме його траєкторію. Обидві пари пластин дозволяють змінювати траєкторію променя у двох взаємно перпендикулярних напрямках, що відповідають осям координат X і Y .

Таким чином, якщо на X -пластини подавати змінну анодну напругу, а на Y -пластини змінну напругу, пропорційну анодному струму, то електронний промінь накреслить на екрані осцилографа

залежність $I_a = f(U_a)$. Отримують характеристики триода за допомогою схеми, зображеної на рис. 9.3. На анод триода подається випрямлена за

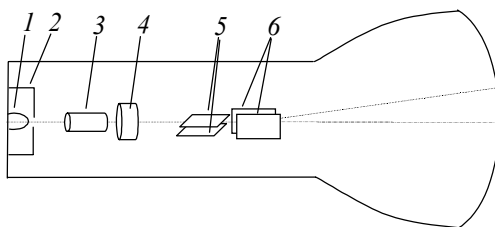


Рис. 9.2

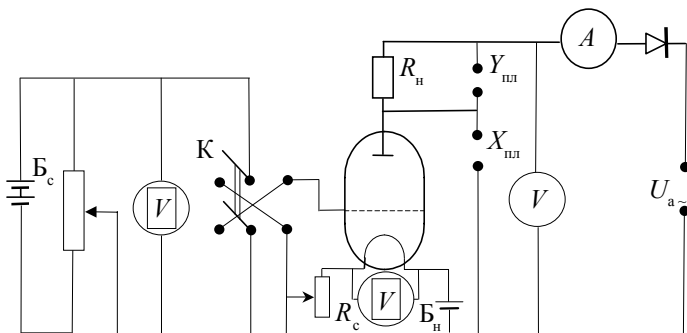


Рис. 9.3

допомогою діода однонапівперіодна напруга U_a . Вона зростає від нуля до максимуму, а потім знову зменшується до нуля. Ця напруга визначає різницю потенціалів між катодом і анодом та спричиняє проходження анодного струму I_a через резистор R_n , і, відповідно, падіння напруги на ньому U_n . Оскільки $R_n = \text{const}$, то $U_n \sim I_a$. Подаючи напругу U_a на X -пластини, а $U_n \sim I_a$ на Y -пластини, отримують на екрані осцилографа графік $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$.

Реостатом R_c можна плавно змінювати U_c від нуля до заданої величини, а за допомогою ключа K – потенціал сітки відносно катода з "+" на "-".

Порядок виконання роботи

1. Перевірити схему і уважно ознайомитись з призначенням перемикачів осцилографа та установки.

2. Увімкнути осцилограф, сфокусувати електронний промінь, налаштувати його яскравість і мінімальні розміри на екрані.

Увага! Не можна залишати надовго електронний промінь нерухомим. Це спричинить пошкодження екрана осцилографа.

3. За допомогою перемикача підключити в коло потрібну лампу. Включивши установку в мережу, відповідними ручками встановити потрібні значення напруги на лампі: розжарення катода, анодну і сіткову, а також величину анодного навантаження R_n (всі початкові дані задає викладач).

4. Після прогріву лампи (2...3 хв) подати найбільшу позитивну напругу на керувальну сітку. Установити анодну характеристику на екрані осцилографа таким чином, щоб зображення сигналу займало весь екран. Для цього змістити характеристику так, щоб вона починалась у лівому нижньому кутку розмітки екрана і підсилити сигнал до максимально можливого в межах екрана (*в подальшому сигнал не можна підсилювати!*). Слідкувати за тим, щоб усі наступні характеристики починались у цій точці, яку будемо розглядати як початок координат, де $I_a = 0$, $U_a = 0$. Права верхня точка відповідає максимальному значенню I_a та U_a .

5. Перенести з екрана осцилографа на кальку (разом з розміткою) накреслені в масштабі 1:1 анодні характеристики тріода для семи різних потенціалів сітки (три додатні, нульове і три від'ємні значення потенціалу).

6. За показаннями вольтметра і амперметра в анодному колі визначити максимальні значення відповідних величин. За цими даними і масштабом характеристик на екрані осцилографа визначити ціну поділки

U_a та I_a . При цьому врахувати, що осцилограф відображає на екрані амплітудне значення струму і напруги, а вольтметр і амперметр показують діючі значення цих величин. Для приведення у відповідність масштабів вимірюваних величин необхідно показання вольтметра і амперметра помножити на $\sqrt{2}$.

7. За отриманими даними побудувати на одному графіку всі анодні характеристики.

8. Визначити за графіком таке значення U_a , при якому є всі сім значень анодного струму для семи різних значень сіткової напруги. За цими даними побудувати графік залежності $I_a = f(U_c)$.

9. З отриманих графіків і формул (9.1)–(9.3) розрахувати μ , S і R_i досліджуваного тріода.

10. Похибку вимірювань розрахувати методом диференціювання логарифма функції. При цьому врахувати похибку, яка вноситься при розрахунку масштабних коефіцієнтів U_a та I_a . Приклад побудови графіка $I_a = f(U_c)$ подано на рис. 9.4.

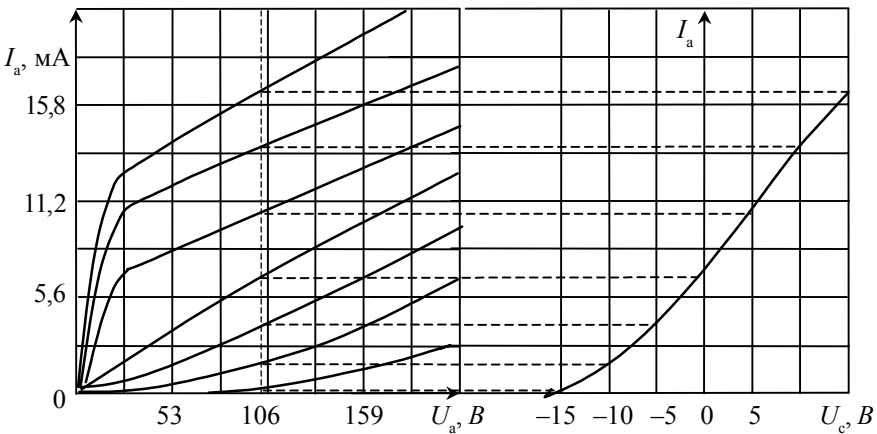


Рис. 9.4

Контрольні запитання і завдання

1. У чому полягає явище електронної емісії?
2. Що таке робота виходу і від чого вона залежить? Записати умову, при якій електрон може вилетіти з металу.
3. Описати принцип роботи вакуумного діода, тріода. Чи може тріод виконувати роль катода?
4. Яким вимогам повинен відповідати матеріал катода?

5. Чому сітку розміщено ближче до катода? Яке її призначення?
6. Якими характеристиками і параметрами визначається робота тріода? Як пов'язані вони між собою?
7. Описати будову і принцип дії електронно-променевої трубки осцилографа.
8. Як розрахувати масштабні коефіцієнти для графіка залежності анодного струму від напруги?
9. Як розраховують похибки в даній роботі?

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: У 2 т. – К.: Либідь, 1997. – Т. 1. – С. 117–123.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 198–211.
3. Савельєв І.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – С. 205–208.

Лабораторна робота ЕМ-10

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ

Мета роботи: ознайомлення з явищем термоелектронної емісії, роботою вакуумного діода; експериментальне визначення роботи виходу електрона з вольфраму.

Електрони провідності в металі перебувають у безладному тепловому русі. Електрони, що швидко рухаються, мають досить велику кінетичну енергію і можуть вириватися з металу на кілька міжатомних відстаней. При цьому вони виконують роботу проти сил притягання з боку надлишкового позитивного заряду, що виникає в результаті їхнього вильоту, і проти сил відштовхування з боку електронів, що вилетіли раніше і утворили поблизу поверхні провідника "електронну хмару". Таким чином, поверхня металу являє собою подвійний електричний шар, що перешкоджає виходу з металу нових електронів. Найменша енергія, яку необхідно надати електрону, щоб видалити його з металу у вакуум, називається роботою виходу. Для різних металів робота виходу коливається в межах 1...5 еВ. Умова, при якій електрон може вилетіти з металу, має вигляд $\frac{mv^2}{2} \geq e\phi$. Зліва записана кінетична енергія електрона, справа – його потенціальна енергія всередині металу; ϕ – потенціал внутрішньої частини металу щодо вакууму. При кімнатній температурі лише незначна частина електронів має достатній запас кінетичної енергії, щоб здійсни-

ти роботу виходу. В міру підвищення температури число швидких електронів зростає, відповідно, збільшується і число швидких електронів, здатних вириватися з металу (явище термоелектронної емісії). Досліджувати це явище можна за допомогою вакуумного діода. При певній різниці потенціалів між катодом і анодом спостерігається явище насичення, густина струму насичення підлягає закону

$$\frac{I_a^{\text{нас}}}{S} = BT^2 e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (10.1)$$

де B – стала, що залежить від матеріалу і чистоти поверхні катода; k – стала Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – абсолютна температура катода, К; A – робота виходу, Дж.

Закон (10.1) можна записати для двох значень струмів насичення:

$$\frac{I_{a1}^{\text{нас}}}{S} = BT_1^2 e^{-\frac{A}{kT_1}} \quad \text{і} \quad \frac{I_{a2}^{\text{нас}}}{S} = BT_2^2 e^{-\frac{A}{kT_2}}.$$

Розділивши першу рівність на другу, отримаємо:

$$\frac{I_{a1}^{\text{нас}}}{I_{a2}^{\text{нас}}} = \frac{T_1^2}{T_2^2} e^{\left(\frac{A}{kT_2} - \frac{A}{kT_1}\right)}.$$

Прологарифмуємо цей вираз і знайдемо A :

$$\ln \frac{I_{a1}^{\text{нас}}}{I_{a2}^{\text{нас}}} = \ln \frac{T_1^2}{T_2^2} + \frac{A}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right),$$

$$A = \frac{k}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \left(\ln \frac{I_{a1}^{\text{нас}}}{I_{a2}^{\text{нас}}} - 2 \ln \frac{T_1}{T_2} \right) = \frac{2,3k}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \left(\lg \frac{I_{a1}^{\text{нас}}}{I_{a2}^{\text{нас}}} - 2 \lg \frac{T_1}{T_2} \right). \quad (10.2)$$

Для обчислення роботи виходу необхідно визначити температуру катода. При високих температурах підведена до катода потужність витрачається на теплове випромінювання у вакуумній лампі. Втрати тепла через конвекцію відсутні, а частина тепла, що витрачається через теплопровідність катода при високих температурах, незначна. Тому температуру катода можна визначити в залежності від потужності нагрівання відповідно до таблиці.

Дані таблиці відповідають характеристикам лампи 4Ц14С, що використовується в роботі.

T, K	$P, Вт$	T, K	$P, Вт$
1500	0,866	2300	7,410
1600	1,216	2400	9,060
1700	1,664	2500	10,960
1800	2,227	2600	13,150
1900	2,922	2700	15,630
2000	3,768	2800	18,440
2100	4,784	2900	21,620
2200	5,990	3000	25,170

Інтерполяцією можна знайти температуру при будь-якій підведеній до катода потужності.

Робота виходу електрона з вольфраму визначається за допомогою експериментальної установки, що складається з касети ФПЭ 06/05, джерела напруги V , мілівольтметра mV та міліамперметра mA .

Касета ФПЭ 06/05. Її основним елементом є діод, що працює при $U_{max} = 2,5...4,5 В$ і $U_a = 12...100 В$. На передній панелі касети є гнізда "РА", до яких необхідно підключити міліамперметр для вимірювання струму в анодному колі $I_{нас}$.

Джерело живлення приєднується відповідним кабелем до касети і забезпечує живлення у колі розжарення й анодному колі діода. У передню панель блоку живлення вмонтовані вольтметр і амперметр, що фіксують відповідно анодну напругу U_a і струм у колі катода I_k .

Крім того, на передній панелі є гнізда вихідної напруги. До гнізд "2,5...4,5 В" необхідно підключити міліамперметр, він покаже напругу на катоді лампи.

Методика виконання роботи

1. Зібрати схему за рис. 10.1. Підготувати до включення джерело живлення. Для цього регулятори напруги (2,5...4,5 В; 12...120 В) повернути в крайнє ліве положення; натиснувши ліву з двох кнопок під амперметром, підключити його до кола катода з напругою 2,5...4,5 В.

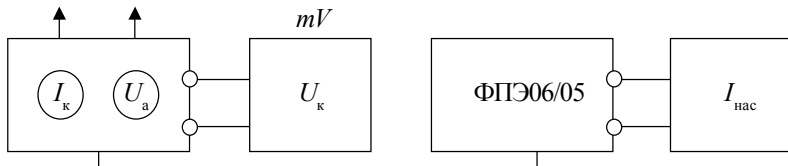


Рис. 10.1

2. Увімкнути джерело живлення.
3. Увімкнути тумблер "Мережа" (повинен загорітись індикатор).
4. Обертаючи регулятор напруги "120...220 В", установити анодну напругу $U_a = 90$ В (під час роботи вона повинна залишатись сталою).
5. Обертанням регулятора напруги 2,5...4,5 В (коло катода) подати в коло струм $I_k = 1,2...1,7$ А з інтервалом 0,1 А, одночасно записуючи показання U_k і $I_a^{нас}$.
6. Підрахувати потужність, що подається на катод.
7. Знайти температуру катода, використовуючи таблицю.
8. Підрахувати за формулою (10.2) роботу виходу електрона з вольфраму (три-чотири значення, комбінуючи струми насичення). Знайти абсолютну похибку за методом середнього ΔA_{cp} , підрахувати відносну похибку.
9. Записати значення роботи в електрон-вольтах ($1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

Контрольні запитання і завдання

1. У чому полягає явище електронної емісії?
2. Описати принцип роботи вакуумного діода.
3. Що таке робота виходу і від чого вона залежить?
4. Чому режим роботи лампи в даній роботі називається режимом насичення?
5. Записати умову, при якій електрон може вилетіти з металу.
6. Що таке густина струму?
7. Як пов'язана густина струму насичення з роботою виходу електрона з металу?
8. На що витрачається потужність, яка підводиться до катода при високих температурах?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3 т. – К.: Техніка, 2001. – Т. 2. – С. 198–211, 121–123.
2. Савельев І.В. Курс общей физики: В 2 т. – М.: Наука, 1982. – Т. 1. – С. 205–208.

ЗМІСТ

<i>Лабораторна робота E-1. Дослідження електростатичного поля</i>	3
<i>Лабораторна робота E-2. Визначення ємності конденсаторів за допомогою балістичного гальванометра</i>	5
<i>Лабораторна робота E-3. Виготовлення вольтметра з заданою межею вимірювання</i>	8
<i>Лабораторна робота E-4. Визначення опору приладу за допомогою містка постійного струму</i>	11
<i>Лабораторна робота E-5. Дослідження температурної залежності опору провідників і напівпровідників</i>	14
<i>Лабораторна робота E-6. Визначення електрорушійної сили джерела струму методом компенсації</i>	20
<i>Лабораторна робота E-7. Градування і визначення сталої термомопари</i>	23
<i>Лабораторна робота E-8. Визначення діелектричної проникності за допомогою містка змінного струму</i>	26
<i>Лабораторна робота E-9. Дослідження характеристик трьох-електродної вакуумної лампи за допомогою осцилографа</i>	29
<i>Лабораторна робота E-10. Визначення роботи виходу електрона з металу</i>	34

Навчальне видання

ЕЛЕКТРИКА

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу фізики

Під редакцією О.О. Мочалова, В.М. Шенкевича
(українською мовою)

Редактор *О.Є. Вакула*
Комп'ютерна правка та верстка *О.М. Червата*
Коректор *М.О. Паненко*

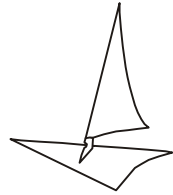
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Підписано до друку 12.02.07. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 2,2. Обл.-вид. арк. 2,4.
Тираж 600 прим. Вид. № 15. Зам. № 17. Ціна договірна.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5



ВИДАВНИЦТВО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ



Шановні панове!

Запрошуємо Вас ознайомитись з можливостями книжкового видавництва, висококваліфіковані спеціалісти якого забезпечать оперативне та якісне виконання замовлення будь-якого рівня складності.

Наш головний принцип – задовольнити потреби замовника у повному комплексі поліграфічних послуг, починаючи з розробки та підготовки оригіналу-макета, що виконується на базі IBM PC, і закінчуючи друком на офсетних машинах.

Крім цього, ми маємо повний комплекс післядрукарського обладнання, що дає можливість виконувати:

- ✓ аркушепідбір;
- ✓ брошурування на скобу, клей;
- ✓ порізку на гільйотинах;
- ✓ ламінування.

Видавництво також оснащено сучасним цифровим дублюкатором фірми "Duplo" формату А3, що дає можливість тиражувати зі швидкістю до 130 копій за хвилину.

Для постійних клієнтів – гнучка система знижок.

Отже, якщо вам потрібно надрукувати ***підручники, книги, брошури, журнали, каталоги, рекламні листівки, прайс-листи, бланки, візитні картки***, – ми до Ваших послуг.

© Національний університет кораблебудування

✉ Україна, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5,
видавництво НУК

☎ 8(0512) 47-83-86; 39-81-41; 39-73-39; fax 8(0512) 39-73-26;