

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

І.Ф.СКИЦЬКО

ФІЗИКА

**ВИВЧЕННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОНІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ
І
МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ**

**Інструкція
до лабораторної роботи**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 125 "Кібербезпека" спеціалізації
"Безпека державних інформаційних ресурсів" та спеціальністю 172
"Телекомунікації та радіотехніка" спеціалізації "Спеціальні телеко-
мунікаційні системи"*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент: Ужва В.І., доцент кафедри ЗФ та моделювання фізичних процесів КПП ім. Ігоря Сікорського, канд. фіз.-мат. наук, доц.

Відповідальний редактор: Лінчевський І.В., професор кафедри загальної фізики КПП ім. Ігоря Сікорського, д-р фіз.-мат. наук, проф.

Рекомендовано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за технічними спеціальностями. Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 27.04.2023 р.) за поданням Вченої ради Фізико-математичного факультету (протокол № 5 від 12.04.2023 р.).

Електронне мережне навчальне видання

Скіцько Іван Федорович, канд. фіз.-мат.наук, доц.

ФІЗИКА

ВИВЧЕННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОНІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ І МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ

Інструкція до лабораторної роботи

Фізика: Вивчення руху електронів в електричному і магнітному полях: Інструкція до лабораторної роботи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 125 “Кібербезпека”, 172 “Телекомунікації та радіотехніка” / І. Ф. Скіцько,; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,109 Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 24 с.

Посібник забезпечує проведення лабораторної роботи:” Вивчення руху електронів в електричному і магнітному полях ” за програмою навчальної дисципліни “Фізика”. Детально розглядається теорія лабораторної роботи, методика проведення дослідження і обробки результатів вимірювань.

Призначений для студентів-здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 125 "Кібербезпека" спеціалізації "Безпека державних інформаційних ресурсів" та спеціальністю 172 "Телекомунікації та радіотехніка" спеціалізації "Спеціальні телекомунікаційні системи" буде корисним і для студентів інших технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

© І.Ф.Скіцько, 2023

ВИВЧЕННЯ РУХУ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК В ЕЛЕКТРИЧНОМУ І МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ

Мета роботи:

1. Вивчити рух заряджених частинок в електричному і магнітному полях.

2. Познайомитись з методом магнетрона для визначення питомого заряду електрона (e/m_e).

3. Визначити питомий заряд електрона e/m_e та оцінити невизначеність цього значення.

4.Зробити висновки по роботі.

Теоретична частина

Вивчення руху різних заряджених частинок в електричному і магнітному полях дає можливість визначити таку важливу характеристику, як відношення їх зарядів до маси q/m і, отже, отримати дані про природу цих частинок і їхні властивості.

Діючи на потоки електронів та іонів електричними і магнітними полями, можна

керувати цими потоками, тобто змінювати їхню інтенсивність і напрямок руху; цей факт лежить в основі роботи різних електронних приладів (електронно-променевих трубок, електронних мікроскопів, прискорювачів заряджених частинок, телевізійних трубок, фотоелектричних помножувачів, електронно-оптичних перетворювачів і т.п.).

Велике практичне значення має рух електронів в магнетроні. Магнетрон – це багаторезонансний прилад для генерації електромагнітних коливань надвисоких частот. В основі роботи магнетрона лежить взаємодія електронів, що рухаються в магнітному полі по криволінійних траєкторіях, із збуджуючим електричним полем. Анод магнетрона – масивний порожнистий циліндр, у внутрішній частині якого вирізані об'ємні резонатори зі щілинами, які виходять на внутрішню поверхню циліндра (рис. 1). По осі циліндра розташований катод K . Під дією маг-

нітного поля $\vec{B}$, яке направ-
лене вздовж осі циліндра,
траєкторії електронів, що ви-
літають із катода, викривля-
ються. Коли в резонаторах
збуджуються коливання, то
біля щілин виникає змінне
електричне поле. Під дією
поля надвисокої частоти
(НВЧ) і схрещених статич-
них електричного і магнітно-
го полів електрони, що вилі-
тають із катода, утворюють

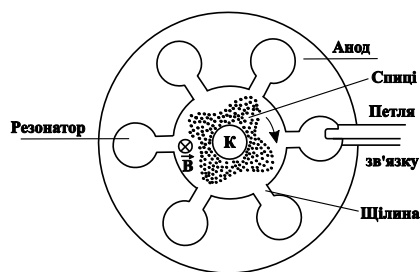


Рис.1. Принципіальна схема магнетрона.

згустки – «спіщі», (точки на
рис.1). Електрони в згустках
при взаємодії з гальмівним
полем НВЧ віддають полю
потенційну енергію і набли-
жаються до анода. На анод
вони попадають, віддавши
електромагнітному полю

майже всю енергію, що обу-
мовлює високий (до 90%)
ККД. Магнетрони здатні ге-
нерувати коливання аж до

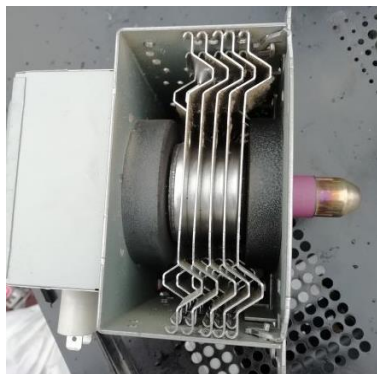


Рис.2. Зовнішній вигляд магнетрона побутової мікрохвильової печі.

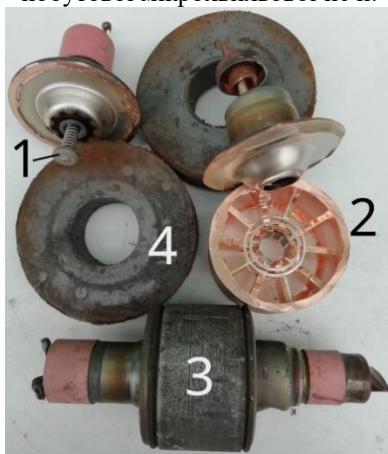


Рис.3. Електронна лампа, яка використовується в магнетроні, що показаний на рис.1.2. 1- катод, 2 – анод, 3 – загальний вигляд лампи, 4 – магніти.

міліметрового діапазону еле-
ктромагнітних хвиль і відда-

вати потужність до тисячі кіловат в імпульсному режимі. Використовуються магнетрони і в побутових цілях, наприклад, в мікрохвильових кухонних пічках (рис.2; 3).

В даній лабораторній роботі за магнетрон використується найпростіша його модель – двохелектродна радіолампа з холодним анодом і катодом, який підігрівається (рис.4).



Рис.4. Електронна лампа, яка використовується в лабораторній роботі. 1- катод, 2 – анод, 3 – загальний вигляд лампи.

Лампа поміщається в зовнішнє однорідне магнітне поле довгого соленоїда. Вектор індукції магнітного поля соленоїда направлений вздовж осі катода і анода. Як правило, ниткоподібний катод – джерело термоелектронів, оточений коаксіальним циліндричним анодом (рис.5).

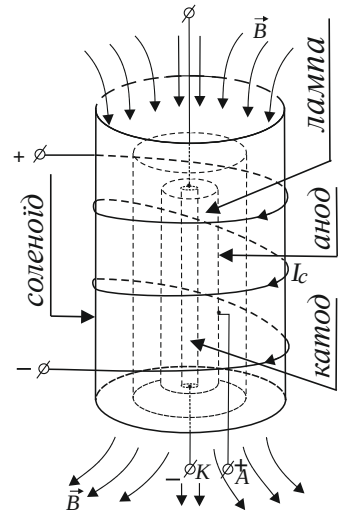


Рис.5.

Розглянемо характер руху електронів у лампі. Якщо струму I_c в соленоїді немає ($\vec{B} = 0$), електрони рухаються від катода до анода в радіаль-

ному напрямі вздовж силових ліній електричного поля між катодом і анодом (рис.6(а)). При заданому значенні анодної напруги між анодом і катодом встановлюється анодний струм $I_a = \text{const}$. Пропустимо струм, сила якого I_c , витками соленоїда і створимо, таким чином, однорідне магнітне поле вздовж катода (рис.6). На рухомі електрони діятиме сила Лоренца $\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B}$, яка перпендикулярна до напрямку швидкості руху електронів.

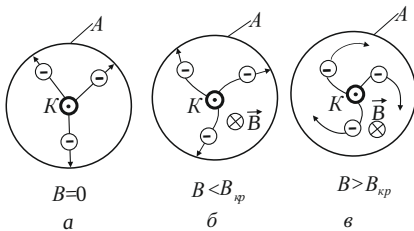


Рис.6.Траєкторія руху електронів в лампі при різних значеннях індукції магнітного поля B .

Траєкторія електронів викривляється (рис.6(б)), але всі вони будуть потрапляти на анод

і, отже, анодний струм I_a не змінюється. З ростом I_c збільшується $\vec{B}$ і кривизна траєкторії руху електронів також зростатиме. При певному, критичному, значенні індукції поля електрони почнуть рухатись по замкнутій траєкторії (рис.6(в)) і не будуть потрапляти на анод. Анодний струм I_a різко спадає.

Критичні значення сили струму соленоїда $I_{кр}$, при яких різко зменшується анодний струм, визначають за так званими скидовими характеристиками лампи, під якими розуміють графіки залежності анодного струму I_a від струму в соленоїді I_c при заданих значеннях анодної напруги U_a .

Після включення постійного струму в соленоїд його магнітне поле починає діяти на електрони з силою F_L , яка завжди направлена перпендикулярно до швидко-

сті $\vec{v}$ їхнього руху. Під дією цієї сили рух електронів набуває більш складного характеру і їхні траєкторії стають криволінійними; вони починаються на катоді і закінчуються на аноді лампи (рис.1.6(а) випадок $B < B_{кр}$). При деякій індукції магнітного поля $B=B_{кр}$, яку називають *критичною*, траєкторії електронів перетворюються в криволінійні, які торкаються поверхні анода (рис.6(в)), випадок $B = B_{кр}$). При індукції $B > B_{кр}$ електрони рухаються траєкторіями, які знаходяться між анодом і катодом. Це означає, що при певному співвідношенні між швидкостями електронів v і значенням індукції B електрони перестануть досягати анода і анодний струм I_a в лампі повинен дорівнювати нулеві. В цьому проявляється ефект дії магнітного поля на електрони, які рухаються в електричному полі, яке створене

різницею потенціалів U_a між анодом і катодом лампи.

Якби всі електрони мали однакову початкову швидкість v_0 при емісії із катода, то величина $B_{кр}$ для них була б теж однаковою і при досягненні сили струму в соленоїді, яка дорівнює $I_{кр}$, сила анодного струму I_a різко упала б до нуля, як показано на рис.7(а).

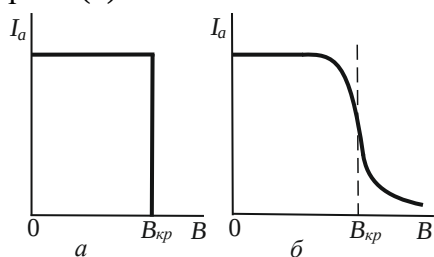


Рис.7.

Проте не існує різкого однозначного спаду анодного струму I_a до нуля при досягненні величини магнітного поля $B \geq B_{кр}$. В області значень індукції, яка близька до $B_{кр}$ має місце монотонний спад струму, як показано на рис.7(б). В літературі [1,2,3] такий спад струму пояснюється в основному тим, що

електрони вилітають із катода з різними швидкостями і тому критичні умови для різних електронів досягаються при різних значеннях індукції B магнітного поля.

Зауважимо, що на залежність анодного струму I_a від індукції магнітного поля B теж впливає: некоаксіальність між анодом і катодом, нахил вектора індукції магнітного поля по відношенню до катода, просторовий заряд між анодом і катодом і т.п., а в наших умовах ще й конструкція електронної лампи, яка не зовсім підходить для таких експериментів.

Експеримент визначення e/m_e цим методом полягає в тому, що в лампі магнетрона встановлюється постійний струм розжарення катода і постійна різниця потенціалів між анодом і катодом, тобто створюються умови для стійкості анодного струму. Потім, змінюючи від нуля значення сили струму в соленоїді I_c і

таким чином збільшуючи індукцію магнітного поля, добиваються суттєвого зменшення анодного струму I_a в лампі

Для електрона, який вилетів із катода і має радіальну складову швидкості, яка дорівнює нулю, а також знаючи геометрію лампи, тобто радіус анода r_a і радіус катода r_k , величину U_a , а також $B_{кр}$, за формулою (1) визначають величину $\frac{e}{m_e}$:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2}, \quad (1)$$

де e – заряд електрона; m_e – маса спокою електрона; r_a – радіус анода; r_k – радіус катода; U_a – напруга між анодом і катодом (анодна напруга).

Характерною особливістю цього методу є те, що він виключає необхідність вивчення траєкторії руху електрона в магнітному полі. Навпаки, зміною значення величини B (при постійному U_a) досягається наперед задана

траєкторія руху електронів, при якій вони не можуть пасти на анод лампи, всупереч дії електричного поля. Таким чином, дослід зводиться до зняття залежності анодного струму I_a (при $U_a = \text{const}$) від індукції магнітного поля соленоїда B (або струму соленоїда I_c).

Додаток 1

Виведення формули (1.1) для розрахунку e/m_e

Розглянемо рух електрона від катода до анода в лампі, яка показана на рис.5, а її переріз приведений на рис.8. Магнітне поле $\vec{B}$ направлене вздовж осі лампи і перпендикулярне електричному полю $\vec{E}$, яке направлене від аноду до катода. В загальному випадку згідно другого закону Ньютона рівняння руху електрона від катода до аноду в такій лампі запишемо так:

$$m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} + e\vec{v} \times \vec{B}, \quad (2)$$

де $e\vec{E}$ – сила зі сторони електричного поля, а $e\vec{v} \times \vec{B}$ сила Лоренца, яка діє на рухомий електричний заряд зі сторони магнітного поля (рис.8) (вона пропорційна індукції $\vec{B}$ і швидкості $\vec{v}$).

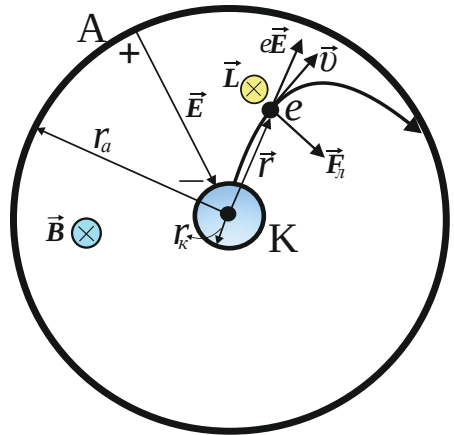


Рис.8.

Якщо рівняння (2) векторно помножити на радіус вектор $\vec{r}$, який визначає положення електрона в лампі, то (2) переписеться так:

$$\vec{r} \times m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{r} \times e\vec{E} + \vec{r} \times e\vec{v} \times \vec{B}. \quad (3)$$

Це вже буде рівняння моментів сил. Врахуємо, що вектор $\vec{E}$ направлений по лінії вектора $\vec{r}$, тоді $\vec{r} \times e\vec{E} = 0$. Скористаємось формулою векторної алгебри, що $\vec{a} \times \vec{b} \times \vec{c} = \vec{b}(\vec{a}\vec{c}) - \vec{c}(\vec{a}\vec{b})$. Тоді вираз для моменту сили Лоренца перепишеться так:

$$\vec{r} \times m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{e}\vec{v}(\vec{r}\vec{B}) - \vec{B}(\vec{r} \cdot e\vec{v}). \quad (4)$$

Так як поле $\vec{B}$ перпендикулярне $\vec{r}$, то $\vec{r}\vec{B} = 0$. Ліву частину виразу (3) перепишемо так:

$$\vec{r} \times m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{r} \times \frac{d(m_e \vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{L}}{dt},$$

де $\vec{L} = \vec{r} \times m_e \vec{v}$ – момент кількості руху електрона відносно центральної осі катода. Дійсно

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{L}}{dt} &= \frac{d\vec{r} \times m_e \vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} \times m_e \vec{v} + \\ &+ \vec{r} \times m_e \frac{d\vec{v}}{dt}. \end{aligned} \quad (5)$$

Перший доданок у виразі (5) дорівнює нулю, тому що

$$\frac{d\vec{r}}{dt} \times m_e \vec{v} = \vec{v} \times m_e \vec{v} = 0.$$

Тоді співвідношення (3) переписується так:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = -e\vec{B}\vec{r}\vec{v} = -e\vec{B}\vec{r} \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (6)$$

Проінтегруємо (6) по часу від 0 до t_0 ,

$$\int_0^{t_0} \frac{d\vec{L}}{dt} dt = - \int_0^{t_0} e\vec{B} \left(\vec{r} \frac{d\vec{r}}{dt} \right) dt, \quad (7)$$

де t_0 – час від моменту вильоту електрона з катоду і до досягнення аноду. Тоді (7) переписується так:

$$\begin{aligned} \int_{\vec{L}_k}^{\vec{L}_a} d\vec{L} &= \vec{L}_a - \vec{L}_k = \\ &- \int_{r_k}^{r_a} e\vec{B} d\left(\frac{r^2}{2}\right) = -e\vec{B} \frac{r^2}{2} \Big|_{r_k}^{r_a} = \\ &= -e\vec{B} \frac{r_a^2 - r_k^2}{2}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\vec{L}_a = \vec{r}_a \times m_e \vec{v}_a$ – момент кількості руху електрона біля аноду, $\vec{L}_k = \vec{r}_k \times m_e \vec{v}_k$ – момент кількості рух електрона біля катоду, $\vec{v}_k$ – початкова швидкість вильоту електрона із катоду. Будемо вважати, що початкова швидкість електрона v_k є значно меншою від

швидкості електрона біля аноду v_a . Дійсно, використовуюється електронна лампа з холодним катодом (підігрів незначний). Якщо вважати, що температура катода $T \cong (400 - 500)K$, то енергія теплового руху $kT = (0,034 \div 0,043)eV$. В нашій лампі електрони розганяються електричним полем з різницею потенціалів між анодом і катодом $U_a \sim (10 \div 30)V$. Тоді електрон біля аноду набуває енергію $eU_a \approx (10 \div 30)eV$. Тобто $eU_a \gg kT$, тому будемо вважати, що початкова швидкість електрона біля катода дорівнює нулю ($v_k = 0$). Тоді співвідношення (8) перепишеться так:

$$\vec{L}_a = -e\vec{B} \frac{r_a^2 - r_k^2}{2}, \quad (9)$$

або

$$\vec{r}_a \times m_e \vec{v}_a = -e\vec{B} \frac{r_a^2 - r_k^2}{2}. \quad (10)$$

Знак «мінус» в (10) враховує знак заряду електрона. Якщо індукція магнітного поля є критичною $B_{кр}$, то швидкість електрона біля анода $\vec{v}_a$ перпендикулярна до радіус вектора $\vec{r}_a$ і тоді (10) перепишеться так:

$$m_e r_a v_a = e B_{кр} \frac{r_a^2 - r_k^2}{2}. \quad (11)$$

Швидкість електрона біля аноду знайдемо із співвідношення, що

$$\frac{m_e v_a^2}{2} = e U_a. \quad (12)$$

Тоді (11) перепишеться так:

$$m_e r_a \sqrt{\frac{2e U_a}{m_e}} = e B_{кр} \frac{r_a^2 - r_k^2}{2}.$$

Звідки знаходимо, що

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8 U_a}{B_{кр}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2}. \quad (13)$$

За формулою (13) можна розрахувати питомий заряд електрона e/m_e , визначаючи $B_{кр}$ для анодної напруги U_a .

В даній лабораторній роботі для створення магнітного поля використовується со-

леноїд, діаметр перерізу якого значно менший його довжини. Це дозволяє вважати його нескінченно довгим і використувати формулу для індукції магнітного поля довгого соленоїда $B = \mu_0 n I_c$, де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнітна стала вакууму, n — густина намотки витків соленоїда, тобто їхня кількість, що приходить на одиницю довжини соленоїда, I_c — сила струму у витках соленоїда. Тоді величина критичної індукції магнітного поля буде дорівнювати

$$B_{кр} = \mu_0 n I_{кр}. \quad (14)$$

Підставляючи вираз (14) в (13), отримаємо, що

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8U_a}{\mu_0^2 n^2 I_{кр}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2}. \quad (15)$$

Вираз (15) можемо дещо спростити. Для нашої електронної лампи $r_k \ll r_a$, тому $r_k^2/r_a^2 \ll 1$. Величини n і r_a є

сталі для експериментальної установки і тому можна ввести позначення:

$$k = \frac{8}{\mu_0^2 n^2 r_a^2}. \quad (16)$$

Тоді формула (15) перепишеться так:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{kU_a}{I_{кр}^2}, \quad (17)$$

або

$$kU_a = \frac{e}{m_e} I_{кр}^2. \quad (18)$$

Ця залежність U_a від $I_{кр}^2$ називається *параболою критичного режиму магнетрона*.

Додаток 2

Методика визначення критичного струму в соленоїді

Як видно із (17) для знаходження відношення e/m_e потрібно визначити критичний струм $I_{кр}$ в соленоїді, який визначає критичну індукцію $B_{кр}$. Методика знаходження $I_{кр}$ — дискусійне питання але більшість дослідників погоджуються, що при $B_{кр}(I_{кр})$ основна кількість електронів, які вихо-

дять із катода внаслідок явища термоелектронної емісії не доходять до аноду лампи, тому

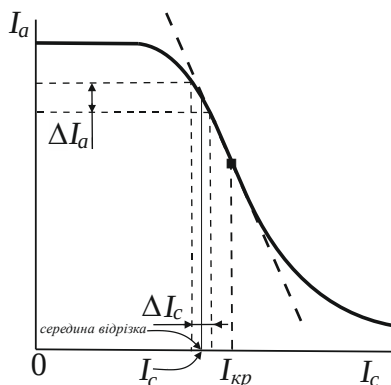


Рис.8.

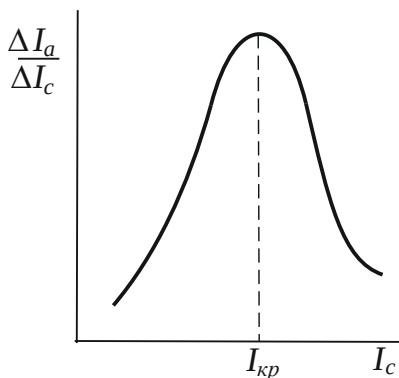


Рис.9.

$I_{кр}$ відповідає найбільш крутій ділянці залежності анодного струму I_a від струму в соленоїді I_c (рис.7(б)). Ділянка, де функція $I_a = f(I_c)$ найбільш швидко змінюється має точку,

в якій похідна dI_a/dI_c має максимальне значення. Для знаходження $I_{кр}$ потрібно побудувати графік похідної анодного струму I_a по струму I_c в соленоїді. Для цього потрібно розбити вісь струму I_c на рис.8 на однакові частини ΔI_c і з рис.8 знайти відповідні їм величини ΔI_a . Знайти посередині кожного інтервалу ΔI_c на рис.8 значення струму I_c і побудувати графік залежності $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = f(I_c)$,

як показано на рис.9. Максимум побудованої функції $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} = f(I_c)$ приходить для значення струму в соленоїді $I_c = I_{кр}$. Така процедура визначення критичного струму в соленоїді для певного значення анодної напруги називається графічним диференціюванням. Таку операцію потрібно проводити для кожної залежності

$I_a = f(I_c)$, отриманих для різних значень анодної напруги U_a . Це значно утруднює процес обробки результатів експерименту, тому можна використати простіший спосіб визначення $I_{кр}$ для кожного значення U_a . Для цього проводимо дотичну лінію до крутого схилу залежності $I_a = f(I_c)$ (рис.8, пунктирна лінія) і знаходимо на цій залежності точку, в якій ця дотична лінія (пунктирна лінія на рис.8) буде мати найбільший кут нахилу до осі I_c . Координата цієї точки дотику на осі I_c визначає струм в соленоїді, при якому похідна dI_a/dI_c має максимальне значення (згідно геометричного тлумачення змісту похідної), а значить струм в соленоїді відповідає значенню струму, що дорівнює $I_{кр}$. Якщо дотична пряма лінія має декі-

лька точок дотику до залежності $I_a = f(I_c)$, то необхідно брати за точку дотику середину цього відрізка (рис.8). Це дозволяє швидше і з меншими затратами часу знаходити $I_{кр}$ для кожного значення U_a .

Додаток 3. Методика визначення питомого заряду e/m_e

Питомий заряд електрона e/m_e можна визначати за формулою (17) за одними значеннями U_a і $I_{кр}$. Це буде неточно, так як всього одне вимірювання. Для більш точного визначення відношення e/m_e за формулою (17) потрібно провести вимірювання для різних значень анодної напруги U_a і для кожного значення U_a визначити відповідне значення $I_{кр}$. Згідно формули (18) залежність $kU_a = f(I_{кр}^2)$ буде лінійною в координатних осях kU_a і $I_{кр}^2$, як показано на рис.10. Пряму лінію проводимо між експериментальними

точками. Нахил цієї прямої лінії $\frac{\Delta(kU_a)}{\Delta(I_{кр}^2)}$ буде дорівнювати експериментально визначеній

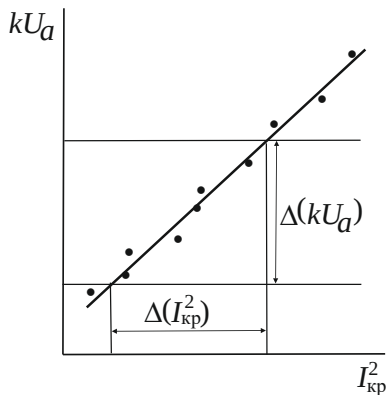


Рис.10.

величині e/m_e . Більше того, можна використати метод найменших квадратів і математично за допомогою програми опрацювати експериментальні дані. Цей метод дозволяє визначити саму величину e/m_e , а також її невизначеність (похибку).

Опис експериментальної установки

Принципову електричну схему зображено на рис.11. Живлення установки здійснюється універсальним джерелом

живлення «УИП-2». Нитка розжарення діода живиться від виходу «6,3В» через блок живлення розжарення «БПН», що захищає нитку розжарення від перевантажень.

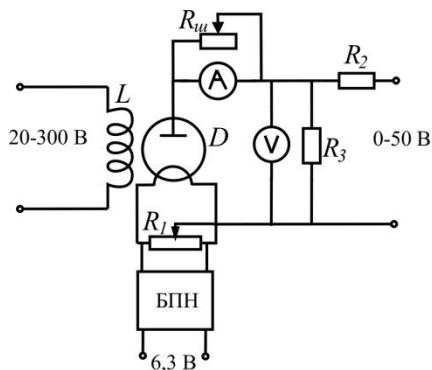


Рис.11. Схема установки.

Середня точка кола живлення приєднана до мінуса джерела анодної напруги. Анодне коло живиться від виходу «0-50 В», напругу виходу можна плавно змінювати потенціометром на блоці живлення. У лабораторній роботі використовується діапазон напруги 0-25 В, тому на вході встановлюють поділь-

ник напруги R_2 і R_3 , щоб вберегти установку від перевантажень. Для вимірювання анодного струму використовується мікроамперметр, до якого під'єднано регулювальний шунт. Для зручності ручки шунта винесено на передню панель установки.

Соленоїд живиться від виходу «20-300В» блока живлення. Сила струму соленоїда вимірюється міліамперметром панелі рис.12. Струм соленоїда можна змінювати, регулюючи напругу на вході блока живлення.

Порядок виконання роботи

1. Перед початком роботи переконатися, що ручки потенціометрів які регулюють напругу виходів «20-300 В» і «0-50 В» встановлені в крайнє ліве положення.

2. Увімкнути універсальне джерело живлення «УІП-

2» в мережу і дати прогрітися 5 хвилин.

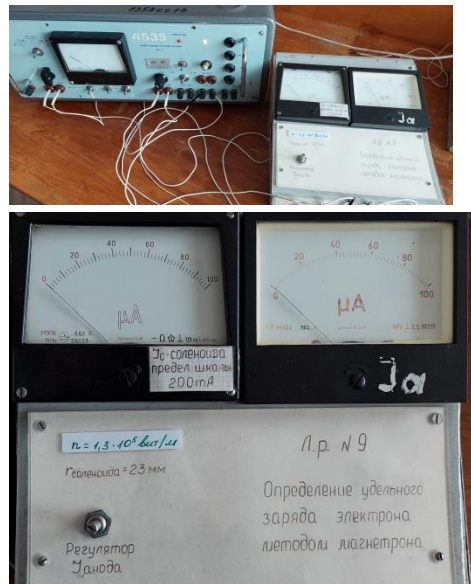


Рис.12. Лабораторна установка.

3. За допомогою потенціометра встановити робочу анодну напругу U_a в межах робочого діапазону «5-30 В». Повертаючи ручку регулювального шунта домогтися, щоб стрілка міліамперметра, що вимірює анодний струм I_a , знаходилась у останній третині шкали (за відсутності струму в соленоїді, тобто за умови ($I_c=0$)). Занести значення U_a та I_a (I_a вимірю-

ється у поділках шкали мікроамперметра) в таблицю 1.

4. Ручкою регулювання виходу «20-300В» збільшувати струм соленоїда I_c з кроком 10 мА. Значення величин I_c та I_a занести у табл.1. Струм соленоїда збільшувати до досягнення критичного режиму, тобто домогтися стрімкого зменшення анодного струму зі збільшенням струму соленоїда.

5. За допомогою потенціометра встановити іншу робочу анодну напругу U_a в діапазоні «5-30 В» і повністю повторити вимірювання пунктів 3 і 4. Вимірювання повторювати 6-8 разів для різних значень напруги U_a .

6. Записати вказані на робочому місці значення r_a і n у таблицю 2.

Таблиця 1

$U_{a1} =$										
I_a , под										

I_c , мА										
$U_{a2} =$										
I_a , под										
I_c , мА										
$U_{a3} =$										
I_a , под										
I_c , мА										
$U_{a4} =$										
I_a , под										
I_c , мА										
$U_{a5} =$										
I_a , под										
I_c , мА										
$U_{a6} =$										
I_a , под										
I_c , мА										
$U_{a7} =$										
I_a , под										

обчислити значення величини e/m_e .

7. Визначити граничну невизначеність (похибку) величини e/m_e . Програма дає значення середньої квадратичної похибки середнього арифметичного величини нахилу прямої $\frac{\Delta(kU_a)}{\Delta(I_{кр}^2)}$.
8. Порівняти отримані значення e/m_e з табличною його величиною.
9. Записати кінцевий результат визначення e/m_e .
10. Написати висновки по роботі.

Приклад обробки результатів експерименту

Розрахунки результатів експерименту приведені в таблиці 4, де будемо вважати $y = kU_a$, а $x = I_{кр}^2$. Тому формула (18) прийме вид:

$$y = ax,$$

де $a = e/m_e$.

За даними табл.4 нанесемо експериментальні точки

на площину з координатними осями $y = kU_a$ і $x = I_{кр}^2$ з відповідним масштабом рис.13. Між експериментальними точками проведемо пряму лінію 1, таким чином, щоб вона проходила через максимальну кількість точок і щоб кількість точок по обидві сторони прямої 1 була, по можливості, однаковою. Після проведення прямої 1 про експериментальні точки можна тимчасово "забути". Вибірємо на прямій 1 дві зручні для розрахунків точки, для яких знаходимо: $(kU_a)_1, (I_{кр}^2)_1$ і $(kU_a)_2, (I_{кр}^2)_2$.

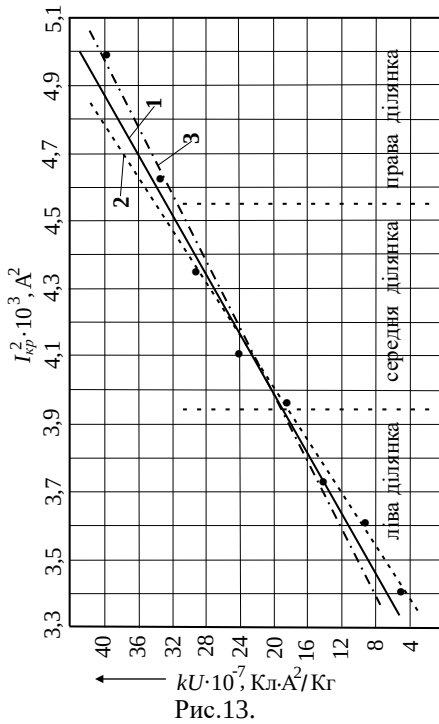
Тоді згідно формули (18) знаходимо:

$$\begin{aligned} \left(\frac{e}{m_e}\right)_1 &= \frac{(kU_a)_2 - (kU_a)_1}{(I_{кр}^2)_2 - (I_{кр}^2)_1} = \\ &= \frac{\Delta(kU_a)}{\Delta(I_{кр}^2)} = \frac{3 \cdot 4 \cdot 10^7}{5,5 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 2,18 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.} \end{aligned}$$

Для знаходження похибки визначення кутового

Таблиця 4

№	$kU_q \cdot 10^{-7}, \text{A}^2 \cdot \text{Кл/кг}$	$I_{кр}^2 \cdot 10^3, \text{A}^2$
1	4,8	3,35
2	9,6	3,60
3	14,4	3,72
4	19,1	3,96
5	24,0	4,10
6	28,8	4,36
7	33,6	4,62
8	38,3	5,04



коефіцієнта $\frac{e}{m_e}$ прямої 1 інтервал, в якому лежать виміряні значення $I_{кр}^2$, розділимо на три однакові частини, як показано на рис.13. Пряму 1 повертаємо так, щоб на лівій ділянці під прямою точок було у два рази більше, ніж над нею, а на правій ділянці навпаки (пряма 3) на рис.13.

За нахилами прямих 2 і 3 знаходимо кутові коефіцієнти, які будуть:

$$\left(\frac{e}{m_e}\right)_2 = \frac{5 \cdot 4 \cdot 10^7}{8 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}} = 2,50 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

і

$$\left(\frac{e}{m_e}\right)_3 = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^7}{4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}} = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Тоді за формулою $\sigma_a = \frac{\Delta a}{\sqrt{n}}$ знаходимо середню квадратичну похибку визначення кутового коефіцієнта прямої 1:

$$\sigma_1 = \frac{\left(\frac{e}{m_e}\right)_2 - \left(\frac{e}{m_e}\right)_3}{\sqrt{n}} =$$

$$= \frac{(2,5 - 2,0) \cdot 10^{11}}{\sqrt{8}} = 0,18 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

В практиці лабораторних робіт за граничну абсолютну похибку приймають $\Delta_{\text{гр}} = 3\sigma$, ймовірність довіри якої згідно [4] табл.1 є $P = 99,7\%$. Тому в нашому випадку будемо вважати, що абсолютна похибка визначення питомого заряду електрона буде:

$$\Delta_{\text{гр.1}} = 3\sigma_1 = 0,54 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Тому кінцевий результат визначення питомого заряду електрона можемо записати так:

$$\left(\frac{e}{m_e}\right)_1 \pm \Delta_{\text{гр.1}} = (2,18 \pm 0,54) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Тобто, згідно нашого лабораторного експерименту значення $\frac{e}{m_e}$ знаходиться в межах від $2,72 \cdot 10^{11}$ Кл/кг до $1,64 \cdot 10^{11}$ Кл/кг із ймовірністю довіри $P = 99,7\%$.

Звичайно ми не отримали *табличного значення*

$$e/m_e = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг,}$$

але наблизились до нього настільки, на стільки нам дозволяє лабораторна установка.

Опрацюємо ці ж результати експерименту, що в табл.4, за методом найменших квадратів. Для цього використаємо формули із [4]: (1.11.16), (1.11.20) і (1.11.22). Приймаючи $y = kU_a$, а $x = I_{\text{кр}}^2$, виконаємо необхідні обчислення і приведемо їх в таблиці 5.

Таблиця 5

$\sum_{i=1}^8 y_i \cdot 10^{-7}$	$\bar{y} \cdot 10^{-7}$	$\sum_{i=1}^8 x_i \cdot 10^3$	$\left(\sum_{i=1}^8 x_i\right)^2 \cdot 10^6$
172,6	21,575	32,751	1072,63
$\bar{x} \cdot 10^3$	$(\bar{x})^2 \cdot 10^6$	$\sum_{i=1}^8 x_i^2 \cdot 10^6$	$\overline{x^2} \cdot 10^6$
4,094	16,76	136,274	17,034
$\sum_{i=1}^8 x_i y_i \cdot 10^{-4}$	$\overline{xy} \cdot 10^{-4}$	$\sum_{i=1}^8 y_i^2 \cdot 10^{-14}$	$\overline{y^2} \cdot 10^{-14}$
752,056	94,01	4688,56	586,0825

За формулою (1.11.20) із [4] кутовий коефіцієнт

прямої $y = b + ax$, де
 $a = e / m_e$ буде:

$$a = \frac{e}{m_e} = \frac{\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2} =$$

$$= \frac{94,01 \cdot 10^4 - 4,09 \cdot 10^{-3} \cdot 21,56 \cdot 10^7}{17,034 \cdot 10^{-6} - 16,76 \cdot 10^{-6}}$$

$$= 2,07 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Середню квадратичну похибку цього кутового коефіцієнта розрахуємо за формулою (1.11.22) із [4]:

$$\sigma_a =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{8}} \sqrt{\frac{(5,861 - 4,655)}{(17,034 - 16,76)} - (2,07)^2} \cdot$$

$$\cdot 10^{11} \text{ Кл/кг} = 0,12 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Прийнявши за граничну абсолютну похибку:

$\Delta_{\text{гр}} = 3\sigma_a = 0,36 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$,
 результат обробки методом найменших квадратів можемо записати так:

$$\frac{e}{m_e} = (2,07 \pm 0,36) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

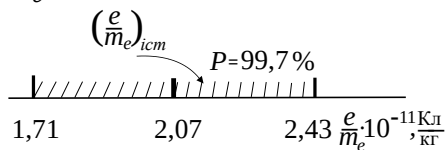


Рис.14.

Це означає, що в інтервалі довіри, який знаходиться

між $e/m_e = 2,43 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ і $e/m_e = 1,71 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ знаходиться 99,7% результатів всіх значень e/m_e . Бачимо, що в інтервалі значень e/m_e від $2,43 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ до $1,71 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ знаходиться і табличне значення e/m_e (рис.14).

Обробка результатів табл.4 методом найменших квадратів за допомогою програми дає такі результати: $\frac{e}{m_e} = 2,07 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$, середню квадратичну похибку $\sigma_{e/m_e} = 0,12 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$.

Якщо прийняти, що $\Delta_{\text{гр}} = 3\sigma_{e/m_e}$, то отримаємо попередній результат.

Кінцевий результат обробки результатів експерименту можемо записати так:

$$\frac{e}{m_e} = (2,07 \pm 0,36) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Відносна невизначеність

$$\delta = \frac{0,36}{2,07} \cdot 100\% = 17\%$$

з ймовірністю довіри

$$P = 0,997.$$

Контрольні запитання

1. Як рухаються заряджені частинки в електричному полі?

2. Як рухаються заряджені частинки в магнітному полі?

3. Написати формулу для сили Лоренца та пояснити її.

4. Чи змінює магнітне поле енергію зарядженої частинки, яка рухається в ньому? Відповідь пояснити.

5. Заряджена частинка влітає у взаємно перпендикулярні електричне і магнітне поля. За якої умови частинка буде рухатись рівномірно і прямо-лінійно?

6. Від чого залежить період обертання зарядженої частинки, яка рухається в магнітному полі?

7. Який вигляд матиме траєкторія заряджених частинок, що влітають із сталою швидкістю v у магнітне поле з ін-

дукцією B , якщо а) $\vec{v} \perp \vec{B}$; б) $\vec{v}$ утворює з $\vec{B}$ деякий кут? Поясніть відповідь.

8. Як рухається заряджена частинка, що влітає в електричне поле, силові лінії якого паралельні напрямку її швидкості?

9. Які можливі траєкторії руху електронів в магнетроні при різних значеннях індукції магнітного поля B (покажіть траєкторії на рисунку)? Що таке критичне поле $B_{кр}$?

10. Що обумовлює плавну залежність анодного струму магнетрона від індукції магнітного поля в соленоїді ($I_a = f(B)$)?

11. Як виводиться формула для величини індукції магнітного поля всередині безмежно довгого соленоїда?

12. Як впливає зміна характеристик електричного E і магнітного B полів на форму траєкторії руху електрона в даній лабораторній роботі?

13. Чи потрібне для розрахунків абсолютне значення анодного струму I_a ?

14.Що найбільш суттєво впливає на точність визначення питомого заряду електрона e/m_e в даній лабораторній роботі?

15.Який прилад називається магнетроном? Які фізичні явища лежать в основі його роботи? Де на практиці використовують магнетрони?

3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. В 3 т. Т.2 Електрика і магнетизм. К.:Техніка, 2001 р.

4. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. [Електронний ресурс]: навч. посіб./ КПІ ім. Ігоря Сікорського/: —Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. –88 с. - Назва з екрану.
- Доступ:
<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>.

Рекомендована література

1. Черкашин В.П. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики для студентів усіх форм навчання: Частина

1. Електрика і магнетизм. – К.:КПІ, 1992. – 57-64 с.

2. Бабич Н.Л., Гриценко Ю.И., Мартинюк А.В., Мацуї І.П., Тычинский А.В., Халимонова И.Н., Харченко Н.П. Курс фізики (практикум). – К.: Вища школа, 1992. – с.88 – 93.

.