

Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона

Мета роботи: 1) ознайомлення з методом створення взаємно перпендикулярних електричного і магнітного полів; 2) дослідження руху зарядженої частинки в схрещених електричному та магнітному полях; 3) експериментальне визначення відношення заряду електрона до його маси (питомого заряду електрона).

Прилади та обладнання: 1) касета ФПЕ-03; 2) джерело живлення; 3) міліамперметр.

Теоретичний вступ

Ідея досліджу

Електрон – складова частина атомів, носій струму в металах, напівпровідниках, газах, фундаментальна частинка, носій найменшої маси і найменшого електричного заряду в природі. Заряд (e) і маса (m_e) електрона дорівнюють

$$e \approx -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Задача досліджу: визначити відношення e/m (питомий заряд електрона) та порівняти його з табличним.

Магнетроном називається електровакуумний прилад, який генерує електромагнітні хвилі у надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні. У даній лабораторній роботі у магнетрона запозичений метод конфігурації схрещених магнітного та електричного полів.

Якщо в електронній лампі одному металевому електроду (наприклад, аноду, плюс «+») надати форму циліндра, а іншому електроду (катоду, мінус, «-») надати форму нитки, яка протягнута вздовж осі цього циліндра (рис.1), то можна створити радіальний потік електронів (рис.2).

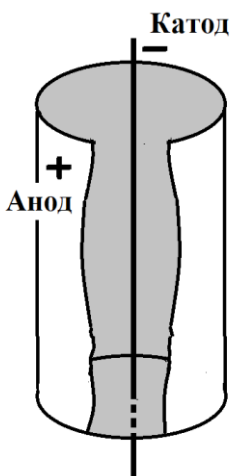


Рис. 1

Для цього металева нитка – катод – розжарюється допоміжним струмом, і з неї у вакуум починають вилітати електрони (явище так званої термоелектронної емісії). Другий електрод – анод – слугує для уловлювання електронів, що випускаються катодом. Анод, потенціал якого позитивний, притягує електрони тому, що їх заряд негативний (рис. 2, вид згори).

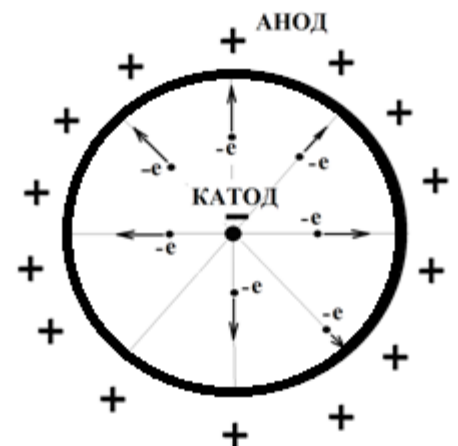


Рис.2.

Далі в даному досліді додається іще одне поле – магнітне B . Його спрямовують вздовж осі електронної лампи, наприклад, знизу догори (рис. 3). Таке магнітне поле можна отримати, якщо помістити електронну лампу всередині котушки зі струмом – соленоїда..

Таким чином здійснюється основна ідея магнетрона – магнітне і електричне поля взаємно перпендикулярні.

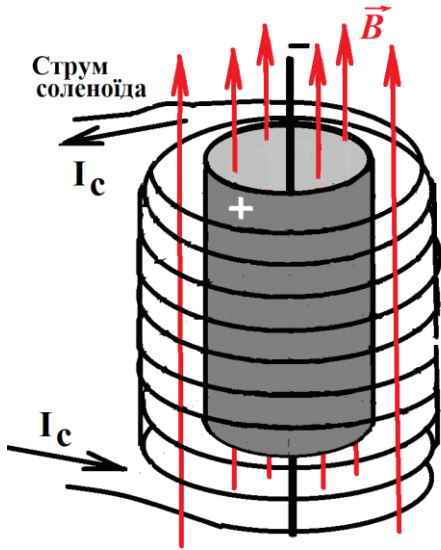


Рис. 3.

При деякому значенні магнітної індукції B електрони з розжареної нитки не будуть досягати анода (рис. 5, в), бо їх траєкторія сильно закручується. Електрон пролітає біля внутрішньої поверхні анода, майже торкаючись її, і повертається на катод.

Цей випадок називають **критичним і його фіксують у досліді по зникненню струму від катода до анода**. За допомогою відповідних розрахункових формул, в які входять критичні параметри, визначають відношення e/m .

З боку магнітного поля на рухомі електрони починає діяти так звана магнітна сила $F_{\text{маг}}$, або сила Лоренца. Ця сила є перпендикулярною як до швидкості v електронів, так і до напрямку магнітного поля B (рис. 4).

На рис. 4 показаний переріз електронної лампи площиною, перпендикулярною до катода (вид згори). Кружечком з точкою в центрі позначене магнітне поле B , що напрямлене перпендикулярно від рисунку до нас.

Оскільки магнітна сила $F_{\text{маг}}$ є перпендикулярною до швидкості електрона, траєкторія електрона викривляється (рис. 5, б). Електрон попадає на анод по скривленій траєкторії.

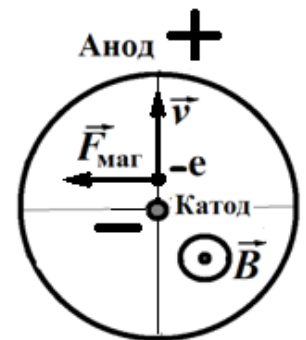


Рис.4.

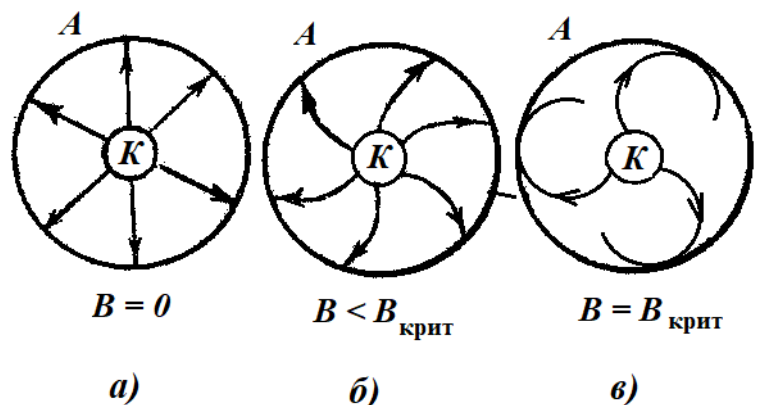


Рис.5.

Виведення робочої формули

Швидкість v емітованого з катода електрона можна визначити, дорівнюючи його кінетичну енергію роботі сил електричного поля, що діє в просторі між катодом і анодом

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (1)$$

Тут m – маса електрона, e – заряд електрона, U_a – різниця потенціалів між анодом і катодом (анодна напруга).

Звідси швидкість, якої набувають електрони

$$v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}}. \quad (2)$$

У відсутності магнітного поля електрони рухаються під дією електричного поля прямо-лінійно в радіальних напрямках (рис. 2). Потік електронів, що летять від катода до анода, називають анодним струмом I_a .

При вміщенні електронної лампи в магнітне поле B на рухомі електрони діє магнітна сила (її часто називають силою Лоренца), напрям якої є перпендикулярним до напрямку магнітної індукції B і напрямку швидкості електрона v (рис. 4), а значення якої визначається векторним добутком

$$F = e v \times B. \quad (3)$$

Ця перпендикулярна до швидкості сила надає електрону доцентрового прискорення.

$$a_{\text{доц}} = \frac{v^2}{r}.$$

За модулем магнітна сила у даному випадку становить

$$F = evB.$$

Згідно з другим законом Ньютона

$$evB = m(v^2/r) \quad (4)$$

Отже електрон буде рухатися в магнітному полі по колу, радіус якого з формули (4):

$$r = mv/(eB)$$

буде зменшуватися з ростом магнітної індукції B .

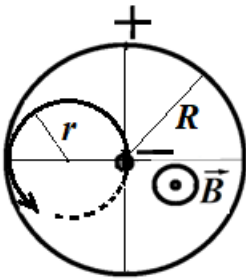
Виключаючи з рівнянь (2) і (4) швидкість v , отримаємо

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_a}{B^2 r^2}$$

У критичному магнітному полі (рис. 6) електрон, як видно з рисунка, рухається по колу радіуса $r \approx R/2$, де R – радіус анода – циліндра (товщиною осьової нитки-катода можна нехтувати).

Тоді

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{\text{крит}}^2 R^2}.$$



в)

$$B = B_{\text{крит}}$$

Для соленоїда скінченної довжини магнітне поле розраховують за формулою

$$B = \frac{\mu_0 N I_{\text{сол}}}{\sqrt{D^2 + L^2}},$$

де $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, N – кількість витків соленоїда, L – його довжина, D – діаметр, $I_{\text{сол}}$ – струм в соленоїді.

Формула для розрахунку питомого заряду електрона набуває вигляду

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a (L^2 + D^2)}{R^2 \mu_0^2 I_{\text{сол-крит}}^2 N^2} \quad (5)$$

або, для зручності,

$$\frac{e}{m} = k \frac{U_a}{I_{\text{сол-крит}}^2} \quad (6)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який визначається паспортними даними експериментальної установки. Для даної установки $k = 1,39 \cdot 10^{10}$ відповідних в системі СІ одиниць.

Отже, остаточно маємо робочу формулу

$$\frac{e}{m} = 1,39 \cdot 10^{10} \frac{U_a}{I_{\text{сол-крит}}^2} \text{ (Кл/кг)} \quad (7)$$

Тут анодну напругу U_a підставляють у вольтах, критичний струм соленоїда $I_{\text{сол-крит}}$ – в амперах.

Опис установки

Основна частина установки - електронна вакуумна лампа, яка розміщена всередині соленоїда, – тут називається модулем ФПЕ-03. Інші частини: джерело живлення і міліамперметр (цифровий мультиметр) (фото 1).

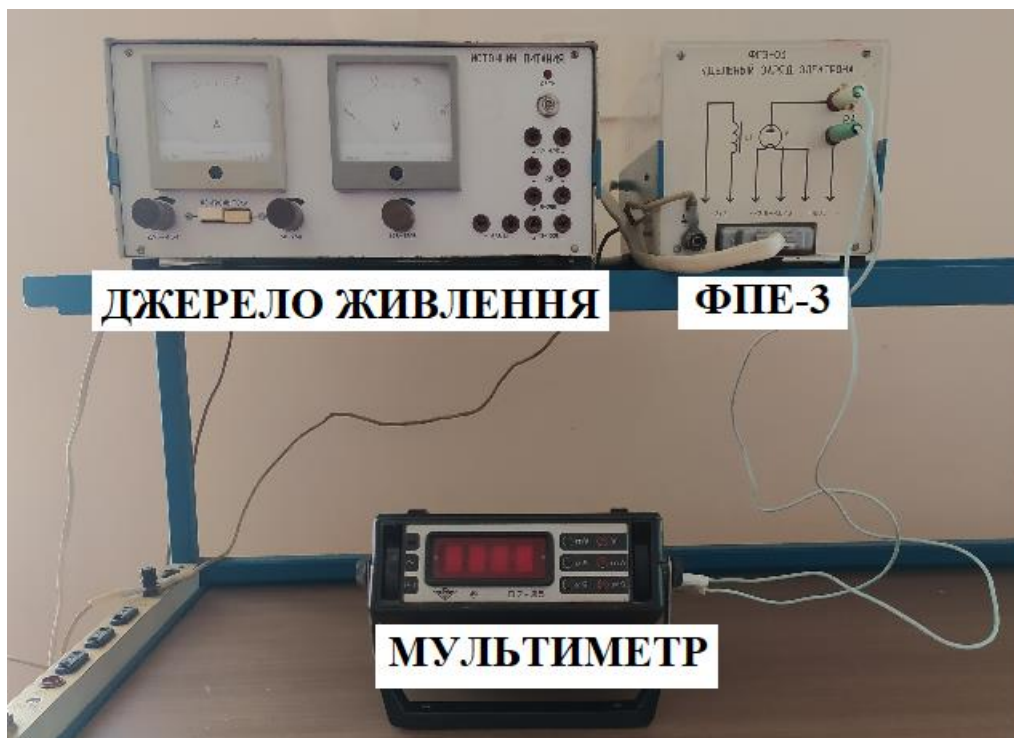


Фото 1.

Порядок виконання роботи

1. Зберіть установку, з'єднав гнізда на лицьовій панелі модуля ФП-03 з відповідними гніздами джерела живлення і міліамперметра (якщо установка вже не зібрана лаборантом).

Поверніть ручки регуляторів струму та напруги на панелі «ДжЖивл» до упору проти годинникової стрілки, увімкніть тумблер МЕРЕЖА.

Увімкніть тумблер МЕРЕЖА цифрового мультиметра, перемикачем «ВИД РОБОТИ» встановити режим вимірювання постійного струму "I =".

2. За допомогою вольтметра джерела живлення **установіть анодну напругу** $U_a = 50 \text{ В}$.

3. Обертанням ручки регулятора струму соленоїда джерела живлення **збільшуйте струм** $I_{\text{сол}}$, що проходить через соленоїд, від початкового $0,4 \text{ А}$ до максимального значення $2,2 \text{ А}$ через кожні $0,1 \text{ А}$.



Для кожного наступного значення струму соленоїда **зніміть показання** відповідної сили анодного струму **по цифровому мультиметру**. Результати вимірювань запишіть у Таблицю 1.

4. **Повторіть вимірювання** за пунктами 2 і 3 при значеннях $U_a = 40$ В і $U_a = 30$ В.

У кожній серії вимірювань анодна напруга залишається постійною,
 $U_a = \text{const}$.

Таблиця 1.

$U_a = 50$ В		$U_a = 40$ В		$U_a = 30$ В	
$I_{\text{сол}}$ (А)	I_a (мА)	$I_{\text{сол}}$ (А)	I_a (мА)	$I_{\text{сол}}$ (А)	I_a (мА)

5. Якщо вважати, що всі електрони покидають катод без початкової швидкості, то при $B < B_{\text{крит}}$ усі вони попадають на анод, а при $B > B_{\text{крит}}$ всі повертаються до катода, не досягнувши анода.

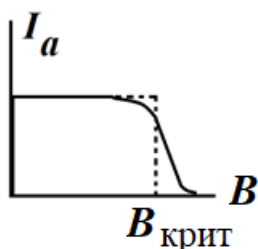


Рис. 7.

Це призводить до різкого зменшення анодного струму і його повного припинення при значеннях $B \geq B_{\text{крит}}$. Анодний струм змінювався б при цьому так, як вказано на рис. 7 штриховою лінією. Така залежність отримала назву «скидної».

В даному досліді графік залежності $I_a = f(B)$ анодного струму I_a від магнітної індукції B заміняється згідно з формулою (5) на залежність анодного струму I_a від сили струму через соленоїд $I_{\text{сол}}$:

$$I_a = f(I_{\text{сол}}).$$

Після того, як буде отримана залежність сили анодного струму I_a від сили струму $I_{\text{сол}}$ через соленоїд за даними таблиці 1 **побудуйте графіки залежності $I_a = f(I_{\text{сол}})$** .

В реальності електрони випускаються розжареним катодом з різними початковими швидкостями. Тому для них критична умова настає при різних значеннях магнітної індукції B (в даному досліді при різних значеннях струму соленоїда $I_{\text{сол}}$). Отже, так звана «скидна» характеристика на відміну від ідеального випадку

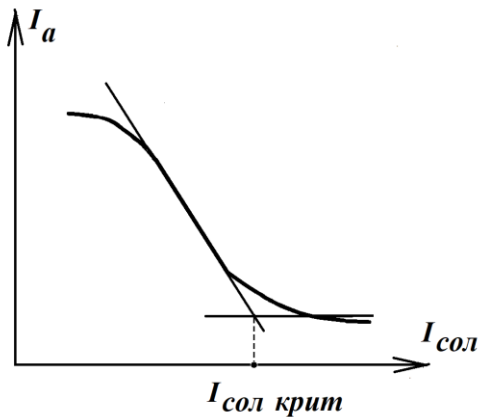


Рис. 8.

має менш круту падаючу частину (рис. 8).

Один із способів визначення за цим графіком критичного струму соленоїда $I_{\text{сол крит}}$, який входить в розрахункову формулу (7), полягає в наступному.

Проводять дотичну до графіка на ділянці спаду і пряму лінію, яка співпадає з ділянкою мінімальних значень анодного струму (рис. 8) до їх взаємного перетину. Абсциса точки перетину визначає шукану $I_{\text{сол крит}}$.

За кожним з трьох побудованих графіків визначте критичний струм соленоїда та занесіть отримані значення $I_{\text{сол крит}}$ у таблицю 2.

Таблиця 2.

U_a (В)	$I_{\text{сол крит}}$ (А)	e/m
50		
40		
30		

6. Для кожної анодної напруги U_a та відповідного критичного значення струму $I_{\text{сол крит}}$, що протікає через соленоїд, за формулою (7) **розрахуйте питомий заряд електрона e/m** і занесіть його у Таблицю 2. .

7. Якщо дозволяє учбовий час, за стандартною процедурою (див. Додаток) проведіть **обробку результатів** вимірювання та визначте граничну похибку $\Delta(e/m)$. Результат запишіть у вигляді

$$e/m = \langle e/m \rangle \pm \Delta(\langle e/m \rangle), \text{ (Кл/кг) при } \alpha =$$

Контрольні питання

1. У чому полягає метод магнетрона?
2. За яких умов виникає сила Лоренца? Яка величина і напрям сили Лоренца?
3. Чому при критичному значенні сили струму через соленоїд анодний струм припиняється?
4. Чому в залежності анодного струму від струму соленоїда відсутній різкий спад?
5. Однорідні електричне і магнітне поля напрямлені взаємно перпендикулярно. Напруженість електричного поля $E = 100$ кВ/м, магнітна індукція $B = 50$ мТл. Електрон влітає у схрещені поля і рухається прямолінійно. Якими мають бути напрям і модуль швидкості електрона?

Методика обробки експерименту

1. Проводять n незалежних дослідів та визначають n значень шуканої величини $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

2. Розраховують середнє арифметичне значення шуканої величини:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

3. Розраховують відхилення кожного результату від середнього значення:

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle.$$

4. Визначають стандартне відхилення середнього

$$S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \dots}{n(n-1)}}.$$

5. Задають довірчу ймовірність α . Зазвичай довірчу ймовірність вважають рівною 0,90; 0,95; 0,98; 0,99. За вибраним значенням довірчої ймовірності α і для виконаної кількості вимірювань n за таблицею визначають коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha, n}$ (Таблиця є в кожній лабораторії).

6. Обчислюють напівширину довірчого інтервалу (**абсолютну похибку середнього**)

$$\Delta \langle x \rangle = t_{\alpha, n} S_{\langle x \rangle}.$$

7. Визначають відносну похибку

$$E = \frac{\Delta \langle x \rangle}{\langle x \rangle} \cdot 100\%.$$

8. Остаточний результат вимірювання записують у вигляді:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta \langle x \rangle) \text{ одиниць виміру, при } \alpha = \dots$$

Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. У 3 т. Т 2: Електрика і магнетизм. Навчальний посібник для студентів вищих технічних та педагогічних закладів освіти – К.; "Техніка", 2006, -452 с
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є).. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.. Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.:«Либідь», 2001. – 448с
4. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Уклав Гаркуша І.П