

Міністерство освіти і науки України  
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»  
Фізико-технічний факультет  
Кафедра фізики і методики викладання

**Лабораторна робота № 2 (ФПЕ-03м)**

**ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА  
ДО ЙОГО МАСИ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА**

м. Івано-Франківськ

**Мета роботи:** вимірювання питомого заряду електрона ( $\frac{e}{m}$ ) методом магнетрона

### **Загальні відомості**

На заряджену частинку, яка рухається у електричному і магнітному полях з боку цих полів діє сила Лоренца яка визначається

$$\vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{v}\vec{B}]),$$

де  $q$  – заряд частинки,  $\vec{v}$  – її швидкість,  $\vec{E}$  – напруженість електричного поля,  $\vec{B}$  – індукція магнітного поля.

На заряджену частинку, яка рухається в тільки у магнітному полі, діє магнітна складова сили Лоренца:

$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}],$$

Напрямок сили перпендикулярний до площини, в якій лежать вектори  $\vec{v}$  і  $\vec{B}$ . Модуль сили:

$$F = qvB \sin \alpha,$$

де  $\alpha$  – кут між векторами  $\vec{v}$  і  $\vec{B}$ .

Траєкторія руху зарядженої частинки в магнітному полі визначається конфігурацією магнітного поля, орієнтацією вектора швидкості і відношенням заряду частинки до її маси.

### **Метод вимірювання**

Існують різні методи визначення відношення  $\frac{e}{m}$ , в основі яких лежать результати дослідження руху електрона в електричному і магнітному полях. Один з них - метод магнетрона. Називається він так тому, що конфігурація полів в ньому нагадує конфігурацію полів в магнетронах - генераторах електромагнітних коливань надвисоких частот. Суть методу полягає в наступному: спеціальна двоелектродна вакуумна лампа, електроди якої є коаксіальними циліндрами, поміщена у соленоїд так, що вісь лампи співпадає з віссю соленоїда. Електрони, що вилітають з катода лампи, за відсутності струму в соленоїді рухаються радіально до анода. При підключенні струму до соленоїда

в лампі створюється магнітне поле, паралельне осі лампи, і на електрони починає діяти магнітна складова сили Лоренца (магнітна сила):

$$\vec{F} = e[\vec{v}\vec{B}], \quad (1)$$

де  $e$  - заряд електрона,  $\vec{v}$  - швидкість електрона,  $\vec{B}$  - індукція магнітного поля.

Під дією цієї сили, яка завжди перпендикулярна до вектора швидкості, траєкторія електронів викривляється. При певному співвідношенні між швидкістю електрона і індукцією магнітного поля електрони перестають поступати на анод, і струм в лампі зникає.

Розглянемо докладніше рух електронів в лампі за наявності магнітного поля. Для опису цього руху скористаємося циліндричною системою координат (рис.1), в якій положення електрона визначається відстанню його від осі лампи  $r$ , полярним кутом  $\varphi$  і зсувом уздовж осі  $z$ . Електричне поле, що має тільки радіальну компоненту, діє на електрон з силою, направленою по радіусу від катода до анода. Магнітна сила, що діє на електрон, не має складової, паралельної осі  $z$ . Тому електрон, що вилетів з катода, рухається в площині, перпендикулярній осі  $z$ . Початкову швидкість електрона, що визначається температурою катода, і є набагато меншою від швидкості, якої надає електрону електричне поле лампи можна вважати рівною нулю.

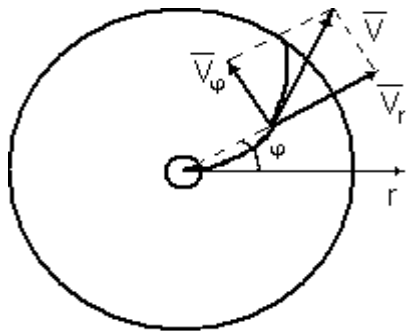


рис. 1

Момент імпульсу  $L$  електрона відносно осі  $z$  рівний:

$$L_z = mv_\varphi r, \quad (2)$$

де  $v_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}$  - складова швидкості, перпендикулярна радіусу  $r$ .

Момент сили  $M$ , що діє на електрон, відносно осі  $z$  визначається складовою магнітної сили, що перпендикулярна до  $r$ . Моменти електричної сили і складової магнітної сили, напрямленої уздовж радіуса  $r$  відносно осі  $z$  рівні нулю. Таким чином:

$$M_z = rF_\varphi = erv_r B, \quad (3)$$

де  $v_r = \frac{dr}{dt}$  - радіальна складова швидкості електрона.

Згідно рівнянню моментів:

$$\frac{dL}{dt} = M. \quad (4)$$

Проектуючи (4) на вісь  $z$ , одержуємо

$$\begin{aligned} \frac{d(mv_{\varphi}r)}{dt} &= evv_r B = er \frac{dr}{dt} B, \\ \frac{d(mv_{\varphi}r)}{dt} &= \frac{1}{2} eb \frac{d(r^2)}{dt}. \end{aligned} \quad (5)$$

Проінтегрувавши (5), одержуємо:

$$mv_{\varphi}r = \frac{1}{2} eBr^2 + const.$$

Константу знайдемо з початкових умов: при  $r = r_k$  (де  $r_k$  - радіус катода)  $v_{\varphi} = 0$ . Тоді

$$const = -\frac{1}{2} eBr_k^2$$

і

$$v_{\varphi} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{b}{r} (r^2 - r_k^2). \quad (6)$$

Кінетична енергія електрона дорівнює роботі сил електричного поля:

$$\frac{m(v_{\varphi}^2 + v_r^2)}{2} = eU \quad (7)$$

де  $U$  - потенціал точки поля, в якій знаходиться електрон відносно катода.

Підставляючи в (7) значення  $v_{\varphi}$  з (6), одержуємо:

$$eU = \frac{m}{2} \left[ v_r^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{e}{m} \right)^2 \frac{B^2}{r^2} (r^2 - r_k^2)^2 \right] \quad (8)$$

При деякому значенні індукції магнітного поля  $B_{kp}$ , яке називають критичним, швидкість електрона поблизу анода буде перпендикулярна радіусу  $r$ , тобто  $v_r = 0$ . Тоді з рівняння (8) отримаємо:

$$eU_a = \frac{m}{8} \left( \frac{e}{m} \right)^2 \frac{B_{kp}^2}{r_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2$$

де  $U_a$  - потенціал анода щодо катода (анодна напруга),  $r_a$  - радіус анода.

Звідси знаходимо вираз для питомого заряду електрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{kp}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2} \quad (9)$$

Індукція магнітного поля соленоїда, довжина  $L$  якого співмірна з діаметром  $D$ , знаходиться за формулою:

$$B_{kp} = \mu_0 n I_{kp} \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 N I_{kp}}{\sqrt{L^2 + D^2}} \quad (10)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$  - магнітна постійна,  $n$  - кількість витків на одиницю довжини соленоїда,  $N$  - кількість витків соленоїда.

Таким чином, експериментально визначивши  $B_{kp}$ , можна обчислити величину  $\frac{e}{m}$ .

Для знаходження  $B_{kp}$  в лампі слід встановити різницю потенціалів між анодом і катодом і, включивши струм в соленоїді, поступово збільшувати магнітне поле в лампі. Якби всі електрони покидали катод із швидкістю рівною нулю, то залежність величини анодного струму від величини індукції магнітного поля мало б вигляд, показаний на рис.2. (пунктирна лінія).

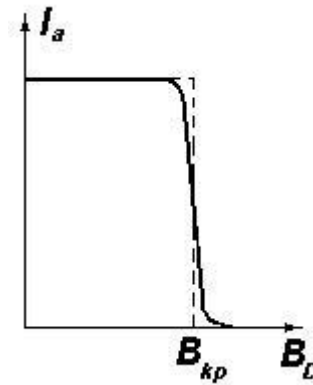


Рис.2.

В цьому випадку при  $B < B_{kp}$  всі електрони, що випускаються катодом, досягали б анода, а при  $B > B_{kp}$  жоден електрон не потрапляв би на анод. Проте деяка некоаксіальність катода і анода, наявність залишкового газу в лампі, спад напруги уздовж катода, неоднорідність поля соленоїда по висоті анода і т.д. призводить до того, що критичні умови досягаються для різних електронів при різних значеннях  $B$ . Все ж

перелом кривої залишиться достатньо різким і може бути використаний для визначення  $B_{кр}$ .

### **Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитися з установкою для вимірювання питомого заряду електрона. Спрощена електрична схема установки для визначення питомого заряду електрона представлена на рис.1.

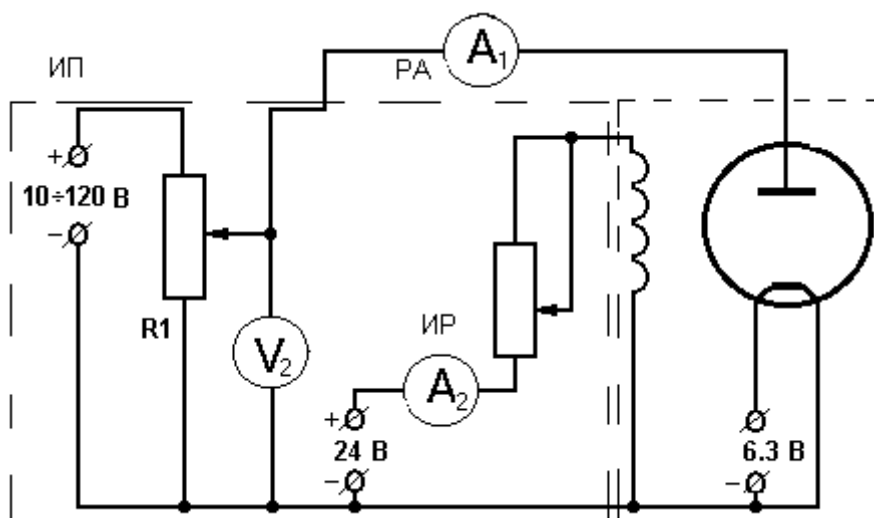


рис.1.

2. З'єднайте касету ФПЕ-03м з джерелом живлення штатним кабелем, при цьому тумблер живлення повинен знаходитися в положенні "Вимкнено". Всі ручки регулювання напруги на блоці живлення перевести в крайнє проти годинникової стрілки положення.

3. Запустити програму ФПЕ-03м.exe. Включити живлення касети ФПЕ-03м.

4. Встановити анодну напругу  $U_a$  приблизно 50В, контролюючи його значення за показами вольтметра у вікні відображення вимірюваних величин. **У процесі вимірювання анодна напруга не повинна змінюватися.**

5. Змінюючи струм в соленоїді від мінімального (початкового) значення до максимального через 0.1 А при постійній анодній напрузі, зняти спадну характеристику, тобто залежність анодного струму  $I_a$  від струму в соленоїді  $I_c$ . Значення анодного струму  $I_a$ , і значення струму в соленоїді  $I_c$ , будуть автоматично занесені в таблицю вимірювань при натисненні кнопки «Внести в список».

4. Повторити пп. 2 і 3 при інших значеннях анодної напруги (60, 75, 90, 105).  
Результати вимірювань занести в таблиці.

5. Для кожного значення анодної напруги будується спадна характеристика (рис.2) (по осі ординат відкладається значення анодного струму, а по осі абсцис - значення струму в соленоїді).

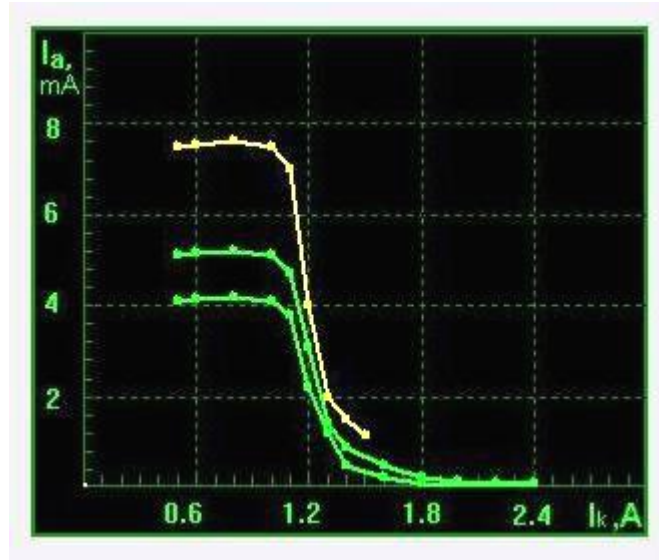


Рис.2

Для знаходження критичного значення струму в соленоїді  $I_{kp}$  необхідно провести до взаємного перетину дотичну до точки перегину спадів характеристики (на ділянці її спаду) і пряму, відповідну зміні мінімальних значень анодного струму (як показано на рис.3).

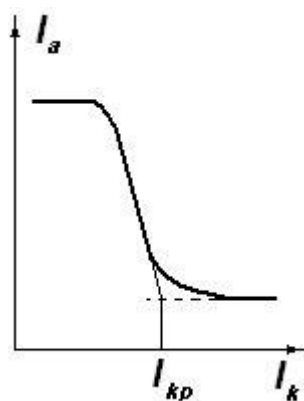


Рис. 3

Занести значення  $I_{kp}$  в таблицю.

N <sup>o</sup>	U <sub>a</sub> , В	I <sub>кр.</sub> , А	B <sub>кр</sub>	e/m
1				
2				
3				
4				
5				

6. Для кожного критичного значення струму в соленоїді розрахувати за формулою (10) індукцію магнітного поля. Величини, що потрібні для розрахунку:

$L = 167\text{мм}$  - довжина котушки,

$D = 62\text{мм}$  - діаметр котушки,

$N = 2010$  - число витків,

$r_a = 6\text{мм}$  - радіус анода,

$r_k = 0,3\text{мм}$  - радіус катода

7. Обчислити  $\frac{e}{m}$  за формулою (9) для кожного значення критичного поля в соленоїді і визначити її середнє значення.

8. Обчислити похибку одержаної величини  $\frac{e}{m}$ .

### **Контрольні питання**

1. У чому суть методу магнетрона для визначення відношення  $\frac{e}{m}$ ?
2. Чи впливає на величину  $B_{кр}$  зміна напрямку струму в соленоїді на протилежний?
3. Чи залежить величина  $\frac{e}{m}$  від величини анодної напруги?
4. Магнітне поле соленоїда.
5. Розглянути рух електрона в однорідному магнітному полі в двох випадках:
  - а) швидкість електрона перпендикулярна до індукції магнітного поля;
  - б) швидкість електрона напрямлена під кутом  $\alpha$  до напрямку поля.
6. Інші методи визначення питомого заряду електрона.