

Лабораторія “Електрики та магнетизму”

Лабораторна робота №15

“ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА”

Мета роботи: Визначити питомий заряд електрона e/m , вивчаючи його рух у взаємно перпендикулярних електричному та магнітному полях.

Вступ. Відношення e/m для електрона визначиться за допомогою методу магнетрона. Назва методу пов'язана з тим, що конфігурація електричного і магнітного полів, яка використовується в лабораторній роботі, нагадує конфігурацію полів в магнетронах - генераторах електромагнітних коливань в області надвисоких частот.

Рух електронів в магнетроні

Рух електронів в магнетроні відбувається в просторі між катодом K і анодом A двохелектродної лампи. Нитка розжарення (катод) розташована уздовж осі циліндричного анода, таким чином, що електричне поле направлене по радіусу. Лампа розташована усередині соленоїда, який створює магнітне поле $\vec{B} = (0, 0, B)$, направлене вздовж осі z лампи.

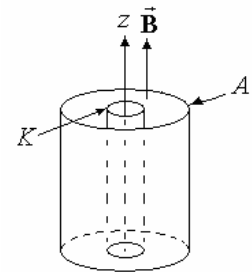


Рис .1

Розглянемо рух електронів. Нехай початкова швидкість електронів, з якою вони вилітають з катода, дорівнює нулю. Тоді рух електрона відбуватиметься в площині, яка перпендикулярна магнітному полю. Скористаємося полярною системою координат. В цьому випадку положення електрона характеризується відстанню до осі циліндра r і полярним кутом φ .

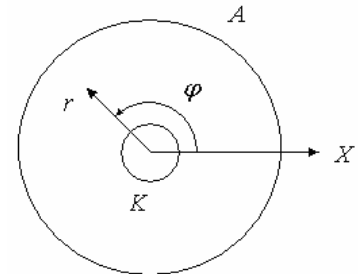


Рис .2

На рис.3. показано орти радіус-вектора \vec{e}_r і полярного кута \vec{e}_φ .

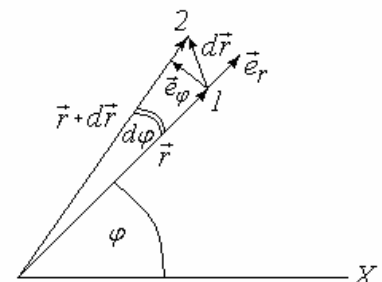


Рис.3.

Вектор швидкості можна записати у вигляді:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dr}{dt} \vec{e}_r + r \vec{e}_\varphi \frac{d\varphi}{dt} = v_r \vec{e}_r + v_\varphi \vec{e}_\varphi = \frac{dr}{dt} \vec{e}_r + r\omega \vec{e}_\varphi,$$

$$\vec{v} = \left(\frac{dr}{dt}, r\omega, 0 \right)$$

(1)

Сила Лоренца дорівнює:

$$\vec{F}_L = q \begin{vmatrix} \vec{e}_r & \vec{e}_\varphi & \vec{e}_z \\ v_r & v_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & B \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Таким чином, відмінні від нуля компоненти сили Лоренца, мають наступний вигляд:

$$F_\varphi = -qv_r B = -q \frac{dr}{dt} B, \quad (3)$$

$$F_r = qv_\varphi B = qr\omega B. \quad (4)$$

Запишемо рівняння руху електрона, скориставшись рівнянням для моменту імпульсу електрона \vec{L} :

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = q \vec{r} \times (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (5)$$

де $q = -e$ - заряд електрона, \vec{E} - напруженість електричного поля між катодом і анодом, \vec{B} - індукція магнітного поля.

Так як $\vec{r} \parallel \vec{E}$, то момент сил зумовлений тільки магнітною складовою сили Лоренца

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = q \vec{r} \times (\vec{v} \times \vec{B}) = \vec{r} \times \vec{F}_L, \quad (6)$$

Рівняння моментів можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}_L = q \begin{vmatrix} \vec{e}_r & \vec{e}_\varphi & \vec{e}_z \\ r & 0 & 0 \\ qr\omega B & -q \frac{dr}{dt} B & 0 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Проекція рівняння $d\vec{L}/dt = \vec{M}$ на вісь z має наступний вигляд:

$$\frac{d(mr^2 \omega)}{dt} = -qr \frac{dr}{dt} B = er \frac{dr}{dt} B. \quad (8)$$

Звідси отримаємо:

$$mr^2 \omega + C = \frac{1}{2} er^2 B, \quad (9)$$

де константа C - стала інтегрування, яка визначається з наступних міркувань. Так як радіус катода r_k - мала величина, тому на початку руху електрона радіальна координата електрона $r = r_k$ теж мала. Тому сталу інтегрування C з деякою точністю можна покласти рівною нулю. Кутова частота ω руху електрона в магнетроні дорівнює ларморівській частоті ω_L :

$$\omega = \omega_L = \frac{eB}{2m}. \quad (10)$$

Якщо розглядати електроди лампи як циліндричний конденсатор, то модуль електричного поля E змінюється з відстанню згідно з законом:

$$E = \frac{U}{\ln(r_a / r_k)} \frac{1}{r}, \quad (11)$$

де r_a - радіус анода, r_k - радіус катода.

Так як магнітне поле не здійснює роботи над зарядом, то кінетична енергія електрона визначається роботою електричного поля, і за умови, що початкова швидкість електрона при $r = r_k$ дорівнює нулю, може бути записана у наступному вигляді:

$$eU = \frac{m(v_r^2 + v_\varphi^2)}{2} = \frac{m[r^2 + (r\omega)^2]}{2} = \frac{m \left\{ r^2 + \left(\frac{reB}{2m} \right)^2 \right\}}{2}. \quad (12)$$

Проведемо аналіз характеру траєкторії електронів, які вилітають з катода при анодній напрузі U_a . За відсутності магнітного поля траєкторія електрона прямолінійна і направлена уздовж радіусу. При слабкому магнітному полі, траєкторія електрона стає криволінійною, але електрон все ж таки досягає анода. При збільшенні магнітного поля траєкторія настільки скривлюється, що при деякому значенні магнітного поля B_{cr} стає дотичною до анода. Це поле B_{cr} називається критичним магнітним полем. На рис.4 індукція магнітного поля \vec{B} , момент імпульсу \vec{L} та момент сил \vec{M} направлені до нас.

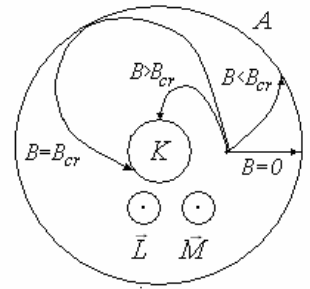


Рис.4.

При подальшому збільшенні магнітного поля B , так, що воно стає більше за критичне значення B_{cr} , електрон вже не потрапляє на анод і повертається на катод. Знайдемо величину B_{cr} , взявши до уваги, що у випадку $B = B_{cr}$ радіальна швидкість електрона dr/dt на аноді ($r = r_a$) звертається в нуль:

$$U_a = \frac{eB_{cr}^2 r_a^2}{8m}, \quad (13)$$

Звідси критичне значення магнітного поля дорівнює:

$$B_{cr} = \sqrt{\frac{8mU_a}{er_a^2}}. \quad (14)$$

Формула (14) дозволяє обчислити e/m , якщо при заданому U_a знайдено таке значення магнітного поля (або навпаки, при заданому B таке значення U_a), при якому електрони перестають попадати на анод. Отримані результати базувались на припущенні, що всі електрони покидають катод з нульовою швидкістю. При цьому у випадку, коли магнітне поле менше критичного значення ($B < B_{cr}$) всі електрони попадали б на анод, а при сильному магнітному полі ($B > B_{cr}$) всі електрони поверталися б на катод, так і не досягнувши аноду. У цьому випадку залежність анодного струму I_A від магнітного поля показана на рис. 5 пунктирною лінією.

В реальних умовах електрони, що виходять з катода, мають різні не нульові швидкості. У цьому випадку критичні умови для кожного електрона виконуються при різних значеннях магнітного поля B . Таким чином в загальному випадку залежність анодного струму I_A від магнітного поля B приймає вигляд суцільної кривої на рис. 5. В даній роботі для знаходження e/m використовується двохелектродна лампа з циліндричним немагнітним анодом. Радіус аноду $r_a = 4,5 \text{ мм}$.

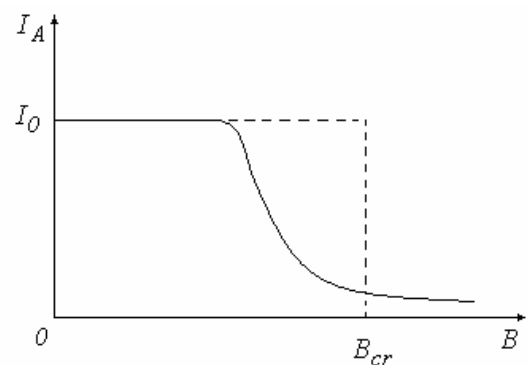
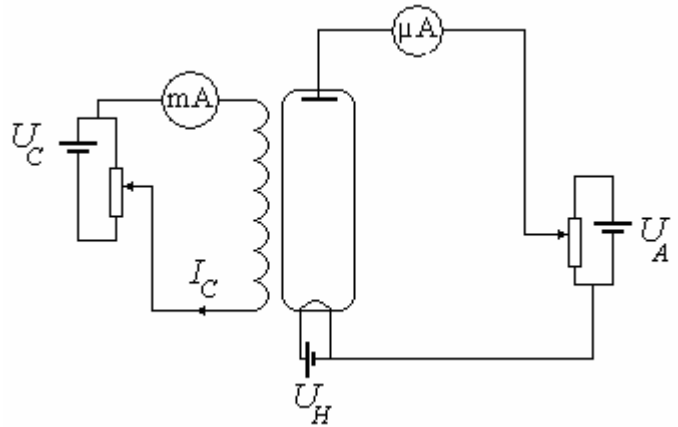


Рис.5.

Опис експериментальної установки.

Принципова електрична схема установки показана на рис.6. Обмотка соленоїда підключена до блоку живлення. Індукція магнітного поля усередині соленоїда без сердечника прямо пропорційна силі струму, який протікає по обмотці $B = D I_c$. Значення коефіцієнта пропорційності $D = 4.1 \times 10^{-2} \text{ Тл} / \text{А}$.

**Виконання роботи.**

1. Зібрати схему згідно рис.6 і зняти залежність анодного струму I_A від струму I_c , що протікає через соленоїд для шістьох значень анодної напруги $U_a = 3 \text{ В}, 5 \text{ В}, 7 \text{ В}, 9 \text{ В}, 11 \text{ В}, 13 \text{ В}$.
2. Побудувати графіки $I_a = f(I_c)$ та за їх допомогою визначити критичне значення магнітного поля B_{cr} . Вибір критичного значення струму I_{cr} , який протікає по соленоїду ($B_{cr} = D I_{cr}$) визначати у відповідності з таким струмом в соленоїді, при якому анодний струм $I_a = 0.85 I_0$, де I_0 - максимальне значення анодного струму при відсутності магнітного поля.
3. Для заданих значень анодної напруги U_a знайти відповідне значення B_{cr} . На основі отриманих значень знайти усереднене значення e/m .
4. Побудувати графік залежності $8U_a / r_a^2$ від B_{cr}^2 та пояснити характер отриманої залежності.

Контрольні питання.

- 1) Що таке сила Лоренца?
- 2) Чому магнітна складова сили Лоренца не здійснює роботи над зарядом?
- 3) Записати рівняння руху електрона в конфігурації електричного і магнітного полів, яка використовується в магнетронах.
- 4) Чому орбітальний момент імпульсу частинки зберігається, якщо вона рухається в центральних полях.
- 5) Отримати рівняння для кутової швидкості руху електрона.
- 6) Чому дорівнює частота прецесії орбітального магнітного моменту в зовнішньому магнітному полі?
- 7) Вивести рівняння для радіального руху електрона.
- 8) Вивести формулу для визначення питомого заряду електрона e/m .
- 9) Що таке критичне магнітне поле B_{cr} ?
- 10) Чи залежить сила анодного струму від напрямку магнітного поля, і якщо залежить, то як краще проводити вимірювання.

ЛОРЕНЦ (Lorentz) Хендрік Антон (1853 - 1928) - нідерландський фізик. Вчився в Лейденському університеті (1870-72), в 1878-1923 професор цього університету. З 1923 директор дослідницького інституту Тейлора в Харлемі. У своїй докторській дисертації (1875) Л. розглянув відбиття та заломлення світла з позицій електромагнітної теорії Дж. Максвелла і показав, що на межі 2 середовищ виникають 4 умови (а не 6, як вимагала механічна теорія світла). Це свідчило про поперечність світлових хвиль і стало доказом електромагнітної теорії світла. У 1878 Л. пояснив дисперсію світла інтерференцією падаючих хвиль і вторинних хвиль, що виникають при коливаннях заряджених частинок під дією падаючих хвиль. Ця робота була першим кроком до розробки електронної теорії, основні положення якої Л. сформулював в 1892.



Лоренц вивів вираз для сили, що діє з боку електромагнітного поля на рухомий заряд (Лоренца сила).

За допомогою електронної теорії Л. вдалося пояснити багато явищ (співвідношення між коефіцієнтом заломлення речовини і поляризуемістю - Лоренц - Лоренца формула, зв'язок між коефіцієнтами тепло- і електропровідності металів, ефекти Хола, Керра та інше).

Л. пояснив Зеемана ефект і передбачив поляризацію компонент зеемановського розщеплення (Нобелівська премія, 1902, спільно з П. Зееманом).

Класична електронна теорія знайшла своє завершення в монографії Л. «Теорія електронів» (1909). Вона з'явилася фундаментом багатьох сучасних фізичних уявлень.

Л. - автор класичних робіт по електродинаміці рухомих середовищ. У 1895 він формально ввів поняття «Місцевого часу» і показав, що рівняння Максвелла приблизно справедливі в ініціальних системах відліку.

Для пояснення Майкельсона опыта Л. використовував припущення про скорочення подовжніх розмірів у напрямі руху тіл, висловлене їм в 1892. Ввів просторово-часові перетворення, що описують перехід від однієї інерціальної системи відліку до іншої і рівняння Максвелла, що залишаються інваріантними (Лоренца преобразования 1904), а також знайшов залежність маси від швидкості. Ці роботи Л. зіграли велику роль в підготовці относительности теорії.

Л. був головою комітету з підготовки проекту часткового осушення затоки Зейдер-Зеє (1918-26); для цього проекту він розробив нові математичні методи гідродинамічних розрахунків. Був організатором і головою Сольвєєвських конгресів з фізики (1911-27). Член Комітету Ліги Націй по інтелектуальній співпраці (з 1923, президент з 1927). Член багатьох академій і наукових суспільств

ЛАРМОР (Larmor) Джозеф (11.7.1857, Магераголл, графство Антрім, Ірландія, — 19.5.1942), англійський фізик, член (з 1892), секретар (1901—12) і віце-президент (1912—14) Лондонського королівського товариства. Закінчив Кембріджський університет (1879). У 1903 отримав люкасовську кафедру в Кембріджі. Наукові праці по електронній теорії, електродинаміці рухомих середовищ і математичній фізиці. Вперше описав явище т.з. Лармора прецесії (1895). У 1900 незалежно від Х. А. Лоренца прийшов до релятивістських перетворень координат і часу (так званого Лоренца преобразования) і формулі складання швидкостей. Підготував до видання праці Дж. Р. Стокса, Дж. К. Максвелла, У. Томсона та ін.