



010304. Определение удельного заряда электрона с помощью ЭЛТ, помещенного в продольное магнитное поле

Цель работы: изучение характера движения заряженных частиц в однородном магнитном поле и определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки.

Требуемое оборудование:

Приборы:

- | | |
|--|-------|
| 3. Амперметр-вольтметр АВ1 | 1 шт. |
| 2. Блок для определения удельного заряда электрона ЕМ1-1 | 1 шт. |
| 4. Комплект проводников | 1 шт. |

Краткое теоретическое введение

На движущуюся заряженную частицу действуют сила Кулона (со стороны электрического поля) и сила Лоренца (со стороны магнитного поля).

$$\vec{F}_r = -e\vec{E} \quad (1)$$

$$\vec{F}_L = -e[\vec{V}, \vec{B}] \quad (2)$$

где e – заряд электрона, E - индукция электрического поля, B - индукция магнитного поля, V - скорость электрона.

Эта сила перпендикулярна скорости движения электрона и поэтому не изменяет её абсолютной величины.

Если угол между направлениями векторов скорости и магнитной индукции α , то скорость движения можно разложить на две составляющие, одна из которых перпендикулярна, другая параллельна вектору магнитной индукции:

$$V_{\perp} = V \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$V_{\parallel} = V \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

Спроектируем уравнение (2) на плоскость, перпендикулярную направлению вектора магнитной индукции:

$$F_L = e \cdot B \cdot V \cdot \sin \alpha = e \cdot B \cdot V_{\perp} \quad (5)$$

На значение силы Лоренца влияет только нормальная составляющая скорости V_{\perp} . Если рассматривать движение электрона как сложное движение со скоростями V_{\perp} и V_{\parallel} , то можно утверждать, что сила Лоренца не влияет на движение вдоль силовых линий индукции магнитного поля, но влияет на изменение направления нормальной составляющей скорости V_{\perp} и вызывает движение по окружности радиуса R . Найдем период обращения электрона по этой окружности.

Сила F_L является центростремительной силой, поэтому:

$$e \cdot B \cdot V_{\perp} = m \cdot V_{\perp}^2 / R, \text{ откуда} \\ V_{\perp} = e \cdot B \cdot R / m \quad (6)$$

Время одного оборота электрона

$$T = 2\pi \cdot R / V_{\perp}, \text{ поэтому} \\ T = 2\pi \cdot m / e \cdot B \quad (7)$$

Интересно отметить, что период обращения электрона в однородном магнитном поле не зависит ни от радиуса, ни от скорости V_{\perp} . Все электроны, влетевшие в данное магнитное поле, сделают один полный оборот за одно, и то же время.

За время одного оборота электрон сместится вдоль силовых линий индукции магнитного поля на расстояние равное шагу винта:

$$h = V_{\parallel} \cdot T, \text{ или, с учётом (4)} \\ h = 2\pi \cdot m \cdot V \cdot \cos \alpha / e \cdot B \quad (8)$$

Если угол α мал, т.е. электроны летят под малым углом к направлению силовых линий индукции магнитного поля, то в этом случае можно записать

$$h = 2\pi \cdot m \cdot V / e \cdot B \quad (9)$$

Таким образом, для малых углов путь, пройденный электроном в магнитном поле за один оборот, не зависит от угла α . Из этого следует, что *все электроны, вышедшие из одной точки под небольшими, но разными углами к направлению силовых линий индукции магнитного поля, после одного оборота соберутся в одной точке*. В этом и заключается принцип магнитной фокусировки электронов.

Выражение (9) может служить для определения удельного заряда электрона.

$$e / m = 2\pi \cdot V / h \cdot B \quad (10)$$

В эксперименте электроны до влета в магнитное поле разгоняются в электрическом поле, имеющем разность потенциалов U , в котором приобретают кинетическую энергию,

$$m \cdot V^2 / 2 = e \cdot U \quad (11)$$

Формулы (10) и (11) не учитывают того обстоятельства, что масса электрона возрастает с увеличением его скорости, согласно теории относительности. Из расчётов получается, что для ускоряющих напряжений меньше 5000 В, приобретённая скорость будет изменять массу меньше 1%. Следовательно можно не учитывать поправку на изменение массы.

Подставив (11) в (10), получим

$$e / m = 8\pi \cdot U / (h \cdot B)^2 \quad (13)$$

При некотором минимальном поле B произойдет первая фокусировка. При этом электрон совершит один оборот спирали, шаг которой в этом случае будет $h = L$, где L – расстояние между вторым анодом ЭЛТ и флуоресцирующим экраном. При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля произойдет вторая фокусировка. Электрон совершит два оборота и шаг спирали будет равен $h = L/2$, если n оборотов, то $h = L/n$.

Методика проведения экспериментов

В данной работе используется электронно-лучевая трубка осциллографа, помещенная внутри соленоида, создающего магнитное поле, направленное вдоль оси трубки. Соленоид расположен на

участке между ускоряющим анодом и экраном. Электроны, эмитируемые раскалённым катодом трубки, ускоряются вдоль её оси приложенным напряжением U до энергии выражения (10). И приобретают скорость

$$V_{\parallel} = \sqrt{2 e \cdot U / m} \quad (14)$$

Заметим, что, поскольку в области ускорения и формирования электронного пучка магнитное поле параллельно электрическому (т. е. $V_{\perp} \approx 0$), то при начальном ускорении электронов до энергии, соответствующей приложенному напряжению, магнитное поле не оказывает никакого влияния на движение частиц.

При отсутствии магнитного поля электронный пучок разворачивается на экране осциллографа в линию под действием электрического поля внутри пластин горизонтального отклонения, на которые подано переменное напряжение синусоидальной формы. Проходя отклоняющие пластины в различные моменты времени, электроны приобретают поперечную скорость V_{\perp} , величина которой изменяется от нулевой до некоторой скорости $V_{\perp \max}$. При этом на экране осциллографа появляется линия, длина которой определяется выражением

$$b_0 = 2 V_{\perp} \cdot LI / V_{\parallel} \quad (15)$$

LI – расстояние от отклоняющих пластин и флуоресцирующим экраном

Для простоты рассмотрения можно считать, что имеется точечный источник пучка электронов, у всех электронов есть одинаковая продольная скорость (вдоль магнитного поля) V_{\parallel} и есть небольшой разброс горизонтальной (поперечной) составляющей V_{\perp} в пределах от 0 до $V_{\perp \max}$.

Электроны, испускаемые источником с разными поперечными скоростями, через период T из соотношения (7) совершат один оборот по ларморовской спирали и соберутся в точку. Поскольку продольная скорость у них одинакова, это произойдет на расстоянии $V_{\parallel} \cdot T$ (8) (далее снова на $n \cdot V_{\parallel} \cdot T$). Зная это расстояние, можно определить удельный заряд электрона.

Проследим, как будет трансформироваться линия на экране при появлении магнитного поля, направление которого совпадает с осью трубки осциллографа (рис. 1, приложение). По мере увеличения магнитного поля уменьшается радиус R (формула (6)) и шаг спирали), по которой электроны движутся в магнитном поле до экрана. При одном и том же магнитном поле электроны с разными скоростями $V_{\perp \max}$ будут двигаться по винтовым линиям, оси которых вертикально смещены от начала линии на экране на радиус окружности R , пропорциональный поперечной скорости V_{\perp} : $R \sim V_{\perp}$. При этом частота вращения ω одинакова для всех электронов, так как не зависит от их скорости. Угол поворота φ , набираемый электронами за время движения до экрана,

$$\varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot LI}{h} = \frac{e \cdot B \cdot LI}{m \cdot V_{\perp}} \quad (16)$$

Угол поворота одинаков для всех электронов с различными скоростями V_{\perp} . Следовательно, линия, высвечиваемая на экране осциллографа, сохранится, повернувшись на угол $\psi = \varphi / 2$. Используя выражения (9) и (11), нетрудно связать угол поворота линии ψ с величиной магнитного поля и ускоряющего напряжения U :

$$\psi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{e}{m}} \cdot \frac{B \cdot L}{\sqrt{2U}} \quad (17)$$

или

$$\frac{e}{m} = 8 \cdot \psi^2 \cdot \frac{U}{B^2 \cdot L^2} \quad (18)$$

Отсюда легко определить отношение e/m , добившись изменением магнитного поля B хорошо измеряемого угла поворота $\psi = \pi/4, \pi/2$ или π , когда происходит фокусировка электронов в точку.

Таким образом, измеряя угол поворота линии на экране осциллографа для заданной величины магнитного поля, можно определить удельный заряд электрона по наклону зависимости $\psi(B)$.

Кроме этого, из уравнений (6), (15), (16) следует, что длина линии на экране осциллографа $b(\varphi)$ изменяется следующим образом:

$$b(\varphi) = b_0 \cdot \frac{|\sin \varphi|}{\varphi} \quad (19)$$

Это уравнение спирали, называемой кохлеоидой. Очевидно, что при $\psi = \pi k$ или при $\varphi = 2\pi k$, где k – целое число, происходит фокусировка электронов в точку. Изображение светящейся полосы на экране осциллографа для некоторых значений магнитного поля в соленоиде (при $B = B_{\text{фок}}$ происходит первая фокусировка электронов в точку).

Индукция магнитного поля соленоида определяется по формуле:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{l} = \mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot n \quad (20)$$

где $\mu = 1$ – относительная магнитная проницаемость воздуха;

$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м- магнитная постоянная;

I – ток в катушке, А;

N – число витков в катушке;

l – длина катушки, м;

n – плотность намотки, витков/м;

Так как данная формула справедлива для бесконечно длинного соленоида, то в расчетах будем использовать $n_{\text{экв}}$, учитывающую конечные размеры катушки.

Рекомендуемое задание к работе

1. Собрать схему. Регуляторы «Уст. I» и «Смещение луча» вывести в крайнее левое положение.
2. Включить прибор и амперметр-вольтметр. Через 1-2 минуты (после прогрева) регуляторами «Яркость» и «Фокусировка» получите четкое изображение линии на экране. Регулятором «Смещение луча» вывести линию в центр экрана.
3. Снять зависимость $\varphi(I)$. Для этого регулятором «Уст. I» добейтесь поворота линии на 30 градусов.
4. Аналогично пункту 3, через каждые 30 градусов провести замеры, до 180 градусов.
5. Рассчитать B по формуле 20.
6. По формуле 18 рассчитать e/m для всех углов.
7. Вычислить среднее значение e/m , сравнить с теоретическим значением.

февраль 2011

**НГТУ, НИЛ ТЭ: 630092 г. Новосибирск, пр. К. Маркса 20,
тел./факс (383) 346-06-77 сот. 89139145981
E-mail: info@opprib.ru
Сайт: www.opprib.ru**