

Определение отношения e/m при помощи фокусировки электронного пучка в продольном магнитном поле

1 Описание метода определения e/m

Если электрический заряд движется в магнитном поле, то на него действует со стороны поля сила f , называемая силой Лоренца.

Величина этой силы

$$f = evB \sin \alpha \quad (1)$$

пропорциональна индукции магнитного поля, величине заряда и скорости его движения. Кроме того, она зависит от угла α между векторами \vec{v} и \vec{B} . Сила максимальна при движении заряда в направлении перпендикулярном к индукции магнитного поля, и равна нулю, если заряд движется вдоль линии индукции магнитного поля.

Сила Лоренца перпендикулярна как к скорости движения заряда \vec{v} , так и к индукции магнитного поля \vec{B} и ее направление совпадает с направлением векторного произведения $[\vec{v}, \vec{B}]$

В векторном виде формула для силы Лоренца имеет вид:

$$\vec{f} = e[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (2)$$

Если кроме магнитного поля существует еще электрическое поле напряженностью \vec{E} , то полная сила, действующая на заряд e равна

$$\vec{f} = e\vec{E} + e[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (3)$$

Наблюдая движение электронов в электрических и магнитных полях, можно определить удельный заряд электрона e/m , т.е. отношение заряда электрона e к его массе m .

Мы рассмотрим здесь метод определения e/m путем фокусировки пучка электронов продольным магнитным полем.

Рассмотрим электрон, движущийся со скоростью v_{\perp} в вакууме в плоскости, перпендикулярной к линиям индукции внешнего магнитного поля \vec{B} . На электрон действует сила

$$f = ev_{\perp}B, \quad (4)$$

которая во все время движения перпендикулярна к направлению вектора \vec{v}_{\perp} . Так как при этом на электрон по условию не действуют никакие другие силы, то его скорость постоянна по величине и, следовательно, траектория движения электрона представляет собой дугу круга, и второй закон Ньютона запишется в виде:

$$\frac{mv_{\perp}^2}{R} = f. \quad (5)$$

Комбинируя формулы (4) и (5), получим

$$R = \frac{v_{\perp}m}{eB}. \quad (6)$$

Рассмотрим теперь электрон, летящий со скоростью \vec{v} , составляющей угол α с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} . Мы легко определим вид траектории в этом случае, если разложим скорость его движения \vec{v} на две составляющие: одна вдоль магнитного поля $v_{\parallel} = v \cos \alpha$, а другая перпендикулярно ему $v_{\perp} = v \sin \alpha$.

Проекция траектории электрона на плоскость, перпендикулярную к линиям поля \vec{B} представляет собой окружность, радиус которой определяется формулой (6). Движение электрона вдоль магнитного поля остается равномерным движением со скоростью v_{\parallel} , т.к. нет сил, действующих вдоль поля. Таким образом траектория движения электрона будет представлять из себя винтовую линию.

Определим время t , необходимое для того, чтобы электрон совершил один оборот. Пусть ω - круговая частота вращения электрона по окружности, R - радиус этой окружности. Тогда, очевидно, что

$$t = \frac{2\pi}{\omega}, \quad v_{\perp} = \omega R. \quad (7)$$

Подставляя последнее выражение в формулу (6), we have

$$R = \frac{\omega R}{\frac{e}{m}B},$$

откуда

$$\omega = \frac{eB}{m},$$

и следовательно,

$$t = \frac{2\pi}{B \frac{e}{m}}. \quad (8)$$

Из формулы (8), видно, что время t не зависит ни от величины, ни от направления скорости \vec{v} , а определяется только индукцией магнитного поля \vec{B} и удельным зарядом e/m . На этом и основан метод определения e/m , суть которого состоит в следующем.

Электроны, испускаемые горячим катодом K , расположенным внутри откаченной трубки (рис.1), проходят через отверстие в диафрагме A_2 .

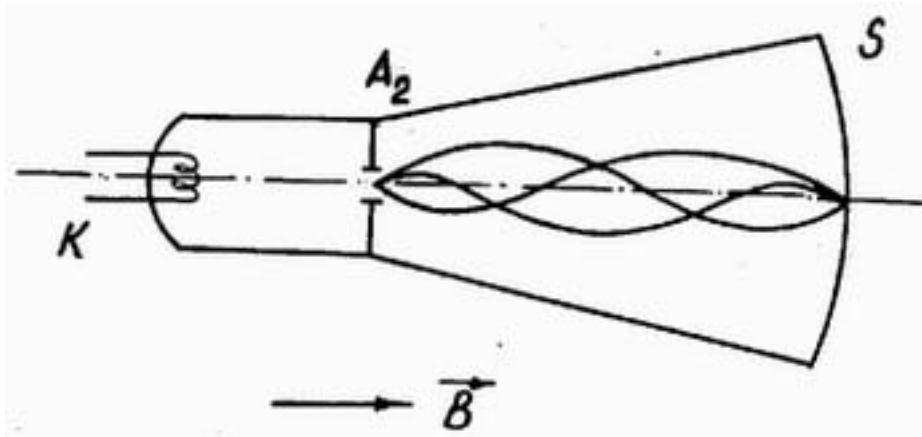


Рис. 1:

Между катодом K и диафрагмой A_2 прикладывается ускоряющее электрическое поле с разностью потенциалов V . Таким образом создается пучок электронов, скорость которых v определяется из соотношения

$$\frac{mv^2}{2} = eV. \quad (9)$$

Электроны вылетают из отверстия в диафрагме в виде пучка, расходящегося под небольшим углом. Пролетев через трубку, электроны попадают на флюоресцирующий экран S , так что на экране виден "след" электронного пучка в виде светящегося пятна. Если теперь поместить

всю трубку в продольное магнитное поле, то по сказанному выше, электроны будут двигаться по винтовой линии. Рассмотрим электрон, скорость которого в начальный момент составляла угол α с осью трубки. За время t , в течение которого электрон описывает один оборот винтовой линии, он успевает пройти вдоль оси трубки отрезок

$$\delta = v_{\parallel} t_1 = v t_1 \cos \alpha.$$

Подставляя сюда вместо времени t_1 его значение по (8) получим

$$\delta = \frac{2\pi v \cos \alpha}{\frac{e}{m} B}.$$

Если угол α мал, то $\cos \alpha \simeq 1$ и

$$\delta \simeq \frac{2\pi v}{\frac{e}{m} B}. \quad (10)$$

Таким образом, отрезок δ оказывается с достаточной точностью приближения не зависящим от угла α , т.е. одинаковым для всех электронов пучка. Электрон, совершивший один оборот винтовой линии, попадает опять на осевую линию прибора. Таким образом траектории электронов пересекаются в одной точке на оси прибора на расстоянии δ от диафрагмы A_2 . Эта точка по аналогии с местом пересечения оптических лучей называется фокусом электронов. Положение фокуса зависит от величины индукции магнитного поля \vec{B} и скорости электронов, которая, в свою очередь, определяется разностью потенциалов V между катодом и диафрагмой. Эти величины можно подобрать так, чтобы фокус пришелся как раз на флюоресцирующий экран S , что легко установить по резкости следа пучка на экране.

Увеличивая индукцию магнитного поля B , можно многократно сфокусировать пятно на экране. Действительно, с увеличением поля B , шаг винтовой линии δ будет уменьшаться и при некотором значении B_1 , окажется равным расстоянию l от диафрагмы A_2 до экрана, при этом светящееся пятно на экране сфокусируется в яркую точку минимальных размеров. При дальнейшем увеличении поля шаг винтовой линии станет короче расстояния l , и электронный пучок будет сходиться в точку до экрана, а в плоскости экрана он будет иметь значительную ширину. Если продолжать и дальше увеличивать поле, то шаг винтовой линии будет укорачиваться и при значении индукции B_2 сделается равным половине

расстояния l , при этом светящееся пятно вновь соберется в точку. т.к. на пути l электроны успеют сделать два полных оборота.

При дальнейшем увеличении поля можно последовательно наблюдать третий фокус, четвертый фокус и т.д. Этим фокусам будут соответствовать длины шагов винтовой линии в три, четыре и т.д. раз меньше расстояния l . Таким образом

$$\delta = \frac{l}{\nu}, \quad (11)$$

где ν число фокусов, помещающихся на длине l . Зная δ , легко определить удельный заряд электрона. Из формулы (10) следует

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi\nu}{\delta B}.$$

Подставляя сюда выражения для ν и δ из формул (9) and (11) we have

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 V}{\left(\frac{l}{\nu}\right)^2 B^2}. \quad (12)$$

Все величины в правой части формулы (12) доступны непосредственному измерению. Таким образом отношение e/m может быть определено.

2 Описание установки

2.1 Электронно-лучевая трубка

В работе используется электронно-лучевая трубка. Электронно-лучевая трубка является основной частью электронного осциллографа – прибора, служащего для изучения быстро меняющихся электрических полей. В данной работе такая трубка используется для изучения движения электронов в постоянных электрическом и магнитных полях.

Устройство и принцип действия трубки прочтите в книге В.А.Соловьева и В.Е. Яхонтова "Основы измерительной техники" ЛГУ, 1980, стр. 148-151. Здесь приведен только схематический чертеж трубки. На рис. 2 F - нить накала, K - катод, M - модулятор (цилиндр Венельта) , A_1 первый (фокусирующий) анод, A_2 второй (ускоряющий) анод, P_x и P_y - отклоняющие пластины, S - экран.

Для создания магнитного поля вдоль оси трубки, она помещается внутрь соленоида, по обмотке которого пропускается ток I .

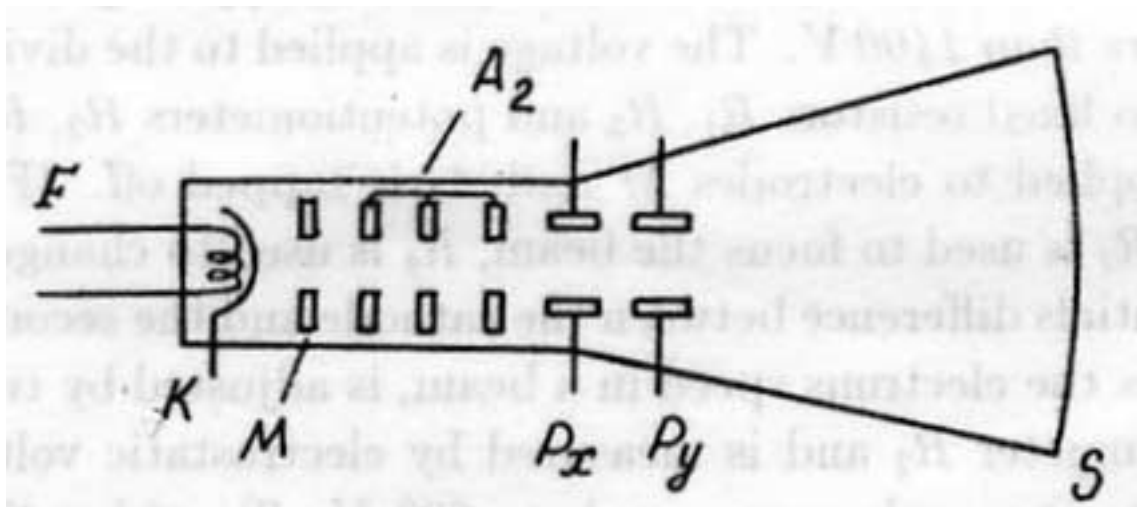


Рис. 2:

Конструктивно прибор выполнен следующим образом. Электронная трубка и соленоид помещены в металлический кожух. на передней стенке кожуха имеется окно. в которое виден экран трубки, а в правой нижней части кожуха находится пара клемм, к которым подсоединена обмотка соленоида. Для соединения трубки с источником питания служит экранированный кабель с разъемом.

2.2 Схема питания трубки

На нить накала электронно-лучевой трубки подается переменное напряжение $6,3 В$, на электроды M , A_1 , A_2 подаются потенциалы, формирующие пучок электронов. На второй анод A_2 подается высокий, положительный относительно катода потенциал задающий скорость электронов в пучке. (Все потенциалы здесь и далее определяются относительно катода, потенциал которого условно принят за ноль). Внимание! разность потенциалов между вторым анодом и катодом не должна превышать $1200 В$. На первый анод A_1 подается меньшее напряжение, изменяя которое можно регулировать степень расходимости пучка, т.е. менять фокусировку электронного пучка. На модулятор M подается небольшой отрицательный потенциал ($-125 \div 0 В$), с помощью которого можно регулировать количество электронов в пучке. а следовательно и яркость изображения на экране.

Электрическая схема питания трубки приведена на рис. 3. Напряжение

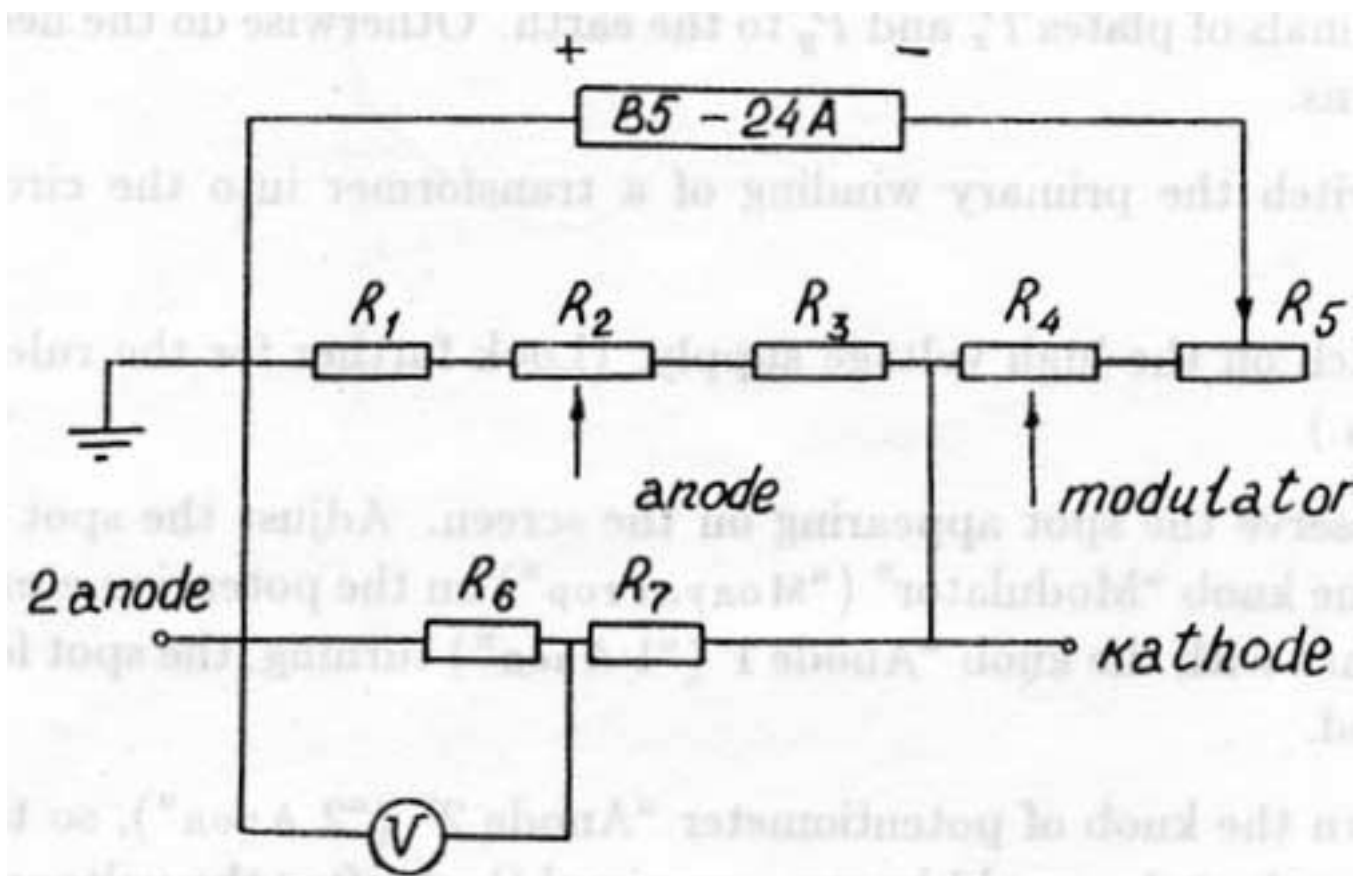


Рис. 3:

накала снимается с понижающего трансформатора. трансформатор включается в сеть напряжением 220 В . Сопротивление R_5 служит для изменения напряжения, подаваемого на трубку. Высокое напряжение снимается с высоковольтного стабилизированного выпрямителя Б5-24А и подается на цепочку сопротивлений $R_1...R_5$. Внимание! С прибора можно снимать напряжение не более 1400 В . Напряжение подается на делитель, состоящий из постоянных сопротивлений R_1, R_3 и потенциометров R_2, R_4 , с которых снимается напряжение, подаваемое на электроды M and A_1 (Рис.2). Потенциометр R_2 служит для фокусировки пучка, R_4 - для изменения его яркости. разность потенциалов между катодом и вторым анодом, определяющая скорость электронов в пучке, регулируется по-

воротом ручки потенциометра R_2 и измеряется при помощи электростатического вольтметра V . Так как вся шкала вольтметра соответствует 600 В , то для расширения пределов измерения прибора он подключается к делителю напряжения R_6, R_7 . Сопротивления R_6 и R_7 одинаковы, так что измеряемое напряжение в два раза больше показаний вольтметра, т.е. вольтметром можно измерять напряжения до 1200 В . Все три делителя смонтированы на панели из оргстекла, так что схема питания трубки уже собрана. На верхней крышке панели расположены гнезда разъема для соединения схемы с электронно – лучевой трубкой, ручки потенциометров R_2, R_4, R_5 , а также две клеммы, которые соединены с отклоняющими пластинами P_x .

Если не требуется получать отклонение луча электрическим полем, то отклоняющие пластины P_x и P_y должны быть соединены со вторым анодом. В этом случае пластины не искажают поля в пространстве анод – экран.

Необходимо обратить внимание на следующую особенность схемы: второй анод A_2 в схеме заземлен, а катод находится под отрицательным потенциалом. Это сделано в целях безопасности и для удобства работы с прибором. Таким образом для соединения отклоняющих пластин со вторым анодом пластины нужно просто заземлить, соединив 4 клеммы пластин с клеммой "земля", закрепленной на столе.

2.3 Порядок включения трубки

1. Перед включением трубки убедитесь, что кожух трансформатора заземлен, и кабель, питающий трубку, при помощи разъема подсоединен к панели питания.
2. Если отклоняющие пластины не будут использоваться в опыте, заземлите все четыре клеммы отклоняющих пластин P_x и P_y .
3. Включите первичную обмотку трансформатора в сеть ($\sim 220\text{ В}$.)
04. Включите источник высокого напряжения. (Правила его включения см. ниже).
5. Наблюдайте появление пятна на экране. Ручкой "Модулятор" на панели потенциометра отрегулируйте яркость пятна. Проверьте, что при повороте ручки "1 Анод"меняется фокусировка пятна.
6. Поверните ручку потенциометра "2 Анод " так, чтобы напряжение на трубке было максимальным (следите за напряжением по вольтметру). затем ручками прибора Б5-24А установите это напряжение равным 1200 В

(при этом стрелка вольтметра отклонится на всю шкалу). В дальнейшей работе для изменения напряжения, питающего трубку, пользуйтесь потенциометром “2 Анод ” не меняя напряжение на источнике высокого напряжения. Помните, что этот источник может использоваться в соседней работе. Согласовывайте все переключения прибора.

7. Если вблизи места фокусировки на экране возникло темное пятнышко, это значит, что из-за слишком большой интенсивности на экране скопился отрицательный заряд. Чтобы убрать пятно, увеличьте энергию электронов (повысив ускоряющее напряжение). После исчезновения пятна вернитесь к прежнему напряжению, но уменьшите яркость пучка.

8. При фокусировки электронов удельная мощность пучка электронов сильно возрастает, что может привести к разрушению флюоресцирующего экрана. Чтобы избежать этого, следует снижать яркость пучка.

2.4 Правила включения источника высокого напряжения

1. Включите тумблер “Сеть” при этом загорится сигнальная лампочка включения сети и сигнальная лампочка указывающая полярность выходного напряжения (“+” соединен с корпусом источника).

2. Через пять минут после включения сети включите тумблер “высокое напряжение” при этом загорится лампочка, указывающая о подаче высокого напья на анод регулирующей лампы.

3. Поставьте переключатель “Напряжение выхода ” в положение “Вкл”. При этом загорится сигнальная лампочка, указывающая о подаче высокого напряжения на оба выходных разъема. При этом высокое напряжение будет подано на две установки. При нажатии кнопки “Калибровка-ток нагрузки-нажать”, отклонение стрелки индикаторного прибора покажет ток нагрузки. Максимальный ток нагрузки прибора 5 mA .

4. Установите ручками регулировок “Киловольт” и “Вольт” необходимое для работы напряжение выхода.

2.5 Порядок выключения источника высокого напряжения

1. Выключите тумблер “Высокое напряжение”.

2. Через одну минуту после выключения тумблера “Высокое напряже-

ние” поставьте переключатель “Напряжение выхода” в положение “Выкл” и установите ручки регулировок “Киловольт” and “Вольт” в крайнее левое положение.

3. Выключите тумблер “Сеть”.

Внимание! Во избежание выхода из строя прибора строго соблюдайте правила включения и выключения прибора.

2.6 Магнитное поле

источником магнитного поля служит соленоид, по обмотке которого пропускается ток I . Магнитное поле в центре длинного соленоида определяется выражением

$$B = \mu_0 I n,$$

где n – число витков обмотки, приходящихся на единицу длины соленоида. (Здесь I должно быть выражено в should be expressed in амперах, а L в метрах.) Если N – общее число витков обмотки, а L – длина соленоида, то очевидно, что

$$n = \frac{N}{L}.$$

В действительности поле на оси соленоида не однородно, оно имеет наибольшую величину в центре и уменьшается к краям, так что в формулу для B , нужно ввести поправочный коэффициент, учитывающий эту неоднородность. С учетом этого

$$B = K \mu_0 I n. \quad (13)$$

В наших установках $N=3200$ turns, $L=30$ см, $K=0.89$. Катушка питается от источника постоянного тока (40В.) Для регулировки величины тока используйте реостат, включив его в цепь как потенциометр. Для измерения тока используйте амперметр на 2,5А.

3 Определение удельного заряда электрона e/m

Для определения e/m , используется формула (12). выражая индукцию магнитного поля по формуле (13) получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 V}{\frac{l^2}{\nu^2} (K^2 \mu_0^2 I^2 n^2)}. \quad (14)$$

Для определения e/m лучше всего использовать второй и третий фокусы ($\nu = 2, 3$). Длина пути электронов l несколько различается для разных трубок.

номер щитов	l , см
17	14,2
18	15,1
19	17,0
20	16,7

4 Порядок выполнения работы

1. Заземлите все отклоняющие пластины (как по x' , так и по y') и включите трубку.
2. С помощью потенциометра Ву potentiometer “1 Анод”) получите на экране расфокусированное пятно.
3. Включите ток питания соленоида.
4. Установите выбранное напряжение на втором аноде, измерьте значение тока в катушке соленоида, при котором наблюдаются второй и третий фокусы (фокусировки выполняются неоднократно). Измените полярность напряжения, подаваемого на соленоид, и проведите такие же измерения. Усредните все значения. при которых наблюдался второй фокус, и используйте полученное значение как окончательный результат. То же самое проделайте для третьего фокуса.
5. Проведите измерения для нескольких напряжений.
6. Для каждого значения V по формуле (14) вычислите $\frac{e}{m}$ по результатам, полученным для второго фокуса. Проделайте то же самое для третьего фокуса. Полученные два значения усредните.
7. За окончательный результат примите значение $\frac{e}{m}$, полученное усреднением полученных значений по всем напряжениям V .