

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 42

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА, ДВИЖУЩЕГОСЯ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Цель работы. Определить удельный заряд электрона – отношение заряда электрона к его массе e/m_e .

Приборы и принадлежности

Лабораторная установка на основе электронно-оптического преобразователя.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

По лекциям и приведенному ниже списку литературы изучите следующие вопросы курса и ответьте на контрольные вопросы:

1. Характеристики магнитного поля.
2. Сила Лоренца.
3. Движение заряженных частиц в электрическом поле.
4. Движение заряженных частиц в магнитном поле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс физики. Т. 2. – М.: Наука, 1989, с. 135 – 160.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1997, с. 204 – 222.
3. Солоухин Р.И. Оптика и атомная физика. – Новосибирск: Наука, Сибирское отд., 1976.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА К РАБОТЕ

1. Назовите основные характеристики магнитного поля.
2. Единицы измерения индукции и напряженности магнитного поля.
3. В чем состоит отличие силовых линий магнитного и электростатического полей?
4. Дайте определение силы Лоренца.
5. Чем объясняется сходство в описании действия силы Ампера и силы Лоренца?
6. По каким траекториям движутся заряженные частицы в магнитном поле?
7. Как действуют электрические поля на заряженные частицы?

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

1. Теоретическая часть

1.1. Сила Лоренца

Сила, действующая на электрический заряд, движущийся в магнитном поле со скоростью \vec{v} , называется силой Лоренца и выражается формулой:

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (17)$$

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки. Модуль силы Лоренца равен:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (18)$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения заряженной частицы, поэтому она изменяет только направление этой скорости, не изменяя модуля. Поэтому сила Лоренца работы не совершает, энергию частицы не меняет.

1.2. Движение заряженных частиц в магнитном поле

Рассмотрим частицу массой m , которая со скоростью \vec{v} влетает в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} . Если частица имеет заряд q , то на нее действует сила Лоренца, величину которой можно найти, воспользовавшись выражением (18). В зависимости от величины угла α возможны 3 основных случая:

1) Вектор скорости \vec{v} направлен вдоль линий магнитной индукции:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 0 \\ \alpha = \pi \end{array} \right\} \Rightarrow \sin \alpha = 0 \Rightarrow F = 0,$$

т.е. магнитное поле на заряд не действует!

2) Вектор скорости \vec{v} перпендикулярен линиям магнитной индукции. Это означает, что на заряженную частицу действует сила Лоренца, перпендикулярная, как сказано выше, направлению движения частицы:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow F = q \cdot v \cdot B,$$

а сама она движется по окружности с нормальным ускорением:

$$|\vec{a}| = \frac{qvB}{m} = \frac{v^2}{r}$$

где r – радиус этой окружности:

$$r = \frac{m v}{q B}. \quad (19)$$

Период вращения частицы равен:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{B q}. \quad (20)$$

3) Угол между векторами \vec{v} и \vec{B} не равен ни 0° , ни 90° . В этом случае заряженная частица участвует сразу в двух движениях — поступательном вдоль линий магнитной индукции и вращательном в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля. Таким образом, траектория частицы будет представлять собой цилиндрическую спираль, ось спирали параллельна вектору \vec{B} , шаг спирали равен:

$$h = \frac{2\pi \cdot mv \cdot \cos \alpha}{qB}.$$

2. Описание установки

2.1. Принцип работы ЭОП

Для проведения эксперимента используется стандартный электронный прибор — электронно-оптический преобразователь изображений (ЭОП), обычно применяемый в технике как усилитель яркости слабых изображений.

Устройство прибора и траектории движения электронов в нем показаны на рис. 11. ЭОП представляет собой электровакуумную колбу 4 цилиндрической формы. На переднем торце внутри колбы напылён фотокатод 3, а вблизи противоположного торца колбы расположен люминесцентный экран 6, который можно наблюдать через прозрачное окно 7. Внутри колбы закреплены специальные электроды (анод 5), образующие электронную линзу. К электродам, выполненным из немагнитного материала, подводится высокое напряжение (до 5 кВ), создающее внутри ЭОП электростатическое поле определенной конфигурации, способное управлять движением электронов при их пролете от фотокатода до экрана.

Принцип действия ЭОП заключается в следующем. Когда изображение спроецировано на фотокатод, последний начинает эмиттировать фотоэлектроны. Электростатическое поле вытягивает электроны и разгоняет их так, что они начинают бомбардировать люминесцентный экран. Возбужденный люминофор светится. Электронная линза, управляющая движением электронов, действует таким образом, что все электроны, покинувшие фотокатод в одной точке, также собираются в одну точку на люминесцентном экране (траектории $1' \dots 1''$). Аналогично каждый элемент изображения одновременно переносится с фотокатода на экран. На экране ЭОП будет четкая, но перевернутая на 180° картина, подобная той, что проецировалась на фотокатод.

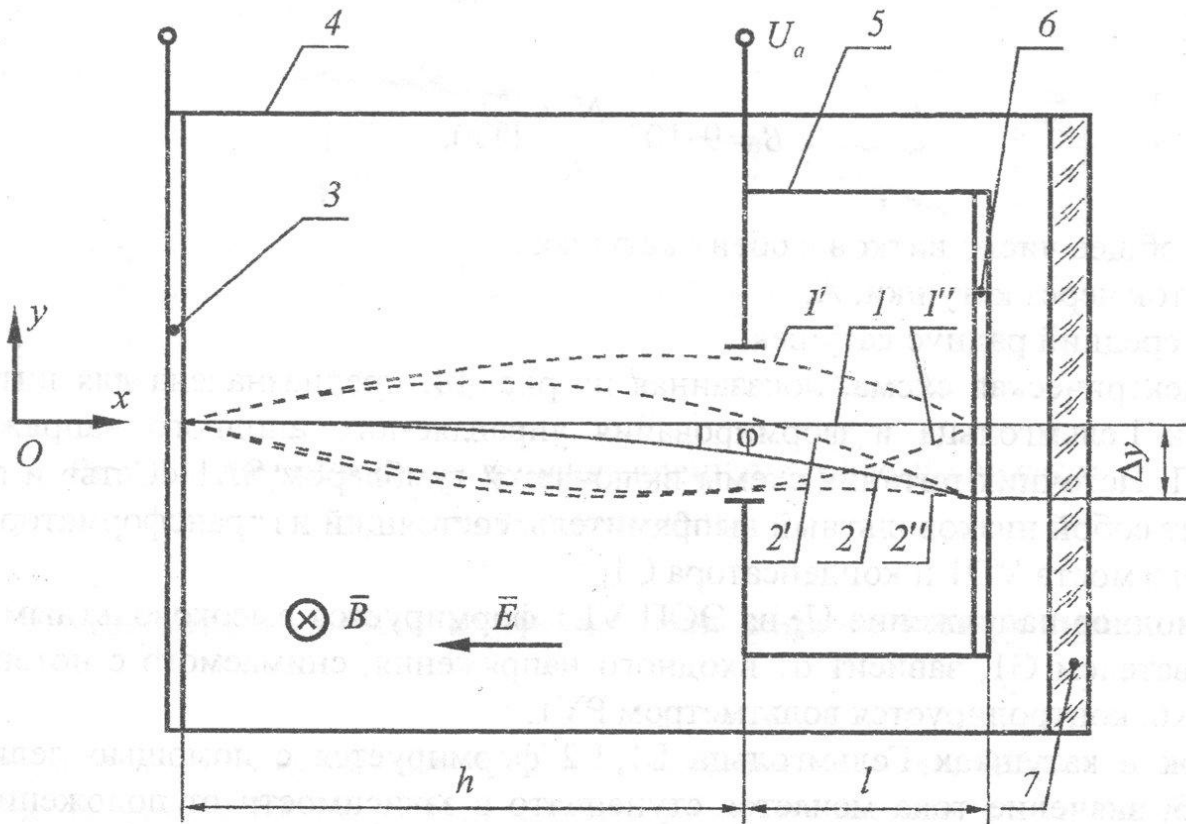


Рис. 11. Схема конструкции ЭОП:

1, 2 – траектории электронов; 3 – фотокатод; 4 – герметичный корпус; 5 – анод; 6 – люминесцентный экран; 7 – прозрачное окно прибора; \otimes – вектор индукции магнитного поля, направленного в плоскость рис.; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля, лежащий в плоскости рис.

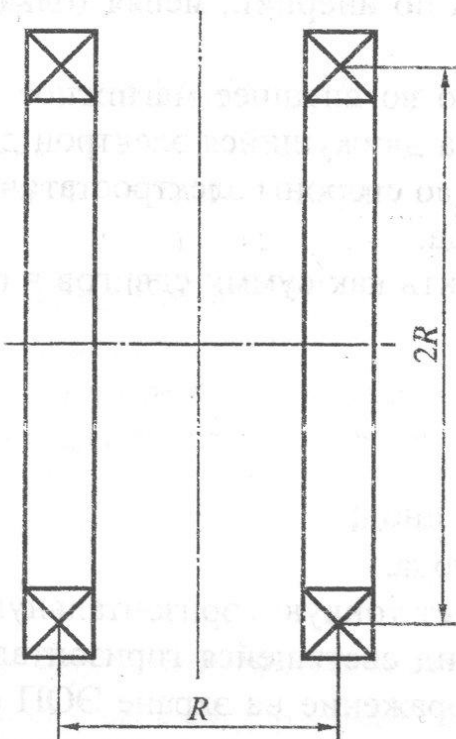


Рис. 12. Катушки Гельмгольца

При помещении ЭОП в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} (как это выполнено в настоящей лабораторной работе) электрон будет двигаться по криволинейной траектории 2. При этом пучок электронов, движущихся в границах траекторий 2'...2'', попадает на люминесцентном экране в точку, отстоящую от точки первоначального положения (в отсутствие магнитного поля) на расстояние Δy .

2.2. Описание электрической схемы

Управляемое магнитное поле в лабораторной установке формируется парой катушек Гельмгольца (рис. 12). Конфигурация катушек подобрана таким образом, чтобы

создавать в пространстве между ними однородное магнитное поле с индукцией B :

$$B = 9 \cdot 10^{-7} \frac{N \cdot i}{R} \text{ (Тл)}, \quad (21)$$

где N – общее число витков в обеих катушках;

i – ток через катушки, А;

R – средний радиус катушек.

Электрическая схема, показанная на рис. 14, предназначена для питания катушек Гельмгольца и формирования управляемого анодного напряжения на ЭОП. Источник питания схемы включается тумблером SA1 «Сеть» и представляет собой низковольтный выпрямитель, состоящий из трансформатора T1, диодного моста VD1 и конденсатора C1.

Анодное напряжение U_a на ЭОП VL1 формируется высоковольтным преобразователем G1, зависит от входного напряжения, снимаемого с потенциометра R6, контролируется вольтметром PV1.

Ток в катушках Гельмгольца L1, L2 формируется с помощью делителя R1...R5, значение тока меняется ступенчато в зависимости от положения галетного переключателя SA2. Переключатель SA3 меняет направление протекания тока в катушках (направление вектора магнитной индукции) и, следовательно, направление смещения на экране установки светящейся полосы.

2.3. Расчет удельного заряда электрона по смещению световой полосы

Внутри анода почти нет электрического поля, но магнитное присутствует, поэтому электроны пролетают этот промежуток по инерции, меняя только направление скорости, а не ее величину.

Таким образом, внутри ЭОП, помещенного во внешнее магнитное поле, можно выделить две основных зоны: в зоне I на движущийся электрон действуют как сила Лоренца, так и ускоряющая сила со стороны электростатического поля, а в зоне II действует только сила Лоренца.

Общее смещение траектории можно выразить как сумму сдвигов в обеих зонах:

$$\Delta y = \Delta y_I + \Delta y_{II}, \quad (22)$$

где Δy_I – сдвиг траектории электрона на входе в анод;

Δy_{II} – сдвиг траектории электрона внутри анода.

Если на фотокатоде падающий свет образует тонкую горизонтальную полосу, ее изображение на экране имеет также вид светящейся горизонтальной полосы. При включении магнитного поля изображение на экране ЭОП сместится вниз или вверх на Δy , в зависимости от направления тока в катушках.

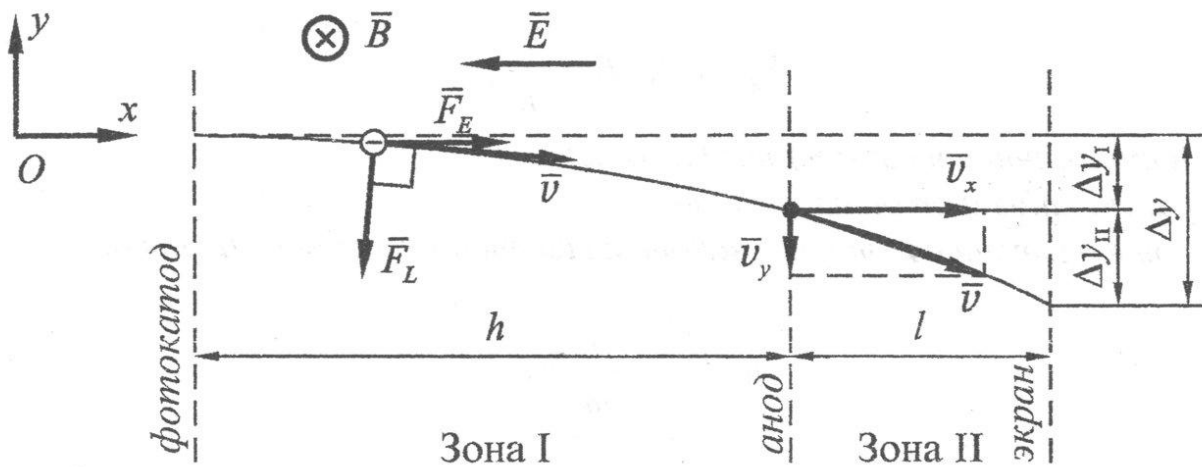


Рис. 13. Движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях

- Текст, напечатанный курсивом, при первом чтении можно опустить.

Рассмотрим движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях внутри ЭОП (рис. 13). При анализе будем считать, что сдвиг траектории электрона невелик, поэтому сила Лоренца \vec{F}_L направлена вдоль оси y и везде перпендикулярна электрической (кулоновской) силе \vec{F}_E . Представим вектор скорости \vec{v} электрона через его составляющие \vec{v}_x и \vec{v}_y по осям координат.

Сила Лоренца \vec{F}_L направлена перпендикулярно вектору скорости, поэтому не может внести вклад в значение кинетической энергии электрона, долетевшего до экрана:

$$W_K = \frac{m_e v_x^2}{2}.$$

Эту энергию электрон приобретет за счет работы сил электрического поля:

$$\frac{m_e v_x^2}{2} = eU_a,$$

где e – заряд электрона;

m_e – масса электрона;

U_a – напряжение на аноде.

Максимальная скорость по оси x равна:

$$v_{x_{\max}} = \sqrt{\frac{2eU_a}{m_e}}, \quad (23)$$

По мере приближения электрона к аноду его скорость растет, движение вдоль оси x является равноускоренным и происходит под действием силы \vec{F}_E , создаваемой электрическим полем:

$$\bar{F}_E = e\bar{E}; \quad E = \frac{U_a}{h}, \quad (24)$$

где E – напряженность электрического поля;
 h – расстояние фотокатод–анод.

В соответствии со вторым законом Ньютона ускорение a равно:

$$a = \frac{F_E}{m_e} = \frac{e}{m_e} E. \quad (25)$$

Найдем скорость движения электрона вдоль направления x в зоне I:

$$v_{x_1} = a \cdot t = \frac{e}{m_e} E \cdot t = \frac{e}{m_e} \frac{U_a}{h} \cdot t. \quad (26)$$

Найдем скорость движения электрона вдоль направления x в зоне II:

$$v_{x_{II}} = v_{x_1}(t_1) = \frac{e}{m_e} E \cdot t_1 = \frac{e}{m_e} \frac{U_a}{h} \cdot t_1 = \text{const}. \quad (27)$$

где t_1 – время движения электрона по траектории от фотокатода до анода.

Рассмотрим движение электрона вдоль направления оси y . Составляющую скорости \bar{v}_y электрон приобретает за счет действия силы Лоренца:

$$F_L = e \cdot B \cdot v \approx e \cdot B \cdot v_x. \quad (28)$$

Учитывая, что:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt}; \quad \Rightarrow \quad dv = \frac{F}{m} dt, \quad (29)$$

выразим в общем виде:

$$F_L = m_e a_y = m_e \frac{dv_y}{dt} = eBv_x; \quad \Rightarrow \quad dv_y = \frac{e}{m_e} B \cdot v_x(t) dt, \quad (30)$$

или

$$v_y = \frac{e}{m_e} B \int_0^{t_1} v_x(t) dt. \quad (31)$$

В зоне I, учитывая (26):

$$v_{y_1} = \frac{e}{m_e} B \int_0^{t_1} v_x(t) dt = \left(\frac{e}{m_e} \right)^2 \frac{U_a}{h} B \int_0^{t_1} t dt = \left(\frac{e}{m_e} \right)^2 \frac{U_a}{2h} B \cdot t_1^2, \quad (32)$$

В зоне II, учитывая (27):

$$\begin{aligned} v_{y_{II}} &= \frac{e}{m_e} B \int v_{x_{II}}(t) dt = v_{y_I}(t_1) + \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{h} B \cdot t_1 \cdot t = \\ &= \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{2h} B \cdot t_1^2 + \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{h} B \cdot t_1 \cdot t = \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{h} B \cdot t_1 \left[\frac{t_1}{2} + t\right]. \end{aligned} \quad (33)$$

При равноускоренном движении вдоль оси x с учетом (23):

$$t_1 = \frac{2h}{v_{x_{\max}}} = 2h \sqrt{\frac{m_e}{2eU_a}}. \quad (34)$$

Рассчитаем в общем случае сдвиг траектории электрона. За время dt в произвольной точке траектории электрон смещается по оси y на расстояние:

$$dy = v_y dt. \quad (35)$$

Смещение в зоне I (на участке от фотокатода до анода) равно:

$$y_I(t) = \int v_{y_I}(t) dt = \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{2h} B \int t^2 dt = \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{6h} B \cdot t^3. \quad (36)$$

Подставим в формулу (36) и значение t , из (34), получим:

$$\Delta y_I = y_I(t_1) = \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{6h} B \cdot \left(2h \sqrt{\frac{m_e}{2eU_a}}\right)^3 = \frac{\sqrt{2}}{3} B \cdot h^2 \sqrt{\frac{e}{m_e U_a}}. \quad (37)$$

Смещение в зоне II (на участке от анода до экрана) равно:

$$y_{II}(t) = \int v_{y_{II}}(t) dt = \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{h} B \cdot t_1 \int \left[\frac{t_1}{2} + t\right] dt = \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{2h} B \cdot t_1 \cdot t [t_1 + t]. \quad (38)$$

Зону II электрон пролетит за время, равное:

$$t_2 = \frac{l}{v_{x_{\max}}} = l \sqrt{\frac{m_e}{2eU_a}}. \quad (39)$$

где l – расстояние от входа в анод до экрана;

Подставим (34) и (39) в (38), получим:

$$\Delta y_{\Pi} = y_{\Pi}(t_2) = \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{U_a}{2h} B \cdot t_1 \cdot t_2 [t_1 + t_2] = \frac{\sqrt{2}}{2} B \sqrt{\frac{e}{m_e U_a}} \left[lh + \frac{l^2}{2} \right]. \quad (40)$$

Учет обоих факторов сдвига изображения на экране ЭОП при наложении магнитного поля в соответствии с выражением (22) позволяет рассчитать общий сдвиг изображения на люминесцентном экране:

$$\Delta y = \left(\frac{\sqrt{2}}{3} h^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} lh + \frac{\sqrt{2}}{4} l^2 \right) B \sqrt{\frac{e}{m_e U_a}} = K \cdot B \sqrt{\frac{e}{m_e U_a}}, \quad (41)$$

$$K = \frac{\sqrt{2}}{12} (4h^2 + 6lh + 3l^2), \quad (42)$$

где K – постоянный коэффициент, определяющийся геометрическими размерами ЭОП. Для ЭОП типа П-4 $K = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Из (41) найдем значение удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{(\Delta y)^2 U_a}{K^2 B^2}. \quad (43)$$

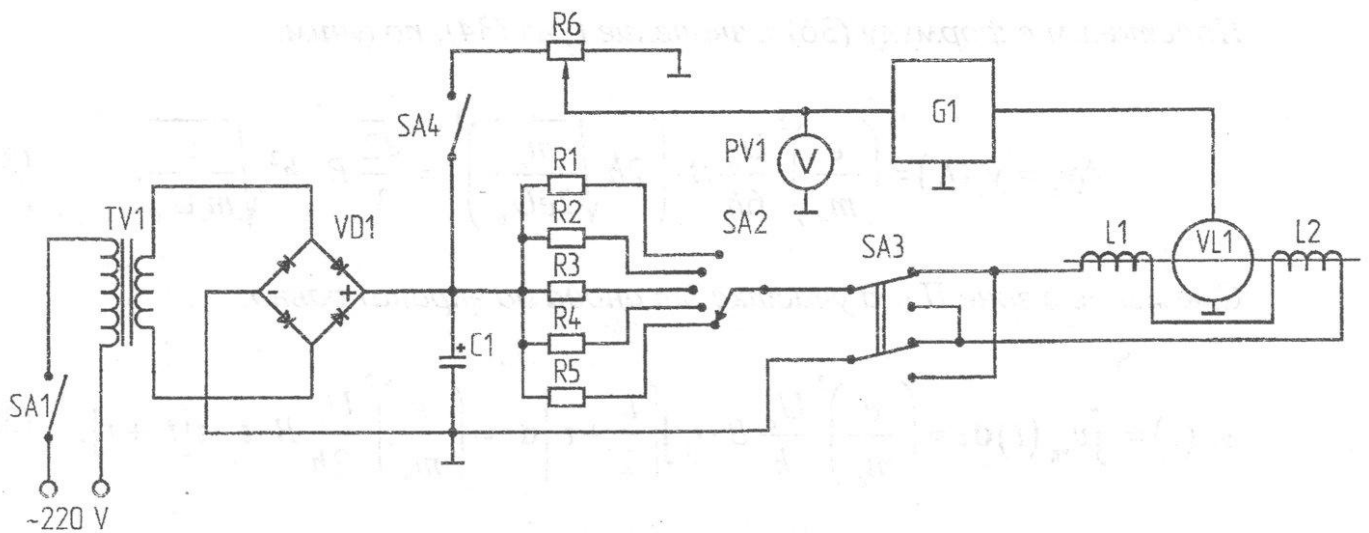


Рис. 14. Схема электрическая принципиальная:

SA1 – кнопка «Сеть», SA2 – переключатель «Ток катушек, мА», SA3 – переключатель полярности \oplus , \ominus , L1, L2 – катушки Гельмгольца, R6 – потенциометр «Высокое, 0...5 кВ», G1 – преобразователь высоковольтный, VL1 – ЭОП

2.4. Методика эксперимента

Согласно вышеприведенным рассуждениям, внутри ЭОП, помещенного во внешнее магнитное поле, можно выделить две основных зоны: в зоне I на движущийся электрон действуют как сила Лоренца, так и ускоряющая сила со стороны электростатического поля, а в зоне II действует только сила Лоренца.

Общее смещение Δy можно выразить как сумму сдвигов в обеих зонах (22) и вычислить по формуле (41) с учетом (42).

Если на фотокатоде падающий свет образует тонкую горизонтальную полосу, ее изображение на экране имеет также вид светящейся горизонтальной полоски. При включении магнитного поля изображение на экране ЭОП сдвинется вниз или вверх на Δy , в зависимости от направления тока в катушках.

Для того, чтобы найти величину удельного заряда электрона экспериментально, необходимо, кроме измеряемого непосредственно смещения светящейся полосы на экране ЭОП, знать коэффициент K (42), величину анодного напряжения U_a , задаваемого оператором, и магнитную индукцию B , вычисляемую по формуле (21). Окончательный расчет производится по формуле (43).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Убедитесь, что прибор заземлен.
2. Разберитесь в электрической схеме блока управления (рис. 14).
3. Убедитесь, что тумблеры «Сеть» и «Высокое» находятся в выключенном состоянии, а переключатель «Ток катушек» установлен на отметку 0 мА.
4. Подключите прибор к сети переменного тока 220 В.
5. Переведите последовательно тумблеры «Сеть» и «Высокое» во включенное состояние.
6. Дождитесь появления светящейся узкой полосы на люминесцентном экране ЭОП и зафиксируйте её положение на вертикальной измерительной шкале.
7. Установите указанное преподавателем значение анодного напряжения с помощью регулятора « U_a », контролируя его величину вольтметром. Заполните графу 2 табл.
8. Меняя переключателем «Ток катушек» величину постоянного тока, текущего через катушки Гельмгольца, а переключателем \oplus / \ominus – его полярность, заполните графы 3, 4 и 5 табл. 1.
9. Выполните пункты 0, 0 трижды (для трех различных анодных напряжений).
10. Рассчитайте величину магнитной индукции B по формуле (21) и результат занесите в графу 7 табл.
11. Рассчитайте удельный заряд электрона для всех измерений по формуле (43). Заполните графу 8 табл. Значение постоянной K указано на корпусе прибора.

$$U_a, \quad (\Delta y)', \quad (\Delta y)'', \quad \langle \Delta y \rangle, \quad B, \quad \frac{e}{m_e}, \frac{Кл}{кг}, \quad \left\langle \frac{e}{m_e} \right\rangle, \frac{Кл}{кг}$$

1
2
3

12. Найдите среднее значение удельного заряда электрона и оцените погрешность измерения. Заполните графы 9 и 10 табл.

13. Сформулируйте выводы по итогам выполнения лабораторной работы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие силы действуют на электрон в лабораторной установке?
2. Чем различается действие электрического и магнитного полей на электрический заряд?
3. Как в данной лабораторной работе определяется удельный заряд электрона?
4. Как зависит период обращения заряженной частицы по орбите в магнитном поле от ее скорости?
5. Выведите рабочую формулу.
6. Какие причины могут привести к неточности определения удельного заряда электрона?
7. Ускоряет или замедляет движение заряженной частицы постоянное магнитное поле? Почему?
8. Как действует на кинетическую энергию заряженной частицы постоянное магнитное поле, в котором она движется?