

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки
03.03.03 «Радиофизика», 02.03.02 «Фундаментальная информатика и
информационные технологии» и специальности 10.05.02 «Информа-
ционная безопасность телекоммуникационных систем»

Нижний Новгород
2021

УДК 537.112
ББК 22.338
О-62

О-62 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА: Составители: Бакунов М.И., Шугуров А.И., Мешков О.В.: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2021. – 10 с.

Рецензент: доцент кафедры квантовой радиофизики и электроники радиофизического факультета ННГУ к.ф.-м.н. **Е.А. Тарасова**

Дано описание лабораторной работы по измерению удельного заряда электрона. Измерения проводятся двумя способами: по отклонению пучка электронов в электронно-лучевой трубке магнитным полем Земли и по фокусировке пучка магнитным полем навитого на электронно-лучевую трубку соленоида.

Практикум предназначен для студентов первого курса радиофизического факультета ННГУ.

Ответственный за выпуск:
зам. председателя методической комиссии радиофизического факультета
д.ф.-м.н. **Е.З. Грибова**

УДК 537.112
ББК 22.338

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2021

Введение

Удельным зарядом электрона называют отношение заряда электрона к его массе. Именно удельным зарядом, а не зарядом и массой в отдельности, определяется движение электрона в электрическом и магнитном полях.

Целью работы является измерение удельного заряда электрона двумя способами: по отклонению пучка электронов в электронно-лучевой трубке магнитным полем Земли и по фокусировке пучка магнитным полем навитого на электронно-лучевую трубку соленоида.

Теоретическая часть

При движении заряженной частицы в электрическом и магнитном полях на нее действует сила Лоренца, которая в системе единиц СИ записывается в виде

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

где q и \vec{v} – заряд и скорость частицы, \vec{E} – напряженность электрического поля, \vec{B} – индукция магнитного поля. Подстановка формулы (1) во второй закон Ньютона дает выражение для ускорения частицы

$$\vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E} + \frac{q}{m}[\vec{v}\vec{B}], \quad (2)$$

в которое заряд q и масса m частицы входят в комбинации q/m , которая называется удельным зарядом частицы (если $q < 0$, то удельным зарядом называют $|q|/m$). Из формулы (2) следует, что из наблюдений за движением частицы в полях можно определить только ее удельный заряд, но не q и m в отдельности. В данной лабораторной работе проводятся наблюдения за движением электрона (с $q = -e$) в магнитных полях и находится его удельный заряд e/m . При этом используются два метода измерения.

Первый метод состоит в измерении отклонения движущихся электронов магнитным полем, направленным перпендикулярно их скорости. В этом случае электрон двигается в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, по дуге окружности (рис. 1) с постоянной по величине скоростью. Обозначая радиус окружности через R , запишем уравнение (2) в проекции на центростремительное направление как

$$\frac{v^2}{R} = \frac{e}{m}vB. \quad (3)$$

Радиус R можно выразить через расстояние L , пройденное электроном в направлении начальной скорости, и смещение h в поперечном направлении (рис. 1):

$$R^2 = (R - h)^2 + L^2. \quad (4)$$

Считая, что $h \ll L$, получаем из (4) приближенное соотношение

$$2Rh = L^2. \quad (5)$$

Выражая R из (5) и подставляя в (3), получаем

$$\frac{e}{m} = \frac{2vh}{BL^2}. \quad (6)$$

При известных значениях параметров v, B, L формула (6) позволяет рассчитать e/m по измеренному поперечному смещению h . В данной установке, однако, электрон приобретает скорость v за счет разгона в электрическом поле

Второй метод измерения e/m основан на использовании эффекта магнитной фокусировки. Пусть несколько электронов вылетают из одной точки, имея одинаковую продольную (направленную вдоль магнитного поля \vec{B}) компоненту скорости \vec{v}_{\parallel} и различные по величине поперечные компоненты скорости \vec{v}_{\perp} (рис. 2). Действующая на электрон сила Лоренца будет определяться только поперечной компонентой скорости \vec{v}_{\perp} и все время будет действовать в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. При этом движение электрона будет представлять собой суперпозицию двух движений – равномерного прямолинейного со скоростью \vec{v}_{\parallel} вдоль магнитного поля и вращения с циклотронной частотой

$$\omega_c = \frac{eB}{m} \quad (7)$$

по окружности ларморовского радиуса

$$R_{\text{л}} = \frac{mv_{\perp}}{eB} \quad (8)$$

в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Результирующее движение электрона будет происходить по винтовой линии с шагом (рис. 2)

$$L = v_{\parallel} \frac{2\pi}{\omega_c} = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{eB}. \quad (9)$$

Как видно из формул (8) и (9), винтовые линии электронов с различными v_{\perp} будут иметь различный радиус $R_{\text{л}}$ и одинаковый шаг L . Это означает, что вылетевшие из начальной точки электроны сначала разойдутся друг от друга, а затем снова соберутся вместе в точке, находящейся на одной линии магнитного поля с начальной точкой на расстоянии L от нее (рис. 2). По аналогии с фокусировкой световых лучей линзой данный эффект называют магнитной фокуси-

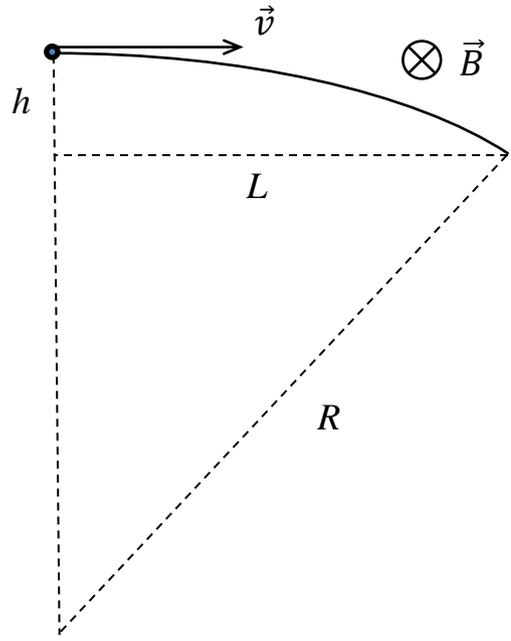


Рис. 1. Отклонение электрона при движении в поперечном магнитном поле

ровкой электронов. Физической причиной магнитной фокусировки является независимость циклотронной частоты ω_c от скорости электрона, вследствие чего электроны с различными v_{\perp} проходят один шаг своей винтовой линии за одинаковое время $2\pi/\omega_c$ и одновременно приходят в точку фокусировки. Фокусировка повторяется периодически через время $2\pi/\omega_c$ с пространственным периодом L , определяемым формулой (9). Измерив L и зная значения v_{\parallel} и B , можно рассчитать e/m по вытекающей из (9) формуле

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi v_{\parallel}}{BL}. \quad (10)$$

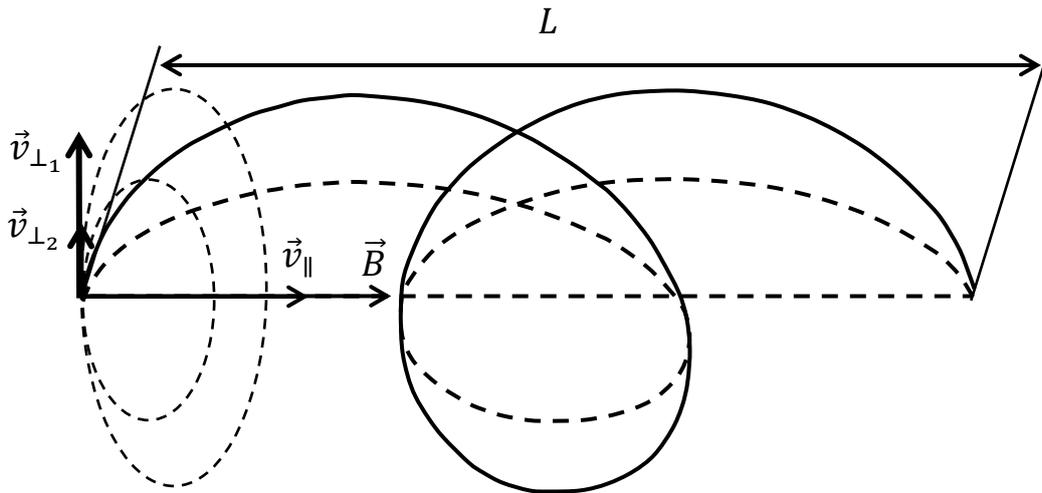


Рис. 2. Траектории движения электронов с различными поперечными скоростями в магнитном поле

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) с навитым на нее соленоидом, транспорта и блока питания с ручками управления (рис. 3). ЭЛТ может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, транспортер служит для ее ориентирования либо в направлении магнитного поля Земли, либо в перпендикулярном направлении.

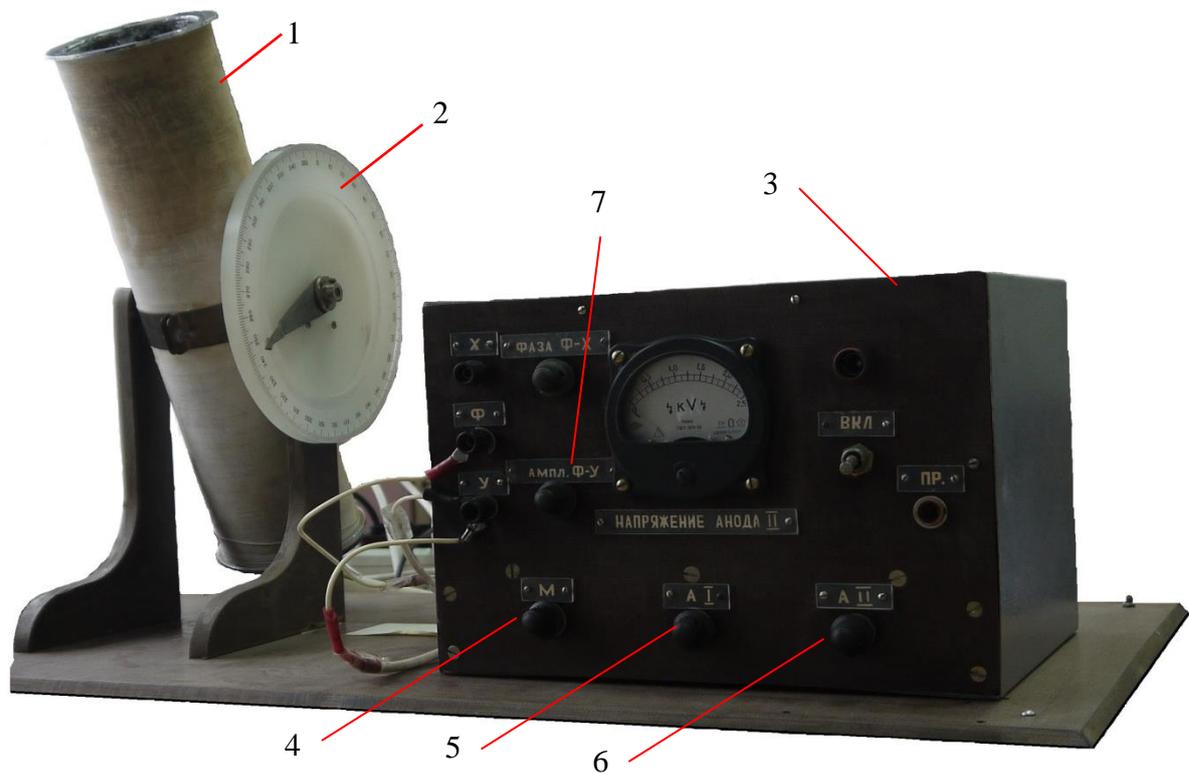


Рис. 3. Экспериментальная установка. 1 – ЭЛТ с навитым на нее соленоидом, 2 – транспортер, 3 – блок питания с ручками регулировки напряжения на модуляторе (4), первом аноде (5), втором аноде (6) и вертикально отклоняющих пластинах (7)

Устройство ЭЛТ приведено на рис. 4. Она представляет собой стеклянный баллон с высоким вакуумом, в котором размещены электронная пушка, состоящая из подогреваемого нитью накала катода К, модулятора М, первого (фокусирующего) анода А I и второго (ускоряющего) анода А II, а также вертикально (В I, В II) и горизонтально (Г I, Г II) отклоняющие пластины. На экран трубки Э с внутренней стороны нанесен флюоресцирующий слой, который светится в месте попадания на него электронного пучка.

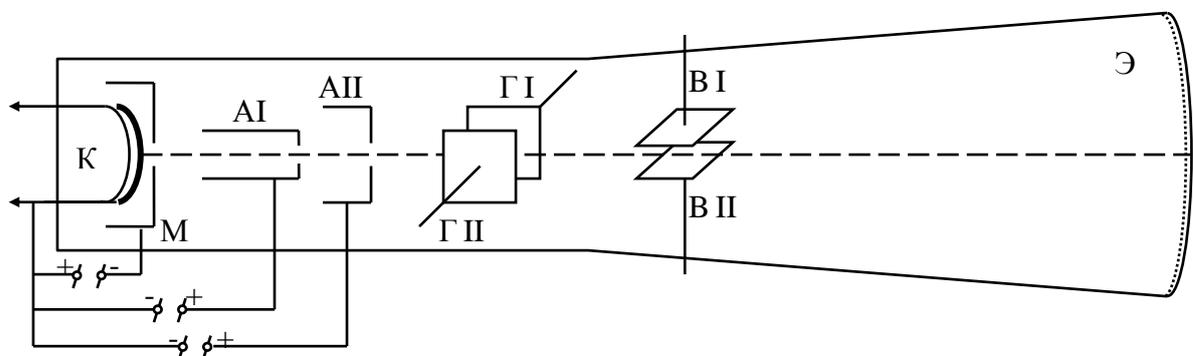


Рис. 4. Устройство ЭЛТ

Проходящий по нити накала электрический ток нагревает катод К и тот начинает испускать электроны. Катод окружен модулятором М, представляю-

щим собой цилиндр с отверстием в доньшке, на который подается отрицательное напряжение относительно катода (от 0 до -50 В). Регулируя величину этого напряжения ручкой «М», можно менять плотность потока электронов, вылетающих из отверстия модулятора, и тем самым яркость пятна на экране. На аноды АI и АII подаются положительные напряжения относительно катода для формирования электронного пучка и ускорения электронов. Ручкой «АI» достигается фокусировка пятна на экране. Ручкой «АII» регулируется скорость вылета электронов из второго анода. Напряжение на втором аноде показывает вольтметр «НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА II». После анода АII пучок электронов проходит между вертикально и горизонтально отклоняющими пластинами и, если на них не подано напряжение, попадает в центр экрана. Если на одну из пар отклоняющих пластин подать напряжение, то электрическое поле между пластинами будет ускорять электроны в поперечном к оси ЭЛТ направлении и пятно на экране сместится. В установке на вертикально отклоняющие пластины можно подавать переменное напряжение с клемм «Ф» и «У» и менять его величину ручкой «АМПП. Ф-У» от нуля до 75 В. Тумблер «ВКЛ» подключает блок питания к сети переменного тока напряжением 220 в.

Для питания обмотки соленоида, создающего магнитное поле вдоль оси ЭЛТ собирается отдельная схема, состоящая из коммутатора, реостата и амперметра, которая подключается к источнику тока.

ВНИМАНИЕ! НА КЛЕММЫ ЭЛТ ПОДАЕТСЯ ОПАСНОЕ ДЛЯ ЖИЗНИ НАПРЯЖЕНИЕ ОКОЛО 2000 В.

Порядок проведения измерений

Пользуясь компасом, расположите установку так, чтобы при горизонтальной ориентации ЭЛТ она была параллельна направлению север-юг. Для устранения наводок зажмите на клемме «Ф» крючки обоих проводов, идущих к вертикально отклоняющим пластинам ЭЛТ. Включите тумблер «ВКЛ». Установите напряжение на втором аноде ручкой «АII», контролируя его по показаниям прибора «НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА II». Ручками «АI» и «М» добейтесь на экране хорошо сфокусированного светящегося пятна достаточной для наблюдений яркости. С помощью транспортира установите ЭЛТ вдоль направления магнитного поля Земли. На широте Нижнего Новгорода линии магнитной индукции идут с юга на север под углом 70° к горизонтальной плоскости. При правильном расположении ЭЛТ светящееся пятно должно быть в центре экрана. Поверните ЭЛТ на 90° , контролируя угол поворота по транспортиру. Измерьте смещение светящегося пятна от центра экрана (для этого удобно поместить на экран кусок бумаги и отмечать на нем карандашом начальное и конечное положения пятна).

Для расчета e/m по измеренному смещению h с помощью формулы (6) необходимо знать скорость электрона v . Она определяется напряжением на втором аноде U_a согласно формуле

$$v = \sqrt{2U_a \frac{e}{m}}. \quad (11)$$

куда входит e/m . Подставляя (11) в (6) и выражая e/m , получаем окончательную расчетную формулу

$$\frac{e}{m} = \frac{8h^2 U_a}{B^2 L^4}. \quad (12)$$

Индукция магнитного поля Земли в Нижнем Новгороде примерно равна $5,4 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Для измерения e/m методом магнитной фокусировки электронам нужно сообщить поперечную (по отношению к оси ЭЛТ) скорость, подавая переменное напряжение на одну из пар отклоняющих пластин и создавая тем самым переменное поперечное электрическое поле. Электроны, прошедшие через пластины в разные моменты времени, будут испытывать воздействие разного электрического поля и приобретут разные поперечные скорости. В результате электроны будут двигаться по винтовым линиям разного поперечного радиуса $R_{\text{л}}$, см. формулу (8), но одинакового шага L , см. формулу (9). Таким образом, через расстояние L после отклоняющих пластин все электроны соберутся в одной точке, т.е. произойдет фокусировка пучка. В эксперименте нужно, увеличивая ток в соленоиде (магнитное поле), добиться фокусировки электронов на экране и измерить соответствующее значение тока, а по нему определить магнитное поле по формуле

$$B = \mu_0 n I, \quad (13)$$

где n – число витков на единицу длины соленоида, I – сила тока в катушке, μ_0 – магнитная постоянная. Удельный заряд электрона с учетом формул (10) и (11) находим по формуле

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_a}{B^2 L^2}. \quad (14)$$

При дальнейшем увеличении тока можно добиться второй фокусировки (электроны совершают два оборота по винтовой линии) и фокусировок более высокого порядка.

Задание

1. Пользуясь компасом и транспортиром, установите ось ЭЛТ так, чтобы она совпадала с направлением магнитного поля Земли. Включите питание и, закоротив отклоняющие пластины ЭЛТ, получите сфокусированное пятно на экране.

2. Проведите измерение удельного заряда электрона методом отклонения пучка земным магнитным полем при двух значениях потенциала второго анода.

3. Проведите измерение удельного заряда электрона методом фокусировки электронного пучка магнитным полем соленоида. Для подачи переменного

напряжения используйте как горизонтальные, так и вертикальные пластины: в каждом случае измерения проводите при двух значениях потенциала второго анода. Для исключения влияния магнитного поля Земли фокусировку производите токами противоположных направлений, используя для этого коммутатор, и берите каждый раз среднее значение.

Литература

1. Сивухин В.Д. Общий курс физики. Т. III Электричество. - М.: Наука, 1977. - 688 с.
2. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. - М.: Высш. шк., 1991.- 289 с.

Приложение. Геометрические размеры ЭЛТ

Расстояние от второго анода до экрана – 16,3 см.

Расстояние от начала вертикально отклоняющих пластин до экрана – 12,2 см, длина пластин – 1,4 см, расстояние между пластинами – 0,6 см.

Расстояние от начала горизонтально отклоняющих пластин до экрана – 14,4 см, длина пластин – 1,6 см, расстояние между пластинами – 0,55 см.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Составители:

Михаил Иванович Бакунов
Александр Иванович Шугуров
Олег Вячеславович Мешков

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.