

ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Введение

В основе физики, как экспериментальной науки, лежат измерения. *Измерением называется операция сравнения измеряемой величины с некоторой величиной, принятой за единицу.* В результате измерения мы получаем число, показывающее, сколько единиц содержится в измеряемой величине. Само это число зависит от выбора единицы измерения и поэтому без ее указания не имеет никакого смысла.

Полученные в результате измерений значения различных величин могут зависеть друг от друга. Физика устанавливает связь между такими величинами и выражает ее в виде формул, которые показывают, как числовые значения одних величин могут быть найдены по числовым значениям других. Основы обработки результатов эксперимента подробно изложены в «Физическом практикуме. Лабораторные работы по механике и молекулярной физике. Учебное пособие для вузов/ В.А. Рябов и др.». Здесь отметим особенности при проведении измерений в электрических цепях и связанными с этими измерениями приборными погрешностями.

Показания прибора обычно округляют до ближайшего деления шкалы (иногда до половины деления), поскольку отсчитывать на глаз доли деления неудобно и ненадежно. Если случайные ошибки невелики, все измерения после округления дадут один и тот же результат. В этом случае достаточно ограничиться двумя-тремя измерениями и не нужно проводить статистическую обработку результатов. Однако следует учесть приборную погрешность.

Будем различать погрешность отсчета по шкале и погрешность показаний прибора. Погрешность отсчета, связанную с округлением, примем равной половине деления шкалы или половине той доли деления, до которой производится округление.

Погрешность показаний, т.е. несоответствие показаний прибора истинному значению измеряемой величины, можно определить при сравнении показаний данного прибора и более точного эталонного прибора. Эта погрешность может быть как систематической (например, неверная градуировка), так и случайной. В паспортных данных приводят максимальное значение суммарной погрешности (систематическая + случайная), которое называют предельной приборной погрешностью.

Может быть указана относительная или абсолютная предельная погрешность.

Вместо предельной погрешности h может быть указан класс точности прибора γ . Для стрелочных электроизмерительных приборов, класс точности означает отношение предельной абсолютной погрешности к предельному значению измеряемой величины, т.е. к наибольшему ее значению x_{\max} , которое может быть измерено по шкале прибора:

$$\gamma = \frac{h}{x_{\max}} \cdot 100\%$$

Абсолютная погрешность показаний определяется по формуле:

$$h = x_{\max} \cdot \frac{\gamma}{100}$$

Класс точности может быть указан на шкале прибора, но это не всегда возможно, так как часто используются многопредельные приборы, в которых одна и та же шкала при различных режимах работы или способах включения прибора соответствует различным пределам измерений x_{\max} . В таких случаях в паспортных данных указывают погрешности для каждого из допускаемых пределов измерения прибора.

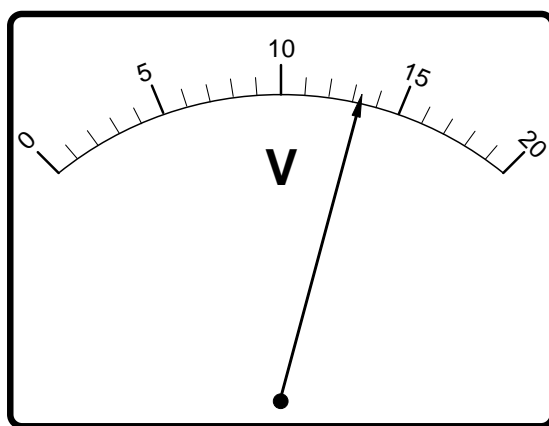


Рис. 1

Пример 1. Милливольтметр класса 1,5 со шкалой на 300 мА дает в любом месте шкалы абсолютную предельную погрешность

$$h = 300 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = 4,5 \text{ мА.}$$

Пример 2. В табл. 1 приведена выдержка из паспортных данных электронного милливольтметра ВЗ-38. Указаны предельные погрешности в процентах от предела измерения.

Погрешности милливольтметра ВЗ-38

Диапазон частот, МГц	Погрешность измерения напряжения, % на пределах измерения	
	1 - 300 мВ	1 - 300В
$(20 - 45) \cdot 10^{-6}$	+4	+4
$45 \cdot 10^{-6} - 1$	+2,5	+4
1-3	+4	+6
3-5	± 6	+6

При грубой оценке погрешностей будем учитывать лишь ту из приборных погрешностей (отсчета или показаний), которая больше. Если, в свою очередь, случайная (т.е. определяемая разбросом результатов) и приборная погрешности заметно различаются, то в записи окончательного результата измерений будем указывать большую из них. Если эти погрешности примерно одинаковы, можно указать любую из них.

В качестве примера на рис.1 показано положение стрелки вольтметра при измерении падения напряжения на некотором сопротивлении. Тогда, с учетом изложенных правил, результатом измерения будет величина напряжения:

$$U = 13,5 \pm 0,5 \text{ В.}$$

1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1.1. Проверка закона Ома и определение удельного сопротивления проводника

1.1.1. Введение

Электрическим током называют упорядоченное движение заряженных частиц. Сами эти частицы называются *носителями тока*. В металлах и полупроводниках носителями тока являются электроны, в электролитах – положительные и отрицательные ионы, в ионизированных газах – положительные, отрицательные ионы и электроны.

Упорядоченное движение носителей тока приводит к переносу заряда в направлении их скорости. Интенсивность этого переноса характеризуется *плотностью тока*, численно равной величине заряда, переносимого в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению движения носителей тока. За направление тока принимается направление движения положительно заряженных частиц. В случае, когда все носители тока одинаковы, плотность тока определяется формулой:

$$\vec{j} = ne\vec{u} \quad (1)$$

Где n –концентрация носителей тока, т.е. число их в единице объема, e – заряд одной частицы, \vec{u} – средняя скорость упорядоченного движения носителей тока. В случае, когда имеется несколько типов носителей тока, правая часть формулы (1) будет представлять собой сумму плотностей тока, создаваемого каждым типом частиц.

Силой тока через поверхность называется заряд, проходящий через эту поверхность в единицу времени. Бесконечно малый элемент поверхности характеризуется вектором $d\vec{S}$, направленным по нормали к поверхности, модуль которого равен площади этого элемента. Сила тока, протекающего через бесконечно малый элемент поверхности, равна

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

Сила тока, протекающего через конечную поверхность S , равна интегралу по этой поверхности от элементов силы тока:

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}. \quad (3)$$

Одним из основных способов возбуждения электрического тока в проводниках является создание и поддержание в них электрического поля. Как показывает опыт, для многих проводников (в частности, металлов) в широких пределах плотность тока \vec{j} пропорциональна напряженности электрического поля \vec{E} . Это – один из важнейших, хотя и не фундаментальных, законов электродинамики. Он называется *законом Ома*. Математически закон Ома выражается формулой

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности σ называется *удельной электрической проводимостью*. Строго говоря, формула (4) справедлива лишь для изотропных проводников, свойства которых одинаковы по всем направлениям. В анизотропных проводниках (кристаллах) направления векторов \vec{j} и \vec{E} , вообще говоря, не совпадают. Величина, обратная электрической проводимости, называется *удельным сопротивлением*:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (5)$$

Удельная электрическая проводимость зависит от свойств материала. По ее значению материалы делятся на три класса: диэлектрики, полупроводники и проводники. Резкой границы между ними нет. Диэлектрики – вещества с малой электрической проводимостью (большим удельным сопротивлением). Идеальный диэлектрик характеризуется отсутствием проводимости. Однако это может осуществиться лишь при 0 °К. При температуре, отличной от 0 °К, все материалы обладают определенной проводимостью и, следовательно, идеальных диэлектриков нет. Диэлектриком принято называть материал, удельное сопротивление которого $\rho > 10^5$ Ом·м. Полупроводники имеют удельное сопротивление меньше 10^5 Ом·м, но больше 10^3 Ом·м. Проводники характеризуются удельным сопротивлением, меньшим 10^3 Ом·м. В основном это металлы. Наиболее хорошими проводниками среди них являются медь и серебро, удельное сопротивление которых имеет порядок 10^{-7} Ом·м.

В практически важном случае, когда электрические токи текут по тонким проводам, направление тока будет совпадать с направлением оси провода, а величина плотности тока может считаться одной и той же во всех точках его поперечного сечения. Сила тока через поперечное сечение провода площадью S равна

$$I = j \cdot S \quad (6)$$

Если ток постоянен, то сила тока I будет одна и та же вдоль всего провода. Электрическое поле постоянного тока создается зарядами, находящимися на поверхности проводника, плотность которых не меняется со временем, хотя и происходит движение зарядов: на место ушедших зарядов приходит такое же количество новых зарядов. Поэтому, как и поле неподвижных зарядов, поле постоянного тока является потенциальным. Разность потенциалов между двумя точками провода численно равна работе электростатических сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}, \quad (7)$$

где $d\vec{l}$ – бесконечно малый элемент длины провода. С учетом формул (4) и (6) для разности потенциалов получаем

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \frac{\vec{j} \cdot d\vec{l}}{\sigma} = I \cdot \int_1^2 \frac{dl}{\sigma \cdot S} = I \cdot R. \quad (8)$$

Величина

$$R = \int_1^2 \frac{dl}{\sigma \cdot S} \quad (9)$$

называется *электрическим сопротивлением* проводника. Для однородного провода постоянного поперечного сечения

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (10)$$

где l – его длина. Разность потенциалов (8) называют также *напряжением* и обозначают $U = \varphi_1 - \varphi_2$. В случае, если участок цепи содержит источник сторонних (не электростатических) сил, то напряжение

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon, \quad (11)$$

Где ε – электродвижущая сила (ЭДС), равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке. Формула

$$U = I \cdot R \quad (12)$$

выражает *закон Ома в интегральной форме* в отличие от формулы (4), представляющей этот закон в *локальной форме*. Формулу (12) называют также *законом Ома для участка цепи*.

Целью настоящей лабораторной работы является определение удельного сопротивления проводника. Наряду с этим экспериментально проверяется закон Ома (12) и пропорциональность сопротивления провода его длине. Согласно формуле (10) коэффициент пропорциональности k между R и l

равен $k = \frac{\rho}{S}$. Зная площадь поперечного сечения провода и определив коэффициент k , можно найти удельное сопротивление как $\rho = k \cdot S$.

1.1.2. Экспериментальная установка

Общий вид установки представлен на рис.2.

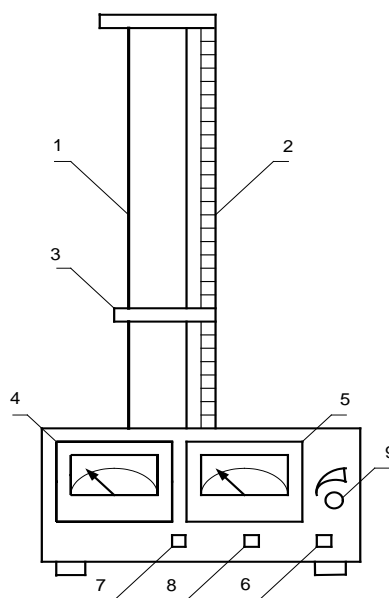


Рис. 2

Провод [1], удельное сопротивление которого требуется определить, натянут между неподвижными кронштейнами колонны [2], на которой нанесена метрическая шкала. Подвижный кронштейн [3] может передвигаться вдоль колонны и фиксироваться в любом положении. На подвижном кронштейне нанесена черта, которая позволяет определить по шкале колонны длину участка провода до нижнего кронштейна. Контактный зажим на подвижном кронштейне обеспечивает соединение данного участка провода с измерительной частью установки. Вольтметр [4] служит для измерения напряжения на выбранном участке провода, а амперметр [5] – для измерения силы тока в нем. Нажатие кнопки [6] вызывает включение напряжения питания. Нажатие кнопки [7] позволяет произвести измерения по одной из схем: при отжатой кнопке [8] с точным измерением силы тока, а при нажатой кнопке – с точным измерением напряжения. Ручка потенциометра [9] позволяет изменять силу тока в цепи.

1.1.3. Методика измерений

Схема измерений с точным измерением силы тока представлена на рис.3.

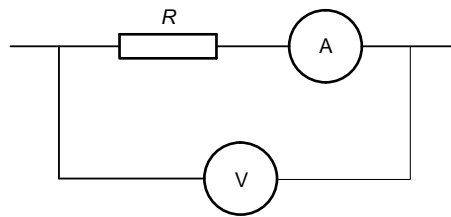


Рис. 3

R – измеряемое сопротивление, A – амперметр, V – вольтметр.

В этом режиме измерений сила тока I в сопротивлении R совпадает с показаниями амперметра I_A :

$$I = I_A, \quad (13)$$

а напряжение U на сопротивлении R равно:

$$U = U_V - I_A \cdot R_A, \quad (14)$$

где U_V – показания вольтметра, $R_A = 0,15$ Ом – внутреннее сопротивление амперметра. В соответствии с законом Ома, измеряемое сопротивление определяется по формуле:

$$R = \frac{U_V}{I_A} - R_A. \quad (15)$$

Схема измерений с точным измерением напряжения приведена на рис. 4.

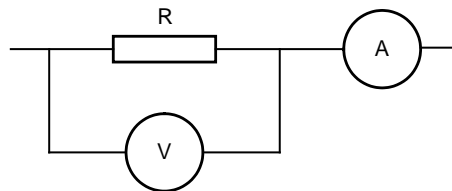


Рис. 4

В этом режиме измерений напряжение U на сопротивлении R совпадает с показаниями вольтметра U_V :

$$U = U_V, \quad (16)$$

а сила тока I в сопротивлении R равна:

$$I = I_A - \frac{U_V}{R_V}, \quad (17)$$

где I_A – показания амперметра, $R_V = 2500$ Ом – внутреннее сопротивление вольтметра. Сопротивление R вычисляется по формуле:

$$R = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}. \quad (18)$$

1.1.4. Порядок выполнения работы

1. Включить шнур питания прибора в розетку с напряжением 220 В и нажать кнопку [6] (см. рис. 2).

2. Выбрать режим измерений с помощью кнопки [8] при нажатой кнопке [7].

3. Перемещая кронштейн [3], выбрать участок провода [1] и по шкале на колонне [2] определить его длину l .

4. Ручкой потенциометра [9] установить одно из значений силы тока I_A по шкале амперметра [5] и по шкале вольтметра [4] определить напряжение U_V .

5. Измерения напряжения U_V провести для пяти различных значений силы тока I_A в интервале от 100 до 250 мА и результаты записать в табл.1.

Таблица 1

Режим	с точным измерением _____				
l , мм					
I_A , мА					
U_V , В					
I , мА					
U , В					

6. Для одного из значений силы тока I_A провести измерения напряжения U_V для пяти различных значений длины l в интервале от 100 до 500 мм и результаты записать в табл.2.

Таблица 2

Режим	с точным измерением _____				
I_A , мА					
l , мм					
U_V , В					
I , мА					
U , В					
R , Ом					

1.1.5. Обработка результатов измерений

1. По показаниям амперметра I_A и вольтметра U_V вычислить, согласно формулам (13) – (15) или (16) – (18), в соответствии с выбранным режимом измерений, силу тока I , напряжение U , сопротивление R и результаты записать в табл.1 и 2.

2. Построить по данным табл.1 вольтамперную характеристику, т.е. график зависимости I от U . Экспериментальным подтверждением закона Ома является линейная зависимость I от U .

3. Проверить пропорциональность сопротивления провода его длине, построив по данным табл.2 график зависимости R от l .

4. Вычислить угловой коэффициент k прямой $R = k \cdot l$ и погрешность δ_k по формулам:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n l_i^2}, \quad (19)$$

$$\delta_k = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i^2}{\sum_{i=1}^n l_i^2} - k^2}. \quad (20)$$

5. Определить удельное сопротивление ρ и погрешность δ_ρ , как

$$\rho = k \cdot S, \quad (21)$$

$$\delta_\rho = \rho \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\delta_S}{S}\right)^2}, \quad (22)$$

где $S = 0,102 \pm 0,003 \text{ мм}^2$ – площадь поперечного сечения провода. Сравните полученное значение со значением $1,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для нихрома, из которого изготовлена проволока.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током? Дайте определения силы и плотности тока.

2. Сформулируйте закон Ома в локальной и интегральной форме.

3. Дайте определения разности потенциалов, электродвижущей силе и напряжению.

4. От чего зависит электрическое сопротивление провода?

1.2. Измерение сопротивлений при помощи моста Уитстона

Приборы и принадлежности: магазин сопротивлений, реохорд, набор неизвестных сопротивлений, микроамперметр постоянного тока, источник постоянного тока, ключ.

Цель работы: определить методом мостиковой схемы неизвестные два сопротивления по отдельности, а также при их последовательном и параллельном соединении.

1.2.1. Введение

Величина тока I равна величине заряда, переносимого носителями через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}, \text{ для постоянного тока } I = \frac{q}{t}. \quad (1)$$

Сила тока измеряется в амперах (СИ):

$$1\text{А} = 1\text{Кл}/1\text{сек.}$$

Источник тока характеризуется величиной электродвижущей силы ЭДС (ε).

ЭДС источника тока равна работе сторонних (неэлектрических) сил при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q} = \oint \frac{\vec{F}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l}}{q} = \oint \vec{E}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

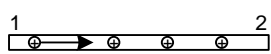
$\vec{E}_{\text{стор}} = \frac{\vec{F}_{\text{стор}}}{q}$ - напряженность сторонних сил (по аналогии с напряженностью электрического поля).

Для любой точки внутри проводника, по которому проходит постоянный ток,

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{Кул}} + \vec{E}_{\text{стор}},$$

где $\vec{E}_{\text{Кул}}$ - напряженность электростатического поля.

Разность потенциалов на участке 1-2 проводника равна


$$\varphi_1 \quad \varphi_2$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{\text{Кул}}}{q} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{Кул}} \cdot d\vec{l} \quad (3)$$

Напряжением (падением напряжения) U_{12} на участке цепи 1-2 называется величина, численно равная работе, совершаемой суммарным

полем кулоновских и сторонних сил при перемещении на этом участке цепи единичного положительного заряда.

$$U_{12} = \varepsilon_{12} + \varphi_1 - \varphi_2 \quad (4)$$

Напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов, когда на этом участке не приложена ЭДС (однородный участок цепи).

Г. Ом экспериментально установил, что сила тока на участке цепи (не содержащем источника тока) прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению проводника R

$$I = \frac{U}{R}. \quad (5)$$

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Для цилиндрического проводника сопротивление R прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S .

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (6)$$

ρ – удельное электрическое сопротивление, характеризующее материал проводника.

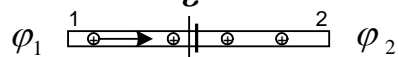
При последовательном соединении проводников их сопротивления складываются

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (7)$$

а при параллельном суммируются обратные значения сопротивлений

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (8)$$

Теперь рассмотрим неоднородный участок 1-2_ε где действующую ЭДС на участке 1-2



обозначим ε , а приложенную на концах участка разность потенциалов $-(\varphi_1 - \varphi_2)$, тогда в формулу (5) для закона Ома следует подставлять напряжение, определяемое формулой (4).

$$I = \frac{\varepsilon + \varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad (9)$$

где (9) – запись закона Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.

Для замкнутого участка цепи $\varphi_1 = \varphi_2$. С учетом этого получим выражение закона Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (10)$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока, а R – сопротивление внешней части цепи (сопротивление нагрузки).

1.2.2. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

Расчет разветвленных цепей можно произвести с помощью двух правил Кирхгофа. Любая точка разветвления цепи, в которой сходится не менее трех проводников с током, называется узлом. При этом ток, входящий в узел, считается положительным, а ток, выходящий из узла отрицательным.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна 0.

$$\sum_k I_k = 0. \quad (11)$$

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда.

Второе правило гласит, что в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, сумма произведений сил токов на сопротивление соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре.

$$\sum_i I_i \cdot R_i = \sum_k \varepsilon_k. \quad (12)$$

При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо:

1) выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи; действительное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток получится положительным, то его направление было выбрано правильно, отрицательным – его истинное направление противоположно выбранному;

2) выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться; произведение $I_i \cdot R_i$ положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода и наоборот; ЭДС, действующие по выбранному направлению обход считаются положительными, против отрицательными;

3) составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу искомых величин.

1.2.3. Описание приборов и метода измерений

В данной работе используется мост постоянного тока (мост Уитстона, рис. 5).

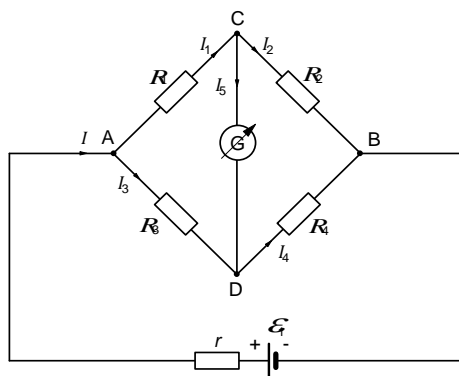


Рис. 5

Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 образуют плечи моста Уитстона. Между точками А и В моста включен источник постоянного тока с ЭДС ε_1 и внутренним сопротивлением r .

Для узлов А, С и D, применяя первое правило Кирхгофа, получим

$$\begin{aligned} I - I_1 - I_3 &= 0 \\ I_1 - I_2 - I_5 &= 0 \\ I_3 + I_5 - I_4 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Для контуров АСВА, АСДА и СВДС согласно второму правилу Кирхгофа, можно записать:

$$\begin{aligned} I \cdot r + I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 &= \varepsilon_1 \\ I_1 \cdot R_1 + I_5 \cdot R_5 - I_3 \cdot R_3 &= 0 \\ I_2 \cdot R_2 - I_4 \cdot R_4 - I_5 \cdot R_5 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Если известны все сопротивления и ЭДС, то решая шесть уравнений (13,14), можно найти неизвестные токи.

1.2.4. Метод измерений

Если нужно найти неизвестное сопротивление, то на практике используют обычно реохордный мост Уинстона (рис. 6),

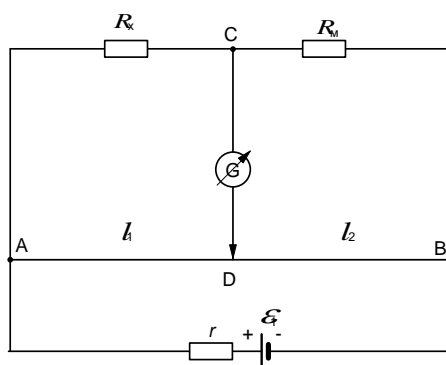


Рис. 6

где сопротивления R_3 и R_4 представляют собой длинную однородную проволоку (реохорд) с большим удельным сопротивлением.

Изменяя известные сопротивления R_m (магазин сопротивлений) R_3 и R_4 (плечи реохорда), можно добиться того, чтобы ток через микроамперметр был равен нулю. Тогда из уравнений (13) найдем

$$I_1 = I_2, I_3 = I_4,$$

а из уравнений (14) получаем: $I_1 \cdot R_1 = I_3 \cdot R_3$ и $I_2 \cdot R_2 = I_4 \cdot R_4$. Взяв отношения последних выражений, получим

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}. \quad (15)$$

Заменив $\frac{R_3}{R_4}$ через длины реохорда $\frac{l_1}{l_2}$ можно вычислить

неизвестное сопротивление R_x по формуле

$$R_x = R_m \cdot \frac{R_3}{R_4} = R_m \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (16)$$

1.2.5. Порядок выполнения работы

1. Соедините приборы по схеме (рис. 6).
2. Установите на магазине сопротивлений (МС) первое значение сопротивления $R_{m1}=2$ Ом. Подайте питание от источника напряжения постоянного тока. Плавно перемещая ползунок реохорда, добейтесь установления стрелки микроамперметра на нуль и запишите значения плеч реохорда l_1 и l_2 , при которых выполняется условие

$$\frac{R_x}{R_m} = \frac{l_1}{l_2}$$

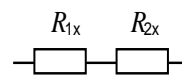
и найдите неизвестное сопротивление по формуле:

$$R_x = R_m \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

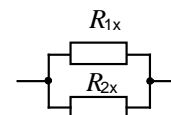
3. Повторите опыт при других значениях сопротивлений магазина МС (5, 10 и 20 Ом).

4. При выключенном тумблере источника питания вместо первого неизвестного сопротивления R_{1x} подключите другое неизвестное сопротивление R_{2x} и повторите опыт.

5. Включите в схему (участок 1-2) R_{1x} и R_{2x} последовательно (отключив источник питания) и повторив опыт, определите общее сопротивление $R_{\text{послед.}}$



6. Включите в схему R_{1x} и R_{2x} параллельно и повторив опыт определите $R_{\text{паралл.}}$



Таблица

Измеряемая величина	№ измерения	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_x , Ом	Среднее значение R_x
R_{1x} , Ом	1	2				
	2	5				
	3	10				
	4	20				
R_{2x} , Ом	1	2				
	2	5				
	3	10				
	4	20				
$R_{\text{послед.}}$, Ом	1	2				
	2	5				
	3	10				
	4	20				
$R_{\text{паралл.}}$, Ом	1	2				
	2	5				
	3	10				
	4	20				

7. Вычислите по формулам (7 и 8) общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении и сравните вычисленные результаты со средними значениями R_x , полученными в опыте.

Контрольные вопросы

1. Какие законы постоянного тока используются в этой работе?
2. В чем заключается метод измерений сопротивлений мостиком постоянного тока?
3. Какова роль реохорда?
4. От чего зависит сопротивление проводников?

1.3. Снятие вольтамперной характеристики вакуумного диода

Цель работы: изучение термоэлектронной эмиссии и снятие вольтамперной характеристики вакуумного диода.

1.3.1. Введение

Вакуумный диод – простейшая электронная лампа с двумя электродами – анодом и катодом. Условное обозначение диода показано на рис. 7.

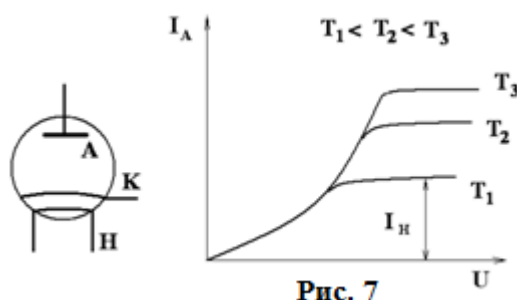


Рис. 7

Основными деталями диода являются: катод К, с которого при нагревании происходит термоэлектронная эмиссия (цилиндрическая трубка, покрытая слоем окислов щелочноземельных металлов, внутри которой помещена изолированная нить накала Н для подогрева катода, и анод А (металлический цилиндр, имевший общую ось с катодом). Электроды диода помещены в стеклянный баллон, из которого откачан воздух до давления ($10^{-7} - 10^{-6}$) мм рт. ст.

Работа вакуумного диода основана на использовании явления термоэлектронной эмиссии. При нагревании катода электроны испускаются с его поверхности и образуют электронное облако. Чем выше температура катода, тем больше электронов вблизи катода. При отсутствии электрического поля количество электронов, покидающих поверхность катода, равно количеству возвратившихся электронов.

При подключении диода к источнику питания между электродами возникает электрическое поле.

При прямом включении диода, когда потенциал анода выше потенциала катода, электроны под действием поля перемещаются к аноду и через лампу течет ток. С увеличением потенциала анода относительно катода сила тока вначале возрастает, так как увеличивается число электронов, достигающих анода. Затем величина тока перестает зависеть от напряжения, так как все электроны, испускаемые катодом, достигают анода. Такой ток называют током насыщения. Чем выше температура катода, тем больше этот ток.

При обратном включении диода, когда потенциал анода ниже потенциала катода, электроны возвращаются к катоду, и ток через лампу не течет. Таким образом, диод пропускает ток лишь в одном направлении, т.е. обладает односторонней проводимостью.

Зависимость силы тока от разности потенциалов на электродах при постоянной температуре катода называется вольтамперной характеристикой диода (см. рис. 7).

Если поддерживать температуру накаливаемого диода постоянной, вольтамперная характеристика не является линейной, т.е. для вакуумного диода не выполняется закон Ома.

В области малых положительных значений напряжения зависимость термоэлектронного тока от напряжения описывается "законом трех вторых":

$$I_A = CU^{3/2},$$

где C - коэффициент, зависящий от геометрических размеров и формы электродов, параметров катода, а также от взаимного расположения электродов.

При увеличении анодного напряжения ток возрастает и достигает некоторого максимального значения, называемого током насыщения. Ток насыщения I_H зависит от температуры катода. Плотность тока насыщения, характеризующая эмиссионную способность, зависит от материала катода и увеличивается с повышением температуры T в соответствии с формулой:

$$j_{\text{нас}} = AT^2 \exp(-e\phi/kT),$$

где $e\phi$ - работа выхода электронов из металла, k - постоянная Больцмана, A - константа.

Семейство вольтамперных характеристик при различных температурах катода представлено на рис. 7.

Свойства диода характеризуются такими его параметрами как крутизна анодной характеристики S_i и сопротивление диода переменному току R_i :

$$S_i = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_A}, R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{1}{S_i}.$$

Параметры диода определяются на приблизительно линейном участке вольтамперной характеристики.

1.3.2. Порядок выполнения работы

Измерения проводятся по схеме, приведенной на рис. 8, в которую входят вакуумный диод, источник постоянного тока ИП, вольтметр, миллиамперметр, блок питания цепи накала.

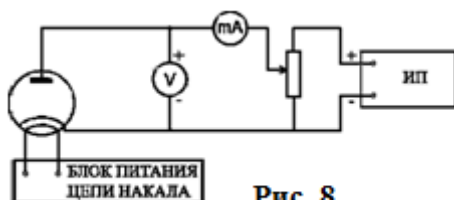


Рис. 8

Задачей работы является измерение анодного тока в зависимости от напряжения на аноде. Данные измерений заносятся в таблицу.

Таблица

U_A									
I_A									

По данным измерений строится вольтамперная характеристика диода.

Из обработки вольтамперной характеристики вычисляется крутизна анодной характеристики и сопротивление переменному току.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия вакуумного диода?
2. Какова основная причина нелинейности вольтамперной характеристики вакуумного диода?
3. Что такое ток насыщения? Как он зависит от температуры катода?

1.4. Определение вольтамперной характеристики полупроводникового диода

Приборы и принадлежности: блок питания, миллиамперметр, амперметр, вольтметр, переменный резистор, полупроводниковый диод.

Цель работы: снятие вольтамперной характеристики диода в фиксированном диапазоне напряжений; определение его параметров.

1.4.1. Введение

Существующие в природе твердые тела делят на аморфные и кристаллические. Используемые полупроводники относятся к кристаллическим телам и имеют пространственную решетку, в узлах которой располагаются атомы и связь между ними поддерживается за счет ковалентных электронов. То есть внешних электронов вращаются вокруг двух атомов и взаимно притягивающих их. Полупроводники имеют промежуточное значение параметра удельного сопротивления по сравнению с металлом 10^{-8} Ом·м и диэлектриком 10^6 Ом·м. Наиболее перспективными являются такие полупроводники как кремний, германий, селен, теллур и др. Собственная проводимость полупроводника обусловлена тем, что под действием тепла и излучений (электромагнитного, корпускулярного) возникают свободные электроны которые из валентной зоны уходят в зону проводимости. Под действием внешнего поля эти свободные электроны двигаются в полупроводнике, создавая ток проводимости. Незанятые электроном валентные зоны создают положительный заряд, который принято называть дыркой. Если есть вакансия валентной связи атома, то она может быть заполнена за счет валентного электрона соседнего атома и при этом положительный заряд переместится в пространстве. Перемещение положительного заряда называют дырочной проводимостью полупроводника. При приложении внешнего поля в полупроводнике возникает движение электронов и дырок, что создает собственную проводимость, которая может составлять величину 10^6 Ом⁻¹·м⁻¹.

В процессе движения электронов и дырок может происходить рекомбинация (исчезновение зарядов). Скорость рекомбинации и генерации зарядов полупроводника стабильны и равны в стационарном состоянии и увеличиваются с увеличением температуры. Отличие проводимости полупроводника и металла заключается в том, что при повышении температуры в полупроводнике значительно увеличивается число свободных электронов, а у металлов этого не происходит. С

другой стороны при увеличении температуры повышается интенсивность колебаний атомов и это приводит к уменьшению проводимости металлов, а у полупроводников определяющим фактором повышения проводимости является повышение концентрации свободных электронов. Проводимость полупроводников можно повысить путем введения примеси, имеющую отличную от полупроводника валентность. Так, например: введение $10^{-3}\%$ примеси мышьяка изменяет проводимость германия в 10^6 раз. Если вводить примесь с увеличенной по сравнению с полупроводником валентностью, то получим полупроводник с избытком свободных электронов, и основным носителем заряда будет электрон. Такие полупроводники называют полупроводниками n-типа. Если валентность примеси меньше, то полупроводник имеет основными носителями дырки и его называют полупроводник p-типа.

При соединении двух полупроводников с различной проводимостью в приграничной области происходит взаимная диффузия основных носителей, что приводит к созданию запирающего слоя, который препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок в смежную зону, и устанавливается динамическое равновесие. Толщина этого слоя невелика и составляет величину порядка $10^{-7} - 10^{-6}$ м. На рис. 9 представлена схема создания запирающего слоя.

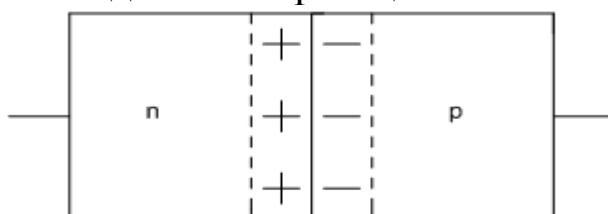


Рис. 9

При приложении к полупроводнику разности потенциалов соответствующих полю запирающего слоя толщина этого слоя увеличивается, и течет малый ток, а при приложении потенциала противоположного знака запирающий слой уменьшается и исчезает, и при этом течет значительный ток. Таким образом, запирающий слой обладает вентиляльным эффектом, то есть односторонней проводимостью.

Аналитическое выражение для тока через p-n переходе имеет вид $I \approx I_0 \cdot \exp\left(\frac{qU}{kT} - 1\right)$, где I_0 — обратный ток через переход.

В идеализированном случае в p-n переходе потерь нет и вольтамперная характеристика имеет плавный вид, а в реальных

условиях имеется резкое увеличение обратного тока при больших напряжениях, которое называется пробоем. На рис. 10 приведены вольтамперные характеристики для идеального (пунктирная кривая) и реального случаев.

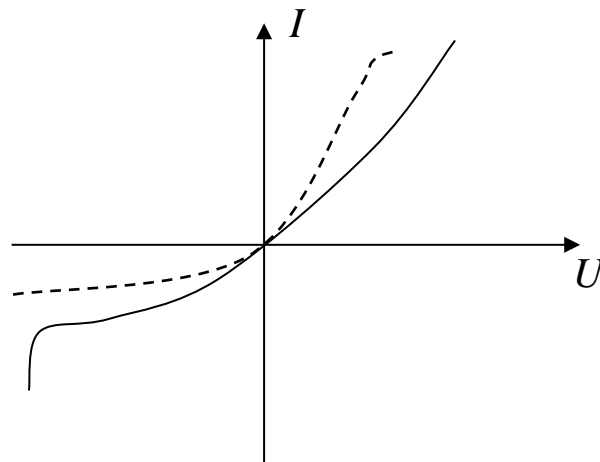


Рис. 10

К достоинствам полупроводникового диода относятся: малые габариты, надежность и др., а к недостаткам – сильная зависимость параметров от температуры. При выборе диода для конкретной схемы необходимо учитывать такие его характеристики, как наименьшее пробивное напряжение, ток пробоя, наибольший прямой ток. Эти параметры необходимо учитывать, так как нельзя допускать превышения рассеиваемой энергии выше допустимой, то есть $P > P_{max}$. Целью данной работы является снятие вольтамперной характеристики, а также определение прямого и обратного сопротивления на линейном участке характеристики.

1.4.2. Порядок выполнения работы

1. Собрать установку по схеме, приведенной на рис. 11.

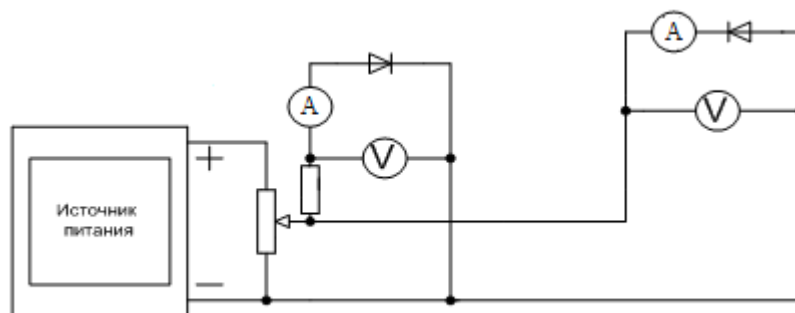


Рис. 11

Изменяя напряжение в пределах до 36 В, записать показания приборов в табл.1 и 2.

Таблица 1

$U_{пр}, В$										
$I_{пр}, мА$										

Таблица 2

$U_{обр}, В$									
$I_{обр}, мкА$									

2. По данным таблицы 1 и 2 построить вольтамперную характеристику диода.

3. Вычислить сопротивление на прямом и обратном участке характеристики по формуле:

$$R = \Delta U / \Delta I$$

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводник и от чего зависит его собственная проводимость?
 2. Что происходит при добавлении в полупроводник примеси?
 3. Что происходит при соединении двух полупроводников с разной проводимостью?
-

2. Магнетизм

2.1. Изучение распределения магнитного поля вдоль оси соленоида

2.1.1. Введение

Источником и объектом действия магнитного поля являются движущиеся заряды (электрические токи). Покоящиеся заряды магнитного поля не создают и на них магнитное поле не действует.

Сила, действующая на движущийся в магнитном поле точечный заряд, выражается формулой:

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

где вектор \vec{B} не зависит от величины заряда q и от скорости \vec{v} его движения. Он характеризует только магнитное поле, в котором движется заряд, и называется магнитной индукцией. Сила \vec{F}_m перпендикулярна как скорости \vec{v} , так и индукции \vec{B} (для положительного заряда направление силы определяется правилом правого винта), а ее величина пропорциональна синусу угла между этими векторами. Когда векторы \vec{B} и \vec{v} коллинеарные, сила \vec{F}_m обращается в нуль.

На элемент объема dV проводника с током плотностью \vec{j} в магнитном поле действует сила

$$d\vec{F} = \vec{j}dV \times \vec{B} \quad (2)$$

называемая силой Ампера. Если ток течет по тонкому проводу, то

$$\vec{j}dV = Id\vec{l},$$

где I —сила тока в проводе, а $d\vec{l}$ — элемент его длины, причем направление вектора $d\vec{l}$ совпадает с направлением тока. Сила Ампера, действующая на линейный элемент тока, равна

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \quad (3)$$

Сила, действующая на провод конечной длины, находится интегрированием выражения (3) по всей длине провода.

Для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции, согласно которому магнитные индукции полей отдельных зарядов векторно складываются, т.е. каждый заряд возбуждает магнитное поле, совершенно не зависящее от других зарядов.

Закон, описывающий порождение магнитного поля элементом тока, называется законом Био–Савара. Для объемных токов он выражается формулой

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{j} \times \vec{r}}{r^3} dV, \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от элемента тока dV к точке, в которой определяется магнитная индукция, а для линейных токов:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) верны лишь для постоянных токов. Индукция магнитного поля, создаваемого всеми элементами тока, находится интегрированием этих выражений. Для замкнутого линейного тока

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}. \quad (6)$$

Воспользуемся формулой (6) для вычисления магнитной индукции на оси кругового тока (рис.12).

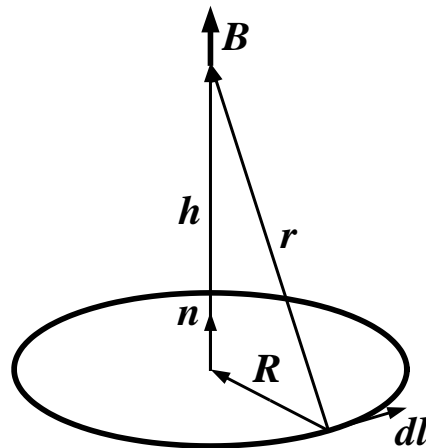


Рис. 12

Представим радиус-вектор \vec{r} как $\vec{r} = \vec{R} + \vec{h}$. При интегрировании его модуль $r = \sqrt{R^2 + h^2}$ не изменяется, поэтому

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} \left(\oint d\vec{l} \times \vec{R} + \oint d\vec{l} \times \vec{h} \right) \quad (7)$$

Поскольку \vec{h} – постоянный вектор, то $\oint d\vec{l} \times \vec{h} = \left(\oint d\vec{l} \right) \times \vec{h} = 0$, так как $\oint d\vec{l} = 0$. Первый интеграл в (7) вычисляется следующим образом:

$$\oint d\vec{l} \times \vec{R} = \oint \vec{n} R \cdot dl = \vec{n} R \oint dl = \vec{n} 2\pi R, \quad (8)$$

где \vec{n} – единичный вектор, перпендикулярный плоскости, в которой находится круговой ток, а его направление связано с направлением тока правилом правого винта. Таким образом,

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \vec{n}. \quad (9)$$

Найдем теперь индукцию магнитного поля на оси прямого круглого соленоида (катушки) радиуса R и длиной L , содержащего N витков тонкого провода, плотно прилегающих друг к другу, если по виткам течет ток силой I . На рис. 13 показано сечение соленоида.

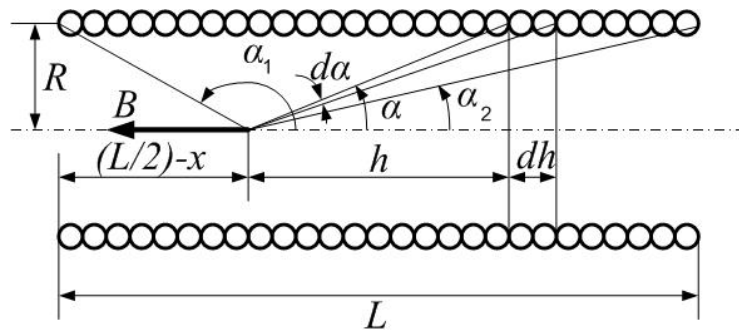


Рис. 13

Каждый виток создает поле, индукция которого на оси соленоида определяется в соответствии с формулой (10). Плотность намотки равна N/L . На малый участок соленоида длиной dh приходится $(N/L)dh$ витков, индукция магнитного поля которых на расстоянии h от них вычисляется как

$$d\vec{B} = \vec{n} \frac{\mu_0 N I}{2L} \frac{R^2 dh}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \quad (10)$$

Так как $h = R/\operatorname{tg} \alpha$ и $\sqrt{R^2 + h^2} = R/\sin \alpha$, то $dh = -R d\alpha/\sin^2 \alpha$ и

$$d\vec{B} = -\vec{n} \frac{\mu_0 N I}{2L} \sin \alpha d\alpha = \vec{n} \frac{\mu_0 N I}{2L} d(\cos \alpha). \quad (11)$$

В пределах соленоида угол α изменяется от α_1 до α_2 , так что магнитная индукция внутри соленоида на его оси равна

$$\vec{B} = \vec{n} \frac{\mu_0 N I}{2L} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (12)$$

где

$$\cos \alpha_1 = -\frac{(L/2) - x}{\sqrt{R^2 + [(L/2) - x]^2}}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{(L/2) + x}{\sqrt{R^2 + [(L/2) + x]^2}}, \quad (13)$$

а x – координата, отсчитанная от центра соленооида. Таким образом, величина индукции магнитного поля соленооида в точке с координатой x на его оси равна

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left\{ \frac{(L/2) + x}{\sqrt{R^2 + [(L/2) + x]^2}} + \frac{(L/2) - x}{\sqrt{R^2 + [(L/2) - x]^2}} \right\}. \quad (14)$$

В середине соленооида ($x = 0$) магнитная индукция достигает максимального значения

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 NI}{L} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (2R/L)^2}}. \quad (15)$$

Для бесконечно длинного соленооида $\alpha_1 = \pi$, а $\alpha_2 = 0$ и, следовательно,

$$B_{\infty} = \frac{\mu_0 NI}{L}. \quad (16)$$

На рис. 14 представлен график распределения магнитного поля вдоль оси соленооида. По оси ординат отложено отношение величины индукции поля B к ее величине B_{∞} в соленооиде бесконечно большой длины.

По оси абсцисс отложена координата x , отнесенная к радиусу R соленооида. График построен для соленооида, длина которого в четыре раза больше его радиуса ($L=4R$).

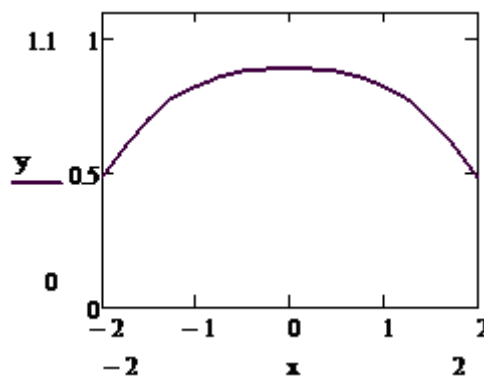


Рис. 14

В центре соленооида индукция магнитного поля весьма близка к значению (16) и почти не меняется, пока расстояние до ближайшего конца соленооида остается больше его радиуса. На концах соленооида индукция поля примерно в два раза меньше, чем в середине.

Целью настоящей лабораторной работы является экспериментальная проверка распределения магнитного поля вдоль оси соленооида. Для измерения магнитной индукции используется датчик

Холла. Наряду с этим определяется концентрация носителей тока в датчике Холла.

2.1.2. Экспериментальная установка и методика измерений

Датчик Холла представляет собой прямоугольную пластинку, вдоль которой течет ток с плотностью \vec{j} (рис. 15).

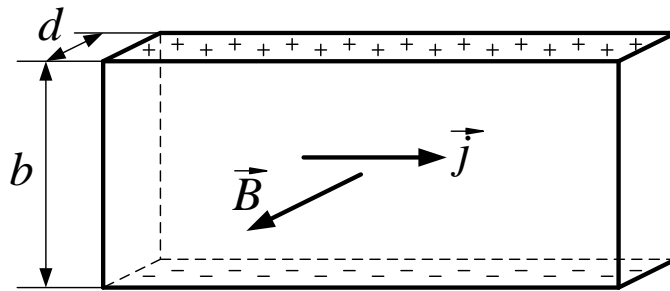


Рис. 15

В магнитном поле с индукцией \vec{B} , направленной перпендикулярно вектору \vec{j} , на носители тока действует сила Лоренца (1), под действием которой заряды стремятся сместиться в направлении силы. В результате на соответствующей грани пластинки образуется избыток зарядов того же знака, что и знак зарядов, осуществляющих ток, а на противоположной грани – избыток зарядов противоположного знака. Ситуация, изображенная на рис. 15, соответствует отрицательно заряженным носителям тока. Между противоположно заряженными гранями возникает разность потенциалов и такое электрическое поле \vec{E} , которое нейтрализует действие магнитного поля. В установившемся состоянии сила, действующая на носители тока с зарядом e со стороны электрического поля, равна по величине силе Лоренца:

$$eE = evB. \quad (17)$$

Следовательно, поперечная разность потенциалов равна

$$U = Eb = vBb, \quad (18)$$

где b – ширина пластинки. Возникновение поперечной разности потенциалов в проводнике с током в магнитном поле называется эффектом Холла. Среднюю скорость v носителей тока можно выразить через плотность тока j , так как,

$$j = nev, \quad (19)$$

где n – концентрация носителей тока. С учетом (19) выражение (18) принимает вид:

$$U = RjBb, \quad (20)$$

где $R = 1/ne$ – постоянная Холла. Принимая во внимание, что сила тока в пластине $i = jS$, где $S = bd$ – площадь поперечного сечения, а d – толщина пластины, перепишем (20) в виде

$$U = R \cdot \frac{iB}{d}. \quad (21)$$

Таким образом, при заданной силе тока холловская разность потенциалов пропорциональна индукции магнитного поля. На этом и основан метод измерения магнитной индукции датчиком Холла.

Эффект Холла используется также для определения концентрации носителей тока, которая рассчитывается по формуле

$$n = \frac{iB}{eUd}. \quad (22)$$

Как показывают измерения, у металлов концентрация носителей тока (электронов) оказывается, примерно равна концентрации атомов. Обычно у металлов концентрация атомов, а, следовательно, и свободных электронов близка к $n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Концентрация носителей тока в полупроводниках изменяется в широких пределах от 10^{19} до 10^{25} м^{-3} .

Основной частью установки является кассета [1] с соленоидом, вдоль оси, которого может перемещаться шток [2] с датчиком Холла (рис. 16). На штоке через 10 мм нанесены деления, с помощью которых ведется отсчет перемещения датчика Холла. На передней панели кассеты имеются два гнезда [3], к которым подключается вольтметр для измерения холловской разности потенциалов, и разъем [4], через который подается питание на соленоид и датчик Холла от источника постоянного тока [5].

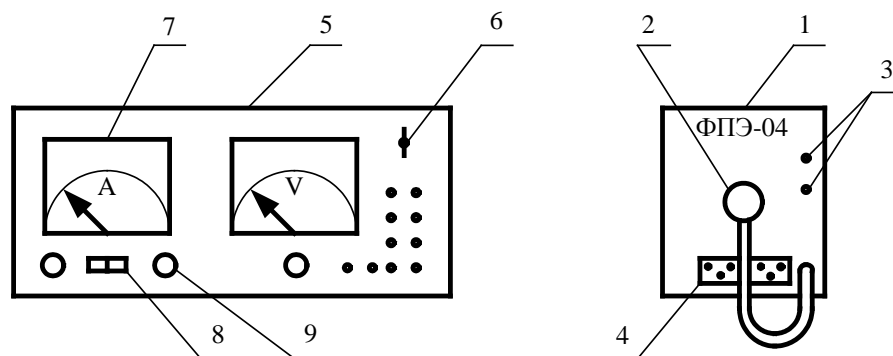


Рис. 16

Тумблером [6] осуществляется подключение источника питания к сети. Напряжение на соленоид подается через канал 5÷25 В. Контроль силы тока в соленоиде осуществляется амперметром [7]. Подключение

амперметра к каналу 5÷25 В происходит при нажатии кнопки [8]. Ручка [9] служит для плавного регулирования выходного напряжения в канале. Питание датчика Холла осуществляется постоянным током $i=90$ мА. Датчик Холла представляет собой германиевую пластинку толщиной $d=0,2$ мм. Соленоид имеет длину $L=168$ мм, диаметр $2R=85$ мм и число витков $N=2700$.

2.1.3. Порядок выполнения работы

1. Подключить к кассете с соленоидом вольтметр и источник питания. Включить приборы в сеть с напряжением 220 В.

2. Установить силу тока I питания соленоида и ее значение записать в табл.1.

3. Перемещая шток с датчиком Холла в соленоиде, снять показания вольтметра U на разных расстояниях x датчика от центра соленоида. Результаты измерений записать в таблицу.

Таблица

I, A							
$x, \text{мм}$	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40
$U, \text{В}$							
$x, \text{мм}$	-30	-20	-10	0	10	20	30
$U, \text{В}$							
$x, \text{мм}$	40	50	60	70	80	90	100
$U, \text{В}$							

4. По данным таблицы построить график зависимости U от x .

5. Вычислить по формуле (15) значение магнитной индукции B_{max} в центре соленоида.

6. По полученному значению B_{max} и соответствующему ему значению холловской разности потенциалов U найти согласно формуле (22) концентрацию n свободных электронов (заряд электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл) в датчике Холла.

Результат измерения

$n =$

Контрольные вопросы

1. Как определяется направление и величина силы, действующей на движущийся заряд в магнитном поле?
2. Чему равна сила, действующая на виток с током в однородном магнитном поле?
3. Как связана индукция магнитного поля движущегося заряда с напряженностью его электрического поля?
4. Сформулируйте закон Био–Савара и получите выражение для индукции магнитного поля прямолинейного тока.
5. В чем заключается и как объясняется эффект Холла?

2.2. Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона

Цель работы - измерение отношения e/m для электрона методом магнетрона.

2.2.1. Общие сведения

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила, которую называют магнитной:

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}],$$

где q - заряд частицы, \vec{v} - ее скорость; \vec{B} - индукция магнитного поля.

Направлена эта сила перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы \vec{v} и \vec{B} . Модуль магнитной силы $F = qvB\sin\alpha$, где α - угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Траектория движения заряженной частицы в магнитном поле определяется конфигурацией магнитного поля, ориентацией вектора скорости и отношением заряда частицы его массе.

Если имеются одновременно электрическое и магнитное поля, то сила, действующая на заряженную частицу, называется силой Лоренца и определяется так:

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

где \vec{E} напряженность электрического поля.

2.2.2. Приборы и оборудование

ФПЭ-03 - кассета;
ИП - источник питания;
РА - амперметр.

2.2.3. Метод измерения

Существуют различные методы определения отношения e/m , в основе которых лежат результаты исследования движения электрона в электрическом и магнитном полях. Один из них - метод магнетрона. Называется он так потому, что конфигурация полей в нем напоминает конфигурацию полей в магнетронах - генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот.

Сущность метода состоит в следующем: специальная двухэлектродная лампа, электроды которой представляют собой коаксиальные цилиндры, помещается внутри соленоида так, что ось лампы совпадает с осью соленоида. Электроны, вылетающие из катода лампы, при отсутствии тока в соленоиде движутся радиально к аноду. При подключении тока к соленоиду в лампе создается магнитное поле, параллельное оси лампы, и на электроны начинает действовать магнитная сила

$$\vec{F} = -e[\vec{V}, \vec{B}], \quad (1)$$

где e - величина заряда электрона; \vec{V} - скорость электрона; \vec{B} - индукция магнитного поля.

Под действием этой силы, направленной в каждый момент времени перпендикулярно вектору скорости, траектория электронов искривляется. При определенном соотношении между скоростью электрона и индукцией магнитного поля электроны перестают поступать на анод, и ток в лампе прекращается. Рассмотрим подробнее движение электронов в лампе при наличии магнитного поля. Для описания этого движения воспользуемся цилиндрической системой координат (рис.17), в которой положение электрона определяется расстоянием его от оси лампы r , полярным углом φ и смещением вдоль оси Z . Электрическое поле, имеющее только радиальную компоненту, действует на электрон с силой, направленной по радиусу от катода к аноду.

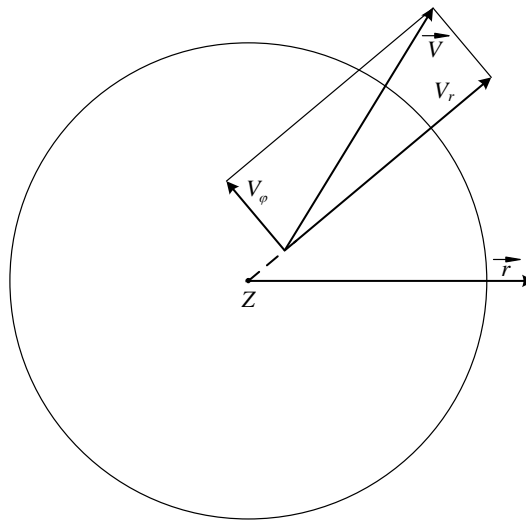


Рис. 17

Магнитная сила, действующая на электрон, не имеет составляющей параллельной оси Z . Поэтому электрон, вылетающий из катода без начальной скорости (начальные скорости электронов,

определяемые начальной температурой катода, много меньше скоростей, приобретаемых ими при движении в электрическом поле лампы), движется в плоскости, перпендикулярной оси Z .

Момент импульса электрона L_z относительно оси Z .

$$L_z = mV_\varphi r, \quad (2)$$

где $V_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}$ - составляющая скорости, перпендикулярная радиусу r .

Момент \vec{M} сил, действующих на электрон относительно оси Z , определяется только составляющей магнитной силы, перпендикулярной \vec{r} . Электрическая сила и составляющая магнитной силы, направленные вдоль радиуса \vec{r} , момента относительно оси Z не создают. Таким образом:

$$M_z = reV_r B, \quad (3)$$

где $V_r = \frac{dr}{dt}$ - радиальная составляющая скорости электрона.

Согласно уравнению моментов:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \quad (4)$$

Проектируя (4) на ось Z , получаем:

$$\frac{d(mV_\varphi r)}{dt} = er \frac{drB}{dt}$$

или

$$\frac{d(mV_\varphi r)}{dt} = \frac{1}{2} eB \frac{d(r^2)}{dt} \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) дает:

$$mV_\varphi r = \frac{1}{2} eBr^2 + const.$$

Константу найдем из начальных условий: при $r = r_k$ (r_k - радиус катода) $V_\varphi = 0$. Тогда $const = -\frac{1}{2} eBr_k^2$ и

$$V_\varphi = \frac{eB}{2mr} \cdot (r^2 - r_k^2). \quad (6)$$

Кинетическая энергия электрона равна работе электрического поля:

$$\frac{m(V_\varphi^2 + V_r^2)}{2} = eU, \quad (7)$$

где U - потенциал относительно катода точки поля, в которой находится электрон. Подставляя в (7) значение V_φ из (6), получаем:

$$eU = \frac{m}{2} \left[V_r^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{e}{m} \right)^2 \frac{B^2}{r^2} (r^2 - r_k^2)^2 \right]. \quad (8)$$

При некотором значении индукции магнитного поля $B_{\text{кр}}$, которое называют критическим, скорость электрона вблизи анода станет перпендикулярной радиусу \vec{r} , т.е. $V_r = 0$. Тогда уравнение (8) примет вид:

$$eU_a = \frac{m}{8} \left(\frac{e}{m} \right)^2 \frac{B_{\text{кр}}^2}{r_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2,$$

где U_a - потенциал анода относительно катода (анодное напряжение); r_a - радиус анода.

Отсюда находим выражение для удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{\text{кр}}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2} \right)^2}. \quad (9)$$

Индукция магнитного поля соленоида, длина L которого соизмерима с диаметром D , находится по формуле

$$B_{\text{кр}} = \mu_0 n i_{\text{кр}} \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 N i_{\text{кр}}}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (10)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м,- магнитная постоянная; N -число витков соленоида; $i_{\text{кр}}$ – ток в обмотке соленоида.

Таким образом, экспериментально определив $B_{\text{кр}}$, можно вычислить величину e/m . Для нахождения $B_{\text{кр}}$ в лампе следует установить разность потенциалов между анодом и катодом и постепенно наращивать ток в соленоиде, что увеличивает магнитное поле в лампе. Если бы все электроны покидали катод со скоростью, равной нулю, то зависимость величины анодного тока от величины индукции магнитного поля имела бы вид, показанный на рис. 18 (пунктирная линия). В этом случае при $B \leq B_{\text{кр}}$ все электроны, испускаемые катодом, достигали бы анода, в при $B \geq B_{\text{кр}}$ ни один электрон не попадал бы на анод. Однако, некоторая некоаксиальность катода и анода, наличие остаточного газа в лампе, падение напряжения вдоль катода, неоднородность поля соленоида по высоте анода и т.д. приводят к тому, что критические условия достигаются для разных электронов при различных значениях B . Все же перелом кривой останется достаточно резким и может быть использован для определения $B_{\text{кр}}$.

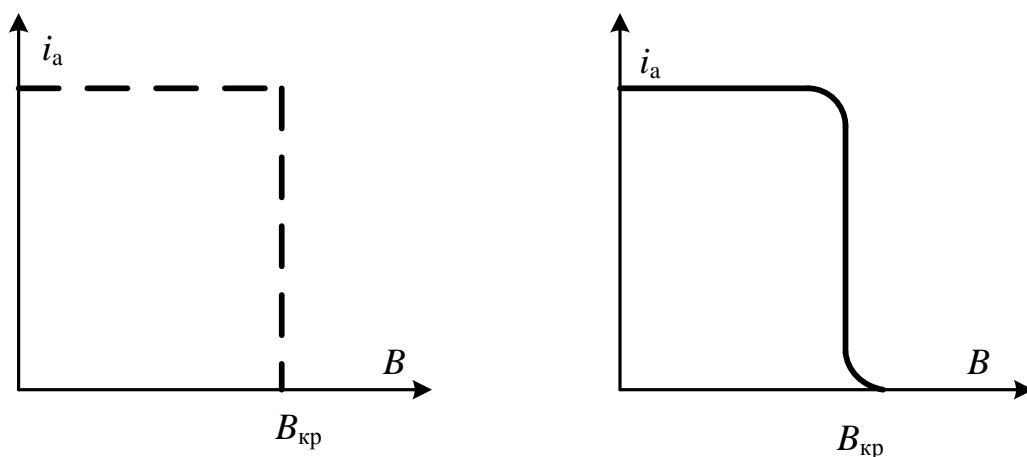


Рис. 18

2.2.4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь установки (рис. 19). Для этого соединить гнезда на лицевой панели кассеты с соответствующими гнездами источника питания ИП и измерительного прибора РА.

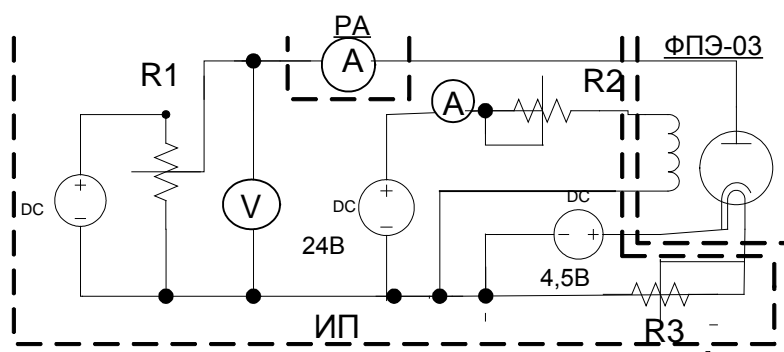


Рис. 19

2. Установить анодное напряжение $U_a = 50$ В по вольтметру ИП.
3. Установить ток накала катода $I_k = 0,45$ А. Подождать стабилизации значения анодного тока i_a как результат установления температурного режима лампы.
4. Изменяя ток в соленоиде i_c от минимального значения до максимального через 0,1 А при постоянном анодном напряжении U_a и токе накала катода I_k , снять сбросовую характеристику, т.е. зависимость анодного тока i_a от тока в соленоиде i_c . Значения анодного тока, определяемые по прибору РА, и значения тока в соленоиде, определяемые по показаниям амперметра ИП, занести в табл. 1.
5. Повторить п.п.2 и 3 при двух других значениях анодного напряжения $U_a > 50$ В. Результаты измерений занести в таблицу 1.

6. Для каждого значения анодного напряжения повторить сбросовую характеристику, откладывая по оси ординат значения анодного тока, а по оси абсцисс - значения тока в соленоиде. Критическое значение тока в соленоиде определить по точке перегиба сбросовой характеристики (на участке ее спада) (как показано на рис. 18). Занести полученные значения в табл. 2.

7. Для каждого критического значения тока в соленоиде рассчитать по формуле (10) индукцию магнитного поля с использованием следующих значений параметров установки.

$L, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	N	$r_a, \text{ м}$	$r_k, \text{ м}$
0,168	0,06	2520	0,001	0,0005

8. Вычислить e/m по формуле (9) для каждого значения критического поля в соленоиде и определить ее среднее значение.

9. Вычислить среднеарифметическую погрешность полученной величины e/m .

Таблица 1

$U_a = \dots\dots B$		$U_a = \dots\dots B$		$U_a = \dots\dots B$	
i_c	i_a	i_c	i_a	i_c	i_a

Таблица 2

U_a	$i_{кр}$	$B_{кр}$	e/m

Контрольные вопросы

1. В чем суть метода магнетрона для определения отношения e/m ?
2. Влияет ли на величину $B_{кр}$ изменение направления тока в соленоиде на противоположное?
3. Зависит ли величина e/m от величины анодного напряжения?
4. Рассмотреть движение электронов в однородном магнитном поле в двух случаях: а) скорость электрона \vec{V} параллельна \vec{B} ; скорость электрона \vec{V} направлена под углом α к полю \vec{B} .

2.3. Определение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, ключ, реостат, двойной переключатель,

Цель работы: изучить магнитное поле Земли; определить горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли.

2.3.1. Введение

Магнитное поле в каждой точке пространства характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} . Графически магнитное поле можно изобразить, если ввести представление о линиях магнитной индукции (иногда их называют силовыми линиями магнитного поля). Линии магнитной индукции – воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} в этих точках поля. Линии магнитной индукции замкнутые (в отличие от линий напряженности электрического поля).

На электрический заряд величиной q , движущийся со скоростью \vec{v} в магнитном поле с индукцией \vec{B} , действует сила Лоренца, модуль которой равен

$$F_{\text{л}} = qvB\sin\alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} . Направление силы $\vec{F}_{\text{л}}$ определяется правилом левой руки: расположим руку так, чтобы линии магнитной индукции (т.е. вектор \vec{B}) входили в ладонь, а направление четырех пальцев совпало с направлением вектора скорости заряда. Тогда направление отогнутого в сторону большого пальца совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд (на отрицательный заряд действует сила противоположного направления).

На прямой проводник с силой тока I и длиной l , помещенный в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} , действует сила Ампера, направление которой определяется правилом левой руки, а модуль равен: $F_{\text{А}} = IlB\sin\alpha$, где α – угол между вектором \vec{B} и направлением тока в проводнике.

На участок длиной l одного из двух параллельных прямых бесконечных проводников, расположенных на расстоянии R друг от друга, по которым текут токи с силами токов, I_1 и I_2 , действует сила

притяжения (отталкивания) при одинаковых (противоположных) направлениях токов, модуль которой равен:

$$F = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{R} l,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ – относительная магнитная проницаемость однородной изотропной среды, в которой находятся проводники с током.

Направление тока в проводе и направление линий магнитной индукции связаны правилом правого винта. Величина магнитной индукции поля, созданного током I , протекающим по тонкому прямому бесконечному проводнику на расстоянии r от проводника:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Величина магнитной индукции в центре кольца радиуса R , по которому протекает ток I , равна:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Как известно, Земля обладает магнитным полем. Магнитное поле Земли, искривляющее траекторию заряженных частиц, предохраняет ее от "солнечного ветра" – мощного потока заряженных частиц, испускаемых Солнцем.

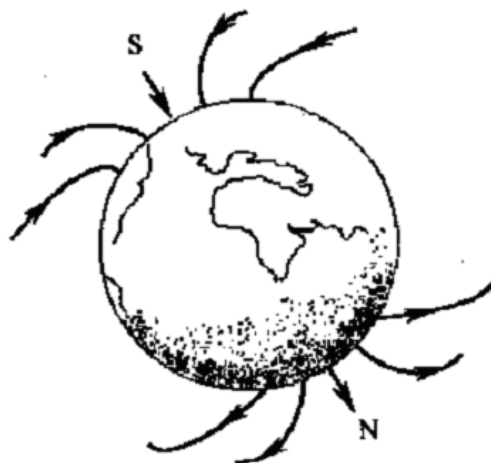


Рис. 20

Силовые линии магнитного поля Земли \vec{B}_3 изображены на рис. 20.

Если поместить в магнитное поле Земли легкую магнитную стрелку, которая может поворачиваться только вокруг вертикальной оси, то она под действием горизонтальной составляющей поля, отклонится на некоторый угол и установится по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли.

Следует иметь в виду, что магнитные полюса Земли не совпадают с ее географическими полюсами. Географические полюса Земли определяются ее осью вращения, тогда как магнитные полюса Земли - это две точки на ее поверхности, в которых \vec{B}_3 - вертикальна. В связи с этим плоскость магнитного меридиана не совпадает с плоскостью географического меридиана. Под плоскостью магнитного меридиана, в какой-нибудь точке на земной поверхности, понимают плоскость, проходящую через эту точку и магнитные полюса Земли. Механическое действие вертикальной составляющей поля будет уравниваться реакцией опоры и нас в дальнейшем интересоваться не будет.

Существующие в настоящее время теории земного магнетизма можно разбить на две группы:

1. Теории, объясняющие наличие магнитного поля электрическими токами, циркулирующими на больших глубинах в жидком ядре Земли.

2. Теории, основанные на предположении, что земная кора содержит в разных своих участках различное количество магнитных пород. Однако происхождение магнитного поля Земли в настоящее время еще не выяснено.

2.3.2. Описание экспериментальной установки

Способность магнитной стрелки (лежащей в горизонтальной плоскости) отклоняться под действием горизонтальной составляющей \vec{B}_{3r} магнитного поля Земли используется в приборе, называемом тангенс-гальванометр, который представляет собой плоскую вертикальную катушку большого радиуса R с некоторым числом витков N провода. В центре катушки установлена геодезическая буссоль. Магнитная стрелка буссоли может свободно вращаться вокруг вертикальной оси. Концы стрелки перемещаются по шкале, разделенной на градусы. Когда тока в катушке нет, магнитная стрелка буссоли направлена вдоль магнитного меридиана Земли.

Когда через катушку тангенс-гальванометра пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол α . Это объясняется тем, что на магнитную стрелку буссоли действуют два поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока в катушке тангенс-гальванометра. Под действием этих полей магнитная стрелка займет положение равновесия (рис. 21), при котором ось стрелки будет совпадать с вектором \vec{B} - векторной суммой \vec{B}_{3r} и \vec{B}_k (поле катушки).

Из треугольника на рис. 21 имеем:

$$B_{3r} = \frac{B_k}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

С другой стороны индукция магнитного поля тока в центре витков катушки равна:

$$B_k = \mu\mu_0 \frac{NI}{2R},$$

где I - сила тока в катушке, R - радиус витков, N - число витков катушки, μ - относительная магнитная проницаемость воздуха (практически равна 1), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. В результате:

$$B_{3r} = \mu\mu_0 \frac{NI}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (1)$$

Формула (1) является расчетной.

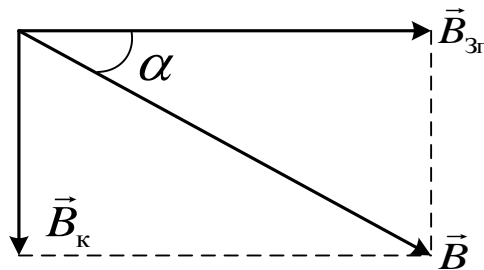


Рис. 21

Для измерения используют схему

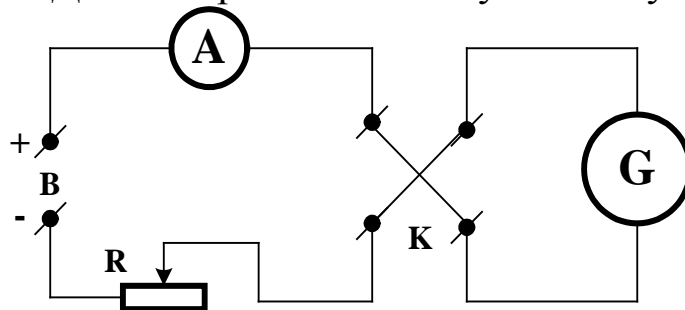


Рис. 22

G - тангенс-гальванометр, R - реостат; К - ключ; А - амперметр; В - источник тока.

2.3.3. Порядок выполнения работы

1. Собрать установку по схеме рис. 22. Число витков катушки и радиус витков указаны на установке.

2. Установить плоскость витков катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли.

3. Включить установку. Перемещая ползунок реостата, установить некоторое значение силы тока I . Выждав, пока магнитная стрелка буссоли придет в равновесие, отсчитать угол отклонения стрелки из

первоначального положения равновесия α_+ . Отсчет производят по концу стрелки, указывающему на север. Результат занести в таблицу.

4. Не меняя величину тока в цепи, с помощью переключателя, измерить угол отклонения магнитной стрелки α_- .

5. Для каждой силы тока найти и занести в таблицу среднее значение угла отклонения стрелки

$$\alpha = \frac{\alpha_+ + \alpha_-}{2}.$$

6. Повторить измерения еще для двух значений тока, указанных преподавателем. Для каждой силы тока по формуле (1) рассчитать $B_{зг}$, используя соответствующее значение угла отклонения α .

7. Найти среднее значение горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли:

Таблица

№	I	α_+	α_-	α	$tg\alpha$	$B_{зг}$	$\overline{B_{зг}}$
1							
2							
3							

Контрольные вопросы

1. Что характеризует вектор индукции магнитного поля Земли?
2. Как можно определить горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли?
3. Поясните принцип действия тангенс–гальванометра.
4. Почему следует ориентировать катушку тангенс–гальванометра в направлении магнитного меридиана?
5. Чему равна напряженность магнитного поля в центре кругового тока?