

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКА**

Теория метода

Все вещества по электрическим свойствам разделяют на три класса: проводники, диэлектрики и полупроводники. К проводникам относятся металлы, обладающие малым удельным сопротивлением – менее 10^{-6} Ом·м. Удельное сопротивление полупроводников обычно лежит в пределах $10^5 \dots 10^{14}$ Ом·м. Материалы, у которых величина удельного сопротивления больше 10^{14} Ом·м, считаются диэлектриками. Полупроводниками являются некоторые элементы III–VI групп таблицы элементов Д.И. Менделеева (B, Ge, Si, As, Te ...), а также большое число химических соединений (GaAs, GaP, ZnS, SiC ...). В зависимости от внешних условий (температуры, давления) одно и то же вещество может проявлять разные электрические свойства. Например, германий при температуре жидкого азота 77 К – диэлектрик, при комнатной температуре – полупроводник, а в жидком виде – проводник.

Теория даёт более обоснованную классификацию веществ. Согласно современной зонной теории твёрдых тел свободные электроны внутри твёрдого тела так же, как и в атомах, могут иметь только некоторые фиксированные значения энергии, т.е. энергия электронов **квантуется**, разрешённые уровни энергии при объединении атомов в кристалл образуют совокупность близко расположенных уровней – **разрешённые** зоны, разделённые «**запрещёнными**» зонами. Каждая разрешённая зона сохраняет наименование уровней, из которых она образована, например, зоны $1s$, $2s$, $2p$ и так далее.

Зона, образованная из энергетических уровней самых удалённых от ядра атома валентных электронов, называется **валентной** зоной. Это самая «верхняя» из зон, заселённых электронами при температуре $T = 0$ К (-273 °C). Следующая разрешённая энергетическая зона называется в полупроводниках **зоной проводимости**. При $T = 0$ в этой зоне нет электронов, она «пустая». Энергетические зоны валентных электронов для металлов, диэлектриков и полупроводников и их заполнение при температуре $T = 0$ представлены на рис. 3.1. Клеточками обозначены занятые уровни энергии. Горизонтальные линии – свободные от электронов *разрешённые* уровни энергии.

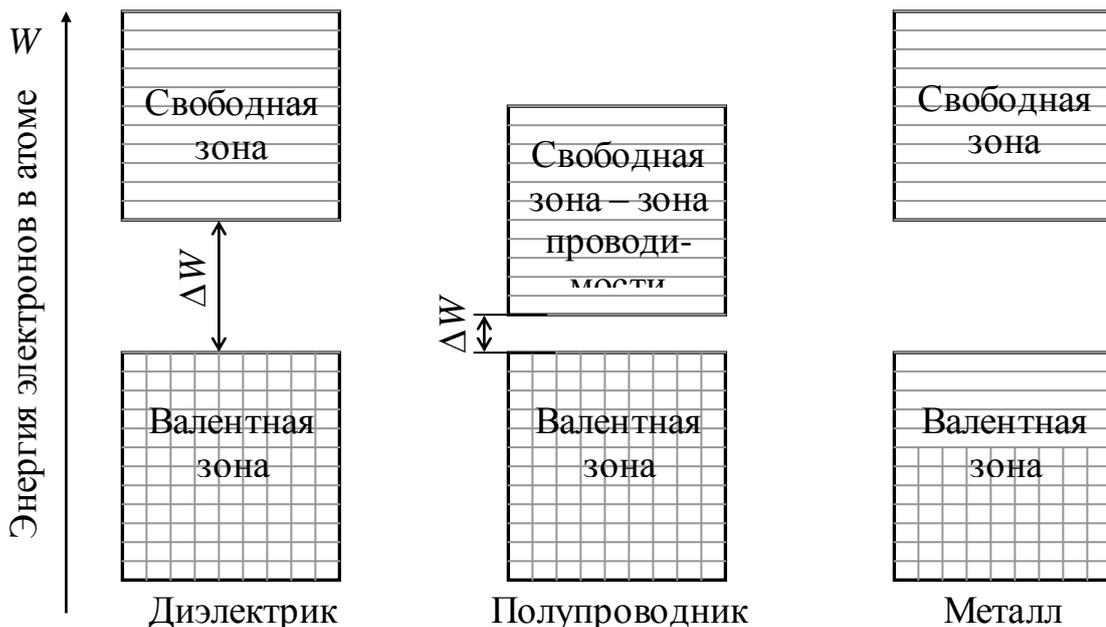


Рис. 3.1

Верхние разрешённые зоны разных веществ могут быть заполнены электронами частично или полностью, а также могут быть совершенно свободными от электронов.

Энергетическая зона считается заполненной, если все уровни зоны заняты электронами. Такими являются валентные зоны **полупроводников и диэлектриков** при абсолютном нуле температуры (см. рис. 3.1). При этом, согласно принципу Паули, на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины.

У **металлов** при $T = 0$ валентная зона заполнена частично (см. рис. 1). Например, в кристалле щелочного металла натрия ${}_{11}\text{Na}$ в валентной зоне $3s$ электронами заполнена только половина уровней.

Ширина запрещённой зоны между зоной проводимости и валентной зоной при абсолютном нуле температуры называется **энергией активации** ΔW полупроводника (см. рис. 3.1). Энергия активации численно равна работе, которую необходимо совершить электрону при его переходе из валентной зоны в зону проводимости. Энергия активации измеряется в электрон-вольтах (эВ) и составляет у полупроводников $0,1 \dots 2$ эВ, у диэлектриков больше 4 эВ.

Чтобы в веществе при наложении электрического поля возник электрический ток, электроны должны начать двигаться направленно. Возникновение тока сопровождается увеличением энергии каждого электрона (к энергии теплового движения добавляется энергия направленного движения). В металлах свободный электрон, получив за счет электрического поля дополнительную энергию на пути свободного пробега, переходит на более высокий уровень энергии в валентной зоне. Освободившийся уровень занимает электрон, расположенный ниже на «энергетической лестнице», и т.д. – возникает электрический ток.

В диэлектриках и полупроводниках электрон не может взять энергию от поля, поскольку, приняв её, он должен занять более высокий уровень, который оказывается либо запрещённым, либо занятым. Поэтому при абсолютном нуле и полупроводники, и диэлектрики являются изоляторами, т.е. не пропускают электрический ток.

При повышении температуры энергия теплового движения электронов увеличивается (их средняя энергия теплового движения $\langle \varepsilon \rangle = 1,5kT$), и уже при температурах порядка 10^2 К некоторые электроны в полупроводниках за счет этой энергии могут перейти с верхних уровней заполненной валентной зоны в зону проводимости (рис. 3.2). В диэлектриках вероятность такого перехода очень мала, так как у них ширина запрещённой зоны значительно больше, чем у полупроводников. Следовательно, в полупроводниках те валентные электроны, которые перешли в зону проводимости, получают возможность направленного движения под действием электрического поля – возникает **электронная проводимость**. В валентной зоне на верхних уровнях, где были электроны, перешедшие в зону проводимости, появляются свободные места – **дырки**, и оставшиеся в валентной зоне электроны тоже получают способность воспринимать энергию направленного движения от электрического поля – возникает **дырочная проводимость**.

В соответствии с распределением Больцмана концентрация n_e свободных электронов (перешедших в зону проводимости) меньше концентрации n_0 электронов, оставшихся в валентной зоне, поскольку потенциальная энергия свободных электронов на ΔW больше потенциальной энергии электронов, связанных с атомом:

$$n_e = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{kT}}. \quad (3.1)$$

Здесь T – абсолютная температура; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана.



Рис. 3.2

В рассмотренном нами полупроводнике концентрация подвижных дырок равна концентрации свободных электронов. Такой полупроводник называется **электронно-дырочным**, а его проводимость – **собственной проводимостью**. Собственной проводимостью обладают очень чистые элементы 4-й группы таблицы Менделеева (германий, кремний).

При наличии в германии или кремнии небольшого количества атомов примесей с другой валентностью баланс между концентрацией свободных электронов и дырок нарушается, и образуются полупроводники с преимущественным типом проводимости. Так, если примесью является элемент 5-й группы таблицы Менделеева (сурьма – Sb, мышьяк – As), то образуется избыток свободных электронов и получается полупроводник с *электронной* проводимостью (***n*-типа**). Если в качестве примеси присутствуют атомы 3-й группы (индий – In, бор – B), то образуется недостаток свободных электронов и получается полупроводник с *дырочной* проводимостью (***p*-типа**). Энергия активации *примесных* полупроводников значительно меньше ширины запрещённой зоны чистого полупроводника.

При отрыве электрона в атоме полупроводника образуется свободное место – дырка. Если теперь в полупроводнике создать электрическое поле, то дырка может переместиться в направлении силовых линий, если это свободное место займёт дрейфующий против поля электрон. Поэтому дырка подобна положительному заряду, равному по величине заряду электрона. Значит при затрате энергии ΔW образуются два свободных заряда, на создание одного носителя тока затрачивается половина энергии ΔW , и концентрация всех носителей тока

$$n = n_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (3.2)$$

От концентрации свободных зарядов зависит **удельная проводимость** σ , обратная удельному сопротивлению ρ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (3.3)$$

Зависимость удельной проводимости σ от концентрации n свободных зарядов легко получить, используя закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.4)$$

и зависимость сопротивления R проводника от его длины l и площади S поперечного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (3.5)$$

Полагая электрическое поле внутри проводника однородным, выразим напряжение U через напряжённость E и длину проводника:

$$U = El. \quad (3.6)$$

Из формул (3.3)–(3.5) легко получить закон Ома в дифференциальной форме:

$$j = \sigma E, \quad (3.7)$$

где $j = I/S$ — плотность тока в проводнике.

С другой стороны, плотность тока может быть выражена через концентрацию n свободных зарядов и скорость v_n их направленного движения, которая определяется напряжённостью электрического поля внутри проводника.

Пусть каждый носитель имеет заряд e , тогда весь заряд q , перенесённый через поперечное сечение проводника за время t , будет равен Ne , где N – число зарядов, прошедших за это время сквозь выделенное сечение (рис. 3.3). Если средняя скорость направленного движения равна v_n , то за время t сечение S пересекут лишь те носители, которые находились не дальше, чем на расстоянии $v_n t$ от него. Число таких носителей пропорционально их концентрации n и объёму элемента проводника:

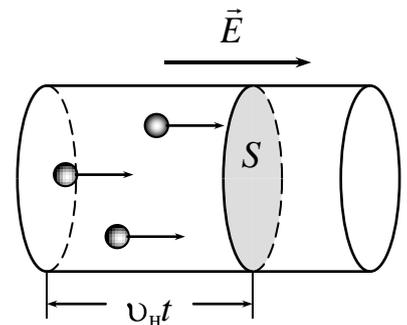


Рис. 3.3

$$N = n_{\text{вн}} t S. \quad (3.8)$$

Тогда перенесённый заряд

$$q = en_{\text{вн}} t S. \quad (3.9)$$

По определению, сила неизменяющегося тока

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3.10)$$

Из определения плотности тока и уравнений (3.9) и (3.10) получим

$$j = ne_{\text{вн}}. \quad (3.11)$$

Приравнявая правые части уравнений (3.7) и (3.11) приходим к выводу, что средняя скорость направленного движения носителей тока прямо пропорциональна напряжённости электрического поля:

$$v_{\text{н}} = bE. \quad (3.12)$$

Коэффициент пропорциональности b называют **подвижностью носителей**. Подвижность зависит от типа носителей (у электронов она существенно выше, чем у дырок) и от их взаимодействия с атомами вещества.

Заменяя в (3.11) скорость по формуле (3.12) и сравнивая полученное выражение с (3.7), получаем зависимость удельной проводимости вещества от характеристик носителей тока:

$$\sigma = neb. \quad (3.13)$$

В *металлах* (проводниках) концентрация носителей не зависит от температуры, а в полупроводниках и диэлектриках она с ростом температуры быстро увеличивается (см. формулу (3.2)) – это основное отличие металлических проводников от полупроводников и диэлектриков.

Подвижность носителей с ростом температуры уменьшается, так как электроны чаще сталкиваются с ионами кристаллической решётки, амплитуда колебаний которых растёт с увеличением температуры. При постоянстве n это ведёт к уменьшению проводимости, и *сопротивление проводников* слабо увеличивается при повышении температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (3.14)$$

где t – температура в градусах Цельсия; R_0 – сопротивление проводника при 0°C ; α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

График температурной зависимости сопротивления проводника в координатах $R - t$ изображается прямой линией, угловой коэффициент которой равен $R_0\alpha$. Определив из графика угловой коэффициент K_1 и R_0 , можно определить значение ТКС исследуемого проводника:

$$\alpha = \frac{\hat{E}_1}{R_0}. \quad (3.15)$$

Для *полупроводников* зависимость сопротивления от температуры экспоненциальная:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (3.16)$$

Эта формула получается путём несложных преобразований из выражений (3.3), (3.5), (3.13) и (3.2) с заменой $1/(Sn_0eb) = R_0$, где n_0 – концентрация носителей тока в полупроводнике при температуре $T \rightarrow \infty$.

Прологарифмируем формулу (3.16):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (3.17)$$

Полученная зависимость $\ln R$ от $1/T$ является линейной, и график зависимости $\ln R$ от обратной температуры T^{-1} будет представлять собой некоторую прямую, угловой коэффициент которой $K_2 = \Delta W/(2k)$ пропорционален энергии активации. Следовательно, найдя из графика угловой коэффициент K_2 , можно вычислить энергию активации

$$\Delta W = 2K_2k. \quad (3.18)$$

Выполнение работы

Оборудование: миниблоки «Ключ», «ТКС», мультиметр, стрелочный вольтметр, датчик температуры, модуль питания 1,2...12 В, соединительные провода.

1. Соберите принципиальную схему установки (рис. 3.4) по монтажной схеме (рис. 3.5). Для этого найдите на наборном поле гнезда для установки миниблоков «Ключ» и «ТКС» (обозначены пунктиром) и аккуратно вставьте в них миниблоки, соблюдая правильность расположения номеров контактов (в гнездо 1 должен попасть 1-й контакт миниблока, во 2-е – 2-й контакт и т.д.). В качестве измерителя сопротивлений используйте мультиметр: выносные гнезда V/Ω и СОМ, предел измерений – «2к». Для установки и контроля напряжения используйте стрелочный вольтметр. При сборке схемы соблюдайте правильную полярность приборов, она указана на схеме.

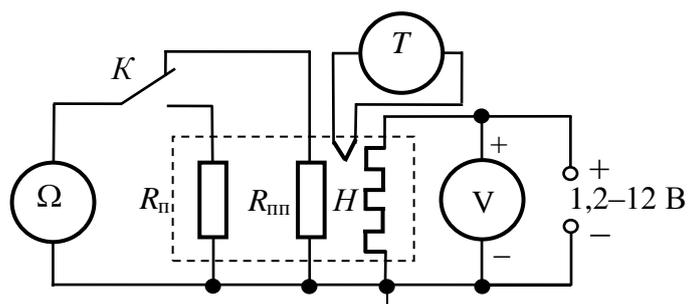


Рис. 3.4

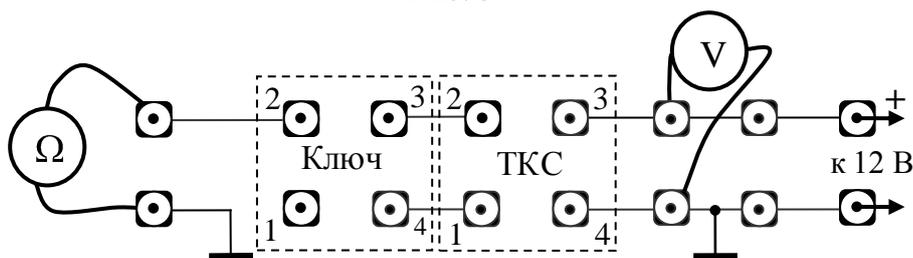


Рис. 3.5

2. Вставьте в отверстие миниблока «ТКС» датчик температуры на глубину 5–8 мм (до упора) и покажите собранную схему преподавателю.

3. Замерьте сопротивление проводника и полупроводника при комнатной температуре. При положении «Ключа» – «влево» к омметру подключается полупроводник, «вправо» – металлический проводник. Полученные значения запишите в первую строку табл. 3.1.

4. Включите модуль питания. Установите ручкой регулировки на блоке питания напряжение 8–9 В. Температура образцов начнёт увеличиваться. Наблюдайте за показаниями термометра и омметра, переключая тумблер «Ключ». Продолжайте нагревание до температуры 65–67 °С, записывая через 4–5 °С значения температуры. **Показания омметра при этом записывать не надо**, потому что основные измерения будут проводиться при охлаждении резисторов. Такой способ проведения измерений позволяет исключить влияние блока питания на показания мультиметра, и получить более точные значения сопротивлений проводника $R_{п}$ и полупроводника $R_{тп}$.

5. Выключите блок питания – температура вскоре начнёт уменьшаться. Начиная с 65 °С, считывайте с дисплея мультиметра и записывайте **одновременно** (переключая тумблер «Ключ») значения сопротивлений проводника и полупроводника в табл. 3.1 при температурах, записанных в таблицу при нагревании.

7. По окончании работы выключите модуль питания, мультиметр и покажите результаты измерений преподавателю. Разберите схему, сдайте миниблоки и набор проводов, наведите порядок на рабочем месте.

Таблица 3.1

№ п/п	$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	
		проводник $R_{\text{п}}$	полупроводник $R_{\text{пп}}$
1			
2			
3			
...			
...			

Обработка результатов измерений

I. Для металлического проводника ($R_{\text{п}}$)

1. По данным из табл. 3.1 постройте график зависимости сопротивления проводника $R_{\text{п}}$ от температуры в градусах Цельсия. За начало координат возьмите точку $0\text{ }^\circ\text{C}$ по оси температур и ($R_{\text{комн.}} - 1\text{ Ом}$) по оси R . Выбранные Вами масштабы должны обеспечить угол наклона графика не менее $35\dots 40^\circ$.

2. По графику определите сопротивление проводника при температуре $0\text{ }^\circ\text{C}$ и значение углового коэффициента K_1 . Расчёты представьте на свободном месте диаграммы $R_{\text{п}}(T)$.

3. По найденным K_1 и R_0 определите температурный коэффициент сопротивления исследованного образца.

4. Сравните полученное значение ТКС со справочными данными и предположите, из какого материала изготовлен проводник.

II. Для полупроводника ($R_{\text{пп}}$)

1. По данным опыта (см. табл. 3.1) постройте график зависимости сопротивления полупроводника $R_{\text{пп}}$ от температуры. Точку пересечения осей графика выбирайте не в 0, а исходя из условия оптимального использования пространства.

2. По результатам измерений (см. табл. 3.1) вычислите и запишите в табл. 3.2 значения абсолютной температуры T , обратной температуры $T^{-1} = 1/T$ и $\ln R_{\text{пп}}$.

3. Постройте график зависимости $\ln R_{\text{пп}}$ от обратной температуры T^{-1} и найдите угловой коэффициент K_2 в единицах СИ (выбор точки пересечения осей графика и масштабов – см. п. 1).

4. Вычислите энергию активации полупроводника в джоулях, а затем выразите её в электрон-вольтах.

5. Найдите в справочной литературе энергию активации германия и кремния, сопоставьте с полученным Вами значением ΔW и определите, из чистого или примесного вещества изготовлен терморезистор.

6. Сделайте обобщающий вывод по Вашим измерениям, расчётам и графикам о характере температурной зависимости сопротивления полупроводников и металлов. Сопоставьте полученные результаты с теоретическими положениями.

Таблица 3.2

№ п/п	$T, \text{К}$	$1/T, \text{К}^{-1}$	$\ln R_{\text{пп}}$
1			
2			
...			

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются металлы, диэлектрики и полупроводники по своим электрическим свойствам?
2. Какова зависимость сопротивления полупроводников и металлов от температуры? Назовите причины различия этих зависимостей.
3. Какая физическая величина имеет аббревиатуру «ТКС»? В каких единицах она измеряется?
4. Выведите расчётную формулу для определения ТКС по угловому коэффициенту графика $R(T)$.
5. Как образуются энергетические зоны при объединении атомов в кристаллах? Каковы названия этих зон? Какова их заполненность электронами в металлах, диэлектриках и полупроводниках при $T = 0$?
6. Что называют энергией активации полупроводника, в каких единицах она измеряется? Какие величины зависят от этой характеристики полупроводника?
7. Дайте определения собственной и примесной, электронной и дырочной проводимостей.
8. Выведите формулы (3.7), (3.12), (3.13).
9. Каковы физический смысл и единицы измерения подвижности b ? Как она зависит от температуры?
10. Каков физический смысл величин n_0 и R_0 в формулах (3.1) и (3.16)?

Работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Теоретическое обоснование метода

Электрические и магнитные поля, воздействуя на движущиеся заряженные частицы, изменяют их скорость и траекторию. В электрическом поле с напряженностью \vec{E} на частицу, обладающую зарядом q , действует сила

$$\vec{F}_э = q\vec{E}. \quad (6.1)$$

На эту же частицу, движущуюся в магнитном поле, будет действовать сила Лоренца

$$\vec{F}_л = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (6.2)$$

где \vec{v} – скорость движения частицы; \vec{B} – вектор магнитной индукции.

В соответствии с определением (6.2) сила Лоренца перпендикулярна плоскости, в которой лежат векторы \vec{v} и \vec{B} . Так как сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости, то она изменяет только направление скорости частицы и не влияет на величину скорости. Если в пространстве, где движется заряд, имеются одновременно электрическое и магнитное поля, то в общем случае скорость заряда будет изменяться как по величине, так и по направлению.

Уравнение движения частицы (второй закон Ньютона) в пространстве, где имеются и электрическое, и магнитное поля, будет иметь вид

$$m\vec{a} = \vec{F}_э + \vec{F}_л, \quad (6.3)$$

где m – масса частицы, которая полагается не зависящей от скорости, что соответствует движению со скоростью v , много меньшей скорости света в вакууме.

Используя выражения (6.1), (6.2) и (6.3), можно найти ускорение заряженной частицы, движущейся в электрическом и магнитном полях:

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}. \quad (6.4)$$

Это уравнение показывает, что движение заряженной частицы в силовых полях зависит от отношения q/m , которое называется **удельным зарядом** данной частицы. Изучая движение различных заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, можно определить удельный заряд частицы и тем самым получить сведения о природе частиц.

В данной лабораторной работе определяется отношение заряда e электрона к его массе m методом магнетрона. **Магнетроном** здесь будем называть устройство, в котором электроны движутся во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях. В нашем случае магнетрон выполнен в виде миниблока «магнетрон», в котором магнитное поле создаётся цилиндрической катушкой с током (соленоидом), внутрь которой помещён вакуумный диод – электронная лампа с двумя электродами: катодом и анодом. Электроды лампы цилиндрические (рис. 6.1), и их общая ось совпадает с осью соленоида. Анод является холодным электродом, а катод подогревается нитью накала для создания *электронной эмиссии*. Магнитное поле соленоида направлено вдоль общей оси катушки и лампы. Благодаря цилиндрической форме электродов напряжённость электрического поля внутри вакуумного диода перпендикулярна оси лампы и, следовательно, *электрическое поле между катодом и анодом лампы перпендикулярно магнитному полю соленоида*.

При подаче на лампу анодного напряжения U (при разогретом катоде) электроны из электронного облака вблизи катода устремляются к аноду. В лампе появляется анодный ток I_A , который будет зависеть от величины приложенного анодного напряжения. Чем выше напряжение, тем большее количество электронов притянется к аноду, обеспечивая увеличение анодного тока диода при увеличении напряжения U .

Модуль питания обеспечивает также прохождение тока I по обмотке соленоида, причём величину тока можно плавно изменять. При этом меняется величина магнитной индукции, которая в середине длинной цилиндрической катушки соленоида может быть найдена по формуле

$$B_c = \frac{\mu\mu_0 IN}{l}, \quad (6.5)$$

где N – число витков в соленоиде, а l – его длина, которая должна быть много больше диаметра соленоида.

В рассматриваемом случае катушка имеет длину, сравнимую с её диаметром, и реальная магнитная индукция B будет меньше B_c , рассчитанной по формуле (6.5). Практически значение средней магнитной индукции в той зоне, где находится анод электронной лампы, определяют, умножая силу тока I в обмотке соленоида на эмпирический коэффициент K , зависящий от длины и диаметра цилиндрической катушки:

$$B = KI, \quad (6.6)$$

Численное значение этого коэффициента указано на миниблоке «Магнетрон». Очевидно, что единица измерения коэффициента K должна быть такой, чтобы при его умножении на силу тока получалась единица измерения магнитной индукции. *Определите размерность этого коэффициента в СИ!*

В отсутствие магнитного поля на электрон, вылетевший из катода за счёт термоэлектронной эмиссии, действует только сила $\vec{F}_Э$ (см. формулу (6.1)), под действием которой электрон дви-

жется прямолинейно от катода к аноду с ускорением $\vec{a} = \frac{e\vec{E}}{m}$ в радиальном направлении (рис.

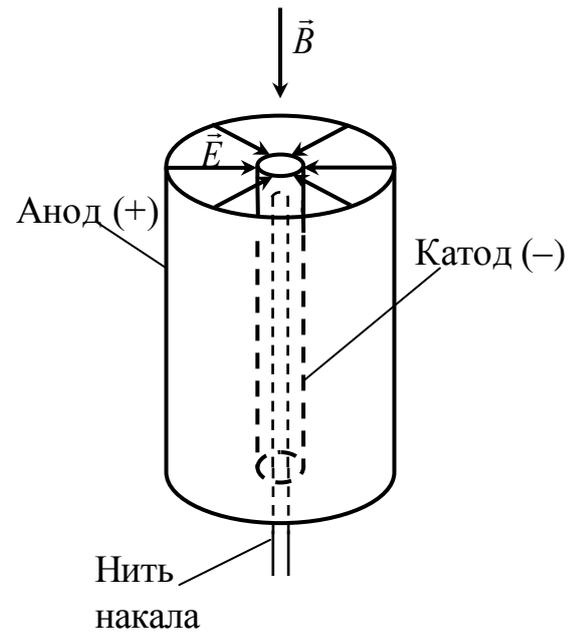


Рис. 6.1

6.2, траектория 1). Если по обмотке соленоида пропустить ток I , то внутри цилиндрического анода создаётся магнитное поле, вектор индукции которого параллелен оси лампы, и вылетающие из катода электроны, пересекая магнитное поле, будут двигаться уже не по радиальным, а по кривым линиям.

Искривление траектории электронов будет тем больше, чем больше сила Лоренца, которая пропорциональна индукции магнитного поля. Если индукция B невелика, то траектории электронов будут слабо искривлены и все электроны будут попадать на анод (см. рис. 6.2, траектория 2), так что анодный ток лампы изменяться не будет.

По мере увеличения индукции магнитного поля траектории электронов все больше искривляются, и при некотором её критическом значении $B = B_{кр}$ траектория электрона будет только касаться анода (траектория 3 на рис. 6.2). При этом анодный ток должен резко уменьшиться, поскольку при дальнейшем увеличении B электроны не будут достигать анода, образуя вокруг катода вихревое электронное облако (траектория 4).

Критическая магнитная индукция $B_{кр}$ при соответствующем напряжении U находится по сбросовой характеристике магнетрона – графику зависимости анодного тока I_a от индукции B магнитного поля (рис. 6.3). При возрастании магнитной индукции анодный ток сначала почти не изменяется. При достижении $B = B_{кр}$ (траектория 3 на рис. 6.2), ток должен резко падать практически до нуля (график 1 на рис. 6.3), так как электроны не достигают анода. В реальных условиях электроны вылетают из катода с различными скоростями, поэтому радиусы кривизны их траекторий не одинаковы и ток уменьшается не столь резко.

Рассмотрим случай, когда $B = B_{кр}$. Поскольку в этом случае траектория электрона касается анода, то в точке касания силы $\vec{F}_Э$ и $\vec{F}_Л$ лежат на одной прямой (см. рис. 6.2) и, в соответствии с формулой (6.4), их равнодействующая будет сообщать электрону центростремительное ускорение

$$\frac{v^2}{R} = \frac{e}{m} \left(\vec{B} - E \right), \quad (6.7)$$

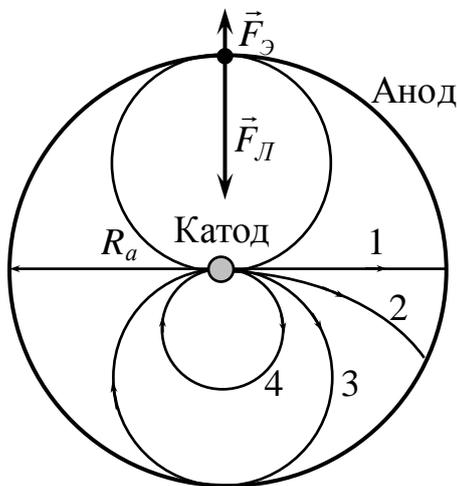


Рис. 6.2

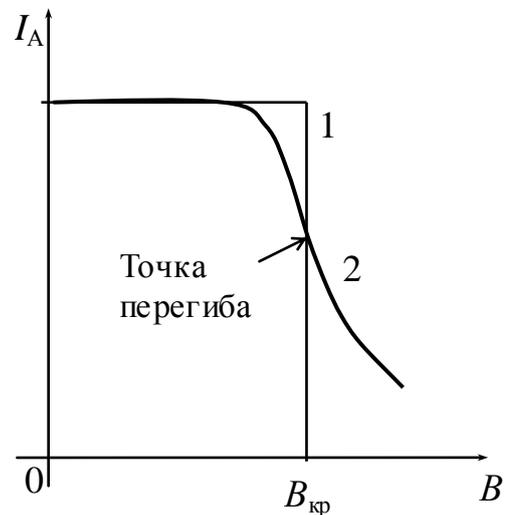


Рис. 6.3

где R – радиус траектории электрона; v – скорость электрона в точке касания.

Учитывая, что скорость электрона перпендикулярна индукции магнитного поля и величина его заряда равна элементарному заряду e , модуль силы Лоренца

$$F_L = evB. \quad (6.8)$$

Используя связь между напряжённостью и потенциалом электрического поля, можно показать, что величина напряжённости прямо пропорциональна напряжению U между анодом и катодом электронной лампы и обратно пропорциональна расстоянию r от оси:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R_A}{R_K}}. \quad (6.9)$$

Здесь R_A – радиус анода, R_K – радиус катода электронной лампы.

Так как $R_A \gg R_K$, то действием электрического поля в точке касания ($r = R_A$) можно пренебречь, тогда

$$m \frac{v^2}{R} = e v B, \quad (6.10)$$

и удельный заряд электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{BR}. \quad (6.11)$$

Скорость электронов вблизи анода легко найти, по величине анодного напряжения, так как работа электрического поля при переносе зарядов не зависит от траектории и равна произведению переносимого заряда на разность потенциалов. При перемещении электрона от катода к аноду его кинетическая энергия увеличивается за счет работы сил электрического поля:

$$\frac{m v^2}{2} - \frac{m v_0^2}{2} = e U. \quad (6.12)$$

Если считать, что скорость электрона, испущенного нагретым катодом, мала ($v_0 \approx 0$), то для скорости v электрона вблизи анода получим формулу

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (6.13)$$

Заменив в выражении (6.11) скорость по формуле (6.13), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 R^2}. \quad (6.14)$$

Таким образом, для решения поставленной задачи – определить удельный заряд электрона – нужно знать радиус траектории электрона и соответствующее ему значение индукции магнитного поля при известном анодном напряжении.

Для траектории 3, соответствующей критическому значению магнитной индукции $B_{кр}$, можно принять, что радиус этой траектории равен половине радиуса R_A анода ($R_{кр} = 0,5 R_A$) (см. рис. 6.2). Тогда расчётная формула для определения удельного заряда электрона будет иметь вид

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{кр}^2 R_A^2}. \quad (6.15)$$

Практически определяют зависимость анодного тока I_A не от индукции B , а от силы тока I в соленоиде. По измеренным значениям токов I и I_A строят график зависимости $I_A(I)$, и по точке перегиба (см. рис. 6.3) определяют $I_{кр}$. Критическое значение индукции магнитного поля рассчитывают по формуле (6.6), подставляя в неё полученное из графика значение $I_{кр}$. Значение коэффициента K указано на миниблоке «Магнетрон».

Выполнение работы

Оборудование: миниблок «Магнетрон», модуль питания, мультиметр, стрелочный амперметр, вольтметр.

1. Для проведения необходимо собрать схему установки (рис. 6.4), используя монтажную схему (рис. 6.5). На наборном поле установите миниблок «Магнетрон» в отведённое для него место. Его контакт № 1 соедините с плюсом источника питания 3 В.

2. Так как все контакты «земля ⊥» на наборном поле внутри блока соединены между собой, и так же соединены между собой подобные контакты блоков питания на модуле питания, то достаточно один контакт ⊥ блока питания соединить с любым контактом ⊥ наборного поля. Например, можно соединить «землю» от 12 В с любой «землёй» наборного поля. Для подачи любого другого напряжения достаточно одного провода от клеммы «+» источника питания.

В работе используются два источника питания с регулируемым напряжением до 13 В. От одного из них напряжение подаётся на анод электронной лампы через мультиметр (выносные входы mA и COM, режим 20 mA), а второй источник питает соленоид через стрелочный амперметр. Третий источник питания с постоянным напряжением $U_H = 3$ В обеспечивает подогрев катода. Соедините их как показано на монтажной схеме (рис. 6.5).

4. При сборке схемы соблюдайте полярность приборов – плюс источника питания соединяйте с плюсом измерительного прибора.

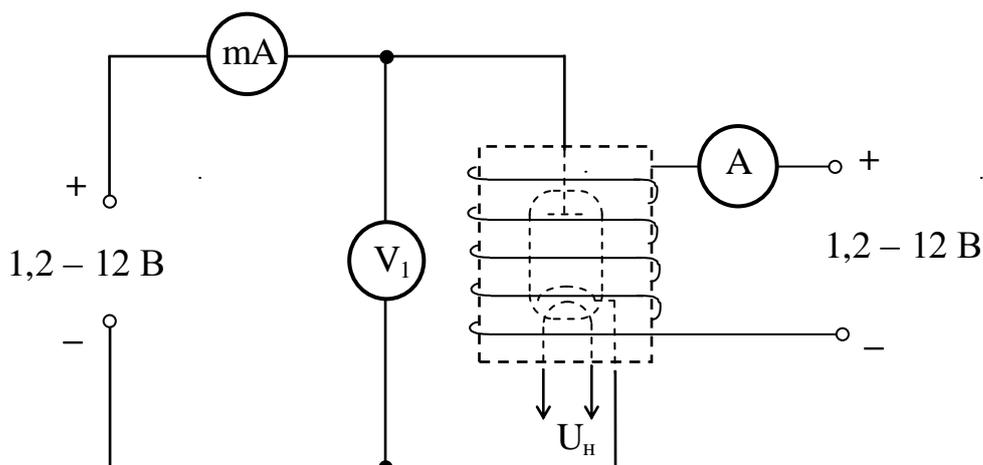


Рис. 6.4

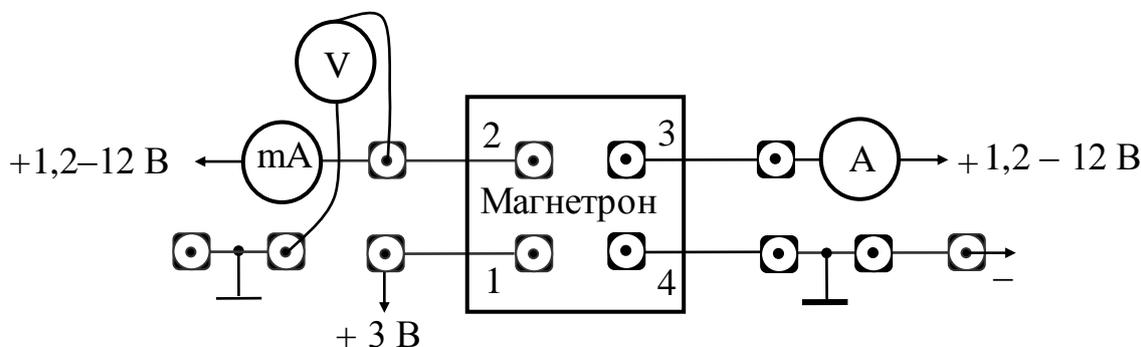


Рис. 6.5

5. Регуляторы напряжения источников питания установите в крайнее левое положение.

6. После проверки схемы преподавателем включите модуль питания, мультиметр. Установите на аноде диода напряжение от 9 до 13 В, контролируя его стрелочным вольтметром. Конкретные значения напряжения U_A указываются преподавателем или лаборантом

7. Замерьте анодный ток лампы при отсутствии магнитного поля, для этого на время измерения анодного тока уберите соединительный провод из гнезда «+» питания соленоида и запишите значение анодного тока в табл. 6.1.

8. Вставьте провод обратно. Плавно увеличивайте ток соленоида и наблюдайте по мультиметру за поведением анодного тока. Как только он начнёт снижаться, запишите этот ток и ток соленоида в табл. 6.1. Далее увеличивайте ток соленоида шагами по 0,02 А до 0,56 А и продолжайте записывать измеряемые величины в табл. 6.1.

№ п/п	I, A	I_A, mA при $U_A = \dots B$	I_A, mA при $U_A = \dots B$
	0		
	...		
	...		
	...		
	...		

9. После снятия характеристики убавьте ток соленоида до минимума, установите следующее напряжение на аноде лампы и повторите предыдущие измерения (т.е. повторите п.п. 7, 8).

10. После выполнения работы отключите питание, запишите в черновик погрешности приборов и представьте результаты измерений руководителю работ в лаборатории для подписи.

11. Разберите схему, наведите порядок на своём рабочем месте.

Обработка результатов

1. Постройте графики зависимости анодного тока I_A от тока I в соленоиде для обоих значений напряжения U_A . Рекомендуем строить оба графика в одной системе координат и с таким масштабом, чтобы изменение анодного тока было очень заметным.

2. Найдите по графикам значения $I_{кр}$, соответствующие точкам перегиба (напоминаем, что в точке перегиба график имеет максимальную крутизну (см. рис. 6.3)).

3. Вычислите $B_{кр}$ по формуле (6.6) и экспериментальные значения e/m .

4. Определите среднее значение удельного заряда электрона, абсолютную и относительную погрешности эксперимента, запишите окончательный результат измерений.

5. Вычислите удельный заряд электрона по табличным значениям его заряда и массы. Сравните полученное Вами экспериментальное значение e/m с табличным, найдите относительное отклонение $(e/m)_{эксп.}$ от $(e/m)_{табл.}$

4. Напишите вывод по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется удельным зарядом частицы? Сравните удельные заряды протона и электрона.

2. Покажите направления индукции магнитного поля и напряженности электрического поля на рис. 6.2.

3. Какие силы действуют на электрон в электрическом и магнитном полях? Укажите их направления на рис. 6.2 в любой точке траектории.

4. Какое направление имеет сила Лоренца? Чему равен её модуль?

5. Какую работу совершает электрическое (магнитное) поле при перемещении заряда?

6. Как изменится сбросовая характеристика магнетрона при увеличении или уменьшении анодного напряжения?

7. От каких величин зависит ускорение заряженной частицы в электрическом поле? В магнитном поле?

8. По каким траекториям может двигаться заряженная частица в однородном магнитном поле?

9. Как определить радиус траектории электрона, если его скорость перпендикулярна вектору магнитной индукции?

10. Какую скорость наберёт электрон на пути к аноду при анодном напряжении, равном U ?

11. Во сколько раз изменится максимальная скорость электронов при увеличении анодного напряжения в 2 раза?

12. За счёт чего создаются электрическое и магнитное поля в магнетроне?

13. Выведите формулы (6.7), (6.14), (6.15).

14. Для чего используется источник напряжения на 3 В?

