

ГЛАВА 15 ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрический ток — направленное движение заряженных частиц. Благодаря электрическому току освещаются квартиры, приводятся в движение станки, нагреваются конфорки на электроплитах, работает радиоприемник и т. д.

Рассмотрим наиболее простой случай направленного движения заряженных частиц — постоянный ток.



§ 100 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СИЛА ТОКА

Какой электрический заряд называется элементарным?

Чему равен элементарный электрический заряд?

Чем различаются заряды в проводнике и диэлектрике?

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда из одной точки в другую. Однако если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как, например, свободные электроны в металле, то переноса заряда не происходит (рис. 15.1, а). Поперечное сечение проводника в среднем пересекает одинаковое число электронов в двух противоположных направлениях. Электрический заряд переносится через поперечное сечение проводника лишь в том случае, если наряду с беспорядочным движением электроны участвуют в направленном движении (рис. 15.1, б). В этом случае говорят, что по проводнику идёт *электрический ток*.

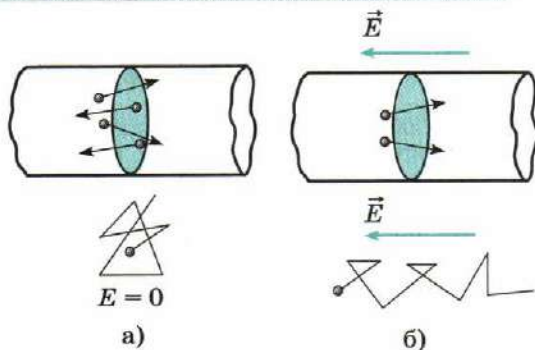


Рис. 15.1

ЗАПОМНИ

Электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Электрический ток имеет определённое направление.

ВАЖНО

За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.

Если перемещать нейтральное в целом тело, то, несмотря на упорядоченное движение огромного числа электронов и атомных ядер, электрический ток не возникнет. Полный заряд, переносимый через любое сечение, будет при этом равен нулю, так как заряды разных знаков перемещаются с одинаковой средней скоростью.

ИНТЕРЕСНО

Направление тока совпадает с направлением вектора напряжённости электрического поля. Если ток образован движением отрицательно заряженных

ИНТЕРЕСНО Выбор направления тока не очень удачен, так как в большинстве случаев ток представляет собой упорядоченное движение электронов — отрицательно заряженных частиц. Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах ещё ничего не знали.

Во-первых, проводник, по которому идёт ток, нагревается.

Во-вторых, электрический ток может изменять химический состав проводника: например, выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса и т. д.).

В-третьих, ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и намагниченные тела. Это действие тока называется *магнитным*.

Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается. Магнитное действие тока в отличие от химического и теплового является основным, так как проявляется у всех без исключения проводников. Химическое действие



Соберите цепь, состоящую из источника (батарейки), реостата, лампочки и ключа. Поднесите компас к реостату сверху. Заметьте, как ориентирована стрелка компаса. Замкните ключ. Изменилась ли ориентация стрелки компаса? Сделайте вывод.

тока наблюдается лишь у растворов и расплавов электролитов, а нагревание отсутствует у сверхпроводников.

Действие тока. Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают.

В лампочке накаливания вследствие прохождения электрического тока излучается видимый свет, а электродвигатель совершает механическую работу.

Сила тока. Если в цепи идёт электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника всё время переносится электрический заряд.

ЗАПОМНИ Заряд, перенесённый в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой **силой тока**.

Если через поперечное сечение проводника за время Δt переносится заряд Δq , то среднее значение силы тока равно:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (15.1)$$

ВАЖНО Средняя сила тока равна отношению заряда Δq , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt , к этому промежутку времени.

ЗАПОМНИ Если сила тока со временем не меняется, то ток называют **постоянным**.

Сила переменного тока в данный момент времени определяется также по формуле (15.1), но промежуток времени Δt в таком случае должен быть очень мал.

Сила тока, подобно заряду, — величина скалярная. Она может быть как *положительной*, так и *отрицательной*. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений обхода контура принять за положительное. Сила тока $I > 0$, если направление тока совпадает с условно выбранным положитель-

ным направлением вдоль проводника. В противном случае $I < 0$.

Связь силы тока со скоростью направленного движения частиц. Пусть цилиндрический проводник (рис. 15.2) имеет поперечное сечение площадью S . За положительное направление тока в проводнике примем направление слева направо. Заряд каждой частицы будем считать равным q_0 . В объёме проводника, ограниченном поперечными сечениями 1 и 2 с расстоянием Δl между ними, содержится $nS\Delta l$ частиц, где n — концентрация частиц (носителей тока). Их общий заряд в выбранном объёме $q = q_0 n S \Delta l$. Если частицы движутся слева направо со средней скоростью v , то за время $\Delta t = \frac{\Delta l}{v}$ все частицы, заключённые

в рассматриваемом объёме, пройдут через поперечное сечение 2. Поэтому сила тока равна: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0 n S \Delta l v}{\Delta l} = q_0 n v S$. (15.2)

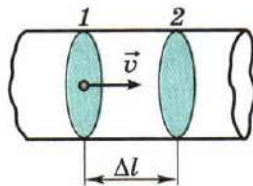


Рис. 15.2

ИНТЕРЕСНО
Термин *сила тока* нельзя считать удачным, так как понятие *сила*, применяемое к току, не имеет никакого отношения к понятию *сила* в механике. Но термин *сила тока* был введён давно и утвердился в науке.

ВАЖНО

В СИ единицей силы тока является *ампер* (А).

Эта единица установлена на основе магнитного взаимодействия токов.

Измеряют силу тока *амперметрами*. Принцип устройства этих приборов основан на магнитном действии тока.

Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике. Найдём скорость упорядоченного перемещения электронов в металлическом проводнике. Согласно формуле (15.2) $v = \frac{I}{enS}$, где e — модуль заряда электрона.

Пусть, например, сила тока $I = 1$ А, а площадь поперечного сечения проводника $S = 10^{-6}$ м². Модуль заряда электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Число электронов в 1 м³ меди равно числу атомов в этом объёме, так как один из валентных электронов каждого атома меди является свободным. Это число есть $n \approx 8,5 \cdot 10^{28}$ м⁻³ (это число можно определить, если решить задачу 6 из § 54). Следовательно,

$$v = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} \text{ (м/с)} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ м/с.}$$

Как видите, скорость упорядоченного перемещения электронов очень мала. Она во много раз меньше скорости теплового движения электронов в металле.

Условия, необходимые для существования электрического тока.

ВАЖНО

Для возникновения и существования постоянного электрического тока в веществе необходимо наличие свободных заряженных частиц.



Определите среднюю квадратичную скорость теплового движения свободных электронов, рассматривая электронный газ как идеальный.

$$\langle \bar{v}_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}}, \text{ где } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Сделайте вывод.

Однако этого ещё недостаточно для возникновения тока.

Важно

Для создания и поддержания упорядоченного движения заряженных частиц необходима сила, действующая на них в определённом направлении.



Если эта сила перестанет действовать, то упорядоченное движение заряженных частиц прекратится из-за столкновений с ионами кристаллической решётки металлов или нейтральными молекулами электролитов и электроны будут двигаться беспорядочно.

На заряженные частицы, как мы знаем, действует электрическое поле с силой

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Важно

Обычно именно электрическое поле внутри проводника служит причиной, вызывающей и поддерживающей упорядоченное движение заряженных частиц. Только в статическом случае, когда заряды покоятся, электрическое поле внутри проводника равно нулю.

Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника в соответствии с формулой (14.21) существует разность потенциалов. Как показал эксперимент, когда разность потенциалов не меняется во времени, в проводнике устанавливается *постоянный электрический ток*. Вдоль проводника потенциал уменьшается от максимального значения на одном конце проводника до минимального на другом, так как положительный заряд под действием сил поля перемещается в сторону убывания потенциала.

Сила тока. Электронная теория проводимости

Найти

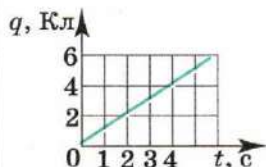


1. Что определяет среднюю скорость дрейфа свободных электронов?
2. Почему единицу тока определяют по магнитному взаимодействию?



A1. Время рабочего импульса ускорителя электронов равно 1 мкс. Средняя сила тока, создаваемого этим ускорителем, 32 кА. Определите число электронов, ускоренных за один пуск ускорителя. Заряд электрона $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.
 1) $4 \cdot 10^{16}$ 2) $8 \cdot 10^{17}$ 3) 10^{17} 4) $2 \cdot 10^{17}$

A2. На электроды вакуумного диода подаётся переменное напряжение, в результате чего сила тока, проходящего через этот диод, равномерно увеличивается за 2 мкс от 0 до 12 А. Определите заряд, который прошёл через диод за это время.
 1) 36 мкКл 2) 12 мкКл 3) 36 мКл 4) $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.



A3. По проводнику идёт постоянный электрический ток. Значение заряда, прошедшего через проводник, возрастает с течением времени согласно графику, представленному на рисунке. Сила тока в проводнике равна

- 1) 36 А
- 2) 16 А
- 3) 6 А
- 4) 1 А

§ 101 ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ. СОПРОТИВЛЕНИЕ

Что заставляет заряды двигаться вдоль проводника?
Как электрическое поле действует на заряды?

Вольт-амперная характеристика. В предыдущем параграфе говорилось, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах. Сила тока в проводнике определяется этой разностью потенциалов. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряжённость электрического поля в проводнике и, следовательно, тем бóльшую скорость направленного движения приобретают заряженные частицы. Согласно формуле (15.2) это означает увеличение силы тока.

Для каждого проводника — твёрдого, жидкого и газообразного — существует определённая зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника.



Г. Ом
(1787—1854)



Запомни Зависимость силы тока в проводнике от напряжения, подаваемого на него, называют **вольт-амперной характеристикой** проводника.

Её находят, измеряя силу тока в проводнике при различных значениях напряжения. Знание вольт-амперной характеристики играет большую роль при изучении электрического тока.

Закон Ома. Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлических проводников и растворов электролитов. Впервые (для металлов) её установил немецкий учёный Георг Ом, поэтому зависимость силы тока от напряжения носит название *закона Ома*.

На участке цепи, изображённой на рисунке 15.3, ток направлен от точки 1 к точке 2. Разность потенциалов (напряжение) на концах проводника равна $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Так как ток направлен слева направо, то напряжённость электрического поля направлена в ту же сторону и $\varphi_1 > \varphi_2$.

Измеряя силу тока амперметром, а напряжение вольтметром, можно убедиться в том, что сила тока прямо пропорциональна напряжению.

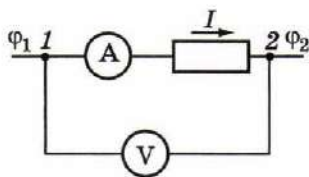


Рис. 15.3

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка R :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (15.3)$$

Применение обычных приборов для измерения напряжения — вольтметров — основано на законе Ома. Принцип устройства вольтметра такой же, как и у амперметра. Угол поворота стрелки прибора пропорционален силе тока.



Сила тока, проходящего по вольтметру, определяется напряжением между точками цепи, к которой он подключён. Поэтому, зная сопротивление вольтметра, можно по силе тока определить напряжение. На практике прибор градуируют так, чтобы он сразу показывал напряжение в вольтах.

Сопротивление. Основная электрическая характеристика проводника — *сопротивление*. От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении.

ЗАПОМНИ

Свойство проводника ограничивать силу тока в цепи, т. е. противодействовать электрическому току, называют **электрическим сопротивлением проводника**.

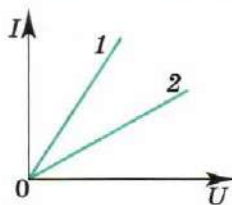


Рис. 15.4

С помощью закона Ома (15.3) можно определить сопротивление проводника: $R = \frac{U}{I}$.

Для этого нужно измерить напряжение на концах проводника и силу тока в нём.

На рисунке 15.4 приведены графики вольт-амперных характеристик двух проводников. Очевидно, что сопротивление проводника, которому соответствует график 2, больше, чем сопротивление проводника, которому соответствует график 1.

Важно

Сопротивление проводника не зависит от напряжения и силы тока.



Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрических размеров. Сопротивление проводника длиной l с постоянной площадью поперечного сечения S равно:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (15.4)$$

где ρ — величина, зависящая от рода вещества и его состояния (от температуры в первую очередь).

Величину ρ называют *удельным сопротивлением проводника*.

Удельное сопротивление материала численно равно сопротивлению проводника из этого материала длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м².

Единицу сопротивления проводника устанавливают на основе закона Ома и называют её омом.

Важно

Проводник имеет сопротивление 1 Ом, если при разности потенциалов 1 В сила тока в нём 1 А.



Выведите зависимость силы тока от длины проводника. Начертите график этой зависимости.

Единицей удельного сопротивления является 1 Ом · м. Удельное сопротивление металлов мало. А вот диэлектрики обладают очень большим удельным сопротивлением. Например, удельное сопротивление серебра

$1,59 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, а стекла порядка 10^{10} Ом · м. В справочных таблицах приводятся значения удельного сопротивления некоторых веществ.

Значение закона Ома. Из закона Ома следует, что при заданном напряжении сила тока на участке цепи тем больше, чем меньше сопротивление этого участка. Если по какой-то причине (нарушение изоляции близко расположенных проводов, неосторожные действия при работе с электропроводкой и пр.) сопротивление между двумя точками, находящимися под напряжением, оказывается очень малым, то сила тока резко возрастает (возникает короткое замыкание), что может привести к выходу из строя электроприборов и даже возникновению пожара.

Именно из-за закона Ома нельзя говорить, что чем выше напряжение, тем оно опаснее для человека. Сопротивление человеческого тела может сильно изменяться в зависимости от условий (влажности, температуры окружающей среды, внутреннего состояния человека), поэтому даже напряжение 10—20 В может оказаться опасным для здоровья и жизни человека. Следовательно, всегда необходимо учитывать не только напряжение, но и силу электрического тока. При работе в физической лаборатории нужно строго соблюдать правила техники безопасности!

Закон Ома — основа расчётов электрических цепей в электротехнике.

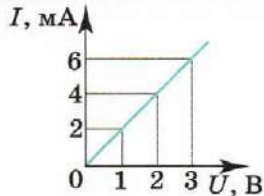
Электрический ток. Закон Ома. Сопротивление проводника

Найти

- ? 1. Согласно закону Ома сопротивление участка цепи $R = \frac{U}{I}$. Означает ли это, что сопротивление зависит от силы тока или напряжения?
2. Что такое удельное сопротивление проводника?

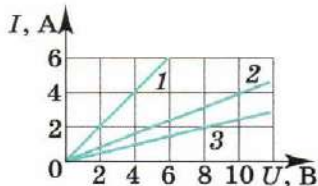
A1. При увеличении напряжения U на участке электрической цепи сила тока I в цепи изменяется в соответствии с графиком (см. рис.). Электрическое сопротивление на этом участке цепи равно

- 1) 2 Ом
2) 0,5 Ом
3) 2 мОм
4) 500 Ом



A2. На рисунке изображены графики зависимости силы тока в трёх проводниках от напряжения на их концах. Сопротивление какого проводника равно 2,5 Ом?

- 1) 1
2) 2
3) 3
4) такого проводника нет



A3. Медная проволока имеет электрическое сопротивление 1,2 Ом. Какое электрическое сопротивление имеет медная проволока, у которой в 4 раза больше длина и в 6 раз больше площадь поперечного сечения?

- 1) 7,2 Ом
2) 1,8 Ом
3) 0,8 Ом
4) 0,2 Ом

A4. Если увеличить в 2 раза напряжение между концами проводника, а его длину уменьшить в 2 раза, то сила тока, проходящего через проводник,

- 1) не изменится
2) уменьшится в 4 раза
3) увеличится в 4 раза
4) увеличится в 2 раза



§ 102

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

Сформулируйте закон Ома для участка цепи.

Как выглядит зависимость силы тока в проводнике от напряжения на нём? от его сопротивления?

От источника тока энергия может быть передана по проводам к устройствам, потребляющим энергию: электрической лампе, радиоприёмнику и др. Для этого составляют *электрические цепи* различной сложности.

К наиболее простым и часто встречающимся соединениям проводников относятся последовательное и параллельное соединения.

Последовательное соединение проводников. При последовательном соединении электрическая цепь не имеет разветвлений. Все проводники включают в цепь поочерёдно друг за другом. На рисунке 15.5, а показано последовательное соединение двух проводников 1 и 2, имеющих сопротивления R_1 и R_2 . Это могут быть две лампы, две обмотки электродвигателя и др.

Важно

Сила тока в обоих проводниках одинакова, т. е.

$$I_1 = I_2 = I. \quad (15.5)$$

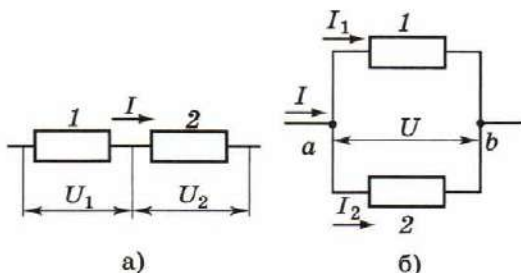
В проводниках электрический заряд в случае постоянного тока не накапливается, и через любое поперечное сечение проводника за определённое время проходит один и тот же заряд.

Напряжение на концах рассматриваемого участка цепи складывается из напряжений на первом и втором проводниках:

$$U = U_1 + U_2.$$



Определите отношение напряжения на всём проводнике длиной l к напряжению на участке этого проводника длиной $l/4$.



Применяя закон Ома для всего участка в целом и для участков с сопротивлениями проводников R_1 и R_2 , можно доказать, что полное сопротивление всего участка цепи при последовательном соединении равно:

$$R = R_1 + R_2. \quad (15.6)$$

Это правило можно применить для любого числа последовательно соединённых проводников.

Напряжения на проводниках и их сопротивления при последовательном соединении связаны соотношением

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (15.7)$$



Выведите формулу (15.6) самостоятельно.

Параллельное соединение проводников. На рисунке 15.5, б показано параллельное соединение двух проводников 1 и 2 сопротивлениями R_1 и R_2 . В этом случае электрический ток I разветвляется на две части. Силу тока в первом и втором проводниках обозначим через I_1 и I_2 .

Так как в точке a — разветвлении проводников (такую точку называют узлом) — электрический заряд не накапливается, то заряд, поступающий в единицу времени в узел, равен заряду, уходящему из узла за это же время. Следовательно,

$$I = I_1 + I_2. \quad (15.8)$$

Важно

Напряжение U на концах проводников, соединённых параллельно, одинаково, так как они присоединены к одним и тем же точкам цепи.

В осветительной сети обычно поддерживается напряжение 220 В. На это напряжение рассчитаны приборы, потребляющие электрическую энергию. Поэтому параллельное соединение — самый распространённый способ соединения различных потребителей. В этом случае выход из строя одного прибора не отражается на работе остальных, тогда как при последовательном соединении выход из строя одного прибора размыкает цепь. Применяя закон Ома для всего участка в целом и для участков проводников сопротивлениями R_1 и R_2 , можно доказать, что величина, обратная полному сопротивлению участка ab , равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных проводников:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (15.9)$$

Отсюда следует, что для двух проводников

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (15.10)$$

Напряжения на параллельно соединённых проводниках равны: $I_1 R_1 = I_2 R_2$. Следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (15.11)$$



Докажите справедливость соотношения (15.7) самостоятельно.



Выведите формулу (15.9) самостоятельно.

Важно

Обратим внимание на то, что если в какой-то из участков цепи, по которой идёт постоянный ток, параллельно к одному из резисторов подключить конденсатор, то ток через конденсатор не будет идти, цепь на участке с конденсатором будет разомкнута. Однако между обкладками конденсатора будет напряжение, равное напряжению на резисторе, и на обкладках накопится заряд $q = CU$.

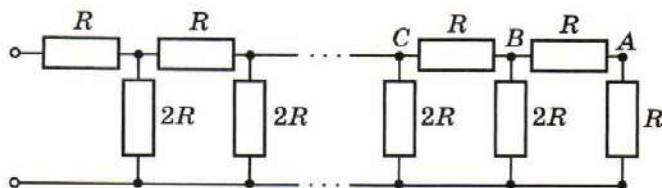


Рис. 15.6

Рассмотрим цепочку сопротивлений $R - 2R$, называемую матрицей (рис. 15.6).

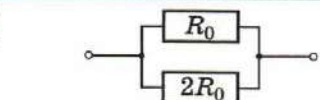
На последнем (правом) звене матрицы напряжение делится пополам из-за равенства сопротивлений, на предыдущем звене напряжение тоже делится пополам, поскольку оно распределяется между резистором сопротивлением R и двумя параллельными резисторами сопротивлениями $2R$ и т. д. Эта идея — деления напряжения — лежит в основе преобразования двоичного кода в постоянное напряжение, что необходимо для работы компьютеров.

Параллельное и последовательное соединения резисторов

Найти

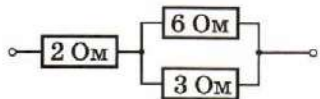
1. Почему лампы в квартире соединяют параллельно, а лампочки в ёлочных гирляндах — последовательно?

2. Сопротивление каждого проводника равно 1 Ом. Чему равно сопротивление двух таких проводников, соединённых: 1) последовательно; 2) параллельно?



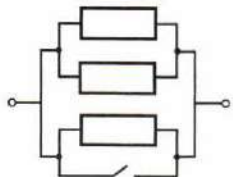
A1. Сопротивление участка цепи, изображённого на рисунке, равно

- 1) $2R_0/3$ 2) $3R_0$ 3) $1,5R_0$ 4) $R_0/3$



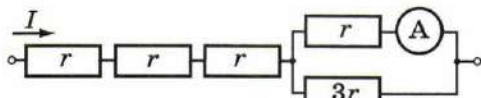
A2. Сопротивление участка цепи, изображённого на рисунке, равно

- 1) 11 Ом 2) 6 Ом 3) 4 Ом 4) 1 Ом



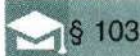
A3. Каким будет сопротивление участка цепи, изображённого на рисунке, при замыкании ключа? Каждый из резисторов имеет сопротивление R .

- 1) R 2) $R/2$ 3) $R/3$ 4) 0



A4. Через участок цепи (см. рис.) идёт постоянный ток. Сила тока $I = 8$ А. Какую силу тока показывает амперметр? Сопротивление амперметра не учитывайте.

- 1) 2 А 2) 3 А 3) 6 А 4) 12 А



§ 103 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН ОМА. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ»

При решении задач на применение закона Ома необходимо учитывать, что при последовательном соединении проводников сила тока во всех проводниках одинакова, а при параллельном их соединении напряжение одинаково на всех проводниках.

Формулы (15.6), (15.7), (15.9) и (15.11) следуют из закона Ома. Их надо применять при решении задач.

Задача 1. Параллельно амперметру, имеющему сопротивление $R_a = 0,5$ Ом, подсоединён медный провод длиной $l = 0,4$ м и диаметром $d = 0,001$ м. Удельное сопротивление меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Определите полную силу тока в цепи, если амперметр показывает силу тока $I_a = 0,2$ А.

Решение. Так как амперметр и провод подключены параллельно, то напряжение на амперметре равно напряжению на проводе:

$$I_a R_a = I_{\pi} R_{\pi}.$$

$$\text{Определим сопротивление провода: } R_{\pi} = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\rho l}{\pi d^2}.$$

$$\text{Тогда } I_{\pi} = \frac{I_a R_a}{R_{\pi}} = \frac{I_a R_a}{\frac{4\rho l}{\pi d^2}} \pi d^2. \text{ Полная сила тока в цепи}$$

$$I = I_a + I_{\pi} = I_a + I_a \frac{R_a \pi d^2}{4\rho l} \approx 12 \text{ А.}$$

Задача 2. На рисунке 15.7 все сопротивления резисторов равны R . Определите эквивалентное сопротивление цепи. Чему равна полная сила тока в цепи, если на клеммы 1, 2 подано напряжение U ?

Решение. Трудно определить, как соединены резисторы R_1 и R_3 — последовательно или параллельно. В подобных схемах всегда нужно искать резисторы, соединения которых очевидны. Так, очевидно, что резисторы R_5 и R_6 соединены последовательно. Значит, $R_{5,6} = R_5 + R_6 = 2R$. Эквивалентный резистор сопротивлением $R_{5,6}$ соединён с резистором R_4 параллельно. Следовательно,

$$\frac{1}{R_{4-6}} = \frac{1}{R_{5,6}} + \frac{1}{R_4}; \quad R_{4-6} = \frac{2RR}{2R + R} = \frac{2}{3}R.$$

Эквивалентный резистор сопротивлением R_{4-6} , в свою очередь, соединён последовательно с резистором R_3 :

$$R_{3-6} = R_3 + R_{4-6} = R + (2/3)R = (5/3)R,$$

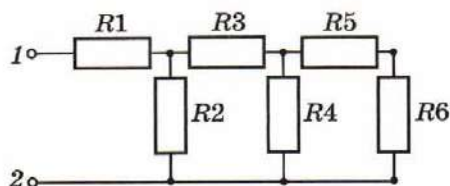


Рис. 15.7

а эквивалентный резистор сопротивлением R_{3-6} — параллельно с резистором R_2 :

$$R_{2-6} = \frac{R_{3-6} R_2}{R_{3-6} + R_2} = \frac{(5/3)RR}{(5/3)R + R} = \frac{5}{8}R.$$

И наконец, эквивалентный резистор R_{2-6} соединён последовательно с резистором R_1 , так что

$$R_{\text{экр}} = R_{2-6} + R = (5/8)R + R = (13/8)R.$$

Из закона Ома следует, что сила тока $I = \frac{U}{R_{\text{экр}}} = \frac{8U}{13R}$.

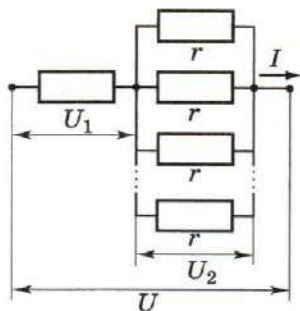


Рис. 15.8

Задача 3. К участку цепи с напряжением U через резистор сопротивлением R подключены параллельно десять лампочек, имеющих одинаковое сопротивление r . Определите напряжение на каждой лампочке.

Решение. Начертим схему цепи (рис. 15.8). Очевидно, что напряжение на каждой лампочке будет одинаково, так как они соединены параллельно. Резистор сопротивлением R и участок цепи с лампочками соединены последовательно, следовательно, $U = U_1 + U_2 = IR + IR_{\text{экр}}$. Запишем закон Ома

$$\text{для каждого из участков цепи: } I = \frac{U_1}{R}; \quad I = \frac{U_2}{R_{\text{экр}}},$$

откуда $\frac{U_1}{R} = \frac{U_2}{R_{\text{экр}}}$, или $\frac{U - U_2}{R} = \frac{U_2}{R_{\text{экр}}}$. Решив это уравнение относительно U_2 ,

получим $U_2 = \frac{UR_{\text{экр}}}{R + R_{\text{экр}}}$. Найдём эквивалентное сопротивление участка цепи

с лампочками из соотношения

$$\frac{1}{R_{\text{экр}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_{10}} = \frac{10}{r}, \quad \text{откуда } R_{\text{экр}} = \frac{r}{10}.$$



$$\text{Окончательно получим } U_2 = \frac{Ur}{10\left(R + \frac{r}{10}\right)}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. К концам медного проводника длиной 300 м приложено напряжение 36 В. Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в проводнике, если концентрация электронов проводимости в меди $8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, а удельное сопротивление $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

2. Сопротивление каждого из проводников, соединённых в квадрат, и проводников, образующих диагонали квадрата, равно r . Определите эквивалентное сопротивление при подключении источника тока: 1) к соседним вершинам; 2) к вершинам, лежащим на одной диагонали. В точке пересечения диагоналей контакта нет.



§ 104 РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Вспомните, как определяется работа кулоновских сил при перемещении заряда q из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 .

Важно При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу.

Её принято называть *работой тока*.

Рассмотрим произвольный участок цепи. Это может быть однородный проводник, например нить лампы накаливания, обмотка электродвигателя и др. Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит заряд Δq . Электрическое поле совершит при этом работу $A = \Delta q U$ (U — напряжение между концами участка проводника).



Так как сила тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, то работа тока равна:

$$A = IU\Delta t. \quad (15.12)$$

Важно Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого шёл ток.

Согласно закону сохранения энергии эта работа должна быть равна изменению энергии рассматриваемого участка цепи. Поэтому

Важно энергия, выделяемая на данном участке цепи за время Δt , равна работе тока.

Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, то происходит только нагревание проводника, т. е. увеличивается внутренняя энергия проводника. Нагретый проводник отдаёт тепло окружающим телам.

Нагревание проводника происходит следующим образом. Электрическое поле ускоряет электроны. В результате столкновения с ионами кристаллической решётки они передают ионам свою энергию. Энергия беспорядочного движения ионов около положений равновесия возрастает. Это и означает увеличение внутренней энергии. Так как температура — мера кинетической энергии тела, то температура проводника повышается, и он начинает передавать тепло окружающим телам. Спустя некоторое время после замыкания цепи процесс устанавливается, и температура проводника перестаёт изменяться со временем. За счёт работы электрического поля в проводнике непрерывно выделяется энергия. Но его внутренняя энергия остаётся неизменной, так как проводник передаёт окружающим телам количество теплоты, равное работе тока. Таким образом, формула (15.12) для работы тока определяет количество теплоты, передаваемой проводником другим телам.



Объясните, почему в отсутствие тока при столкновениях свободных электронов с ионами решётки энергия последних не увеличивается.

Если в формуле (15.12) выразить либо напряжение через силу тока, либо силу тока через напряжение с помощью закона Ома для участка цепи, то получим три эквивалентные формулы

$$A = IU\Delta t = I^2 R\Delta t = \frac{U^2}{R}\Delta t = Q. \quad (15.13)$$

Формулой $A = I^2 R\Delta t$ удобно пользоваться при последовательном соединении проводников, так как сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках. При параллельном соединении удобна формула $A = \frac{U^2}{R}\Delta t$, так как напряжение на всех проводниках одинаково.



Закон Джоуля—Ленца. Закон, определяющий количество теплоты, которую выделяет проводник с током в окружающую среду, был впервые установлен экспериментально английским учёным Д. Джоулем (1818—1889) и русским учёным Э. Х. Ленцем (1804—1865).

Закон Джоуля—Ленца

Количество теплоты, выделяемой в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока по проводнику:

$$Q = I^2 R\Delta t. \quad (15.14)$$



Как можно экспериментально проверить закон Джоуля—Ленца? Предложите схему опыта.

Мы получили этот закон с помощью рассуждений, основанных на законе сохранения энергии. Формула (15.14) позволяет вычислить количество теплоты, выделяемой на

любом участке цепи, содержащем какие угодно проводники.

Мощность тока. Любой электрический прибор (лампа, электродвигатель и т. д.) рассчитан на потребление определённой энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой тока очень важное значение имеет понятие *мощность тока*.

Важно

Мощность тока равна отношению работы тока ко времени прохождения тока. Согласно этому определению мощность тока

$$P = \frac{A}{\Delta t}. \quad (15.15)$$

Электрическая мощность, так же как и механическая, выражается в *ваттах* (Вт).

Это выражение для мощности тока можно переписать в нескольких эквивалентных формах, используя закон Ома для участка цепи:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$



Найдите на любом электроприборе значение его мощности. Обсудите, какой мощности соответствует это значение — полезной или затраченной.

На большинстве электроприборов указана потребляемая ими мощность, предельное значение силы тока, а также предельное значение напряжения.

В быту для расчётов потребляемой электроэнергии часто используется единица кВт · ч, $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Закон Джоуля—Ленца. Работа электрического тока

Найти

- ?
1. Что называют работой тока?
 2. Чем отличается понятие работы тока в электростатике от понятия работы в механике?
 3. Что такое мощность тока?
 4. В каких единицах выражается мощность тока?
 5. Можно ли увеличить мощность электроприбора, подавая на него большее напряжение?
 6. Какие преобразования энергии происходят в проводнике, когда по нему идёт ток?



A1. Чему равна работа электрического тока за 10 мин, если напряжение на концах проводника равно 10 В, а сила тока равна 1,5 А?

- 1) 150 Дж 2) 900 Дж 3) 1500 Дж 4) 9000 Дж

A2. При прохождении по проводнику электрического тока в течение 2 мин совершается работа 96 кДж. Сила тока 4 А. Чему равно сопротивление проводника?

- 1) 0,02 Ом 2) 50 Ом 3) 3 кОм 4) 15 кОм

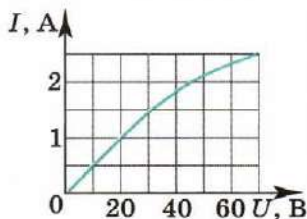
A3. На цоколе лампы накаливания написано: 150 Вт, 220 В. Определите силу тока в спирали при включении лампы в сеть с номинальным напряжением

- 1) 0,45 А 2) 0,68 А 3) 22 А 4) 220 000 А

A4. На рисунке показан график зависимости силы тока в лампе накаливания от напряжения на её клеммах.

При напряжении 30 В мощность тока в лампе равна

- 1) 135 Вт 2) 67,5 Вт 3) 45 Вт 4) 20 Вт

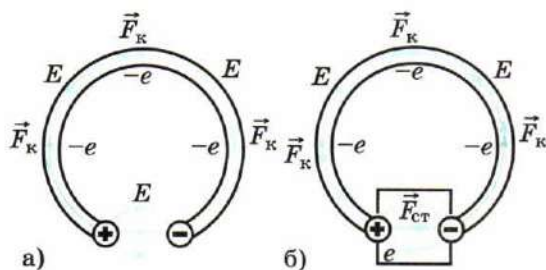


A5. Как изменится мощность, потребляемая электрической лампой, если, не изменяя её электрическое сопротивление, уменьшить напряжение на ней в 3 раза?

- 1) уменьшится в 3 раза 3) не изменится
2) уменьшится в 9 раз 4) увеличится в 9 раз

§ 105 ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Любой источник тока характеризуется электродвижущей силой, или сокращённо ЭДС. Так, на круглой батарейке для карманного фонарика написано: 1,5 В. Что это значит?



Если соединить проводником два разноимённо заряженных шарика, то заряды быстро нейтрализуют друг друга, потенциалы шариков станут одинаковыми, и электрическое поле исчезнет (рис. 15.9, а).

Сторонние силы. Для того чтобы ток был постоянным, надо поддерживать постоянное напряжение между шариками. Для этого необходимо устройство (*источник тока*), которое перемещало бы заряды от одного шарика к другому в направлении, противоположном направлению сил, действующих на эти заряды со стороны электрического поля шариков. В таком устройстве на заряды, кроме электрических



Возьмите два электрометра и зарядите один из них. Затем соедините стержни электрометров проводником и наблюдайте, как быстро происходит перетекание зарядов.

сил, должны действовать силы неэлектростатического происхождения (рис. 15.9, б). Одно лишь электрическое поле заряженных частиц (*кулоновское поле*) не способно поддерживать постоянный ток в цепи.

Запомни Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением сил электростатического происхождения (т. е. кулоновских), называют **сторонними силами**.

Вывод о необходимости сторонних сил для поддержания постоянного тока в цепи станет ещё очевиднее, если обратиться к закону сохранения энергии.

Важно Электростатическое поле потенциально. Работа этого поля при перемещении в нём заряженных частиц по замкнутой электрической цепи равна нулю. Прохождение же тока по проводникам сопровождается выделением энергии — проводник нагревается. Следовательно, в цепи должен быть какой-то источник энергии, поставляющий её в цепь. В нём, помимо кулоновских сил, обязательно должны действовать сторонние, непотенциальные силы. Работа этих сил вдоль замкнутого контура должна быть отлична от нуля.

Именно в процессе совершения работы этими силами заряженные частицы приобретают внутри источника тока энергию и отдают её затем проводникам электрической цепи.

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри всех источников тока: в генераторах на электростанциях, в гальванических элементах, аккумуляторах и т. д.

При замыкании цепи создаётся электрическое поле во всех проводниках цепи. Внутри источника тока заряды движутся под действием *сторонних сил против кулоновских сил* (электроны от положительно заряженного электрода к отрицательному), а во внешней цепи их приводит в движение электрическое поле (см. рис. 15.9, б).

Природа сторонних сил. Природа сторонних сил может быть разнообразной. В генераторах электростанций сторонние силы — это силы, действующие со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике.

В гальваническом элементе, например в элементе Вольта, действуют химические силы.



Элемент Вольта состоит из цинкового и медного электродов, помещённых в раствор серной кислоты. Химические силы вызывают растворение цинка в кислоте. В раствор переходят положительно заряженные ионы цинка, а сам цинковый электрод при этом заряжается отрицательно. (Медь очень мало растворяется в серной кислоте.) Между цинковым и медным электродами появляется разность потенциалов, которая и обуславливает ток во внешней электрической цепи.

ИНТЕРЕСНО

Электродвижущая сила. Действие сторонних сил характеризуется важной физической величиной, называемой *электродвижущей силой* (сокращённо ЭДС).

ЗАПОМНИ

Электродвижущая сила источника тока равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру к абсолютной величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст.}}}{q}. \quad (15.16)$$

Электродвижущую силу, как и напряжение, выражают в вольтах.

Разность потенциалов на клеммах батареи при разомкнутой цепи равна электродвижущей силе. ЭДС одного элемента батареи обычно 1—2 В.

Можно говорить также об электродвижущей силе и на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил (работа по перемещению единичного заряда) не во всём контуре, а только на данном участке.

ВАЖНО

Электродвижущая сила гальванического элемента есть величина, численно равная работе сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри элемента от одного полюса к другому.

Работа сторонних сил не может быть выражена через разность потенциалов, так как сторонние силы непотенциальны и их работа зависит от формы траектории перемещения зарядов.

Электродвижущая сила источника тока. Сторонние силы

Найти



1. Почему электрическое поле заряженных частиц (кулоновское поле) не способно поддерживать постоянный электрический ток в цепи?
2. Какие силы принято называть сторонними?
3. Что называют электродвижущей силой?





§ 106 ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
Из каких элементов состоит электрическая цепь?
Для чего служит источник тока?

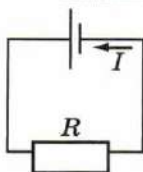


Рис. 15.10

Рассмотрим простейшую полную (т. е. замкнутую) цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора сопротивлением R (рис. 15.10). Источник тока имеет ЭДС \mathcal{E} и сопротивление r .

В генераторе r — это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе сопротивление раствора электролита и электродов.

ЗАПОМНИ

Сопротивление источника называют **внутренним сопротивлением** в отличие от внешнего сопротивления R цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи связывает силу тока в цепи, ЭДС и *полное сопротивление цепи* $R + r$. Эта связь может быть установлена теоретически, если использовать закон сохранения энергии и закон Джоуля—Ленца (15.14).

Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит электрический заряд Δq . Тогда работу сторонних сил при перемещении заряда Δq можно записать так: $A_{\text{ст}} = \mathcal{E}\Delta q$. Согласно определению силы тока (15.1) $\Delta q = I\Delta t$. Поэтому

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}I\Delta t. \quad (15.17)$$

При совершении этой работы на внутреннем и внешнем участках цепи, сопротивления которых r и R , выделяется некоторое количество теплоты. По закону Джоуля—Ленца оно равно:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t. \quad (15.18)$$

По закону сохранения энергии $A_{\text{ст}} = Q$, откуда получаем

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (15.19)$$

ЗАПОМНИ

Произведение силы тока и сопротивления участка цепи называют **падением напряжения на этом участке**.

Таким образом, ЭДС равна сумме падений напряжения на внутреннем и внешнем участках замкнутой цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}. \quad (15.20)$$

Согласно этому закону сила тока в цепи зависит от трёх величин: ЭДС \mathcal{E} , сопротивлений R внешнего и r внутреннего участков цепи. Внутреннее сопротивление источника тока не оказывает заметного влияния на силу



тока, если оно мало по сравнению с сопротивлением внешней части цепи ($R \gg r$). При этом напряжение на зажимах источника примерно равно ЭДС: $U = IR = \mathcal{E} - Ir \approx \mathcal{E}$.

При коротком замыкании, когда $R \approx 0$, сила тока в цепи $I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ и определяется именно внутренним сопротивлением источника и при электродвижущей силе в несколько вольт может оказаться очень большой, если r мало (например, у аккумулятора $r \approx 0,1 - 0,001$ Ом). Провода могут расплавиться, а сам источник выйти из строя.



Разработайте совместно с одноклассниками схему проводки, позволяющей включать и выключать свет с помощью двух выключателей, находящихся в разных концах комнаты.

Важно

Если цепь содержит несколько последовательно соединённых элементов с ЭДС $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и т. д., то полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов.

Для определения знака ЭДС любого источника нужно вначале условиться относительно выбора положительного направления обхода контура. На рисунке 15.11 положительным (произвольно) считают направление обхода против часовой стрелки.

Если при обходе цепи данный источник стремится вызвать ток в направлении обхода, то его ЭДС считается положительной: $\mathcal{E} > 0$. Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу.

Если же при обходе цепи данный источник вызывает ток против направления обхода цепи, то его ЭДС будет отрицательной: $\mathcal{E} < 0$. Сторонние силы внутри источника совершают отрицательную работу. Так, для цепи, изображённой на рисунке 15.11, при обходе контура против часовой стрелки получаем следующее уравнение:

$$\mathcal{E}_n = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| - |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

Если $\mathcal{E}_n > 0$, то согласно формуле (15.20) сила тока $I > 0$, т. е. направление тока совпадает с выбранным направлением обхода контура. При $\mathcal{E}_n < 0$, наоборот, направление тока противоположно выбранному направлению обхода контура. Полное сопротивление цепи R_n равно сумме всех сопротивлений (см. рис. 15.11):

$$R_n = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

Для любого замкнутого участка цепи, содержащего несколько источников токов, справедливо следующее правило: алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме ЭДС на этом участке (второе правило Кирхгофа):

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_m.$$

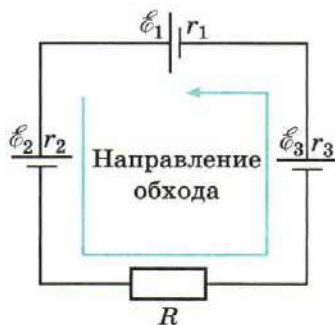
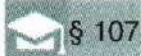


Рис. 15.11



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ»

При решении задач, связанных с расчётом работы и мощности тока, надо применять формулы (15.13) и (15.15).

Для определения силы тока в замкнутой цепи надо использовать закон Ома для полной цепи, а в случае нескольких источников правильно определить суммарную ЭДС.

Задача 1. Аккумулятор с ЭДС $\mathcal{E} = 6,0$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,1$ Ом питает внешнюю цепь с сопротивлением $R = 12,4$ Ом. Какое количество теплоты Q выделится во всей цепи за время $t = 10$ мин?

Решение. Согласно закону Ома для замкнутой цепи сила тока в цепи равна $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$. Количество теплоты, выделившейся на внешнем участке цепи, $Q_1 = I^2 R t$, на внутреннем — $Q_2 = I^2 r t$. Полное количество теплоты

$$Q = Q_1 + Q_2 = I^2 (R + r) t = \frac{\mathcal{E}^2 t}{R + r} = 1728 \text{ Дж.}$$

Задача 2. Разность потенциалов в сети зарядной станции равна 20 В. Внутреннее сопротивление аккумулятора, поставленного на зарядку, равно 0,8 Ом; в начальный момент времени его остаточная ЭДС равна 12 В. Какая мощность будет расходоваться станцией на зарядку аккумулятора при этих условиях? Какая часть этой мощности будет расходоваться на нагревание аккумулятора?

Решение. При зарядке аккумулятора зарядное устройство и аккумулятор соединены разноимёнными полюсами навстречу друг другу. Сила тока, идущего через аккумулятор, $I = (U - \mathcal{E})/R$. Мощность, расходуемая станцией:

$$P_1 = UI = U(U - \mathcal{E})/R = 200 \text{ Вт.}$$

Мощность, расходуемая на нагревание аккумулятора:

$$P_2 = I^2 R = \left(\frac{U - \mathcal{E}}{R} \right)^2 R = 80 \text{ Вт.}$$

Тогда $P_2/P_1 = 0,4$.

Задача 3. При подключении вольтметра сопротивлением $R_V = 200$ Ом непосредственно к зажимам источника он показывает $U = 20$ В. Если же этот источник замкнуть на резистор сопротивлением $R = 8$ Ом, то сила тока в цепи $I_2 = 0,5$ А. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление источника.

Решение. По закону Ома для полной цепи в первом случае сила тока $I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_V + r}$, во втором случае $I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$. Показания вольтметра — падение

напряжения на его внутреннем сопротивлении, т. е. $U = I_1 R_V$. Из соотношения $I_1(R_V + r) = I_2(R + r)$ найдём внутреннее сопротивление источника:

$$r = \frac{I_1 R_V - I_2 R}{I_2 - I_1} = \frac{U - I_2 R}{I_2 - \frac{U}{R_V}} = \frac{(U - I_2 R) R_V}{I_2 R_V - U} = 40 \text{ Ом.}$$

Для ЭДС источника запишем: $\mathcal{E} = I_2(R + r) = 24 \text{ В.}$

Задача 4. Определите силу тока короткого замыкания для источника, который при силе тока в цепи $I_1 = 10 \text{ А}$ имеет полезную мощность $P_1 = 500 \text{ Вт}$, а при силе тока $I_2 = 5 \text{ А}$ — мощность $P_2 = 375 \text{ Вт}$.

Решение. Сила тока короткого замыкания $I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r}$. Полезная мощность $P = IU$, где U — напряжение на зажимах источника, или падение напряжения на внешнем участке цепи. Напряжения на зажимах источника в первом и во втором случаях

$$U_1 = \frac{P_1}{I_1} = \mathcal{E} - I_1 r, \quad U_2 = \frac{P_2}{I_2} = \mathcal{E} - I_2 r.$$

Вычтем почленно из первого выражения второе:

$$\frac{P_1}{I_1} - \frac{P_2}{I_2} = (\mathcal{E} - I_1 r) - (\mathcal{E} - I_2 r) = (I_2 - I_1) r,$$

откуда определим $r = \frac{P_1 I_2 - P_2 I_1}{I_1 I_2 (I_2 - I_1)} = 5 \text{ Ом.}$

ЭДС источника тока

$$\mathcal{E} = U_1 + I_1 r = \frac{P_1}{I_1} + \frac{I_1 (P_1 I_2 - P_2 I_1)}{I_1 I_2 (I_2 - I_1)} = \frac{P_1}{I_1} + \frac{P_1 I_2 - P_2 I_1}{I_2 (I_2 - I_1)} = 100 \text{ В.}$$

Окончательно для силы тока короткого замыкания $I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r} = 20 \text{ А.}$

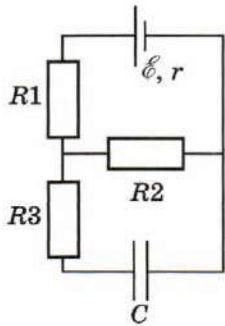


Рис. 15.12

Задача 5. Конденсатор ёмкостью 2 мкФ включён в цепь (рис. 15.12), содержащую три резистора и источник постоянного тока с ЭДС $3,6 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением 1 Ом . Сопротивления резисторов $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 7 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$. Чему равен заряд на правой обкладке конденсатора?

Решение. Участок цепи, в котором находится конденсатор, разомкнут, и ток через резистор R_3 не идёт.

Разность потенциалов между пластинами конденсатора равна падению напряжения на резисторе R_2 : $U = IR_2$.

Сила тока, идущего по цепи, согласно закону Ома рав-

$$\text{на } I = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + R_1 + r}.$$

Тогда

$$U = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + R_1 + r} R_2.$$

Заряд на обкладках конденсатора $q = CU = C \frac{\mathcal{E}}{R_2 + R_1 + r} R_2 = 4,2 \cdot 10^{-6}$ Кл.

На правой обкладке конденсатора накопится отрицательный заряд, так как она подключена к отрицательному полюсу источника.

Задача 6. Определите параметры источника тока, если известно, что максимальная мощность, равная 40 Вт, выделяется при подключении резистора сопротивлением 10 Ом.

Решение. Максимальная мощность выделяется при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений, следовательно, $R = r = 10$ Ом.

Мощность определяется формулой $P = I^2 R$, или с учётом закона Ома:

$$P_{\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{(R+r)^2} R = \frac{\mathcal{E}^2}{4R}.$$

Тогда ЭДС источника

$$\mathcal{E} = 2\sqrt{RP_{\max}} = 40 \text{ В.}$$



Задачи для самостоятельного решения

1. За некоторый промежуток времени электрическая плитка, включённая в сеть с постоянным напряжением, выделила количество теплоты Q . Какое количество теплоты выделит за то же время две такие плитки, включённые в ту же сеть последовательно? параллельно? Изменение сопротивления спирали в зависимости от температуры не учитывать.

2. Чему равно напряжение на клеммах гальванического элемента с ЭДС, равной \mathcal{E} , если цепь разомкнута?

3. Чему равна сила тока при коротком замыкании аккумулятора с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,01$ Ом?

4. Батарейка для карманного фонаря замкнута на резистор переменного сопротивления. При сопротивлении резистора, равном 1,65 Ом, напряжение на нём равно 3,30 В, а при сопротивлении, равном 3,50 Ом, напряжение равно 3,50 В. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление батарейки.

5. Источники тока с ЭДС 4,50 В и 1,50 В и внутренними сопротивлениями 1,50 Ом и 0,50 Ом, соединённые, как показано на рисунке 15.13, питают лампу от карманного фонаря. Какую мощность потребляет лампа, если известно, что сопротивление её нити в нагретом состоянии равно 23 Ом?

6. Замкнутая цепь питается от источника с ЭДС $\mathcal{E} = 6$ В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом. Постройте графики зависимости силы тока в цепи, напряжения на зажимах источника и мощности от сопротивления внешнего участка.

7. Два элемента, имеющие одинаковые ЭДС по 4,1 В и одинаковые внутренние сопротивления по 4 Ом, соединены одноимёнными полюсами, от которых сделаны выводы, так что получилась батарейка. Какую ЭДС и какое внутреннее сопротивление должен иметь элемент, которым можно было бы заменить такую батарейку?

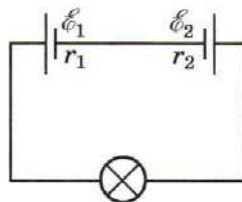


Рис. 15.13

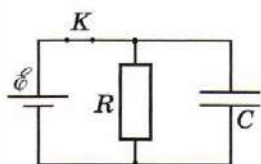


С1. Резисторы поочерёдно подключают к источнику постоянного тока. Сопротивления резисторов равны соответственно 3 Ом и 12 Ом. Мощность тока в резисторах одинакова. Чему равно внутреннее сопротивление источника тока?

С2. ЭДС источника постоянного тока $\mathcal{E} = 2$ В, а его внутреннее сопротивление $r = 1$ Ом. Мощность тока в резисторе, подключённом к источнику, $P_0 = 0,75$ Вт. Чему равна сила тока в цепи?

С3. Электрическая цепь состоит из источника тока и реостата. ЭДС источника 6 В, его внутреннее сопротивление $r = 2$ Ом. Сопротивление реостата можно изменять в пределах от 1 до 5 Ом. Чему равна максимальная мощность, выделяемая на реостате?

С4. К однородному медному цилиндрическому проводнику длиной 10 м приложили разность потенциалов 1 В. Определите промежуток времени, в течение которого температура проводника повысится на 10 К. Изменением сопротивления проводника и рассеянием тепла при его нагревании можно пренебречь. Плотность меди 8900 кг/м^3 , удельное сопротивление меди $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, удельная теплоёмкость меди $380 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.



С5. В электрической схеме, показанной на рисунке, ключ K замкнут. Заряд конденсатора $q = 2 \text{ мкКл}$, ЭДС батарейки $\mathcal{E} = 24$ В, её внутреннее сопротивление $r = 5$ Ом, сопротивление резистора $R = 25$ Ом. Определите количество теплоты, которая выделяется на резисторе после замыкания ключа K в результате разрядки конденсатора. Потерями на излучение можно пренебречь.



ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 15 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.



«Источники постоянного тока и их применение»

1. Первые источники тока — химические источники.
2. Фотоэлектрический эффект. Фотоэлементы.
3. Термоэлектрический эффект. Термоэлементы.
4. Применение источников постоянного тока в современной технике.



«Экспериментальная проверка закона Ома для полной цепи»

«Создание экспериментальной установки для исследования тепловых действий тока»

«Обоснование общего закона сохранения энергии на основе исследований тепловых действий тока»

ГЛАВА 16 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

В этой главе вы познакомитесь с физическими процессами, обуславливающими протекание тока в различных средах.



§ 108

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ. ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Как движутся электроны в металлическом проводнике, когда в нём нет электрического поля?

Как изменяется движение электронов, когда к металлическому проводнику прикладывают напряжение?

Электрический ток проводят твёрдые, жидкие и газообразные тела. Чем эти проводники отличаются друг от друга?

Мы познакомились с электрическим током в металлических проводниках и с установленной экспериментально вольт-амперной характеристикой этих проводников — законом Ома.

Наряду с металлами хорошими проводниками, т. е. веществами с большим количеством свободных заряженных частиц, являются водные растворы или расплавы электролитов и ионизованный газ — плазма. Эти проводники широко используются в технике.

В вакуумных электронных приборах электрический ток образуют потоки электронов.

Металлические проводники находят самое широкое применение в передаче электроэнергии от источников тока к потребителям. Кроме того, эти проводники используются в электродвигателях и генераторах, электронагревательных приборах и т. д.

ИНТЕРЕСНО

Кроме *проводников* и *диэлектриков* (веществ со сравнительно небольшим количеством свободных заряженных частиц), имеется группа веществ, проводимость которых занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Эти вещества не настолько хорошо проводят электричество, чтобы их назвать проводниками, но и не настолько плохо, чтобы их отнести к диэлектрикам. Поэтому они получили название *полупроводников*.

Долгое время полупроводники не играли заметной практической роли. В электротехнике и радиотехнике применяли исключительно различные проводники и диэлектрики. Положение существенно изменилось, когда сначала была предсказана теоретически, а затем обнаружена и изучена легкоосуществимая возможность управления электрической проводимостью полупроводников.

Ещё раз подчеркнём, что нет универсального носителя тока. В таблице приведены носители тока в различных средах.

Среда	Носители тока
Металл	Свободные электроны



Среда	Носители тока
Электролит	Положительные и отрицательные ионы
Газ	Ионы и электроны
Вакуум	Электроны
Полупроводник	Свободные электроны и дырки

Электронная проводимость металлов. Начнём с металлических проводников. Вольт-амперная характеристика этих проводников нам известна, но пока ничего не говорилось о её объяснении с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Важно

Носителями свободных зарядов в металлах являются электроны. Их концентрация велика — порядка 10^{28} $1/\text{м}^3$.



Л. И. Мандельштам
(1879—1944)

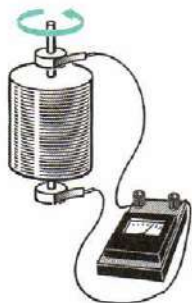


Рис. 16.1

Эти электроны участвуют в беспорядочном тепловом движении. Под действием электрического поля они начинают перемещаться упорядоченно со средней скоростью порядка 10^{-4} м/с.

Экспериментальное доказательство существования свободных электронов в металлах. Экспериментальное доказательство того, что проводимость металлов обусловлена движением свободных электронов, было дано в опытах Мандельштама и Папалекси (1913), Стюарта и Толмена (1916). Схема этих опытов такова.

На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга (рис. 16.1). К концам дисков при помощи скользящих контактов подключают гальванометр.

Катушку приводят в быстрое вращение, а затем резко останавливают. После резкой остановки катушки свободные заряженные частицы некоторое время движутся относительно проводника по инерции, и, следовательно, в катушке возникает электрический ток. Ток существует незначительное время, так как из-за сопротивления проводника заряженные частицы тормозятся и упорядоченное движение частиц, образующее ток, прекращается.

Направление тока в этом опыте говорит о том, что он создаётся движением отрицательно заряженных частиц. Переносимый при этом заряд пропорционален отношению заряда частиц, создающих ток, к их массе, т. е. $|q|/m$. Поэтому, измеряя заряд, проходящий через гальванометр

за время существования тока в цепи, удалось определить это отношение. Оно оказалось равным $1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. Эта величина совпадала с отношением заряда электрона к его массе e/m , найденным ранее из других опытов.



Движение электронов в металле. Свободные электроны в металле движутся хаотично. При подключении проводника к источнику тока в нём создаётся электрическое поле, и на электроны начинает действовать кулоновская сила $\vec{F} = q_e \vec{E}$. Под действием этой силы электроны начинают двигаться направленно, т. е. на хаотичное движение электронов накладывается направленное движение с ускорением $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m_e}$. Скорость направленного движения увеличивается в течение некоторого времени t_0 до тех пор, пока не произойдёт столкновение электронов с ионами кристаллической решётки. При этом электроны теряют направление движения, а затем опять начинают двигаться направленно. Таким образом, скорость направленного движения электрона изменяется от нуля до некоторого максимального значения, равного $\frac{q_e E t_0}{m_e}$. В результате средняя скорость упорядоченного движения электронов оказывается равной $\frac{q_e E t_0}{m_e 2}$, т. е. пропорциональной напряжённости

электрического поля в проводнике: $v \sim E$ и, следовательно, разности потенциалов на концах проводника, так как $E = \frac{U}{l}$, где l — длина проводника.



Выведите выражение для удельного сопротивления металла, используя формулу (15.2) (с. 333) и выражение для средней скорости электронов.

Важно

Сила тока в проводнике пропорциональна скорости упорядоченного движения частиц (см. формулу (15.2)). Поэтому можем сказать, что сила тока пропорциональна разности потенциалов на концах проводника: $I \sim U$.

В этом состоит *качественное объяснение закона Ома* на основе электронной теории проводимости металлов.

Построить удовлетворительную количественную теорию движения электронов в металле на основе законов классической механики невозможно. Дело в том, что условия движения электронов в металле таковы, что классическая механика Ньютона неприменима для описания этого движения. Этот факт подтверждает, например, зависимость сопротивления от температуры. Согласно классической теории металлов, в которой движение электронов рассматривается на основе второго закона Ньютона, сопротивление проводника пропорционально \sqrt{T} , эксперимент же показывает линейную зависимость сопротивления от температуры.

Интересно

Проводимость металлов. Движение электронов в металле

Найти



1. Чем отличаются проводники от полупроводников?
2. Катушка (см. рис. 16.1) вращалась по часовой стрелке, а затем была резко заторможена. Каково направление электрического тока в катушке в момент торможения?
3. Что определяет скорость упорядоченного движения электронов в металле?
4. Какие частицы находятся в узлах кристаллической решётки металла?



§ 109

ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Вспомните, какую физическую величину называют сопротивлением. От чего и как зависит сопротивление металлического проводника?

Различные вещества имеют разные удельные сопротивления (см. § 101). Зависит ли сопротивление от состояния проводника? от его температуры? Ответ должен дать опыт.

Если пропустить ток от аккумулятора через стальную спираль, а затем начать нагревать её в пламени горелки, то амперметр покажет уменьшение силы тока. Это означает, что с изменением температуры сопротивление проводника меняется.

Если при температуре, равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, сопротивление проводника равно R_0 , а при температуре t оно равно R , то относительное изменение сопротивления, как показывает опыт, прямо пропорционально изменению температуры t :

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha t. \quad (16.1)$$

Коэффициент пропорциональности α называют температурным коэффициентом сопротивления.

ЗАПОМНИ

Температурный коэффициент сопротивления — величина, равная отношению относительного изменения сопротивления проводника к изменению его температуры.



Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры.

ВАЖНО

Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на 1 K (на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для всех металлических проводников коэффициент $\alpha > 0$ и незначительно меняется с изменением температуры. Если интервал изменения температуры невелик, то температурный коэффициент можно считать постоянным и равным его среднему значению на этом интервале температур. У чистых металлов $\alpha \approx \frac{1}{273}\text{ K}^{-1}$.

ВАЖНО

У растворов электролитов сопротивление с ростом температуры не увеличивается, а уменьшается. Для них $\alpha < 0$. Например, для 10%-ного раствора поваренной соли $\alpha = -0,02\text{ K}^{-1}$.



Обсудите с соседом по парте вопрос о различии характеров зависимости сопротивления металлов и растворов электролитов от температуры. Чем это различие определяется?

При нагревании проводника его геометрические размеры меняются незначительно. Сопротивление проводника меняется в основном за счёт изменения его удельного сопротивления. Можно найти зависимость этого удельного сопро-

тивления от температуры, если в формулу (16.1) подставить значения

$R = \rho \frac{l}{S}$ и $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$. Вычисления приводят к следующему результату:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \text{ или } \rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (16.2)$$

где ΔT — изменение абсолютной температуры.

Важно

Так как α мало меняется при изменении температуры проводника, то можно считать, что удельное сопротивление проводника линейно зависит от температуры (рис. 16.2).

Увеличение сопротивления можно объяснить тем, что при повышении температуры увеличивается амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решётки, поэтому свободные электроны сталкиваются с ними чаще, теряя при этом направленность движения. Хотя коэффициент α довольно мал, учёт зависимости сопротивления от температуры при расчёте параметров нагревательных приборов совершенно необходим. Так, сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания увеличивается при прохождении по ней тока за счёт нагревания более чем в 10 раз.

У некоторых сплавов, например у сплава меди с никелем (константан), температурный коэффициент сопротивления очень мал: $\alpha \approx 10^{-5} \text{ К}^{-1}$; удельное сопротивление константана велико: $\rho \approx 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Такие сплавы используют для изготовления эталонных резисторов и добавочных резисторов к измерительным приборам, т. е. в тех случаях, когда требуется, чтобы сопротивление заметно не менялось при колебаниях температуры.

Существуют и такие металлы, например никель, олово, платина и др., температурный коэффициент которых существенно больше: $\alpha \approx 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Зависимость их сопротивления от температуры можно использовать для измерения самой температуры, что и осуществляется в *термометрах сопротивления*.

На зависимости сопротивления от температуры основаны и приборы, изготовленные из полупроводниковых материалов, — *термисторы*. Для них характерны большой температурный коэффициент сопротивления (в десятки раз превышающий этот коэффициент у металлов), стабильность характеристик во времени. Номинальное сопротивление термисторов значительно выше, чем у металлических термометров сопротивления, оно обычно составляет 1, 2, 5, 10, 15 и 30 кОм.

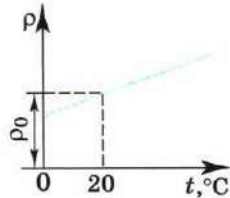


Рис. 16.2

Обычно в качестве основного рабочего элемента термометра сопротивления берут платиновую проволоку, зависимость сопротивления которой от температуры хорошо известна. Об изменениях температуры судят по изменению сопротивления проволоки, которое можно измерить. Такие термометры позволяют измерять очень низкие и очень высокие температуры, когда обычные жидкостные термометры непригодны.

ИНТЕРЕСНО

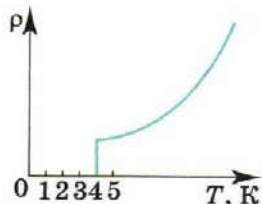


Рис. 16.3

Сверхпроводимость. Сопротивление металлов уменьшается с уменьшением температуры. Что произойдет при стремлении температуры к абсолютному нулю?

В 1911 г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес открыл замечательное явление — *сверхпроводимость*. Он обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии её сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,1 К очень резко падает до нуля (рис. 16.3).

Запомни Явление падения до нуля сопротивления проводника при критической температуре называется **сверхпроводимостью**.

Открытие Камерлинг-Оннеса, за которое в 1913 г. ему была присуждена Нобелевская премия, повлекло за собой исследования свойств веществ при низких температурах. Позже было открыто много других сверхпроводников.

Сверхпроводимость многих металлов и сплавов наблюдается при очень низких температурах — начиная примерно с 25 К. В справочных таблицах приводятся температуры перехода в сверхпроводящее состояние некоторых веществ.

Запомни Температура, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, называется **критической температурой**.

Критическая температура зависит не только от химического состава вещества, но и от структуры самого кристалла. Например, серое олово имеет структуру алмаза с кубической кристаллической решёткой и является полупроводником, а белое олово обладает тетрагональной элементарной ячейкой и является серебристо-белым, мягким, пластичным металлом, способным при температуре, равной 3,72 К, переходить в сверхпроводящее состояние.

У веществ в сверхпроводящем состоянии были отмечены резкие аномалии магнитных, тепловых и ряда других свойств, так что правильное говорить не о сверхпроводящем состоянии, а об особом, наблюдаемом при низких температурах состоянии вещества.

Если в кольцевом проводнике, находящемся в сверхпроводящем состоянии, создать ток, а затем удалить источник тока, то сила этого тока не меняется сколь угодно долго. В обычном же (несверхпроводящем) проводнике электрический ток в этом случае прекращается.

Подумайте, что останавливает направленное движение электронов в проводнике.

Сверхпроводники находят широкое применение. Так, сооружают мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые создают магнитное поле на протяжении длительных интервалов времени без затрат энергии. Ведь *выделения тепла в сверхпроводящей обмотке не происходит*.

Однако получить сколь угодно сильное магнитное поле с помощью сверхпроводящего магнита нельзя. Очень сильное магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние. Такое поле может быть создано и током в самом сверхпроводнике. Поэтому для каждого проводника в сверхпроводящем состоянии существует критическое значение силы тока, превысить которое, не нарушая сверхпроводящего состояния, нельзя.



Сверхпроводящие магниты используются в ускорителях элементарных частиц, магнитогидродинамических генераторах, преобразующих механическую энергию струи раскалённого ионизованного газа, движущегося в магнитном поле, в электрическую энергию.

ИНТЕРЕСНО

Объяснение сверхпроводимости возможно только на основе квантовой теории. Оно было дано лишь в 1957 г. американскими учёными Дж. Бардиным, Л. Купером, Дж. Шриффером и советским учёным, академиком Н. Н. Боголюбовым.

В 1986 г. была открыта высокотемпературная сверхпроводимость. Получены сложные оксидные соединения лантана, бария и других элементов (керамики) с температурой перехода в сверхпроводящее состояние около 100 К. Это выше температуры кипения жидкого азота при атмосферном давлении (77 К).

Высокотемпературная сверхпроводимость в недалёком будущем приведёт наверняка к новой технической революции во всей электротехнике, радиотехнике, конструировании ЭВМ. Сейчас прогресс в этой области тормозится необходимостью охлаждения проводников до температур кипения дорогого газа — гелия.

Физический механизм сверхпроводимости довольно сложен. Очень упрощённо его можно объяснить так: электроны объединяются в правильную шеренгу и движутся, не сталкиваясь с кристаллической решёткой, состоящей из ионов. Это движение существенно отличается от обычного теплового движения, при котором свободный электрон движется хаотично.

ИНТЕРЕСНО

Надо надеяться, что удастся создать сверхпроводники и при комнатной температуре. Генераторы и электродвигатели станут исключительно компактными (уменьшатся в несколько раз) и экономичными. Электроэнергию можно будет передавать на любые расстояния без потерь и аккумулировать в простых устройствах.

Сопrotивление. Удельное сопротивление. Сверхпроводимость

Найти

- ?
1. Когда электрическая лампочка потребляет большую мощность: сразу после включения её в сеть или спустя несколько минут?
 2. Если бы сопротивление спирали электроплитки не менялось с температурой, то её длина при номинальной мощности должна быть большей или меньшей?
 3. Каковы главные технические трудности использования сверхпроводников на практике?
 4. Как убедиться в том, что в кольцевом сверхпроводнике действительно устанавливается неизменный ток?



A1. Сопротивление медного провода, с помощью которого электроприбор подключается к источнику тока, не должно превышать 8 Ом. На каком максимальном расстоянии от источника можно установить электроприбор, если диаметр провода 2 мм? Удельное сопротивление меди $1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

1) 1500 м 2) 15 м 3) 150 м 4) 750 м

A2. На сколько градусов нагрелась вольфрамовая спираль лампы, если её сопротивление увеличилось на 46%?

1) 20 °C 2) 50 °C 3) 100 °C 4) 1000 °C



**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ.
СОБСТВЕННАЯ И ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТИ**

Почему сопротивление проводников зависит от температуры?
Какие явления наблюдаются в состоянии сверхпроводимости?

Запомним

Полупроводники — вещества, удельное сопротивление которых имеет промежуточное значение между удельным сопротивлением металлов (10^{-6} — 10^{-8} Ом · м) и удельным сопротивлением диэлектриков (10^8 — 10^{13} Ом · м).

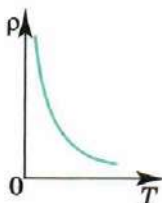


Рис. 16.4

Отличие проводников от полупроводников особенно проявляется при анализе зависимости их электропроводимости от температуры. Исследования показывают, что у ряда элементов (кремний, германий, селен, индий, мышьяк и др.) и соединений (PbS, CdS, GaAs и др.) удельное сопротивление с увеличением температуры не растёт, как у металлов (см. рис. 16.3), а, наоборот, чрезвычайно резко уменьшается (рис. 16.4). Такое свойство присуще именно *полупроводникам*.

Из графика, изображённого на рисунке, видно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление полупроводников очень велико. Это означает, что при низких температурах полупроводник ведёт себя как диэлектрик. По мере повышения температуры его удельное сопротивление быстро уменьшается.



Строение полупроводников. Для того чтобы включить транзисторный приёмник, знать ничего не надо. Но чтобы его создать, надо было знать очень много и обладать незаурядным талантом. Понять же в общих чертах, как работает транзистор, не так уж и трудно. Сначала необходимо познакомиться с механизмом проводимости в полупроводниках. А для этого придётся вникнуть в *природу связей*, удерживающих атомы полупроводникового кристалла друг возле друга.

Для примера рассмотрим кристалл кремния.

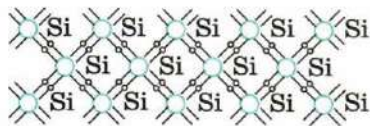


Рис. 16.5

Кремний — четырёхвалентный элемент. Это означает, что во внешней оболочке его атома имеется четыре электрона, сравнительно слабо связанные с ядром. Число ближайших соседей каждого атома кремния также равно четырём. Схема структуры кристалла кремния изображена на рисунке 16.5.

Взаимодействие пары соседних атомов осуществляется с помощью парноэлектронной связи, называемой *ковалентной связью*. В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону, электроны отделяются от атома, которому они принадлежат (коллективируются кристаллом), и при своём движении большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы кремния друг возле друга.

Не надо думать, что коллективированная пара электронов принадлежит лишь двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними, и любой валентный электрон может двигаться по одной из них. Дойдя до сосед-

него атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла. Валентные электроны принадлежат всему кристаллу.

Парноэлектронные связи в кристалле кремния достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому кремний при низкой температуре не проводит электрический ток. Участвующие в связи атомов валентные электроны являются как бы цементирующим раствором, удерживающим кристаллическую решётку, и внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение. Аналогичное строение имеет кристалл германия.

Электронная проводимость. При нагревании кремния кинетическая энергия частиц повышается, и наступает разрыв отдельных связей. Некоторые электроны покидают свои «проторённые пути» и становятся свободными, подобно электронам в металле. В электрическом поле они перемещаются между узлами решётки, создавая электрический ток (рис. 16.6).

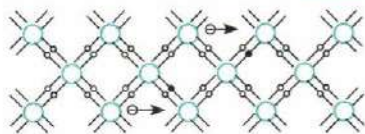


Рис. 16.6

Запомни Проводимость полупроводников, обусловленную наличием у них свободных электронов, называют **электронной проводимостью**.

При повышении температуры число разорванных связей, а значит, и свободных электронов увеличивается. При нагревании от 300 до 700 К число свободных носителей заряда увеличивается от 10^{17} до 10^{24} $1/\text{м}^3$. Это приводит к уменьшению сопротивления.

Дырочная проводимость.

Запомни При разрыве связи между атомами полупроводника образуется вакантное место с недостающим электроном, которое называют **дыркой**.

В дырке имеется избыточный положительный заряд по сравнению с остальными, не разорванными связями (см. рис. 16.6).

Положение дырки в кристалле не является неизменным. Непрерывно происходит следующий процесс. Один из электронов, обеспечивающих связь атомов, перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает здесь парноэлектронную связь, а там, откуда перескочил этот электрон, образуется новая дырка. Таким образом, дырка может перемещаться по всему кристаллу.

Если напряжённость электрического поля в образце равна нулю, то перемещение дырок происходит беспорядочно и поэтому не создаёт электрического тока. При наличии электрического поля возникает упорядоченное перемещение дырок.

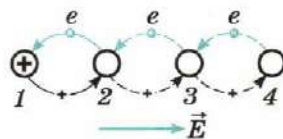


Рис. 16.7

Важно Направление движения дырок противоположно направлению движения электронов (рис. 16.7).

В отсутствие внешнего поля на один свободный электрон (-) приходится одна дырка (+). При наложении поля свободный электрон смещается



против напряжённости поля. В этом направлении перемещается также один из связанных электронов. Это выглядит как перемещение дырки в направлении поля.

Итак, в полупроводниках имеются носители заряда двух типов: электроны и дырки.

ЗАПОМНИ Проводимость, обусловленная движением дырок, называется **дырочной проводимостью** полупроводников.

Мы рассмотрели механизм проводимости чистых полупроводников.

ЗАПОМНИ Проводимость чистых полупроводников называют **собственной проводимостью**.

Примесная проводимость. Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных электронов: например, в германии при комнатной температуре $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В то же время число атомов германия в 1 см^3 порядка 10^{23} .

Таким образом, число свободных электронов составляет примерно одну десятиллиардную часть от общего числа атомов.

Проводимость полупроводников можно существенно увеличить, внедряя в них примесь. В этом случае наряду с собственной проводимостью возникает дополнительная — *примесная проводимость*.

ЗАПОМНИ Проводимость проводников, обусловленная внесением в их кристаллические решётки примесей (атомов посторонних химических элементов), называется **примесной проводимостью**.

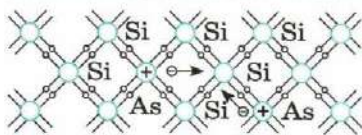


Рис. 16.8

Донорные примеси. Добавим в кремний небольшое количество мышьяка. Атомы мышьяка имеют пять валентных электронов. Четыре из них участвуют в создании ковалентной связи данного атома с окружающими атомами кремния. Пятый валентный электрон оказывается слабо связанным с атомом. Он легко покидает атом мышьяка и становится свободным (рис. 16.8).

При добавлении одной десятиллионной доли атомов мышьяка концентрация свободных электронов становится равной 10^{16} см^{-3} . Это в тысячу раз больше концентрации свободных электронов в чистом полупроводнике.

ЗАПОМНИ Примеси, легко отдающие электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов, называют **донорными** (отдающими) **примесями**.

Свободные электроны перемещаются по полупроводнику подобно тому, как перемещаются свободные электроны в металле.

ЗАПОМНИ Полупроводники, имеющие донорные примеси и потому обладающие большим числом электронов (по сравнению с числом дырок), называются **полупроводниками n-типа** (от английского слова negative — отрицательный).



Важно В полупроводнике *n*-типа электроны являются *основными* носителями заряда, а дырки — *неосновными*.

Акцепторные примеси. Если в качестве примеси использовать индий, атомы которого трёхвалентны, то характер проводимости полупроводника меняется. Для образования нормальных парноэлектронных связей с соседями атому индия недостаёт одного электрона, который он берёт у соседнего атома кристалла. В результате образуется дырка. Число дырок в кристалле равно числу атомов примеси (рис. 16.9).

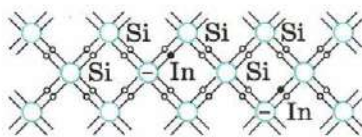


Рис. 16.9

Запомни Примеси в полупроводнике, создающие дополнительную концентрацию дырок, называют **акцепторными** (принимающими) **примесями**.

При наличии электрического поля дырки перемещаются направленно и возникает электрический ток, обусловленный дырочной проводимостью.

Запомни Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости над электронной называют **полупроводниками *p*-типа** (от английского слова positive — положительный).

Важно *Основными* носителями заряда в полупроводнике *p*-типа являются дырки, а *неосновными* — электроны.

Изменяя концентрацию примеси, можно значительно изменять число носителей заряда того или иного знака. Благодаря этому можно создавать полупроводники с преимущественной концентрацией одного из носителей тока электронов или дырок. Эта особенность полупроводников открывает широкие возможности для их практического применения.



Обсудите с одноклассником, как влияет собственная проводимость на силу тока в проводнике с одним из типов примесной проводимости.

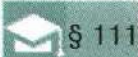
Проводимость полупроводников. Примесная проводимость

Найти



1. Какую связь называют ковалентной?
2. В чём состоит различие зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры?
3. Какие подвижные носители зарядов имеются в чистом полупроводнике?
4. Что происходит при встрече электрона с дыркой?
5. Почему сопротивление полупроводников сильно зависит от наличия примесей?
6. Какие носители заряда являются основными в полупроводнике с акцепторной примесью?
7. Какую примесь надо ввести в полупроводник, чтобы получить полупроводник *n*-типа?





§ 111

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК ЧЕРЕЗ КОНТАКТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С РАЗНЫМ ТИПОМ ПРОВОДИМОСТИ. ТРАНЗИСТОРЫ

Какие носители тока в полупроводнике являются основными, а какие — основными?

Чем отличается примесная проводимость от собственной проводимости?

Наиболее интересные явления происходят при контакте полупроводников n - и p -типов. Эти явления используются в большинстве полупроводниковых приборов.



p — n -Переход. Рассмотрим, что будет происходить, если привести в контакт два одинаковых полупроводника, но с разным типом проводимости: слева полупроводник n -типа, а справа полупроводник p -типа (рис. 16.10).

Запомни

Контакт двух полупроводников с разным типом проводимости называют **p — n -** или **n — p -переходом**.

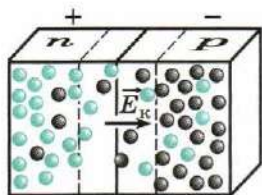


Рис. 16.10

Электроны на рисунке изображены голубыми кружочками, дырки — серыми.

В левой части много свободных электронов, а в правой их концентрация очень мала. В правой части, наоборот, много дырок, т. е. вакантных мест для электронов. Как только полупроводники приводят в контакт, начинается диффузия электронов из области с проводимостью n -типа в область с проводимостью p -типа и соответственно переход дырок в обратном направлении. Перешедшие в полупроводник p -типа электроны занимают свободные места, происходит процесс рекомбинации электронов и дырок, а попавшие в полупроводник n -типа дырки также исчезают благодаря электронам, занимающим вакантное место. Таким образом, вблизи границы раздела полупроводников с разным типом проводимости возникает слой, обеднённый носителями тока (его называют *контактным* слоем). Этот слой фактически представляет собой диэлектрик, его сопротивление очень велико. При этом полупроводник n -типа заряжается положительно, а полупроводник p -типа — отрицательно. В зоне контакта возникает стационарное электрическое поле напряжённостью E_k , препятствующее дальнейшей диффузии электронов и дырок.

Суммарное сопротивление приведённых в контакт полупроводников складывается из сопротивления полупроводника n -типа, p — n -перехода и полупроводника p -типа: $R = R_n + R_{pn} + R_p$. Так как сопротивления областей с n - и p -типами проводимости малы (там много носителей заряда — электронов и дырок), то суммарное сопротивление определяется в основном сопротивлением p — n -перехода: $R \approx R_{pn}$.



Объясните, почему полупроводник из одного и того же материала может иметь разный тип проводимости.

Объясните, почему полупроводник из одного и того же материала может иметь разный тип проводимости.

Суммарное сопротивление приведённых в контакт полупроводников складывается из сопротивления полупроводника n -типа, p — n -перехода и полупроводника p -типа: $R = R_n + R_{pn} + R_p$. Так как сопротивления областей с n - и p -типами проводимости малы (там много носителей заряда — электронов и дырок), то суммарное сопротивление определяется в основном сопротивлением p — n -перехода: $R \approx R_{pn}$.



Включим полупроводник с p — n -переходом в электрическую цепь так, чтобы потенциал полупроводника p -типа был положительным, а n -типа — отрицательным (рис. 16.11). В этом случае напряжённость внешнего поля будет направлена в сторону, противоположную напряжённости контактного слоя. Модуль суммарной напряжённости $E = E_k - E_{\text{внеш}}$. Так как поле, удерживающее носители тока, ослабевает, то у электронов уже достаточно энергии, чтобы его преодолеть.

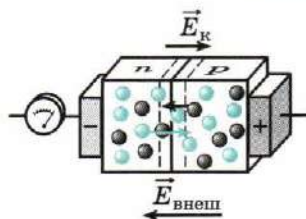


Рис. 16.11

Важно

Через переход пойдёт ток, при этом он будет создан основными носителями — из области с n -типом проводимости в область с p -типом проводимости идут электроны, а из области с p -типом в область с n -типом — дырки. В этом случае p — n -переход называется **прямым**.

Отметим, что электрический ток идёт во всей цепи: от положительного контакта через область p -типа от p — n -переходу, затем через область n -типа к отрицательному контакту (рис. 16.12). Проводимость всего образца велика, а сопротивление мало. Чем больше подаваемое на контакт напряжение, тем больше сила тока.

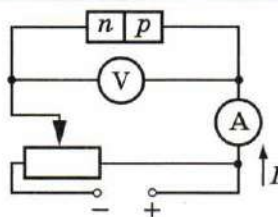


Рис. 16.12

Зависимость силы тока от разности потенциалов — вольт-амперная характеристика прямого перехода — изображена на рисунке 16.13 сплошной линией.

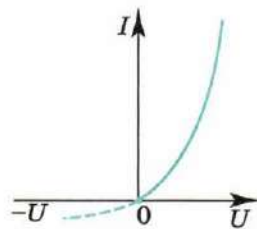


Рис. 16.13

Отметим, что изменение подаваемого напряжения приводит к резкому увеличению силы тока. Так, увеличение напряжения на 0,25 В может привести к увеличению силы тока в 20 000 раз.

При прямом переходе сопротивление запирающего слоя мало, и оно также зависит от подаваемого напряжения, с увеличением которого сопротивление уменьшается.

Изменим теперь полярность подключения батареи. В этом случае напряжённость внешнего и контактного полей направлены в одну сторону (рис. 16.14) и модуль суммарной напряжённости $E = E_k + E_{\text{внеш}}$. Внешнее поле оттягивает электроны и дырки от контактного слоя, в результате чего он расширяется. В связи с этим у электронов уже не хватает энергии для того, чтобы преодолеть этот слой. Теперь переход через контакт осуществляется неосновными носителями, число которых мало.

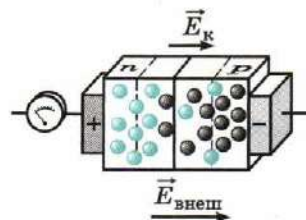


Рис. 16.14

Важно

Сопротивление контактного слоя очень велико. Ток через p — n -переход не идёт. Образуется так называемый **запирающий** слой. Такой переход называется **обратным**.

Вольт-амперная характеристика обратного перехода изображена на рисунке 16.13 штриховой линией.



$p-n$ -Переход по отношению к току оказывается несимметричным: в прямом направлении сопротивление перехода значительно меньше, чем в обратном. Таким образом, $p-n$ -переход можно использовать для выпрямления электрического тока.

ЗАПОМНИ

Устройство, содержащее $p-n$ -переход и способное пропускать ток в одном направлении и не пропускать в противоположном, называется **полупроводниковым диодом**.

Если на контакты полупроводникового диода подать переменное напряжение, то ток по цепи пойдёт только в одну сторону.

Полупроводниковые диоды изготавливают из германия, кремния, селена и других веществ.



Проведите под руководством учителя эксперимент. Соберите цепь, содержащую источник тока, реостат, амперметр, полупроводниковый диод и ключ. Замкните ключ. Измерьте силу тока. Разомкните ключ и подключите провода к другим полюсам источника тока. Замкните цепь и вновь измерьте силу тока. Сделайте выводы.

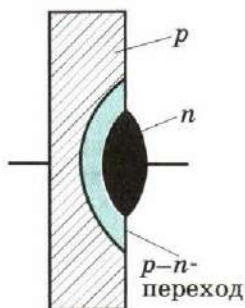


Рис. 16.15

Рассмотрим, как создают $p-n$ -переход, используя германий, обладающий проводимостью n -типа, с небольшой добавкой донорной примеси. Этот переход не удаётся получить путём механического соединения двух полупроводников с различными типами проводимости, так как при этом получается слишком большой зазор между полупроводниками. Толщина же $p-n$ -перехода

должна быть не больше межатомных расстояний, поэтому в одну из поверхностей образца вплавляют индий. Для создания полупроводникового диода полупроводник с примесью p -типа, содержащий атомы индия, нагревается до высокой температуры. Пары примеси n -типа (например, мышьяка) осаждаются на поверхность кристалла. Вследствие диффузии они внедряются в кристалл, и на поверхности кристалла с проводимостью p -типа образуется область с электронным типом проводимости (рис. 16.15).

Для предотвращения вредных воздействий воздуха и света кристалл германия помещают в герметичный металлический корпус.

ИНТЕРЕСНО

Полупроводниковые диоды применяют в детекторах приёмников для выделения сигналов низкой частоты, для защиты от неправильного подключения источника к цепи.

В светофорах используются специальные полупроводниковые диоды. При прямом подключении такого диода происходит активная рекомбинация электронов и дырок. При этом выделяется энергия в виде светового излучения.

Схематическое изображение диода приведено на рисунке 16.16. Полупроводниковые выпрямители обладают высокой надёжностью и имеют большой

срок службы. Однако они могут работать лишь в ограниченном интервале температур (от -70 до 125 °C).

Транзисторы. Ещё одно применение полупроводников с примесным типом проводимости — транзисторы — приборы, используемые для усиления электрических сигналов.

Рассмотрим один из видов транзисторов из германия или кремния с введёнными в них донорными и акцепторными примесями. Распределение примесей таково, что создаётся очень тонкая (толщиной порядка нескольких микрометров) прослойка полупроводника n -типа между двумя слоями полупроводника p -типа (рис. 16.17). Эту тонкую прослойку называют *основанием* или *базой*.

В кристалле образуются два p — n -перехода, прямые направления которых противоположны. Три вывода от областей с различными типами проводимости позволяют включать транзистор в схему, изображённую на рисунке 16.17. В данной схеме при подключении батареи $B1$ левый p — n -переход является *прямым*. Левый полупроводник с проводимостью p -типа называют *эмиттером*. Если бы не было правого p — n -перехода, в цепи эмиттер — база существовал бы ток, зависящий от напряжения источников (батареи $B1$ и источника переменного напряжения) и сопротивления цепи, включая малое сопротивление прямого перехода эмиттер — база.

Батарея $B2$ включена так, что правый n — p -переход в схеме (см. рис. 16.17) является *обратным*. Правая область с проводимостью p -типа называется *коллектором*. Если бы не было левого p — n -перехода, сила тока в цепи коллектора была бы близка к нулю, так как сопротивление обратного перехода очень велико. При существовании же тока в левом p — n -переходе появляется ток и в цепи коллектора, причём сила тока в коллекторе лишь немного меньше силы тока в эмиттере. (Если на эмиттер подано отрицательное напряжение, то левый p — n -переход будет обратным, и ток в цепи эмиттера и в цепи коллектора будет практически отсутствовать.)

Это объясняется следующим образом. При создании напряжения между эмиттером и базой основные носители полупроводника p -типа (дырки) проникают в базу, где они являются уже *неосновными носителями*. Поскольку толщина базы очень мала и число основных носителей (электронов) в ней

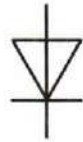


Рис. 16.16

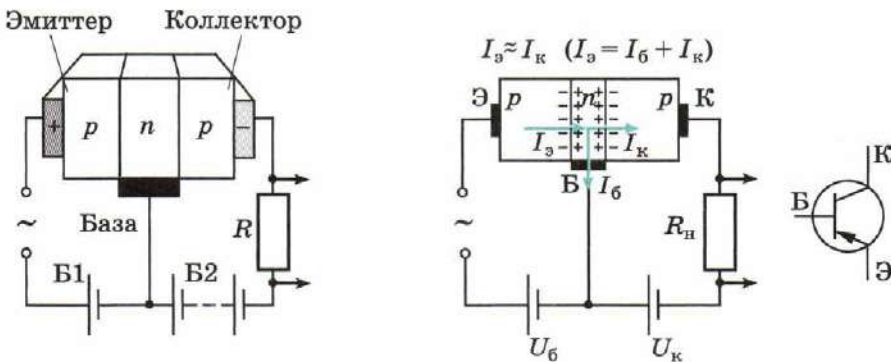


Рис. 16.17



невелико, попавшие в неё дырки почти не объединяются (не рекомбинируют) с электронами базы и проникают в коллектор за счёт диффузии. Правый $p-n$ -переход закрыт для основных носителей заряда базы — электронов, но не для дырок. В коллекторе дырки увлекаются электрическим полем и замыкают цепь. Сила тока, ответвляющегося в цепь эмиттера из базы, очень мала, так как площадь сечения базы в горизонтальной (см. рис. 16.17) плоскости много меньше сечения в вертикальной плоскости.

Сила тока в коллекторе, почти равная силе тока в эмиттере, изменяется вместе с током через эмиттер. Сопротивление резистора R мало влияет на ток в коллекторе, и это сопротивление можно сделать достаточно большим. Управляя током эмиттера с помощью источника переменного напряжения, включённого в его цепь, мы получим синхронное изменение напряжения на резисторе R .

При большом сопротивлении резистора изменение напряжения на нём может в десятки тысяч раз превышать изменение напряжения сигнала в цепи эмиттера. Это означает усиление напряжения. Поэтому на нагрузке R можно получить электрические сигналы, мощность которых во много раз превышает мощность, поступающую в цепь эмиттера.

Применение транзисторов. Современная электроника базируется на микросхемах и микропроцессорах, включающих в себя колоссальное число транзисторов.

ИНТЕРЕСНО Первая интегральная схема поступила в продажу в 1964 г. Она содержала шесть элементов — четыре транзистора и два резистора. Современные микросхемы содержат миллионы транзисторов.

Компьютеры, составленные из микросхем и микропроцессоров, фактически изменили окружающий человека мир. В настоящее время не существует ни одной области человеческой деятельности, где компью-

теры не служили бы активными помощниками человека. Например, в космических исследованиях или высокотехнологичных производствах работают микропроцессоры, уровень организации которых соответствует искусственному интеллекту.

Транзисторы (рис. 16.18, 16.19) получили чрезвычайно широкое распространение в современной технике. Они заменили электронные лампы в электрических цепях научной, промышленной и бытовой аппаратуры. Портативные радиоприёмники, в которых используются такие приборы, в обиходе называются транзисторами. Преимуществом транзисторов (так же как и полупроводниковых диодов) по сравнению с электронными лампами является

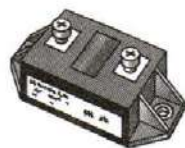
 $I \approx 0,1 \text{ A}$  $I = 10 \text{ A}$  $I = 50 \text{ A}$  $I \approx 400 \text{ A}$

Рис. 16.18

Рис. 16.19

прежде всего отсутствие накалённого катода, потребляющего значительную мощность и требующего времени для его разогрева. Кроме того, эти приборы в десятки и сотни раз меньше по размерам и массе, чем электронные лампы.

Полупроводниковый диод. Транзистор

Найти

- ?
1. Что происходит в контакте двух проводников n - и p -типов?
 2. Что такое запирающий слой?
 3. Какой переход называют прямым?
 4. Для чего служит полупроводниковый диод?
 5. Почему база транзистора должна быть узкой?
 6. Как надо включать в цепь транзистор, у которого база является полупроводником p -типа, а эмиттер и коллектор — полупроводниками n -типа?
 7. Почему сила тока в коллекторе почти равна силе тока в эмиттере?



A1. Выберите фамилию нашего соотечественника, получившего Нобелевскую премию за исследование полупроводников, использующихся в лазерах, средствах мобильной связи.

- 1) Басов 2) Прохоров 3) Гинзбург 4) Алфёров

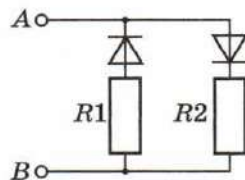
A2. Идеальный $p-n$ -переход присоединён через металлические контакты к источнику тока так, что к p -полупроводнику присоединена отрицательная клемма источника. Если током неосновных носителей зарядов пренебречь, то ток

- 1) в p -области перехода обеспечивается в основном движением дырок, в n -области — электронов
- 2) в p -области перехода обеспечивается в основном движением электронов, в n -области — дырок
- 3) в p -области и n -области перехода обеспечивается в равной степени движением дырок и электронов
- 4) в p -области и n -области перехода не идёт

C3. Чему примерно равна концентрация носителей заряда в полупроводнике p -типа, если он получен добавлением трёхвалентного металла в германий (число атомов примеси составляет 0,01% от числа атомов германия в кристалле). Собственной проводимостью германия можно пренебречь, плотность его считайте равной 5400 кг/м^3 . Молярная масса германия $0,0725 \text{ кг/моль}$.

C4. В цепи, изображённой на рисунке, сопротивление диодов в прямом направлении пренебрежимо мало, а в обратном многократно превышает сопротивление резисторов. При подключении к точке A положительного полюса, а к точке B отрицательного полюса батареи с ЭДС 12 В и пренебрежимо малым внутренним сопротивлением потребляемая мощность равна $7,2 \text{ Вт}$. При изменении полярности подключения батареи потребляемая мощность оказалась равной $14,4 \text{ Вт}$.

Укажите условия прохождения тока через диоды и резисторы в обоих случаях и определите сопротивление резисторов в этой цепи.





§ 112

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ.
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА**

Какое физическое явление называют постоянным током?
Каковы условия существования электрического тока?

До открытия уникальных свойств полупроводников в радиотехнике использовались исключительно электронные лампы.

Откачивая газ из сосуда (трубки), можно получить газ с очень малой концентрацией молекул.

Запомни

Состояние газа, при котором молекулы успевают пролететь от одной стенки сосуда к другой, ни разу не испытав соударений друг с другом, называют **вакуумом**.

Если в сосуд с вакуумом поместить два электрода и подключить их к источнику тока, то ток между электродами не пойдёт, так как в вакууме нет носителей заряда. Следовательно, для создания тока в трубке должен быть источник заряженных частиц.

Термоэлектронная эмиссия. Чаще всего действие такого источника заряженных частиц основано на свойстве тел, нагретых до высокой температуры, испускать электроны.

**Запомни**

Явление испускания электронов нагретыми металлами называется **термоэлектронной эмиссией**.

Это явление можно рассматривать как испарение электронов с поверхности металла. У многих твёрдых веществ термоэлектронная эмиссия начинается при температурах, при которых испарение самого вещества ещё не происходит. Такие вещества и используются для изготовления катодов.

Односторонняя проводимость. Диод. Явление термоэлектронной эмиссии приводит к тому, что нагретый металлический электрод, в отличие от холодного, непрерывно испускает электроны. Электроны образуют вокруг электрода *электронное облако*. Электрод заряжается положительно, и под влиянием электрического поля заряженного облака электроны из облака частично возвращаются на электрод.

В равновесном состоянии число электронов, покинувших электрод в секунду, равно числу электронов, возвратившихся на электрод за это время. Чем выше температура металла, тем выше плотность электронного облака.

При подключении электродов к источнику тока между ними возникает электрическое поле. Если положительный полюс источника тока соединён с холодным электродом (анодом), а отрицательный — с нагретым (катодом), то вектор напряжённости электрического поля направлен к нагретому электроду. Под действием этого поля электроны частично покидают электронное облако и движутся к холодному электроду. Электрическая цепь замыкается, и в ней устанавливается электрический ток. При противоположной полярности включения источника напряжённости поля направлена от нагретого электрода к холодному. Электрическое поле отталкивает электроны облака назад к нагретому электроду. Цепь оказывается разомкнутой.





Если в аноде электронной лампы сделать отверстие, то часть электронов, ускоренных электрическим полем, пролетит в это отверстие, образуя за анодом электронный пучок. Количеством электронов в пучке можно управлять, поместив между катодом и анодом дополнительный электрод и изменяя его потенциал.

Свойства электронных пучков и их применение. Испускаемые катодом потоки электронов, движущихся в вакууме, называют иногда *катодными лучами*.

Перечислим свойства электронных пучков (катодных лучей).

- 1) Электроны в пучке движутся по прямым линиям.
- 2) Электронный пучок, попадая на мишень, передаёт ей часть кинетической энергии, что вызывает её нагревание. В современной технике это свойство используют для электронной плавки в вакууме сверхчистых металлов.
- 3) При торможении быстрых электронов, попадающих на вещество, возникает *рентгеновское излучение*. Это явление используют в рентгеновских трубках.
- 4) Некоторые вещества (стекло, сульфиды цинка и кадмия), бомбардируемые электронами, светятся. В настоящее время среди материалов этого типа (люминофоров) применяются такие, у которых в световую энергию превращается до 25% энергии электронного пучка.
- 5) Электронные пучки отклоняются электрическим полем. Например, проходя между пластинами конденсатора, электроны отклоняются от отрицательно заряженной пластины к положительно заряженной (рис. 16.20).
- 6) Электронный пучок отклоняется также в магнитном поле. Пролетая над северным полюсом магнита, электроны отклоняются влево, а пролетая над южным, отклоняются вправо. Отклонение электронных потоков, идущих от Солнца, в магнитном поле Земли приводит к тому, что свечение газов верхних слоёв атмосферы (полярное сияние) наблюдается только у полюсов.

7) Электронные пучки обладают ионизирующей способностью.

8) Электронные пучки могут проходить сквозь очень тонкие металлические пластины толщиной 0,003—0,03 мм.

Электронно-лучевая трубка. Возможность управления электронным пучком с помощью электрического или магнитного поля и свечение покрытого люминофором экрана под действием пучка применяют в электронно-лучевой трубке.

Электронно-лучевая трубка была основным элементом первых телевизоров и осциллографа —

Интересно
Односторонняя проводимость широко использовалась раньше в электронных приборах с двумя электродами — *вакуумных диодах*, которые служили, как и полупроводниковые диоды, для выпрямления электрического тока. Однако в настоящее время вакуумные диоды практически не применяются.

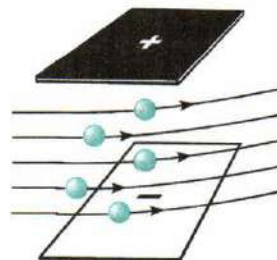


Рис. 16.20



Рис. 16.21

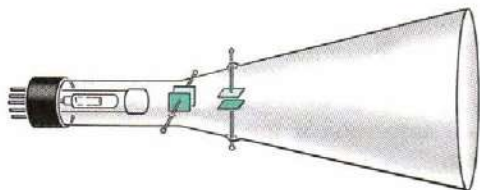


Рис. 16.22

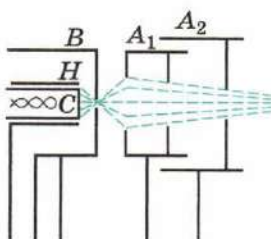


Рис. 16.23

прибора для исследования быстропеременных процессов в электрических цепях (рис. 16.21).

Устройство электронно-лучевой трубки показано на рисунке 16.22. Эта трубка представляет собой вакуумный баллон, одна из стенок которого служит экраном. В узком конце трубки помещён источник быстрых электронов — *электронная пушка* (рис. 16.23). Она состоит из катода, управляющего электрода и анода (чаще несколько анодов располагается друг за другом). Электроны испускаются нагретым оксидным слоем с торца цилиндрического катода C , окружённого теплозащитным экраном H . Далее они проходят через отверстие в цилиндрическом управляющем электроде B (он регулирует число электронов в пучке). Каждый анод (A_1 и A_2) состоит из дисков с небольшими отверстиями. Эти диски вставлены в металлические цилиндры. Между первым анодом и катодом создаётся разность потенциалов в сотни и даже тысячи вольт. Сильное электрическое поле ускоряет электроны, и они приобретают большую скорость. Форма, расположение и потенциалы анодов выбирают так, чтобы наряду с ускорением электронов осуществлялась и фокусировка электронного пучка, т. е. уменьшение площади поперечного сечения пучка на экране почти до точечных размеров.

На пути к экрану пучок последовательно проходит между двумя парами управляющих пластин, подобных пластинам плоского конденсатора (см. рис. 16.22). Если электрического поля между пластинами нет, то пучок не отклоняется и светящаяся точка располагается в центре экрана. При сообщении разности потенциалов вертикально расположенным пластинам пучок смещается в горизонтальном направлении, а при сообщении разности потенциалов горизонтальным пластинам он смещается в вертикальном направлении.

Одновременное использование двух пар пластин позволяет перемещать светящуюся точку по экрану в любом направлении. Так как масса электронов очень мала, то они почти мгновенно, т. е. за очень короткое время, реагируют на изменение разности потенциалов управляющих пластин.

В электронно-лучевой трубке, применяемой в телевизоре (так называемом кинескопе), управление пучком, созданным электронной пушкой, осу-

ИНТЕРЕСНО В настоящее время чаще используются телевизоры с жидкокристаллическим или плазменным экраном.

ществляется с помощью магнитного поля. Это поле создают катушки, надетые на горловину трубки (рис. 16.24).

Цветной кинескоп содержит три разнесённые электронные пушки и экран мозаичной структуры, составленный из люминофоров трёх типов (красного, синего и зелёного свечения). Каждый электронный пучок возбуждает люминофоры одного типа, свечение которых в совокупности даёт на экране цветное изображение.

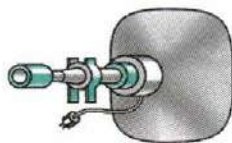


Рис. 16.24

Электронно-лучевые трубки широко применялись в *дисплеях* — устройствах, присоединяемых к электронно-вычислительным машинам (ЭВМ). На экран дисплея, подобный экрану телевизора, поступала информация, записанная и переработанная ЭВМ. Можно было непосредственно видеть текст на любом языке, графики различных процессов, изображения реальных объектов, а также воображаемые объекты, подчиняющиеся законам, записанным в программе вычислительной машины.

ИНТЕРЕСНО

Термоэлектронная эмиссия. Катодные лучи

Найти

- ?
1. Для какой цели в электронных лампах создают вакуум?
 2. Наблюдается ли термоэлектронная эмиссия в диэлектриках?
 3. Как осуществляется управление электронными пучками?
 4. Как устроена электронно-лучевая трубка?

A1. Электронная пушка создаёт пучок электронов в стеклянной вакуумированной камере. Все электроны, покинувшие раскалённый катод пушки, покидают катод и ударяются в экран электронно-лучевой трубки. Если увеличить ускоряющее напряжение в пушке в 2 раза, то сила тока, идущего в вакууме через трубку,

- 1) не изменится
- 2) возрастёт примерно в $\sqrt{2}$ раза
- 3) возрастёт примерно в 2 раза
- 4) возрастёт примерно в 4 раза

A2. Вакуумный диод, у которого анод (положительный электрод) и катод (отрицательный электрод) — параллельные пластины, работает в режиме, когда между током и напряжением выполняется соотношение $I = aU^{3/2}$ (где a — некоторая постоянная величина). Линейная зависимость тока от напряжения (закон Ома) нарушается из-за

- 1) свойств электронного пучка
- 2) появления дополнительных носителей тока
- 3) того, что свойства анода и катода разные
- 4) движения электронов в вакууме





§ 113

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ.
ЗАКОН ЭЛЕКТРОЛИЗА**

Каковы носители электрического тока в вакууме?
Каков характер их движения?

Жидкости, как и твёрдые тела, могут быть диэлектриками, проводниками и полупроводниками. К диэлектрикам относится дистиллированная вода, к проводникам — растворы и расплавы электролитов: кислот, щелочей и солей. Жидкими полупроводниками являются расплавленный селен, расплавы сульфидов и др.

Электролитическая диссоциация. При растворении электролитов под влиянием электрического поля полярных молекул воды происходит распад молекул электролитов на ионы.

Запомни

Распад молекул на ионы под влиянием электрического поля полярных молекул воды называется **электролитической диссоциацией**.

Степень диссоциации — доля в растворённом веществе молекул, распавшихся на ионы.

Степень диссоциации зависит от температуры, концентрации раствора и электрических свойств растворителя.

Важно

С увеличением температуры степень диссоциации возрастает и, следовательно, увеличивается концентрация положительно и отрицательно заряженных ионов.



Предположите, как можно нарушить состояние динамического равновесия в растворе.

Ионы разных знаков при встрече могут снова объединиться в нейтральные молекулы.

При неизменных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся за секунду на ионы, равно числу пар ионов, которые за то же время вновь объединяются в нейтральные молекулы.

Ионная проводимость.**Важно**

Носителями заряда в водных растворах или расплавах электролитов являются положительно и отрицательно заряженные ионы.

Если сосуд с раствором электролита включить в электрическую цепь, то отрицательные ионы начнут двигаться к положительному электроду — аноду, а положительные — к отрицательному — катоду. В результате по цепи пойдёт электрический ток.

Запомни

Проводимость водных растворов или расплавов электролитов, которая осуществляется ионами, называют **ионной проводимостью**.

Жидкости могут обладать и электронной проводимостью. Такой проводимостью обладают, например, жидкие металлы.



Электролиз. При ионной проводимости прохождение тока связано с переносом вещества. На электродах происходит выделение веществ, входящих в состав электролитов. На аноде отрицательно заряженные ионы отдают свои лишние электроны (в химии это называется окислительной реакцией), а на катоде положительные ионы получают недостающие электроны (восстановительная реакция).

Интересно
Жидкости могут обладать и электронной проводимостью. Такой проводимостью обладают, например, жидкие металлы.

Запомним Процесс выделения на электроде вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, называют **электролизом**.

От чего зависит масса вещества, выделяющегося за определённое время? Очевидно, что масса m выделившегося вещества равна произведению массы m_{0i} одного иона на число N_i ионов, достигших электрода за время Δt :

$$m = m_{0i}N_i. \quad (16.3)$$

Масса иона m_{0i} равна:

$$m_{0i} = \frac{M}{N_A}, \quad (16.4)$$

где M — молярная (или атомная) масса вещества, а N_A — постоянная Авогадро, т. е. число ионов в одном моле.

Число ионов, достигших электрода, равно:

$$N_i = \frac{\Delta q}{q_{0i}}, \quad (16.5)$$

где $\Delta q = I\Delta t$ — заряд, прошедший через электролит за время Δt ; q_{0i} — заряд иона, который определяется валентностью n атома: $q_{0i} = ne$ (e — элементарный заряд). При диссоциации молекул, например KBr , состоящих из одновалентных атомов ($n = 1$), возникают ионы K^+ и Br^- . Диссоциация молекул медного купороса ведёт к появлению двухзарядных ионов Si^{2+} и SO_4^{2-} ($n = 2$). Подставляя в формулу (16.3) выражения (16.4) и (16.5) и учитывая, что $\Delta q = I\Delta t$, а $q_{0i} = ne$, получаем

$$m = \frac{M}{neN_A} I\Delta t. \quad (16.6)$$

Закон Фарадея. Обозначим через k коэффициент пропорциональности между массой m вещества и зарядом $\Delta q = I\Delta t$, прошедшим через электролит:

$$k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n} = \frac{1}{F} \frac{M}{n}, \quad (16.7)$$

где $F = eN_A = 9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль — *постоянная Фарадея*.

Коэффициент k зависит от природы вещества (значений M и n). Согласно формуле (16.6) имеем

$$m = kI\Delta t. \quad (16.8)$$

Масса вещества, выделившегося на электроде за время Δt при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока и времени. **Закон электролиза Фарадея**

Это утверждение, полученное нами теоретически, впервые было установлено экспериментально Фарадеем.

Запомним Величину k в формуле (16.8) называют **электрохимическим эквивалентом** данного вещества и выражают в **килограммах на кулон (кг/Кл)**.

Важно Из формулы (16.8) видно, что коэффициент k численно равен массе вещества, выделившегося на электродах, при переносе ионами заряда, равного 1 Кл.

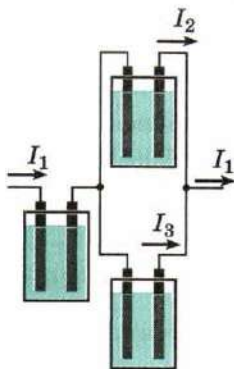


Рис. 16.25

Электрохимический эквивалент имеет простой физический смысл. Так как $M/N_A = m_{oi}$ и $en = q_{oi}$, то согласно формуле (16.7) $k = m_{oi}/q_{oi}$, т. е. k — отношение массы иона к его заряду.

Измеряя величины m и Δq , можно определить электрохимические эквиваленты различных веществ.

Убедиться в справедливости закона Фарадея можно на опыте. Соберём установку, показанную на рисунке 16.25. Все три электролитические ванны заполнены одним и тем же раствором электролита, но токи, проходящие через них, различны. Обозначим силы токов через I_1 , I_2 , I_3 . Тогда $I_1 = I_2 + I_3$. Измеряя массы m_1 , m_2 , m_3 веществ, выделившихся на электродах в разных ваннах, можно убедиться, что они пропорциональны соответствующим силам токов I_1 , I_2 , I_3 .

Определение заряда электрона. Формулу (16.6) для массы выделившегося на электроде вещества можно использовать для определения заряда электрона. Из этой формулы

$$e = \frac{M}{mnN_A} I \Delta t. \quad (16.9)$$

Зная массу m выделившегося вещества при прохождении заряда $I \Delta t$, молярную массу M , валентность n атомов и постоянную Авогадро N_A , можно найти значение модуля заряда электрона. Оно оказывается равным $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Именно таким путём и было впервые в 1874 г. получено значение элементарного электрического заряда.

Применение электролиза. Электролиз широко применяют в технике для различных целей. Электролитическим способом покрывают поверхность одного металла тонким слоем другого (*никелирование, хромирование, позолота* и т. п.). Это прочное покрытие защищает поверхность от коррозии. Если обеспечить хорошее отслаивание электролитического покрытия от поверхности, на которую осаждается металл (этого достигают, например, нанося на поверхность графит), то можно получить копию с рельефной поверхности.

Процесс получения отслаиваемых покрытий — *гальванопластика* — был разработан русским учёным Б. С. Якоби (1801—1874), который в 1836 г.



Предложите свою схему опыта, с помощью которого можно было бы проверить справедливость закона Фарадея. Проведите опыт.

вытекает, что модуль заряда электрона равен:



применил этот способ для изготовления полых фигур для Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге.

При помощи электролиза осуществляют очистку металлов от примесей. Так, полученную из руды неочищенную медь отливают в форме толстых листов, которые затем помещают в ванну в качестве анодов. При электролизе медь анода растворяется, примеси, содержащие ценные и редкие металлы, выпадают на дно, а на катоде оседает чистая медь.

При помощи электролиза получают алюминий из расплава бокситов. Именно этот способ получения алюминия сделал его дешёвым и наряду с железом самым распространённым в технике и быту.

С помощью электролиза получают электронные платы, служащие основой всех электронных изделий. На диэлектрик наклеивают тонкую медную пластину, на которую наносят особой краской сложную картину соединяющих проводов. Затем пластину помещают в электролит, где вытравливаются не закрытые краской участки медного слоя. После этого краска смывается, и на плате появляются детали микросхемы.

ИНТЕРЕСНО

Раньше в полиграфической промышленности копии с рельефной поверхности (стереотипы) получали с матриц (оттиск набора на пластичном материале), для чего осаждали на матрицы толстый слой железа или другого вещества. Это позволяло воспроизвести набор в нужном количестве экземпляров.

Токи в электролитах. Законы электролиза

Найти



1. Почему при прохождении тока по раствору электролита происходит перенос вещества, а при прохождении по металлическому проводнику перенос вещества не происходит?
2. В чём состоит сходство и различие собственной проводимости у полупроводников и у растворов электролитов?
3. Сформулируйте закон электролиза Фарадея.
4. Почему отношение массы вещества, выделившегося при электролизе, к массе иона равно отношению прошедшего заряда к заряду иона?



A1. Какими носителями заряда создаётся электрический ток в растворах и расплавах электролитов?

- 1) только электронами
- 2) электронами и дырками
- 3) только ионами
- 4) электронами и ионами

A2. Известно, что раствор соляной кислоты в воде проводит электрический ток. Это объясняется тем, что в растворе кислоты присутствуют

- 1) свободные ионы
- 2) свободные электроны
- 3) дырки
- 4) атомы металлов

A3. Известно, что раствор поваренной соли в воде хорошо проводит электрический ток, а раствор сахара в воде — плохо. Это объясняется тем, что при растворении соли в воде появляются

- 1) положительные ионы, а при растворении сахара — отрицательные ионы
- 2) свободные ионы, а при растворении сахара — электроны
- 3) свободные ионы, а при растворении сахара свободные ионы не появляются
- 4) появляются электроны, а при растворении сахара электроны не появляются





§ 114 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ. НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯДЫ

Опишите кратко механизм проводимости твёрдых и жидких тел, а также тока в вакууме.

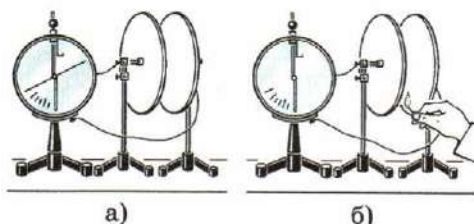


Рис. 16.26

мал. Следовательно, электрическая проводимость воздуха при комнатной температуре мала и воздух можно считать диэлектриком.

Теперь нагреем воздух между дисками горячей спичкой (рис. 16.26, б). Заметим, что стрелка электрометра быстро приближается к нулю, значит, конденсатор разряжается. Следовательно, нагретый газ является проводником и в нём устанавливается электрический ток.

ЗАПОМНИ

Процесс прохождения электрического тока через газ называют **газовым разрядом**.

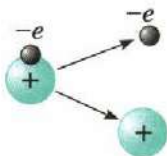


Рис. 16.27

Ионизация газов. При обычных условиях газы почти полностью состоят из нейтральных атомов или молекул и, следовательно, являются *диэлектриками*. Вследствие нагревания или воздействия излучением часть атомов *ионизируется* (рис. 16.27).

В газе могут образовываться и отрицательные ионы, которые появляются благодаря присоединению электронов к нейтральным атомам.

ЗАПОМНИ

Процесс распада атомов и молекул на ионы и электроны называется **ионизацией**.

Ионизация газов при нагревании объясняется тем, что по мере нагревания молекулы движутся всё быстрее и быстрее. При этом некоторые молекулы начинают двигаться так быстро, что часть из них при столкновениях распадается, превращаясь в ионы. Чем выше температура, тем больше образуется ионов.

ИНТЕРЕСНО

При комнатной температуре воздух является очень плохим проводником. При нагревании проводимость воздуха возрастает. Увеличение проводимости воздуха можно вызвать и иными способами, например действием излучений: ультрафиолетового, рентгеновского, радиоактивного и др.

Проводимость газов. Механизм проводимости газов похож на механизм проводимости растворов и расплавов электролитов. Различие состо-



ит в том, что отрицательный заряд переносится в основном не отрицательными ионами, как в водных растворах или расплавах электролитов, а электронами.

Важно

Таким образом, в газах сочетается электронная проводимость, подобная проводимости металлов, с ионной проводимостью, подобной проводимости водных растворов или расплавов электролитов. Есть ещё одно различие. В растворах электролитов образование ионов происходит вследствие ослабления внутримолекулярных связей под действием молекул растворителя (молекул воды). В газах образование ионов происходит либо при нагревании, либо за счёт действия внешних ионизаторов, например излучений.

Рекомбинация. Если ионизатор перестанет действовать, то можно заметить, что заряженный электромметр снова будет сохранять заряд. Это показывает, что после прекращения действия ионизатора газ перестаёт быть проводником. Ток прекращается после того, как все ионы и электроны достигнут электродов. Кроме того, при сближении электрона и положительно заряженного иона они могут вновь образовать нейтральный атом. Схематически это изображено на рисунке 16.28.

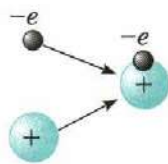


Рис. 16.28

Запомни

Процесс образования из ионов и электронов нейтральных атомов и молекул называют **рекомбинацией** заряженных частиц.

В отсутствие внешнего поля заряженные частицы исчезают только вследствие рекомбинации, и газ становится диэлектриком. Если действие ионизатора не прерывается, то устанавливается динамическое равновесие, при котором среднее число вновь образующихся пар заряженных частиц равно некоторому числу пар, исчезающих вследствие рекомбинации.

Разряд в газе может происходить и без внешнего ионизатора.

Несамостоятельный разряд. Для исследования разряда в газе при различных давлениях удобно использовать стеклянную трубку с двумя электродами (рис. 16.29).



Запомни

Если действие ионизатора прекратить, то прекратится и разряд. Такой разряд называют **несамостоятельным разрядом**.

Пусть с помощью какого-либо ионизатора в газе образуется в секунду определённое число пар заряженных частиц: положительных ионов и электронов.

При небольшой разности потенциалов между электродами трубки положительно заряженные ионы перемещаются к отрицательному электроду, а электроны и отрицательно заряженные ионы — к положительному электроду. В результате в трубке возникает электрический ток, т. е. происходит *газовый разряд*.

Не все образующиеся ионы достигают электродов; часть их воссоединяется с электронами, образуя нейтральные молекулы газа. По мере увеличения разности потенциалов между электродами трубки доля за-

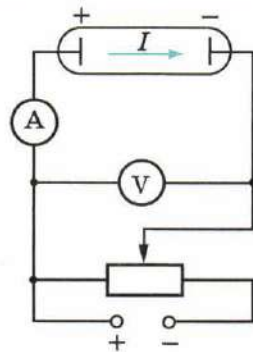


Рис. 16.29

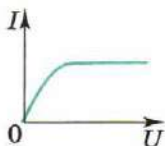


Рис. 16.30

ряженных частиц, достигающих электродов, увеличивается. Возрастает и сила тока в цепи. Наконец наступает момент, при котором все заряженные частицы, образующиеся в газе за секунду, достигают за это время электродов. При этом дальнейшего роста силы тока не происходит (рис. 16.30). Ток достигает *насыщения*.



Самостоятельный разряд. Что будет происходить с разрядом в газе, если продолжать увеличивать разность потенциалов на электродах?

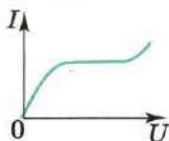


Рис. 16.31

Казалось бы, сила тока и при дальнейшем увеличении разности потенциалов должна оставаться неизменной. Однако опыт показывает, что в газах при увеличении разности потенциалов между электродами, начиная с некоторого её значения, сила тока снова возрастает (рис. 16.31). Это означает, что в газе появляются дополнительные ионы помимо тех, которые образуются за счёт действия ионизатора.

Сила тока может возрасти в сотни и тысячи раз, а число ионов, возникающих в процессе разряда, может стать таким большим, что внешний ионизатор будет уже не нужен для поддержания разряда. Если убрать внешний ионизатор, то разряд может не прекратиться.

Запомни

Разряд, происходящий в газе без внешнего ионизатора, называется **самостоятельным разрядом**.

Ионизация электронным ударом. Каковы же причины резкого увеличения силы тока в газе при больших напряжениях?

Рассмотрим какую-либо пару заряженных частиц (положительный ион и электрон), образовавшуюся благодаря действию внешнего ионизатора. Появившийся таким образом свободный электрон начинает двигаться к положительному электроду — аноду, а положительный ион — к катоду. На своём пути электрон встречает ионы и нейтральные атомы. В промежутках между двумя последовательными столкновениями кинетическая энергия электрона увеличивается за счёт работы сил электрического поля. Чем больше разность потенциалов между электродами, тем больше напряжённость электрического поля.

Кинетическая энергия электрона перед очередным столкновением пропорциональна напряжённости поля и длине l свободного пробега электрона (пути между двумя последовательными столкновениями):

$$\frac{mv^2}{2} = eEl. \quad (16.10)$$

Важно

Если кинетическая энергия электрона превышает работу A_i , которую нужно совершить, чтобы ионизовать нейтральный атом, т. е.

$$\frac{mv^2}{2} > A_i,$$

то при столкновении электрона с атомом происходит ионизация (рис. 16.32).

Запомни

Процесс выбивания быстро движущимся свободным электроном при соударении у нейтрального атома одного или нескольких электронов называют **ионизацией электронным ударом**.

В результате вместо одного свободного электрона образуются два (налетающий на атом и вырванный из атома). Эти электроны, в свою очередь, получают энергию в поле и ионизуют встречные атомы и т. д. Число заряженных частиц резко возрастает, возникает электронная лавина.

Но одна ионизация электронным ударом не может обеспечить длительный самостоятельный разряд. Действительно, ведь все возникающие таким образом электроны движутся по направлению к аноду и по достижении анода «выбивают из игры». Для существования разряда необходима эмиссия электронов с катода (напомним, что слово *эмиссия* означает «испускание»). Эмиссия электронов может быть обусловлена несколькими причинами. Положительные ионы, образовавшиеся при столкновении свободных электронов с нейтральными атомами, при своём движении к катоду приобретают под действием поля большую кинетическую энергию. При ударах таких быстрых ионов о катод с поверхности последнего выбиваются электроны.

Кроме того, катод может испускать электроны при нагревании его до высокой температуры. При самостоятельном разряде нагрев катода может происходить за счёт бомбардировки его положительными ионами, что происходит, например, при дуговом разряде.

Итак, в газах при больших напряжённостях электрических полей электроны достигают таких больших энергий, что начинается ионизация электронным ударом. Разряд становится самостоятельным и продолжается без внешнего ионизатора.

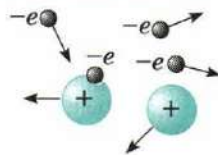


Рис. 16.32

В разреженном газе самостоятельный разряд возникает при сравнительно небольших напряжениях. Благодаря малому давлению длина пробега электрона между двумя ударами велика, и он может приобрести энергию, достаточную для ионизации атомов. При таком разряде газ светится, цвет свечения зависит от рода газа. Свечение, возникающее при тлеющем разряде, широко используется для рекламы, для освещения помещения лампами дневного света.

Интересно

Токи в газах. Эмиссия электронов. Ионизация газов

Найти



1. В чём различие между диссоциацией электролитов и ионизацией газов?
2. Что такое рекомбинация?
3. Почему после прекращения действия ионизаторов газ снова становится диэлектриком?
4. При каких условиях несамостоятельный разряд в газах превращается в самостоятельный?
5. Почему ионизация электронным ударом не может обеспечить существование разряда в газах?



§ 115 ПЛАЗМА

Назовите три состояния вещества, с которыми вы познакомились ранее. Чем характерно каждое из этих состояний?

Интересно Слово «плазма» произошло от греческого слова *plasma* — оформленное. Первоначально это слово начали употреблять в биологии для обозначения бесцветных жидких компонентов крови и живых тканей. В физике слово *плазма* приобрело другой смысл.

При очень низких температурах все вещества находятся в твёрдом состоянии. Их нагревание вызывает переход веществ из твёрдого состояния в жидкое. Дальнейшее повышение температуры приводит к превращению жидкостей в газ.

При достаточно больших температурах начинается ионизация газа за счёт столкновений быстро движущихся атомов или молекул. Вещество переходит в новое состояние, называемое *плазмой*.

Запомним **Плазма** — это частично или полностью ионизованный газ, в котором локальные плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают.

Таким образом, плазма в целом является электрически нейтральной системой. В зависимости от условий степень ионизации плазмы (отношение числа ионизованных атомов к их полному числу) может быть различной. В полностью ионизованной плазме нейтральных атомов нет.

Интересно Древние философы считали, что основу мироздания составляют четыре стихии: земля, вода, воздух и огонь. В известном смысле это отвечает принятому ныне делению на агрегатные состояния вещества, причём четвёртой стихии — огню и соответствует, очевидно, плазма.

Свойства плазмы. Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать её как особое, четвёртое состояние вещества.

Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей. Поэтому любое нарушение электрической нейтральности отдельных областей плазмы, вызванное скоплением частиц одного знака заряда, быстро ликвидируется. Возникающие электрические поля перемещают заряженные частицы до тех пор, пока электрическая нейтральность не восстановится и электрическое поле не станет равным нулю.

В отличие от нейтрального газа, между молекулами которого существуют короткодействующие силы, между заряженными частицами плазмы действуют кулоновские силы, сравнительно медленно убывающие с расстоянием. Каждая частица взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц. Благодаря этому наряду с беспорядочным (тепловым) движением частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных (коллективных) движениях. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны.

Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени её ионизации. При высоких температурах полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.



Плазма в космическом пространстве. В состоянии плазмы находится подавляющая (около 99%) часть вещества Вселенной. Вследствие высокой температуры Солнце и другие звёзды состоят в основном из полностью ионизованной плазмы.

Из плазмы состоит и межзвёздная среда, заполняющая пространство между звёздами и галактиками. Плотность межзвёздной среды очень мала — в среднем менее одного атома на 1 см^3 . Ионизация атомов межзвёздной среды вызывается излучением звёзд и космическими лучами — потоками быстрых частиц, пронизывающими пространство Вселенной по всем направлениям. В отличие от горячей плазмы звёзд температура межзвёздной плазмы очень мала.

Плазмой окружена и наша планета. Верхний слой атмосферы на высоте 100—300 км представляет собой ионизованный газ — *ионосферу*. Ионизация воздуха в верхнем слое атмосферы вызывается преимущественно излучением Солнца и потоком заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Выше ионосферы простираются радиационные пояса Земли, открытые с помощью спутников. Радиационные пояса также состоят из плазмы. Многими свойствами плазмы обладают свободные электроны в металлах. В отличие от обычной плазмы в плазме твёрдого тела положительные ионы не могут перемещаться по всему телу.

ИНТЕРЕСНО

Наряду с нагреванием ионизация газа и образование плазмы могут быть вызваны различными излучениями или бомбардировкой атомов газа быстрыми заряженными частицами. При этом получается так называемая *низкотемпературная плазма*.

Плазма. Свойства плазмы. Значение плазмы. Ионосфера

Найти



1. Из каких частиц состоит плазма?
2. Как получить плазму?
3. От чего зависит степень ионизации плазмы?
4. Как плазма проводит электрический ток?
5. Каково значение плазмы?

A1. Высокая степень ионизации ионосферы определяется

- 1) температурой
- 2) ионизацией за счёт соударений молекул
- 3) солнечным коротковолновым излучением
- 4) замедленными процессами рекомбинации

A2. Плазма обладает

- 1) малой электропроводностью, так как суммарный заряд в малом объёме равен нулю
- 2) устойчивостью
- 3) большим числом электронов по сравнению с числом ионов
- 4) большой электропроводностью





Наиболее просты количественные закономерности для электрического тока в металлах и электролитах.

Задачи на закон Ома, который выполняется для этих проводников, были приведены в главе 15. В данной главе преимущественно рассматриваются задачи на применение закона электролиза. Кроме того, при решении некоторых задач надо использовать формулу (16.1) для зависимости сопротивления металлических проводников от температуры.

Задача 1. Проводящая сфера радиусом $R = 5$ см помещена в электролитическую ванну, наполненную раствором медного купороса. Насколько увеличится масса сферы, если отложение меди длится $t = 30$ мин, а электрический заряд, поступающий на каждый квадратный сантиметр поверхности сферы за 1 с, $q = 0,01$ Кл? Молярная масса меди $M = 0,0635$ кг/моль.

Решение. Площадь поверхности сферы $S = 4\pi R^2 = 314$ см². Следовательно, заряд, перенесённый ионами за $t = 30$ мин = 1800 с, равен $\Delta q = qSt = 0,01$ Кл/(см² · с) · 314 см² · 1800 с = 5652 Кл. Масса выделившейся меди равна:

$$m = \frac{M}{n e N_A} \Delta q \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Задача 2. При электролизе, длившемся в течение одного часа, сила тока была равна 5 А. Чему равна температура выделившегося атомарного водорода, если при давлении, равном 10^5 Па, его объём равен 1,5 л? Электрохимический эквивалент водорода $k = 1,0 \cdot 10^{-8}$ $\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Решение. По закону Фарадея масса m выделившегося водорода:

$$m = kIt. \quad (1)$$

Из уравнения Менделеева—Клапейрона $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M}R$, где R — универсальная газовая постоянная, $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$; M — молярная масса атомарного водорода, определим массу водорода, полученного при электролизе:

$$m = \frac{pVM}{TR}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) определим температуру: $T = \frac{pVM}{RkIt} \approx 100$ К.

Задача 3. При никелировании изделия в течение 1 ч отложился слой никеля толщиной $l = 0,01$ мм. Определите плотность тока, если молярная масса никеля $M = 0,0587$ кг/моль, валентность $n = 2$, плотность никеля $\rho = 8,9 \cdot 10^3$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.



Решение. Согласно закону электролиза Фарадея масса выделившегося на катоде никеля

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It, \quad (1)$$

где $m = \rho V = \rho lS$, а $I = jS$, где S — площадь покрытия никелем; F — постоянная Фарадея, $F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$. Подставив выражения для массы никеля и силы тока I в формулу (1), получим $\rho lS = \frac{1}{F} \frac{M}{n} jSt$, откуда $j = \frac{\rho lFn}{Mt} \approx 81 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

Задача 4. Определите электрическую энергию, затраченную на получение серебра массой 200 г, если КПД установки 80%, а электролиз проводят при напряжении 20 В. Электрохимический эквивалент серебра равен $k = 1,118 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Решение. Энергия, идущая только на электролиз, равна:

$$W'_a = qU. \quad (1)$$

Согласно закону Фарадея $m = kq$, откуда $q = \frac{m}{k}$.

Подставив выражение для q в формулу (1), получим $W'_a = \frac{m}{k} U$.

Полная затраченная энергия W_a связана с W'_a выражением $W'_a = \frac{\eta}{100\%} \cdot W_a$, следовательно, $W_a = \frac{100\%}{\eta} \frac{m}{k} U = 4,47 \cdot 10^6$ Дж.

Задача 5. Объясните, почему при дуговом разряде при увеличении силы тока напряжение уменьшается.

Решение. При увеличении силы тока возрастает термоэлектронная эмиссия с катода, носителей заряда становится больше, а следовательно, сопротивление промежутка между электродами уменьшается. При этом уменьшение сопротивления происходит быстрее, чем увеличение силы тока (в газах нарушается линейный закон Ома $U = IR$), поэтому напряжение уменьшается.

Задача 6. Покажите, что при упругом столкновении электрона с молекулой электрон передаёт ей меньшую энергию, чем при абсолютно неупругом ударе.

Решение. При прямом абсолютно упругом столкновении электрона с молекулой выполняются законы сохранения энергии и импульса:

$$\frac{m_e v_0^2}{2} = \frac{m_e v_1^2}{2} + \frac{m v_2^2}{2},$$

$$m_e v_0 = m_e v_1 + m v_2,$$

где m_e и m — массы электрона и молекулы; v_1 и v_2 — их скорости после столкновения. Решая эту систему относительно v_1 и v_2 , получаем $v_2 = \frac{2m_e v_0}{m_e + m}$.

Энергия, передаваемая молекуле, $\Delta W = \frac{mv_0^2}{2} = \frac{m_e v_0^2}{2} \frac{4mm_e}{(m_e + m)^2}$. Так как $m_e \ll m$, то можно записать, что $(m_e + m)^2 \approx m^2$. Тогда $\Delta W \approx \frac{4m_e}{m} \frac{m_e v_0^2}{2}$.

Из полученного выражения следует, что молекуле передаётся очень малая часть первоначальной энергии электрона, так как $m_e \ll m$.

При неупругом столкновении выполняется только закон сохранения импульса $m_e v_0 = (m + m_e)v$, и, таким образом, электрон теряет энергию

$$\Delta W_3 = \frac{m_e v_0^2}{2} - \frac{m_e v^2}{2} = \frac{m_e v_0^2}{2} \left(1 - \left(\frac{m_e}{m + m_e} \right)^2 \right).$$

Так как $m_e \ll m$, мы можем считать, что дробь в скобках равна нулю, от-

куда $\Delta W_3 \approx \frac{m_e v_0^2}{2}$, т. е. при неупругом столкновении электрон полностью передаёт свою энергию молекуле.

Задачи для самостоятельного решения

1. Однородное электрическое поле напряжённостью E создано в металле и в вакууме. Одинаковое ли расстояние пройдёт за одно и то же время электрон в том и другом случаях? Начальная скорость электрона равна нулю.

2. Длинная проволока, на концах которой поддерживается постоянное напряжение, накалилась докрасна. Половину проволоки опустили в холодную воду. Почему часть проволоки, оставшаяся над водой, нагревается сильнее?

3. Спираль электрической плитки перегорела и после соединения концов оказалась несколько короче. Как изменилось количество теплоты, выделяемой плиткой за единицу времени?

4. Алюминиевая обмотка электромагнита при температуре 0°C потребляет мощность 5 кВт . Чему будет равна потребляемая мощность, если во время работы температура обмотки повысится до 60°C , а напряжение останется неизменным? Что будет, если неизменной останется сила тока в обмотке? Температурный коэффициент сопротивления алюминия $3,8 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$.

5. Концентрация электронов проводимости в кремнии при комнатной температуре $n_1 = 10^{17}\text{ м}^{-3}$, а при 700°C — $n_2 = 10^{24}\text{ м}^{-3}$. Какую часть составляет число электронов проводимости от общего числа атомов кремния? Плотность кремния 2300 кг/м^3 .

6. Для получения примесной проводимости применяют индий, мышьяк, фосфор, галлий, сурьму, висмут. Какие из этих элементов можно ввести в качестве примеси в кремний, чтобы получить электронную проводимость?

7. Какой тип полупроводника получится, если в кремний ввести небольшое количество алюминия?

8. Для покрытия цинком металлических изделий в электролитическую ванну помещён цинковый электрод массой $m = 0,01\text{ кг}$. Какой заряд должен пройти через ванну, чтобы электрод был полностью израсходован? Электрохимический эквивалент цинка $k = 3,4 \cdot 10^{-7}\text{ кг/Кл}$.

9. При силе тока $1,6\text{ А}$ на катоде электролитической ванны за 10 мин отложилась медь массой $0,316\text{ г}$. Определите электрохимический эквивалент меди.



10. Определите количество выделившегося на катоде при электролизе алюминия (электролит Al_2SO_4), если затрачена энергия $20 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ при напряжении на электродах 12 В , КПД установки 80% . Электрохимический эквивалент алюминия $k = 9,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

11. Как надо расположить электроды, чтобы электролитически покрыть внутреннюю поверхность полового металлического предмета?

12. При никелировании детали в течение 2 ч сила тока, проходящего через ванну, была 25 А . Электрохимический эквивалент никеля $k = 3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$, его плотность $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Чему равна толщина слоя никеля, выделившегося на детали, если площадь детали $S = 0,2 \text{ м}^2$?

13. Определите скорость электронов при выходе из электронной пушки в двух случаях — при разности потенциалов между анодом и катодом 500 В и 5000 В .



ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 16 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.



«Токи в газах»

1. Тлеющий разряд и его использование в рекламе.
2. Дуговой разряд. Дуговая сварка.
3. Искровой и коронный разряды. Молния. Громоотвод.
4. Плазма и её использование.



«Экспериментальное исследование свойств полупроводникового диода»
«Моделирование установки для покрытия металлических изделий различной формы слоем другого металла»