

## ГЛАВА 6

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

При изучении электрических явлений необходимо знать, возможно ли существование электрического тока в рассматриваемом веществе, поскольку все вещества делят на группы по их электрическим свойствам: проводники, полупроводники, диэлектрики. Чем эти группы веществ отличаются друг от друга? Как они проводят электрический ток?

Проводниками электрического тока могут быть вещества и в твёрдом, и в жидком, и в газообразном состояниях. Изучая данную тему, найдём ответы на следующие вопросы: какие частицы являются носителями электрического заряда в данной среде? Как зависит электрическая проводимость среды от температуры, излучения и других воздействий? Каково техническое применение электрического тока в различных средах?

### § 34. Электрический ток в металлах. Сверхпроводимость

*Типичными представителями класса проводников являются металлы. Какова природа электрического тока в металлах?*

**Природа электрического тока в металлах.** В металлических проводниках носители электрического заряда — свободные электроны. Под действием внешнего электрического поля свободные электроны упорядоченно движутся, создавая электрический ток (рис. 194). Электронная проводимость металлов была впервые экспериментально подтверждена немецким физиком К. Рикке (1845–1915) в 1901 г. Суть опыта Рикке заключалась в следующем: по проводнику, состоявшему из трёх отполированных и плотно прижатых друг к другу цилиндров — двух медных

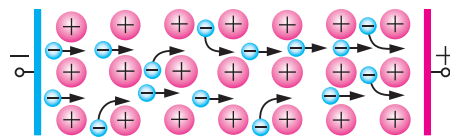


Рис. 194

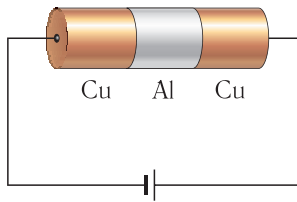


Рис. 195

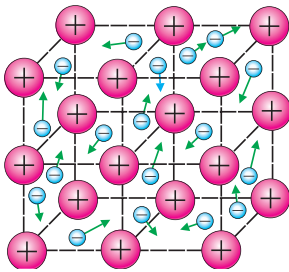


Рис. 196



и одного алюминиевого (рис. 195), в течение года проходил ток одного и того же направления. За этот промежуток времени через проводник прошёл заряд более 3,5 МКл. После завершения опыта взвешивание показало, что массы цилиндров остались неизменными. Это явилось экспериментальным доказательством того, что перенос заряда при прохождении тока в металлах не сопровождается химическими процессами и переносом вещества, а осуществляется частицами, которые являются одинаковыми для всех металлов, т. е. электронами.

Вещества, обладающие электронной проводимостью, называют *проводниками первого рода*.

В соответствии с классической электронной теорией проводимости металлов, созданной немецким физиком П. Друде (1863–1906) в 1900 г., металлический проводник можно рассматривать как физическую систему, состоящую из свободных электронов и положительно заряженных ионов, колеблющихся около положений равновесия (рис. 196).

### Из истории физики

Убедительное доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах с проявлением инерции электронов. Идея таких опытов и первые результаты (1913 г.) принадлежали русским физикам Л. И. Мандельштаму (1879–1944) и Н. Д. Папалекси (1880–1947).

В 1916 г. американские учёные Р. Толмен (1881–1948) и Т. Стюарт (1890–1958) усовершенствовали методику этих опытов и выполнили количественные измерения, неопровержимо доказавшие, что ток в металлических проводниках обусловлен движением свободных электронов.

**Зависимость сопротивления металлов от температуры.** При изучении физики в 8-м классе вы узнали, что сопротивление металлических проводников зависит от рода вещества (удельного сопротивления  $\rho$ ) и их геометрических размеров (длины  $l$  и площади поперечного сечения  $S$ ):

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

А зависит ли сопротивление от температуры проводника?

Проведём опыт. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, проволоочной спирали и гальванометра (рис. 197). Из опыта следует, что при нагревании спирали показания гальванометра уменьшаются. Вывод очевиден: при увеличении температуры сопротивление металлов увеличивается.

Зависимость сопротивления металлов от температуры используют в специальных приборах — термометрах сопротивления (рис. 198).

Широкое распространение получили термометры сопротивления из чистых металлов, особенно платины и меди, которые конструктивно представляют собой металлическую проволоку, намотанную на жёсткий каркас (из кварца, фарфора, слюды), заключённый в защитную оболочку (из металла, кварца, фарфора, стекла) (рис. 199). Платиновые термометры сопротивления применяют для измерения температуры в пределах от  $-263$  до  $1064$  °С, медные — от  $-50$  до  $180$  °С.

**Сверхпроводимость.** При очень низких температурах сопротивление некоторых металлических проводников резко (скачком) уменьшается до нуля. Впервые это обнаружил в 1911 г. нидерландский физик Г. Камерлинг-Оннес (1853—1926). Он экспериментально установил, что при температуре  $T \leq 4,12$  К (по современным измерениям  $4,15$  К) электрическое сопротивление ртути исчезает. Позже многочисленными опытами было установлено, что это явление характерно для многих проводников. Температуру, при которой электрическое сопротивление проводника уменьшается до нуля, называют *критической температурой*. Состояние проводника при этом называют *сверхпроводимостью*, а сам проводник — *сверхпроводником*. Каждый сверхпроводящий металл характеризуется своей критической температурой. Явление сверхпроводимости свойственно не только некоторым металлам, но и сплавам, полупроводникам и полимерам.

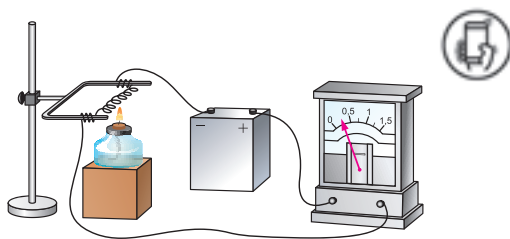


Рис. 197



Рис. 198



Рис. 199

Если в сверхпроводнике создать электрический ток, то он будет существовать в нём неограниченно долго. При этом для поддержания тока нет необходимости в источнике тока. Это указывает на перспективу использования явления сверхпроводимости при передаче электрической энергии.

Сверхпроводящие соединения нашли применение в качестве материала обмоток электромагнитов для создания сильных магнитных полей в мощных электрических двигателях, генераторах, ускорителях и др. Разрабатывают проекты сверхпроводящих электронно-вычислительных машин. Уже созданы компактные интегральные схемы на сверхпроводниках, обладающие рядом преимуществ по сравнению с имеющимися аналогами.



Электрический ток в металлах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов

Металлический проводник можно рассматривать как физическую систему, состоящую из свободных электронов и положительно заряженных ионов

Состояние, при котором электрическое сопротивление проводника уменьшается до нуля, называют сверхпроводимостью, а сам проводник — сверхпроводником



1. Какова природа электрического тока в металлах?
2. Как было доказано, что носителями электрического заряда в металлах являются электроны?
3. Как изменяется сопротивление металлического проводника при повышении температуры?
4. На каком свойстве проводников основано действие термометра сопротивления?
5. В чём проявляется явление сверхпроводимости?



### § 35. Электрический ток в электролитах

*При изучении предыдущего параграфа вы узнали, что в металлах перенос заряда не сопровождается переносом вещества, а носителями свободных зарядов являются электроны. Но существует класс проводников, прохождение электрического тока в которых всегда сопровождается химическими изменениями и переносом вещества. Какова природа электрического тока в таких проводниках?*

**Природа электрического тока в электролитах.** Из опытов следует, что растворы многих солей, кислот и щелочей, а также расплавы солей и оксидов металлов проводят электрический ток, т. е. являются проводниками. Такие проводники назвали *электролитами*.

**Электролиты** — вещества, растворы или расплавы которых проводят электрический ток.

Проведём опыт. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, лампы накаливания и ванны с дистиллированной водой, в которой находятся два угольных электрода. При замыкании цепи лампа не светится, следовательно, дистиллированная вода не проводит электрический ток. Повторим опыт, добавив в дистиллированную воду сахар. Лампа не светится и в этом случае. Раствор сахара в воде также не является проводником. А теперь добавим в дистиллированную воду небольшое количество соли, например, хлорида меди(II)  $\text{CuCl}_2$ . В цепи проходит электрический ток, о чём наглядно свидетельствует свечение лампы (рис. 200). Следовательно, раствор соли в воде является проводником электрического тока, т. е. при растворении хлорида меди(II) в дистиллированной воде появились свободные носители электрического заряда.

Изучая химию, вы узнали, что при растворении солей, кислот и щелочей в воде происходит электролитическая диссоциация, т. е. распад молекул электролита на ионы. В проведённом опыте хлорид меди(II)  $\text{CuCl}_2$  в водном растворе диссоциирует на положительно заряженные ионы меди  $\text{Cu}^{2+}$  и отрицательно заряженные ионы хлора  $\text{Cl}^-$ .

Ионы  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cl}^-$  в растворе при отсутствии электрического поля движутся беспорядочно. Под действием внешнего электрического поля на беспорядочное движение ионов накладывается их направленное движение (рис. 201). При этом положительно заряженные ионы  $\text{Cu}^{2+}$  движутся к катоду (электроду, подключённому к отрицательному полюсу источника тока), отрицательно заряженные ионы  $\text{Cl}^-$  — к аноду (электроду, подключённому к положительному полюсу источника тока). На аноде будет происходить процесс окисления ионов  $\text{Cl}^-$  до атомов. Атомы образуют молекулы хлора, которые выделяются на аноде. На катоде будет происходить процесс восстановления ионов  $\text{Cu}^{2+}$  до атомов и осаждение меди. Это явление называют *электролизом*.

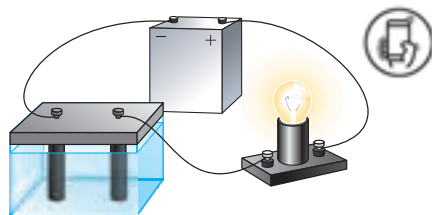


Рис. 200

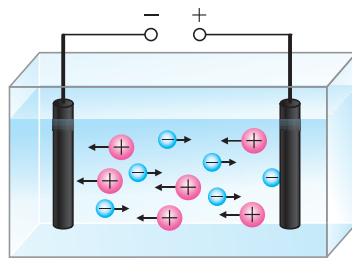


Рис. 201

**Электролиз** — процесс выделения на электроде вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, протекающими при прохождении электрического тока через растворы (расплавы) электролитов.

Таким образом, свободные носители электрического заряда в электролитах — положительно и отрицательно заряженные ионы, которые образуются в результате электролитической диссоциации, а проводимость электролитов является ионной. Электролиты относят к *проводникам второго рода*.

### От теории к практике

Почему опасно прикасаться голыми руками к неизолированным металлическим проводам, по которым проходит электрический ток?



**Техническое применение электролиза.** Электролиз нашёл различные применения в промышленности. Рассмотрим некоторые из них.

1. Нанесение защитных и декоративных покрытий на металлические изделия (гальваностегия).

Для предохранения металлов от окисления, а также для придания изделиям прочности и улучшения внешнего вида их покрывают тонким слоем благородных металлов (золотом, серебром) или малоокисляющимися металлами (хромом, никелем). Предмет, подлежащий гальваническому покрытию, например, ложку (рис. 202), погружают в качестве катода в электролитическую ванну. Электролитом является раствор соли металла, которым осуществляется покрытие. Анодом служит пластина из такого же металла. Пропуская через электролитическую ванну в течение определённого промежутка времени электрический ток, ложку покрывают слоем металла нужной толщины. Для наиболее равномерного покрытия ложки её необходимо поместить между двумя или более анодными пластинами. После покрытия ложку вынимают из ванны, сушат и полируют.

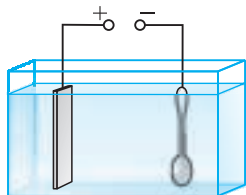


Рис. 202

2. Производство металлических копий с рельефных моделей (гальванопластика).

Для получения копий предметов (монет, медалей, барельефов и т. п.) делают слепки из какого-нибудь пластичного материала (например, воска). Для придания слепку электропроводности его покрывают графитовой пылью, погружают в электролитическую ванну в качестве катода и получают на нём слой металла нужной толщины. Затем, нагревая, удаляют воск.

Процесс гальванопластики был разработан в 1836 г. русским академиком Б. С. Якоби (1801–1874).

3. Получение металлов из расплавленных руд и их очистка, электрохимическая обработка металлов.

Процесс очистки металлов происходит в электролитической ванне. Анодом служит металл, подлежащий очистке, катодом — тонкая пластина из чистого металла, а электролитом — раствор соли данного металла. Например, пластину из неочищенной меди помещают в качестве анода в ванну с раствором медного купороса, где катодом служит лист чистой меди (рис. 203). В загрязнённых металлах могут содержаться ценные примеси. Так, в меди часто содержатся никель и серебро. При пропускании через ванну электрического тока медь с анода переходит в раствор, из раствора на катоде выделяется чистая медь, а примеси выпадают в виде осадка или переходят в раствор.

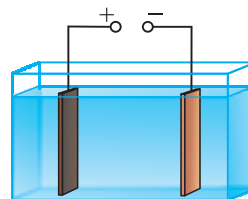


Рис. 203



Электролиты — вещества, растворы или расплавы которых проводят электрический ток

Электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение ионов, которые образуются в результате электролитической диссоциации растворённого вещества

Электролиз — процесс выделения на электроде вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, протекающими при прохождении электрического тока через растворы (расплавы) электролитов



1. Что называют электролитом?
2. Какова природа электрического тока в электролитах?
3. Какой процесс называют электролизом?
4. Приведите примеры использования электролиза.



## § 36. Электрический ток в газах. Плазма

Газы при нормальных условиях не проводят электрический ток, т. е. являются диэлектриками. Это обусловлено тем, что газы состоят из нейтральных атомов (молекул). Однако при определённых условиях газы, в том числе и воздух, становятся проводниками. При каких условиях это возможно?

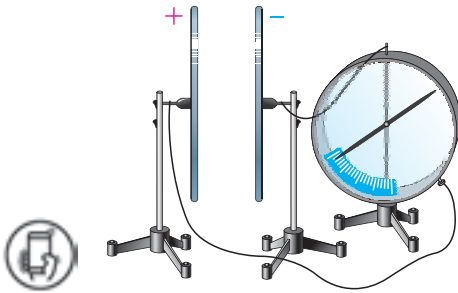


Рис. 204

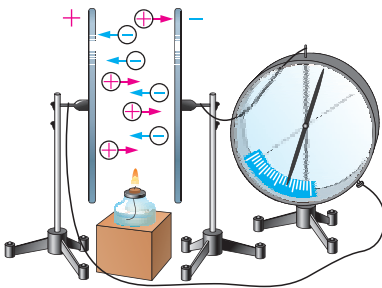


Рис. 205

### Природа электрического тока в газах.

Проведём опыт и убедимся, что электрическая проводимость газа (воздуха) может изменяться. Два металлических диска, заряженных разноимёнными зарядами и расположенных на некотором расстоянии друг от друга, соединим с электрометром (рис. 204). Стрелка электрометра при этом отклонится на некоторый угол. Электрометр не разряжается, значит, при небольшой разности потенциалов между дисками воздух не проводит электрический ток.

Повторим опыт, нагревая пламенем (спиртовки, свечи) воздушный промежуток между дисками. Электрометр разряжается, т. е. через воздух проходит электрический ток (рис. 205).

Вывод очевиден: в воздушном промежутке между дисками появились свободные носители электрического заряда.

Если убрать пламя, то электрический ток исчезнет, т. е. воздух между дисками опять станет диэлектриком.

Объясним результаты рассмотренного опыта. Нагревание газа пламенем приводит к образованию свободных электронов и положительно заряженных ионов, т. е. к *ионизации газа*.

Для отрыва электрона от атома (молекулы) необходима энергия, минимальное значение которой называют *энергией ионизации* атома (молекулы). Наряду с ионизацией может происходить присоединение образовавшихся при отрыве электронов к нейтральным атомам (молекулам) газа. Это приводит к образованию отрицательно заряженных ионов.



Под действием электрического поля в газе возникает направленное движение положительно заряженных ионов к отрицательному электроду (катоду) и направленное движение электронов и отрицательно заряженных ионов к положительному электроду (аноду). В ионизированном газе возникает электрический ток, который называют *газовым разрядом*.

Таким образом, носители электрического заряда в ионизированных газах — положительно и отрицательно заряженные ионы и свободные электроны, а проводимость газов является ионно-электронной.

Если устранить внешнее воздействие (в данном случае нагревание пламенем), электрический ток в газе прекращается. Это обусловлено тем, что при столкновении положительно заряженного иона с электроном они образуют нейтральный атом (молекулу) газа. Ионы противоположных знаков при столкновении также превращаются в нейтральные атомы (молекулы) — рекомбинируют. При рекомбинации освобождается энергия, равная энергии, затраченной на ионизацию.

Таким образом, чтобы в газе появились свободные носители электрического заряда, его атомы (молекулы) необходимо ионизировать. Это можно осуществить нагреванием газа до высокой температуры, воздействием на газ ультрафиолетовым, рентгеновским, радиоактивным излучениями и др.

Внешние воздействия, в результате которых происходит ионизация, называют *ионизаторами*. Разряд, возникающий в результате ионизации газа под действием ионизатора, называют *несамостоятельным*.

Однако в ряде случаев газовый разряд может существовать и после прекращения действия ионизатора. В этом случае имеющееся между электродами сильное электрическое поле является причиной сохранения газового разряда, который называют *самостоятельным*.

**Виды самостоятельного газового разряда и их применение.** В зависимости от напряжённости электрического поля, давления газа, формы и вещества электродов различают следующие виды самостоятельного газового разряда: тлеющий, дуговой, коронный и искровой.

*Тлеющий* разряд характеризуется небольшой силой тока (десятки миллиампер), относительно высоким напряжением (десятки и сотни вольт), низким давлением газа (десятые доли миллиметра ртутного столба). Тлеющий разряд широко используют в различных газосветных трубках (рис. 206), применяемых для световой



Рис. 206



Рис. 207

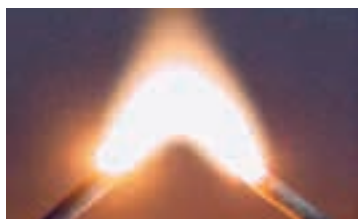


Рис. 208



Рис. 209



Рис. 210

рекламы и декораций, лампах дневного света (рис. 207), неоновых лампах.

*Дуговой* разряд представляет собой столб ярко светящегося газа (рис. 208). Он характеризуется большой силой тока (десятки и сотни ампер) и сравнительно небольшим напряжением (несколько десятков вольт). Дуговой разряд является мощным источником света. Его используют в осветительных установках, для сварки и резки металлов (рис. 209), электролиза расплавов, в промышленных электропечах для плавки стали и др.

### Интересно знать

В 1802 г. профессор физики Петербургской медико-химической академии В. В. Петров получил электрическую дугу. Он установил, что если присоединить к полюсам большой электрической батареи два кусочка древесного угля, привести их в соприкосновение, а затем слегка раздвинуть на небольшое расстояние, то между концами углей образуется яркое пламя, а сами концы углей раскаляются добела, испуская ослепительный свет (электрическая дуга). Впервые электрическая дуга была применена в 1876 г. русским инженером П. Н. Яблочковым для уличного освещения.

*Коронный* разряд возникает вблизи заострённой части проводника при атмосферном давлении под действием сильно неоднородного электрического поля. Он сопровождается слабым свечением, напоминающим корону, и характерным потрескиванием (рис. 210).

Коронный разряд используют в электрофильтрах для очистки промышленных газов от твёрдых и жидких примесей. Однако возникновение коронного разряда вокруг высоковольтных линий электропередачи нежелательно, так как приводит к потерям электрической энергии.

**Интересно знать**

Часто перед грозой, во время шторма или снежной бури в атмосфере резко возрастает напряжённость электрического поля. Это приводит к возникновению слабого свечения вблизи заострённых предметов, например, вблизи корабельных мачт, шпилей на зданиях и др. (рис. 211). моряки, бороздившие моря и океаны, часто наблюдали это явление (коронный разряд), которое получило название «огни Святого Эльма». Один из участников кругосветного плавания Магеллана писал: «Во время тех штормов нам много раз являлся сам Святой Эльм в виде света... чрезвычайно тёмными ночами на грот-мачте, где оставался в течение двух и более часов, избавляя нас от уныния».

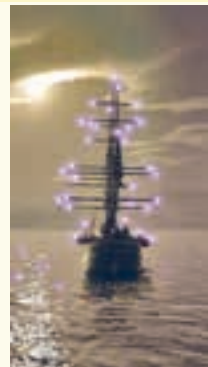


Рис. 211

*Искровой* разряд наблюдают при высоком напряжении (рис. 212). Он сопровождается ярким свечением газа, звуковым эффектом, который создаётся резким повышением давления воздуха. Примером искрового разряда в природе служит молния (рис. 213).

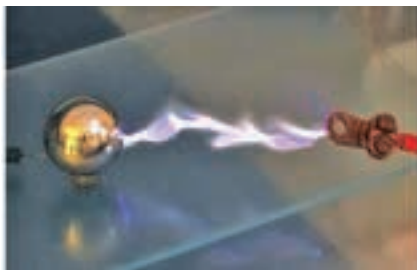


Рис. 212



Рис. 213

**Интересно знать**

Перед появлением молнии напряжение между облаком и поверхностью Земли достигает  $U \sim 10^8 - 10^9$  В. Сила тока в молнии составляет  $I \sim 10^5$  А, продолжительность разряда молнии —  $t \sim 10^{-6}$  с, диаметр светящегося канала —  $d \sim 10-20$  см. Извилистый вид молнии объясняется тем, что электрический разряд проходит через участки воздуха, имеющие наименьшее сопротивление. А такие участки расположены в воздухе случайным образом.

**Плазма.** При достаточно высокой температуре любое вещество испаряется, превращаясь в газ. При дальнейшем увеличении температуры усиливается термическая ионизация. Нейтральные молекулы газа распадаются на составляющие их атомы, которые в дальнейшем превращаются в ионы. Кроме того, ионизация газа может быть обусловлена его взаимодействием с электромагнитным излучением (фотоионизация) или бомбардировкой газа заряженными частицами, например, ионизация электронным ударом.

*Плазма* — полностью или частично ионизованный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически совпадают, т. е. средние плотности положительных  $\rho_+$  и отрицательных  $\rho_-$  зарядов одинаковы по модулю:  $\rho_+ = |\rho_-|$ .

В зависимости от степени ионизации различают частично ионизованную и полностью ионизованную плазму. В зависимости от скорости теплового движения заряженных частиц различают низкотемпературную ( $< 10^5$  К) и высокотемпературную ( $> 10^6$  К) плазму. Примером низкотемпературной плазмы является плазма, образующаяся при всех видах электрического разряда в газах. Звёзды представляют собой гигантские сгустки высокотемпературной плазмы.

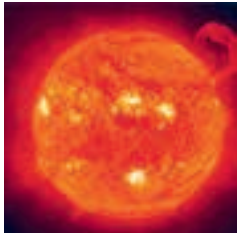


Рис. 214

Плазма заполняет космическое пространство между звёздами и галактиками и является самым распространённым состоянием вещества во Вселенной (рис. 214). Концентрация плазмы в межгалактическом пространстве очень мала, в среднем одна частица на кубический метр. Верхний слой атмосферы Земли также представляет собой слабо ионизованную плазму. Причиной ионизации являются ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца и других звёзд, быстрые заряженные частицы и др.

Независимо от способа получения плазма в целом является электрически нейтральной. Проводимость плазмы растёт с увеличением отношения числа ионизованных атомов (молекул) к их общему числу. Полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.



Носителями электрического заряда в ионизованных газах являются положительно и отрицательно заряженные ионы и свободные электроны

Газовый разряд — прохождение электрического тока через ионизованный газ

Плазма — полностью или частично ионизованный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически совпадают, т. е. средние плотности положительных  $\rho_+$  и отрицательных  $\rho_-$  зарядов одинаковы по модулю:  $\rho_+ = |\rho_-|$



1. Какова природа электрического тока в газах?
2. Как можно увеличить электрическую проводимость газов?
3. Какой разряд называют несамостоятельным?
4. Какой разряд называют самостоятельным?
5. Какие виды самостоятельного разряда вы знаете? Приведите примеры их использования.
6. Что такое плазма? Как её можно получить?



## § 37. Электрический ток в полупроводниках. Собственная и примесная проводимости полупроводников

*Полупроводники — широкий класс как неорганических, так и органических веществ в твёрдом или жидком состоянии. Полупроводники обладают многими замечательными свойствами, благодаря которым они нашли широкое применение в различных областях науки и техники. Каковы особенности строения полупроводников?*

**Зависимость сопротивления полупроводников от температуры и освещённости.** Удельное сопротивление полупроводников находится в пределах от  $10^{-6}$  до  $10^8$  Ом·м (при  $T = 300$  К), т. е. во много раз меньше, чем у диэлектриков, но существенно больше, чем у металлов. В отличие от проводников удельное сопротивление полупроводников резко убывает при увеличении температуры, а также изменяется при изменении освещения и введении сравнительно небольшого количества примесей. К полупроводникам относят ряд химических элементов (бор, углерод, кремний, германий, фосфор, мышьяк, сурьма, сера, селен, теллур и др.), множество оксидов и сульфидов металлов, а также других химических соединений.

Изучить свойства полупроводников можно на опытах. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, полупроводника и миллиамперметра (рис. 215). Из опыта следует, что

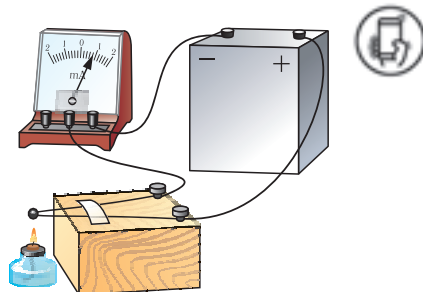


Рис. 215