

Министерство образования Красноярского края краевое государственное
автономное профессиональное образовательное учреждение
“Ачинский колледж транспорта и сельского хозяйства”.

Реферат на тему:

«Электрический ток в различных средах»

по дисциплине: «Физика»

Преподаватель:

Борутенко Т.М.

Работу выполнил:

студент группы: ТОД 22-49

Романов С.В.

г.Ачинск 2023

Содержание

1. Электрический ток в газах.....
2. Электрический ток в полупроводник.....
3. Электрический ток в вакууме.....
4. Электрический ток в металлах.....
5. Электрический ток в электролитах.....
6. Библиографический список.....

Электрический ток в газах

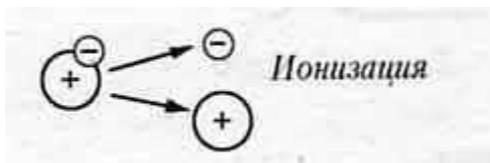
В обычных условиях газ - это диэлектрик, т.е. состоит из нейтральных атомов и молекул и не содержит свободных носителей эл.тока.

Газ-проводник - это ионизированный газ. Ионизированный газ обладает электронно-ионной проводимостью.

Воздух является диэлектриком в линиях электропередач, в воздушных конденсаторах, в контактных выключателях.

Воздух является проводником при возникновении молнии, электрической искры, при возникновении сварочной дуги.

Ионизация газа

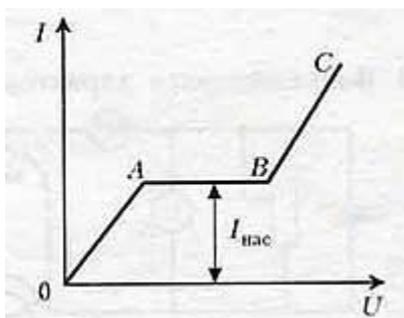
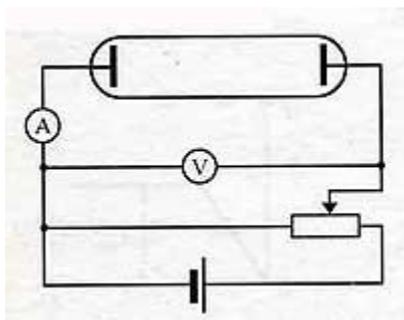


- это распад нейтральных атомов или молекул на положительные ионы и электроны путем отрыва электронов от атомов. Ионизация происходит при нагревании газа или воздействия излучений (УФ, рентген, радиоактивное) и объясняется распадом атомов и молекул при столкновениях на высоких скоростях.

Газовый разряд

- это эл.ток в ионизированных газах.

Носителями зарядов являются положительные ионы и электроны. Газовый разряд наблюдается в газоразрядных трубках (лампах) при воздействии электрического или магнитного поля.



Рекомбинация заряженных частиц



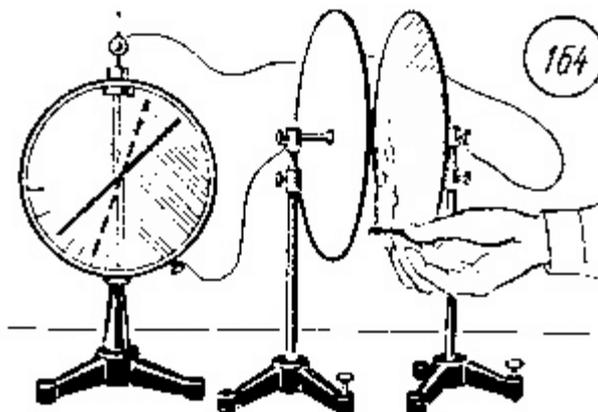
- газ перестает быть проводником, если ионизация прекращается, это происходит в следствие рекомбинации (воссоединения противоположно заряженных частиц).

Существует самостоятельный и несамостоятельный газовый разряд.

Несамостоятельный электрический разряд. Опыт показывает, что две разноименно заряженные пластины, разделенные слоем воздуха, не разряжаются.

Обычно вещество в газообразном состоянии является изолятором, так как атомы или молекулы, из которых оно состоит, содержат одинаковое число отрицательных положительных электрических зарядов и в целом нейтральны.

Внесем в пространство между пластинами пламя спички или спиртовки (рис. 164).



При этом электрометр начнет быстро разряжаться. Следовательно, воздух под действием пламени стал проводником. При вынесении пламени из пространства между пластинами разряд электрометра прекращается. Такой же результат можно получить, облучая пластины светом электрической дуги. Эти опыты доказывают, что газ может стать проводником электрического тока.

Явление прохождения электрического тока через газ, наблюдаемое только при условии какого-либо внешнего воздействия, называется *несамостоятельным электрическим разрядом*.

Термическая ионизация. Нагревание газа делает его проводником электрического тока, потому что часть атомов или молекул газа превращается в заряженные ионы.

Для отрыва электрона от атома необходимо совершить работу против сил кулоновского притяжения между положительно заряженным ядром и отрицательным электроном. Процесс отрыва электрона от атома называется *ионизацией атома*. Минимальная энергия, которую необходимо затратить для отрыва электрона от атома или молекулы, называется *энергией связи*.

Электрон может быть оторван от атома при соударении двух атомов, если их кинетическая энергия превышает энергию связи электрона. Кинетическая энергия теплового движения атомов или молекул прямо пропорциональна абсолютной температуре, поэтому с повышением температуры газа увеличивается число соударений

атомов или молекул, сопровождающихся ионизацией.

Процесс возникновения свободных электронов и положительных ионов в результате столкновений атомов и молекул газа при высокой температуре называется *термической ионизацией*.

Плазма. Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизована, называется *плазмой*. Степень термической ионизации плазмы зависит от температуры. Например, при температуре 10 000 К ионизовано меньше 10 % общего числа атомов водорода, при температуре выше 20 000 К водород практически полностью ионизован.

Электроны и ионы плазмы могут перемещаться под действием электрического поля. Таким образом, при низких температурах газ является изолятором, при высоких температурах превращается в плазму и становится проводником электрического тока.

Фотоионизация. Энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или молекулы, может быть передана светом. Ионизация атомов или молекул под действием света называется *фотоионизацией*.

Самостоятельный электрический разряд. При увеличении напряженности электрического поля до некоторого определенного значения, зависящего от природы газа и его давления, в газе возникает электрический ток и без воздействия внешних ионизаторов. Явление прохождения через газ электрического тока, не зависящего от действия внешних ионизаторов, называется *самостоятельным электрическим разрядом*.

В воздухе при атмосферном давлении самостоятельный электрический разряд возникает при напряженности электрического поля, равной примерно

$$E = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$$

Основной механизм ионизации газа при самостоятельном электрическом разряде — ионизация атомов и молекул вследствие ударов электрона.

Ионизация электронным ударом. Ионизация электронным ударом становится возможной тогда, когда электрон при свободном пробеге приобретет кинетическую энергию, превышающую энергию связи W электрона с атомом.

Кинетическая энергия W_k электрона, приобретаемая под действием электрического поля напряженностью \vec{E} , равна работе сил электрического поля:

$$W_k = Fl = eEl,$$

где l — длина свободного пробега.

Отсюда приближенное условие начала ионизации электронным ударом имеет вид

$$eEl > W.$$

Энергия связи электронов в атомах и молекулах обычно выражается в *электронвольтах* (эВ). 1 эВ равен работе, которую совершает электрическое поле при перемещении электрона (или другой частицы, обладающей элементарным зарядом) между точками поля, напряжение между которыми равно 1 В:

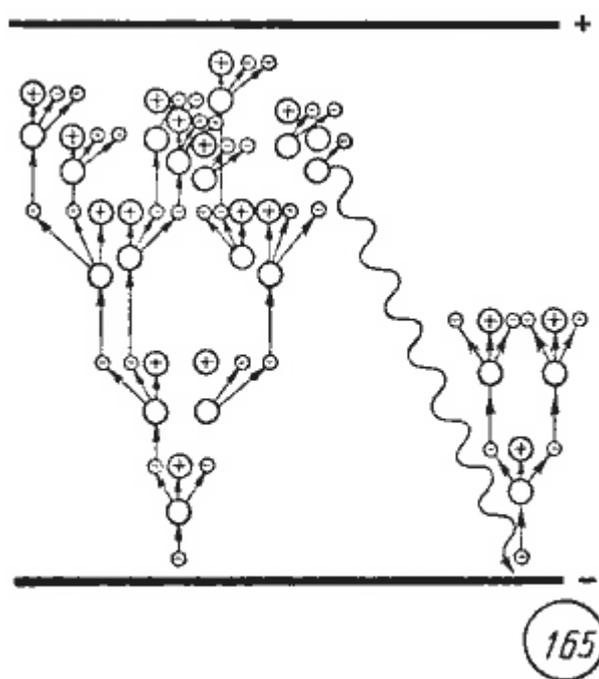
$$A = eU,$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Энергия ионизации атома водорода, например, равна 13,6 эВ.

Механизм самостоятельного разряда. Развитие самостоятельного электрического разряда в газе протекает следующим образом. Свободный электрон под действием электрического поля приобретает ускорение. Если напряженность электрического поля достаточно велика, электрон при свободном пробеге настолько увеличивает кинетическую энергию, что при соударении с молекулой ионизует ее.

Первый электрон, вызвавший ионизацию молекулы, и второй электрон, освобожденный в результате ионизации, под действием электрического поля приобретают ускорение в направлении от катода к аноду. Каждый из них при следующих соударениях освобождает еще по одному электрону и общее число свободных электронов становится равным четырем. Затем таким же образом оно увеличивается до 8, 16, 32, 64 и т. д. Число свободных электронов, движущихся от катода к аноду, нарастает лавинообразно до тех пор, пока они не достигнут анода (рис. 165).

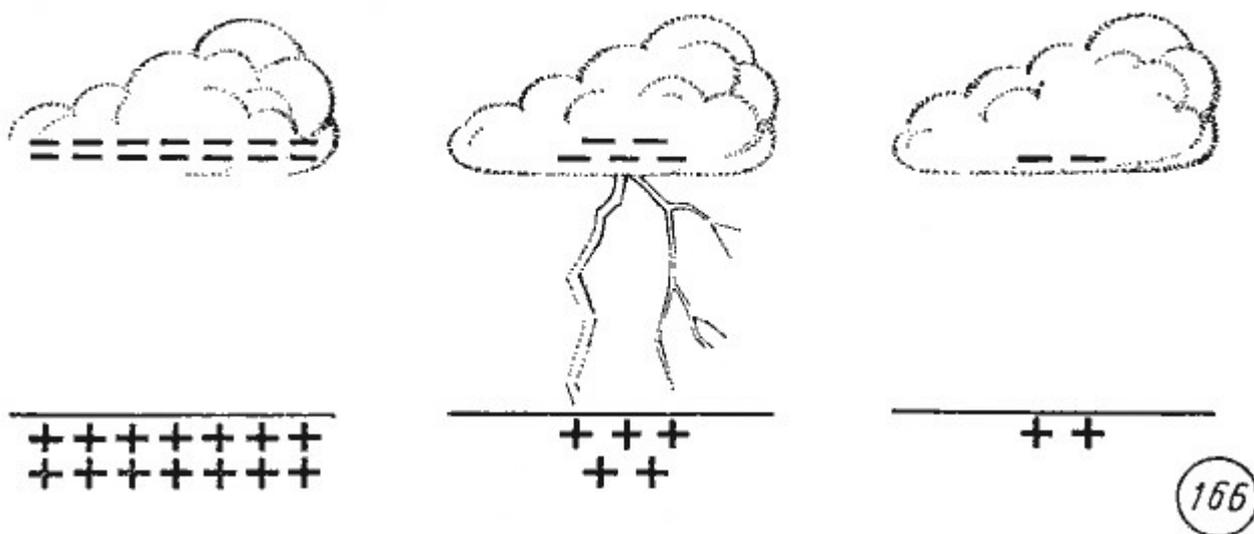


Положительные ионы, возникшие в газе, движутся под действием электрического поля от анода к катоду. При ударах положительных ионов о катод и под действием света, излучаемого в процессе разряда, с катода могут освобождаться новые электроны. Эти электроны в свою очередь разгоняются электрическим полем и создают новые электронно-ионные лавины, поэтому процесс может продолжаться непрерывно.

Концентрация ионов в плазме по мере развития самостоятельного разряда увеличивается, а электрическое сопротивление разрядного промежутка уменьшается. Сила тока в цепи самостоятельного разряда обычно определяется лишь внутренним сопротивлением источника тока и электрическим сопротивлением других элементов цепи.

Искровой разряд. Молния. Если источник тока не способен поддерживать самостоятельный электрический разряд в течение длительного времени, то происходящий самостоятельный разряд называется *искровым разрядом*. Искровой разряд прекращается через короткий промежуток времени после начала разряда в результате значительного уменьшения напряжения. Примеры искрового разряда — искры, возникающие при расчесывании волос, разделении листов бумаги, разряде конденсатора.

Самостоятельный электрический разряд представляют собой и молнии, наблюдаемые во время грозы. Сила тока в канале молнии достигает 10 000—20 000 А, длительность импульса тока составляет несколько десятков микросекунд. Самостоятельный электрический разряд между грозовым облаком и Землей после нескольких ударов молнии сам собою прекращается, так как большая часть избыточных электрических зарядов в грозовом облаке нейтрализуется электрическим током, протекающим по плазменному каналу молнии (рис. 166).

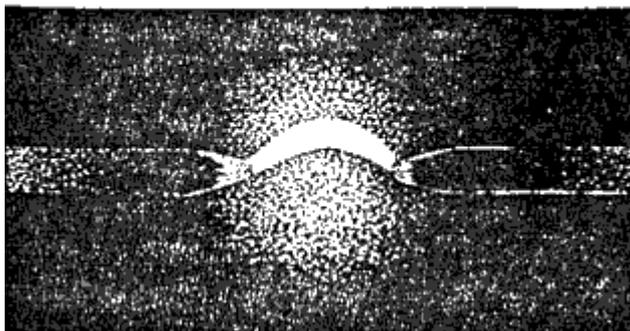


При увеличении силы тока в канале молнии происходит нагревание плазмы до температуры свыше 10 000 К. Изменения давления в плазменном канале молнии при увеличении силы тока и прекращении разряда вызывают звуковые явления, называемые громом.

Тлеющий разряд. При понижении давления газа в разрядном промежутке разрядный канал становится более широким, а затем светящейся плазмой оказывается равномерно заполнена вся разрядная трубка. Этот вид самостоятельного электрического разряда в газах называется *тлеющим разрядом* (рис. 167).



Электрическая дуга. Если сила тока в самостоятельном газовом разряде очень велика, то удары положительных ионов и электронов могут вызвать разогревание катода и анода. С поверхности катода при высокой температуре происходит эмиссия электронов, обеспечивающая поддержание самостоятельного разряда в газе. Длительный самостоятельный электрический разряд в газах, поддерживаемый за счет термоэлектронной эмиссии с катода, называется *дуговым разрядом* (рис. 168).



Коронный разряд. В сильно неоднородных электрических полях, образующихся, например, между острием и плоскостью или между проводом и плоскостью (линия электропередачи), возникает самостоятельный разряд особого вида, называемый *коронным разрядом*. При коронном разряде ионизация электронным ударом происходит лишь вблизи одного из электродов, в области с высокой напряженностью электрического поля.

Применение электрических разрядов. Удары электронов, разгоняемых электрическим полем, приводят не только к ионизации атомов и молекул газа, но и к возбуждению атомов и молекул, сопровождающемуся излучением света. Световое излучение плазмы самостоятельного электрического разряда широко используется в народном хозяйстве и в быту. Это лампы дневного света и газоразрядные лампы уличного, освещения, электрическая дуга в кинопроекторном аппарате и ртутно-кварцевые лампы, применяемые в больницах и поликлиниках.

Высокая температура плазмы дугового разряда позволяет применять его для резки и сварки металлических конструкций, для плавки металлов. С помощью искрового разряда ведется обработка деталей из самых твердых материалов.

Электрический разряд в газах бывает и нежелательным явлением, с которым в технике необходимо бороться. Так, например, коронный электрический разряд с проводов высоковольтных линий электропередач приводит к бесполезным потерям электроэнергии. Возрастание этих потерь с увеличением напряжения ставит предел на пути дальнейшего увеличения напряжения в линии электропередач, тогда как для уменьшения потерь энергии на нагревание проводов такое повышение весьма желательно.

Электрический ток в полупроводниках

По значению удельного электрического сопротивления **полупроводники** занимают промежуточное место между хорошими проводниками и диэлектриками. К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и др.), огромное количество сплавов и химических соединений. Почти все неорганические вещества окружающего нас мира – полупроводники. Самым распространенным в природе полупроводником является кремний, составляющий около 30 % земной коры. Качественное отличие полупроводников от металлов проявляется прежде всего в зависимости удельного сопротивления от температуры. С понижением температуры сопротивление металлов падает. У полупроводников, напротив, с понижением температуры сопротивление возрастает и вблизи абсолютного нуля они практически становятся изоляторами (рис. 4.13.1).

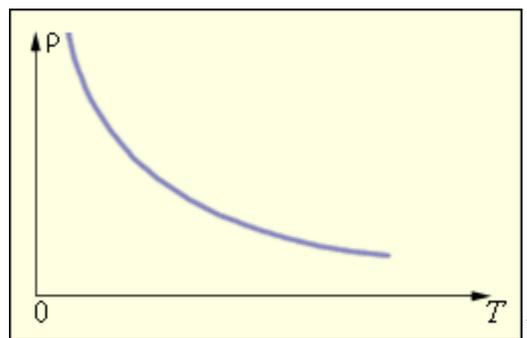


Рисунок 5. Зависимость удельного сопротивления ρ чистого полупроводника от абсолютной температуры T .

Такой ход зависимости $\rho(T)$ показывает, что у полупроводников концентрация носителей свободного заряда не остается постоянной, а увеличивается с ростом температуры. Механизм электрического тока в полупроводниках нельзя объяснить в рамках модели газа свободных электронов. Рассмотрим качественно этот механизм на примере германия (Ge). В кристалле кремния (Si) механизм аналогичен. Атомы германия имеют четыре слабо связанных электрона на внешней оболочке.

Их называют **валентными электронами**. В кристаллической решетке каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями. Связь между атомами в кристалле германия является **ковалентной**, то есть осуществляется парами валентных электронов. Каждый валентный электрон принадлежит двум атомам. Валентные электроны в кристалле германия гораздо сильнее связаны с атомами, чем в металлах; поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках на много порядков меньше, чем у металлов. Вблизи абсолютного нуля температуры в кристалле германия все электроны заняты в образовании связей. Такой кристалл электрического тока не проводит.

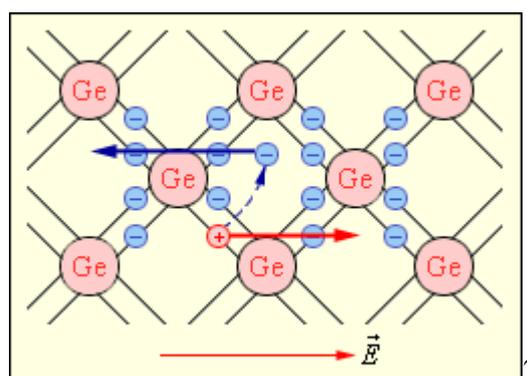


Рисунок 6. Парно-электронные связи в кристалле германия и образование электронно-дырочной пары.

При повышении температуры некоторая часть валентных электронов может получить энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. Тогда в кристалле возникнут свободные электроны (электроны проводимости). Одновременно в местах разрыва связей образуются вакансии, которые не заняты электронами. Эти вакансии

получили название «**дырок**». Вакантное место может быть занято валентным электроном из соседней пары, тогда дырка переместится на новое место в кристалле. При заданной температуре полупроводника в единицу времени образуется определенное количество электронно-дырочных пар.

В то же время идет обратный процесс – при встрече свободного электрона с дыркой, восстанавливается электронная связь между атомами германия. Этот процесс называется **рекомбинацией**. Электронно-дырочные пары могут рождаться также при освещении полупроводника за счет энергии электромагнитного излучения. В отсутствие электрического поля электроны проводимости и дырки участвуют в хаотическом тепловом движении. Если полупроводник помещается в электрическое поле, то в упорядоченное движение вовлекаются не только свободные электроны, но и дырки, которые ведут себя как положительно заряженные частицы. Поэтому ток I в полупроводнике складывается из электронного I_n и дырочного I_p токов:

$$I = I_n + I_p.$$

Концентрация электронов проводимости в полупроводнике равна концентрации дырок: $n_p = p_p$. Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (то есть без примесей) полупроводников. Он называется **собственной электрической проводимостью** полупроводников. При наличии примесей электропроводность полупроводников сильно изменяется. Например, добавка примесей фосфора в кристалл кремния в количестве 0,001 атомного процента уменьшает удельное сопротивление более чем на пять порядков. Такое сильное влияние примесей может быть объяснено на основе изложенных выше представлений о строении полупроводников.

Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла. Проводимость полупроводников при наличии примесей называется **примесной проводимостью**. Различают два типа примесной проводимости – **электронную** и **дырочную** проводимости. **Электронная проводимость** возникает, когда в кристалл германия с четырехвалентными атомами введены пятивалентные атомы (например, атомы мышьяка, As).

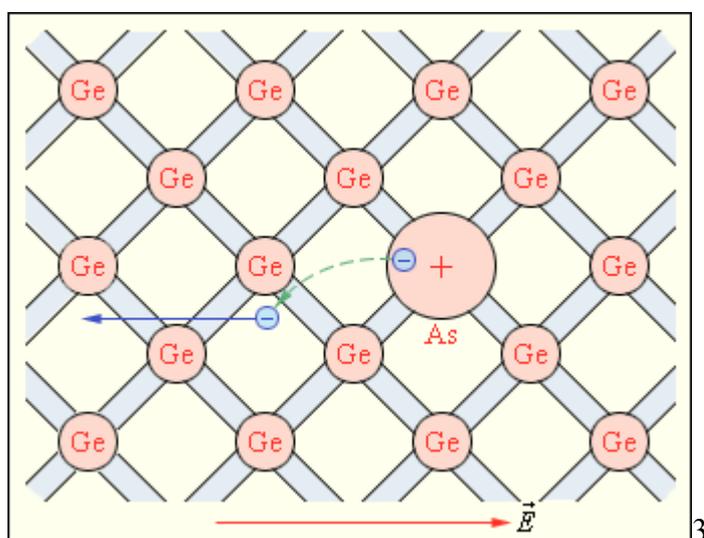


Рисунок 7. Атом мышьяка в решетке германия.

Полупроводник n-типа.

На рис. 7 показан пятивалентный атом мышьяка, оказавшийся в узле кристаллической решетки германия. Четыре валентных электрона атома мышьяка включены в образование ковалентных связей с четырьмя соседними атомами германия.

Пятый валентный электрон оказался излишним; он легко отрывается от атома мышьяка и становится свободным. Атом, потерявший электрон, превращается в положительный ион, расположенный в узле кристаллической решетки. Примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называется **донорской примесью**.

В результате ее введения в кристалле появляется значительное число свободных электронов. Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника – в тысячи и даже миллионы раз. Удельное сопротивление проводника с большим содержанием примесей может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника. В кристалле германия с примесью мышьяка есть электроны и дырки, ответственные за собственную проводимость кристалла.

Но основным типом носителей свободного заряда являются электроны, оторвавшиеся от атомов мышьяка. В таком кристалле $n_p \gg p_p$. Такая проводимость называется электронной, а полупроводник, обладающий **электронной** проводимостью, называется **полупроводником n-типа**.

Дырочная проводимость возникает, когда в кристалл германия введены трехвалентные атомы (например, атомы индия, In). На образование связи с четвертым атомом германия у атома индия нет электрона. Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия. В этом случае атом индия превращается в отрицательный ион, расположенный в узле кристаллической решетки, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия. Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется **акцепторной примесью**.

В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (дырки). На эти места могут перескакивать электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу. Наличие акцепторной примеси резко снижает удельное сопротивление полупроводника за счет появления большого числа свободных дырок. Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью значительно превышает концентрацию электронов, которые возникли из-за механизма собственной электропроводности полупроводника: $p_p \gg n_p$. Проводимость такого типа называется **дырочной проводимостью**.

Примесный полупроводник с дырочной проводимостью называется **полупроводником p-типа**. Основными носителями свободного заряда в полупроводниках p-типа являются дырки. Следует подчеркнуть, что дырочная проводимость в действительности обусловлена эстафетным перемещением по вакансиям от одного атома германия к другому электронов, которые осуществляют ковалентную связь. Для полупроводников n- и p-типов закон Ома выполняется в определенных интервалах сил тока и напряжений при условии постоянства концентраций свободных носителей.

Электрический ток в вакууме

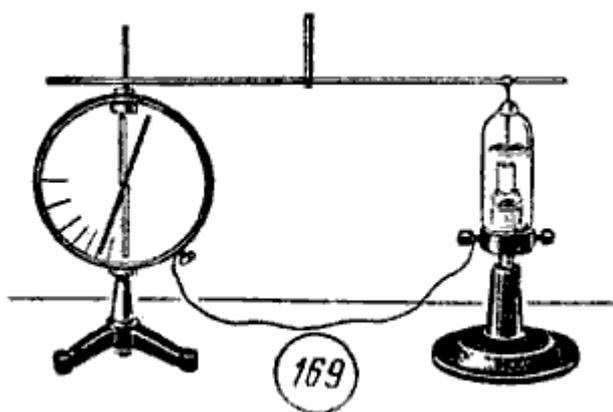
Важнейшими приборами в электронике первой половины XX в. были электронные лампы, в которых использовался электрический ток в вакууме. Однако им на смену пришли полупроводниковые приборы. Но и сегодня ток в вакууме используется в электронно-лучевых трубках, при вакуумном плавлении и сварке, в том числе в космосе, и во многих других установках. Это и определяет важность изучения электрического тока в вакууме.

Вакуум (от лат. *vacuum* – пустота) – состояние газа при давлении, меньшем атмосферного. Это понятие применяется к газу в замкнутом сосуде или в сосуде, из которого откачивают газ, а часто и к газу в свободном пространстве, например к космосу. Физической характеристикой вакуума есть соотношение между длиной свободного пробега молекул и размером сосуда, между электродами прибора и т.д

Когда речь идет о вакууме, то почему-то считают, что это совсем пустое пространство. На самом же деле это не так. Если из какого-нибудь сосуда откачивать воздух то количество молекул в нем с течением времени будет уменьшаться, хотя все молекулы из сосуда удалить невозможно. Так когда же можно считать, что в сосуде создан вакуум?

Молекулы воздуха, двигаясь хаотически, часто сталкиваются между собой и со стенками сосуда. Между такими столкновениями молекулы пролетают определенные расстояния, которые называются длиной свободного пробега молекул. Понятно, что при откачивании воздуха концентрация молекул (их количество в единице объема) уменьшается, а длина свободного пробега – увеличивается. И вот наступает момент, когда длина свободного пробега становится равной размерам сосуда: молекула движется от стенки к стенке сосуда, практически не встречаясь с другими молекулами. Вот тогда-то и считают, что в сосуде создан вакуум, хотя в нем еще может быть много молекул. Понятно, что в меньших по размерам сосудах вакуум создается при больших давлениях газа в них, чем в больших сосудах. Если продолжать откачивание воздуха из сосуда, то говорят, что в нем создается более глубокий вакуум. При глубоком вакууме молекула может много раз пролететь от стенки к стенке, прежде чем встретится с другой молекулой. Откачать все молекулы из сосуда практически невозможно. Где берутся свободные носители зарядов в вакууме? Если в сосуде создан вакуум, то в нем все же есть немало молекул, некоторые из них могут быть и ионизированы. Но заряженных частичек в таком сосуде для выявления заметного тока мало. Как же получить в вакууме достаточное количество свободных носителей заряда? Если нагреть проводник, пропуская по нему электрический ток или другим способом, то часть свободных электронов в металле будет иметь достаточную энергию, чтобы выйти из металла (выполнить работу выхода).

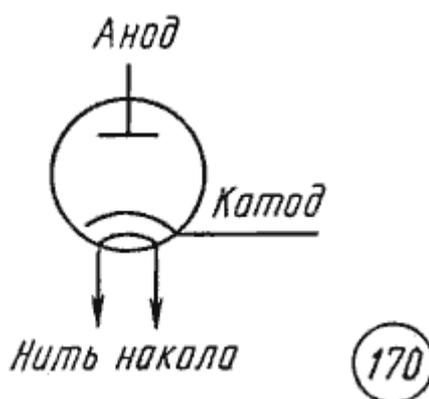
Термоэлектронная эмиссия. Соединим стержень заряженного электрометра с одним электродом вакуумной стеклянной колбы, а корпус электрометра — с другим электродом, представляющим собой тонкую металлическую нить (рис. 169). Опыт покажет, что электрометр не разряжается.



Между двумя электродами, расположенными в герметичном сосуде, из которого удален воздух, и находящимися под напряжением, электрический ток отсутствует, так как в вакууме нет свободных носителей электрического заряда. Американский ученый и изобретатель Томас Эдисон (1847—1931) обнаружил (1879 г.), что в вакуумной стеклянной колбе возникает электрический ток, если один из электродов нагреть до высокой температуры.

Подключим к выводам металлической нити источник тока. Если нить соединена с отрицательным полюсом источника, то при ее нагревании электрометр быстро разряжается. При соединении нити с положительным полюсом электрометр не разряжается и при нагревании нити током. Эти опыты доказывают, что нагретый катод испускает частицы, обладающие отрицательным электрическим зарядом. Эти частицы — электроны. Явление испускания свободных электронов с поверхности нагретых тел называется *термоэлектронной эмиссией*.

Диод. Термоэлектронная эмиссия используется в различных электронных приборах. Простейший из них — электровакуумный диод. Этот прибор состоит из стеклянного баллона, в котором находятся два электрода: *катод* и *анод*. Анод изготовлен из металлической пластины, катод — из тонкой металлической проволоки, свернутой в спираль. Концы спирали укреплены на металлических стержнях, имеющих два вывода для подключения в электрическую цепь. Соединив выводы катода с источником тока, можно вызвать нагревание проволочной спирали катода проходящим током до высокой температуры. Проволочную спираль, нагреваемую электрическим током, называют нитью накала лампы. Условное обозначение вакуумного диода показано на рисунке 170.

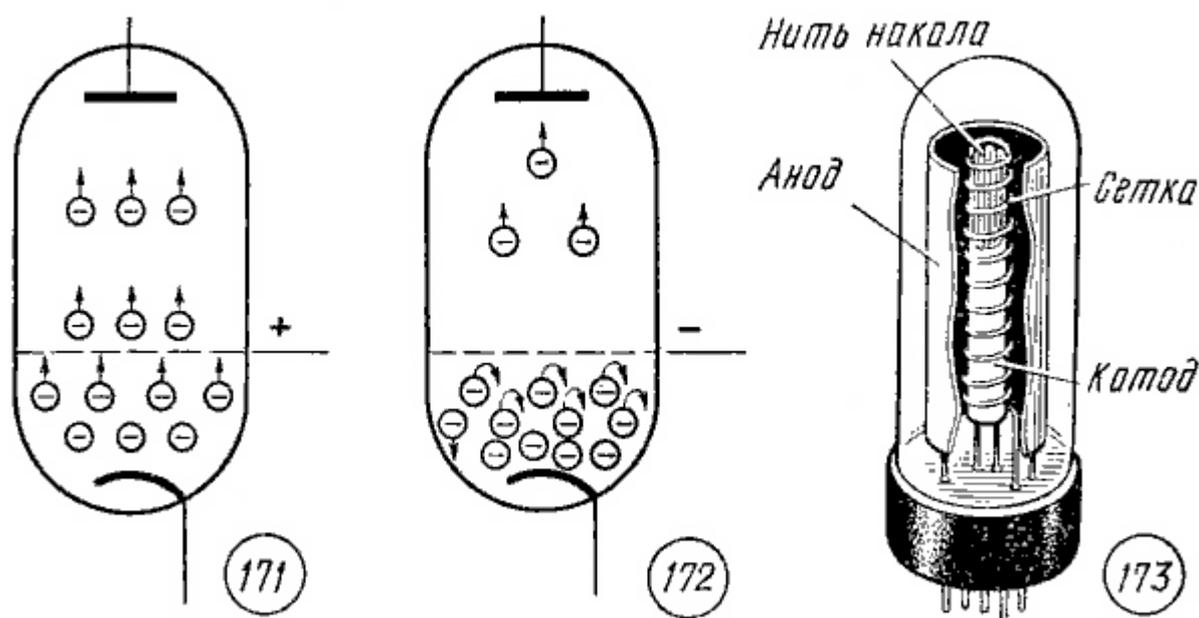


Применение диода. Включив вакуумный диод в электрическую цепь последовательно с источником постоянного тока и амперметром, можно обнаружить основное свойство диода, используемое в различных радиоэлектронных приборах, —

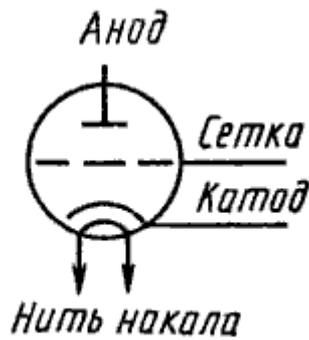
одностороннюю проводимость. При подключении источника тока положительным полюсом к аноду и отрицательным к катоду электроны, испускаемые нагретым катодом, движутся под действием электрического поля к аноду — в цепи течет электрический ток. Если подключить источник тока положительным полюсом к катоду, а отрицательным — к аноду, то электрическое поле будет препятствовать движению электронов от катода к аноду — электрического тока в цепи нет. Свойство односторонней проводимости диода используется в радиоэлектронных приборах для преобразования переменного тока в постоянный.

Триод. Потокom электронов, движущихся в электронной лампе от катода к аноду, можно управлять с помощью электрических и магнитных полей. Простейшим электровакуумным прибором, в котором осуществляется управление потоком электронов с помощью электрического поля, является *триод*. Баллон, анод и катод вакуумного триода имеют такую же конструкцию, как и у диода, однако на пути электронов от катода к аноду в триоде располагается третий электрод, называемый *сеткой*. Обычно сетка — это спираль из нескольких витков тонкой проволоки вокруг катода.

Если на сетку подается положительный потенциал относительно катода (рис. 171), то значительная часть электронов пролетает от катода к аноду, и в цепи анода существует электрический ток. При подаче на сетку отрицательного потенциала относительно катода электрическое поле между сеткой и катодом препятствует движению электронов от катода к аноду (рис. 172), анодный ток убывает. Таким образом, изменяя напряжение между сеткой и катодом, можно регулировать силу тока в цепи анода.



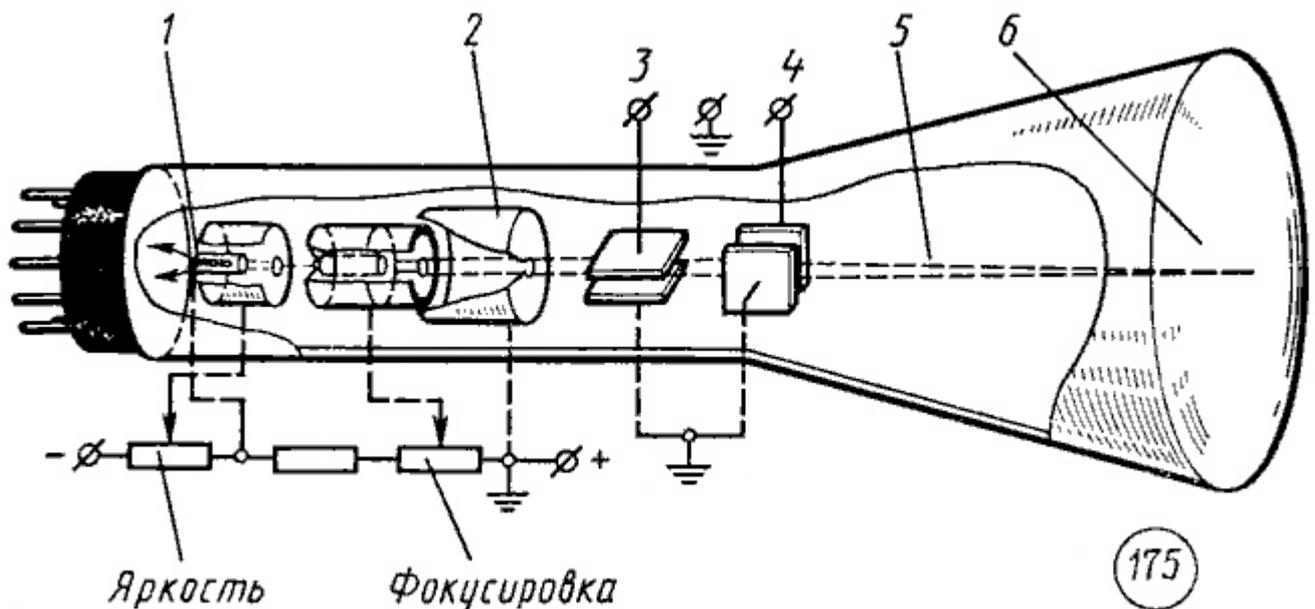
Устройство вакуумного триода показано на рисунке 173, его условное обозначение на схемах — на рисунке 174.



174

Электронные пучки и их свойства. Электроны, испускаемые нагретым катодом, можно с помощью электрических полей разгонять до высоких скоростей. Пучки электронов, движущихся с большими скоростями, можно использовать для получения рентгеновских лучей, плавки и резки металлов. Способность электронных пучков испытывать отклонения под действием электрических и магнитных полей и вызывать свечение кристаллов используется в электронно-лучевых трубках.

Электронно-лучевая трубка. Если в аноде 2 вакуумного диода сделать отверстие, то часть электронов, испущенных катодом 1, пролетит сквозь отверстие и образует в пространстве за анодом поток параллельно летящих электронов — электронный луч 5 (рис. 175).



175

Электрoвакуумный прибор, в котором используется такой поток электронов, называется *электронно-лучевой трубкой*.

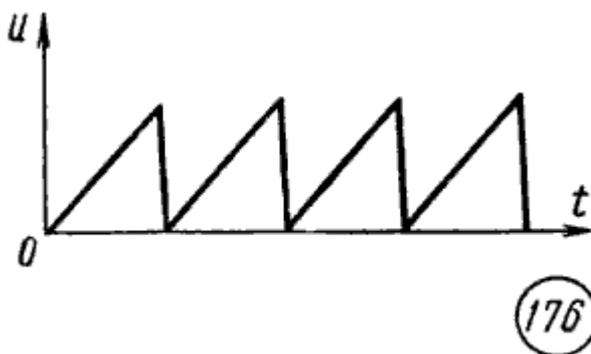
Внутренняя поверхность стеклянного баллона электронно-лучевой трубки против анода покрыта тонким слоем кристаллов, способных светиться при попадании в них быстрых электронов. Эту часть трубки называют экраном (6).

С помощью электрических и магнитных полей можно управлять движением электронов на пути от анода до экрана и заставить электронный луч «рисовать» любую картину на экране. Эта способность электронного луча используется для создания изображений на экране электронно-лучевой трубки телевизора, называемой кинескопом. Изменение яркости свечения пятна на экране достигается путем управления

интенсивностью пучка электронов с помощью дополнительного электрода, расположенного между катодом и анодом и работающего по принципу управляющей сетки электровакуумного триода.

В трубке электронно-лучевого осциллографа между анодом и экраном расположены две пары параллельных металлических пластин. Эти пластины называются отклоняющими пластинами. Подача напряжения на вертикально расположенные пластины 4 вызывает смещение электронного луча в горизонтальном направлении, подача напряжения на горизонтальные пластины 3 вызывает вертикальное отклонение луча. Смещения луча на экране трубки пропорциональны приложенному напряжению, поэтому электронный осциллограф может использоваться в качестве электроизмерительного прибора.

Для исследования быстропеременных электрических процессов в осциллографе осуществляется развертка — равномерное перемещение электронного луча по горизонтали. Для того чтобы луч перемещался вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью, напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах должно изменяться линейно во времени, а для возвращения луча в исходное положение напряжение должно очень быстро падать до нуля. Такая форма напряжения носит название пилообразной (рис. 176).



Электрический ток в металлах

Электрический ток в металлах — это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля. опыты показывают, что при протекании тока по металлическому проводнику не происходит переноса вещества, следовательно, ионы металла не принимают участия в переносе электрического заряда.

Наиболее убедительное доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах с инерцией электронов. Идея таких опытов и первые качественные результаты принадлежат русским физикам Л. И. Мандельштаму и Н. Д. Папалекси (1913 г.). В 1916 году американский физик Р. Толмен и шотландский физик Б. Стюарт усовершенствовали методику этих опытов и выполнили количественные измерения, неопровержимо доказавшие, что ток в металлических проводниках обусловлен движением электронов. Схема опыта Толмена и Стюарта показана на рис. 1. Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к чувствительному **баллистическому гальванометру Г**. Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. Полный заряд, протекающий по цепи, измерялся по отбросу стрелки гальванометра.

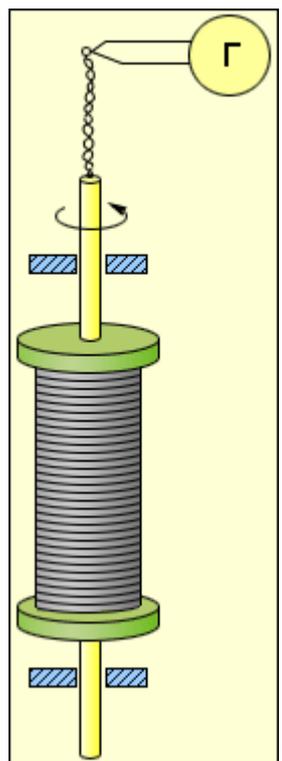


Рисунок 1 Схема опыта Толмена и Стюарта.

При торможении вращающейся катушки на каждый носитель заряда e действует

$$F = -m \frac{dv}{dt},$$

тормозящая сила, которая играет роль **сторонней силы**, то есть силы неэлектрического происхождения. Сторонняя сила, отнесенная к единице заряда, по определению является напряженностью $E_{ст}$ поля сторонних сил:

$$E_{ст} = - \frac{m}{e} \frac{dv}{dt}.$$

Следовательно, в цепи при торможении катушки возникает электродвижущая сила \mathcal{E} , равная

$$\mathcal{E} = E_{ст} l = - \frac{m}{e} \frac{dv}{dt} l,$$

где l – длина проволоки катушки. За время торможения катушки по цепи протечет заряд q , равный

$$q = \int I dt = \frac{1}{R} \int \mathcal{E} dt = \frac{m}{e} \frac{lv_0}{R}.$$

Здесь I – мгновенное значение силы тока в катушке, R – полное сопротивление цепи, v_0 – начальная линейная скорость проволоки. Отсюда удельный заряд e/m свободных носителей тока в металлах равен:

$$\frac{e}{m} = \frac{h\nu_0}{Rq}$$

Все величины, входящие в правую часть этого соотношения, можно измерить. На основании результатов опытов Толмена и Стюарта было установлено, что носители свободного заряда в металлах имеют отрицательный знак, а отношение заряда носителя к его массе близко к удельному заряду электрона, полученному из других опытов. Так было установлено, что носителями свободных зарядов в металлах являются электроны. По современным данным модуль заряда электрона (**элементарный заряд**) равен

$$e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

а его удельный заряд есть

$$\frac{e}{m} = 1,75882 \cdot 10^{11} \text{ Кл / кг}.$$

Хорошая электропроводность металлов объясняется высокой концентрацией свободных электронов, равной по порядку величины числу атомов в единице объема. Предположение о том, что за электрический ток в металлах ответственны электроны, возникло значительно раньше опытов Толмена и Стюарта. Еще в 1900 году немецкий ученый П. Друде на основе гипотезы о существовании свободных электронов в металлах создал электронную теорию проводимости металлов. Эта теория получила развитие в работах голландского физика Х. Лоренца и носит название **классической электронной теории**. Согласно этой теории, электроны в металлах ведут себя как электронный газ, во многом похожий на идеальный газ. Электронный газ заполняет пространство между ионами, образующими кристаллическую решетку металла (рис. 2).

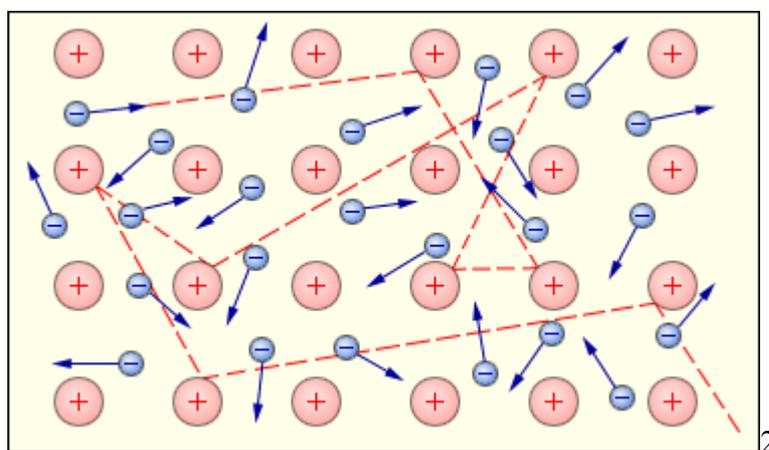


Рисунок 2 Газ свободных электронов в кристаллической решетке металла. Показана траектория одного из электронов.

Из-за взаимодействия с ионами электроны могут покинуть металл, лишь преодолев так называемый **потенциальный барьер**. Высота этого барьера называется **работой выхода**. При обычных (комнатных) температурах у электронов не хватает энергии для преодоления потенциального барьера. Как ионы, образующие решетку, так и электроны участвуют в тепловом движении. Ионы совершают тепловые колебания вблизи положений равновесия – узлов кристаллической решетки. Свободные электроны движутся хаотично и при своем движении сталкиваются с ионами решетки. В результате таких столкновений устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом

и решеткой. Согласно теории Друде–Лоренца, электроны обладают такой же средней энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного идеального газа. Это

позволяет оценить среднюю скорость \bar{v}_T теплового движения электронов по формулам молекулярно-кинетической теории.

При комнатной температуре она оказывается примерно равной 105 м/с. При наложении внешнего электрического поля в металлическом проводнике кроме теплового движения электронов возникает их упорядоченное движение (дрейф), то есть

электрический ток. Среднюю скорость \bar{v}_D дрейфа можно оценить из следующих соображений. За интервал времени Δt через поперечное сечение S проводника пройдут все

электроны, находившиеся в объеме $S\bar{v}_D\Delta t$. Число таких электронов равно $nS\bar{v}_D\Delta t$, где n – средняя концентрация свободных электронов, примерно равная числу атомов в единице объема металлического проводника. Через сечение проводника за время Δt пройдет заряд $\Delta q = enS\bar{v}_D\Delta t$.

Отсюда следует:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enS\bar{v}_D$$

или

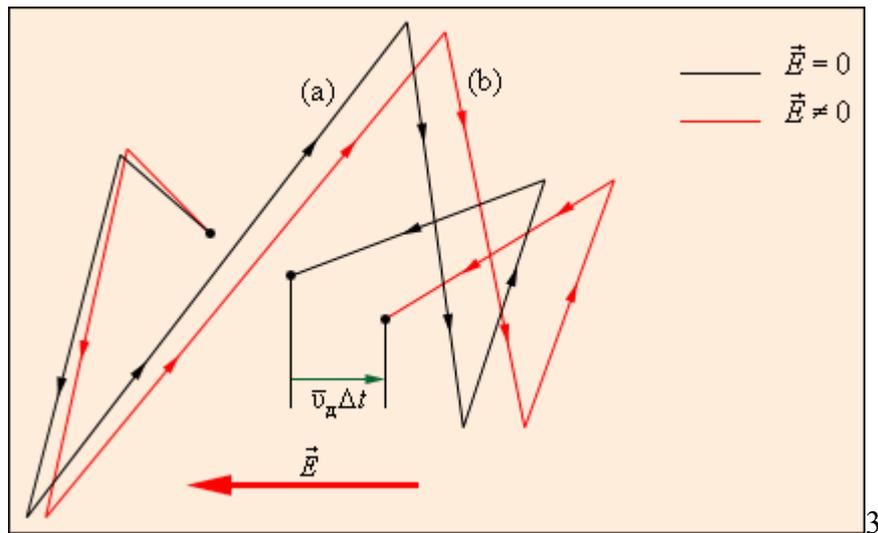
$$\bar{v}_D = \frac{I}{enS}$$

Концентрация n атомов в металлах находится в пределах 10^{28} – 10^{29} м⁻³. Оценка по этой формуле для металлического проводника сечением 1 мм², по которому течет ток

10 А, дает для **средней скорости \bar{v}_D упорядоченного движения электронов значение в**

пределах 0,6–6 мм/с. Таким образом, средняя скорость \bar{v}_D упорядоченного движения электронов в металлических проводниках на много порядков меньше средней

скорости \bar{v}_T их теплового движения $\left(\bar{v}_D \ll \bar{v}_T\right)$. **дает представление о характере движения свободного электрона в кристаллической решетке.**



Движение свободного электрона в кристаллической решетке:
 а – хаотическое движение электрона в кристаллической
 решетке металла; б – хаотическое движение с дрейфом,

обусловленным электрическим полем. Масштабы дрейфа
 сильно преувеличены.

Малая скорость дрейфа на противоречит опытному факту, что ток во всей цепи постоянного тока устанавливается практически мгновенно. Замыкание цепи вызывает распространение электрического поля со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Через время порядка l/c (l – длина цепи) вдоль цепи устанавливается стационарное распределение электрического поля и в ней начинается упорядоченное движение электронов. В классической электронной теории металлов предполагается, что движение электронов подчиняется законам механики Ньютона. В этой теории пренебрегают взаимодействием электронов между собой, а их взаимодействие с положительными ионами сводят только к соударениям. Предполагается также, что при каждом соударении электрон передает решетке всю накопленную в электрическом поле энергию и поэтому после соударения он начинает движение с нулевой дрейфовой скоростью. Несмотря на то, что все эти допущения являются весьма приближенными, классическая электронная теория качественно объясняет законы электрического тока в металлических проводниках. **Закон Ома.** В промежутке между соударениями на электрон действует сила, равная по модулю

$$\frac{eE}{m}$$

eE , в результате чего он приобретает ускорение. Поэтому к концу свободного пробега дрейфовая скорость электрона равна

$$v_{\text{д}} = \left(v_{\text{д}} \right)_{\text{max}} = \frac{eE}{m} \tau,$$

где τ – время свободного пробега, которое для упрощения расчетов предполагается

одинаковым для всех электронов. Среднее значение скорости дрейфа $\bar{v}_{\text{д}}$ равно половине максимального значения:

$$\bar{v}_{\text{д}} = \frac{1}{2} \left(v_{\text{д}} \right)_{\text{max}} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \tau.$$

Рассмотрим проводник длины l и сечением S с концентрацией электронов n . Ток в проводнике может быть записан в виде:

$$I = enSv_{\text{д}} = \frac{1}{2} \frac{e^2 n S}{m} E = \frac{e^2 n S}{2ml} U,$$

где $U = El$ – напряжение на концах проводника. Полученная формула выражает закон Ома для металлического проводника. Электрическое сопротивление проводника равно:

$$R = \frac{2m}{e^2 n \tau} \frac{l}{S},$$

а удельное сопротивление ρ и удельная проводимость ν выражаются соотношениями:

$$\rho = \frac{2m}{e^2 n \tau}; \quad \nu = \frac{1}{\rho} = \frac{e^2 n \tau}{2m}.$$

Закон Джоуля–Ленца. К концу свободного пробега электроны приобретают под действием поля кинетическую энергию

$$\frac{1}{2} m (v_{\text{д}})_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2 \tau^2}{m} E^2.$$

Согласно сделанным предположениям, вся эта энергия передается решетке при соударении и переходит в тепло. За время Δt каждый электрон испытывает $\Delta t / \tau$ соударений. В проводнике сечением S и длины l имеется nSl электронов. Отсюда следует, что выделяемое в проводнике за время Δt тепло равно:

$$\Delta Q = \frac{nSl \Delta t}{\tau} \frac{e^2 \tau^2}{2m} E^2 = \frac{ne^2 \tau S}{2m l} U^2 \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

Это соотношение выражает **закон Джоуля–Ленца**. Таким образом, классическая электронная теория объясняет существование электрического сопротивления металлов, законы Ома и Джоуля–Ленца. Однако в ряде вопросов классическая электронная теория приводит к выводам, находящимся в противоречии с опытом. Эта теория не может, например, объяснить, почему молярная теплоемкость металлов, также как и молярная теплоемкость диэлектрических кристаллов, равна $3R$, где R – универсальная газовая постоянная (**закон Дюлонга и Пти**). Наличие свободных электронов на сказывается на величине теплоемкости металлов. Классическая электронная теория не может также объяснить температурную зависимость удельного сопротивления металлов. Теория дает $\rho \sim \sqrt{T}$,

в то время как из эксперимента получается зависимость $\rho \sim T$. Однако наиболее ярким примером расхождения теории и опытов является **сверхпроводимость**. Согласно классической электронной теории, удельное сопротивление металлов должно монотонно уменьшаться при охлаждении, оставаясь конечным при всех температурах. Такая зависимость действительно наблюдается на опыте при сравнительно высоких температурах. При более низких температурах порядка нескольких кельвинов удельное

сопротивление многих металлов перестает зависеть от температуры и достигает некоторого предельного значения.

Однако наибольший интерес представляет удивительное **явление сверхпроводимости**, открытое датским физиком Х. Каммерлинг-Оннесом в 1911 году. При некоторой определенной температуре $T_{кр}$, различной для разных веществ, удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля (рис. 3).

Критическая температура у ртути равна 4,1 К, у алюминия 1,2 К, у олова 3,7 К. Сверхпроводимость наблюдается не только у элементов, но и у многих химических соединений и сплавов. Например, соединение ниобия с оловом (Ni3Sn) имеет критическую температуру 18 К. Некоторые вещества, переходящие при низких температурах в сверхпроводящее состояние, не являются проводниками при обычных температурах. В то же время такие «хорошие» проводники, как медь и серебро, не становятся сверхпроводниками при низких температурах.

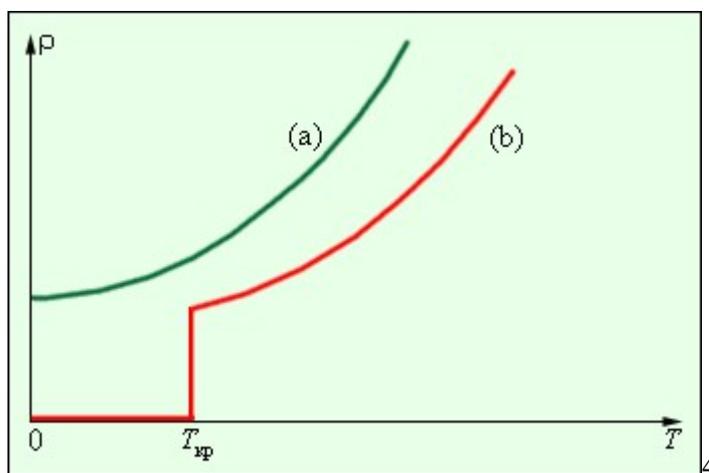


Рисунок 3. Зависимость удельного сопротивления ρ от абсолютной температуры T при низких температурах: а – нормальный металл; б – сверхпроводник.

Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают исключительными свойствами. Практически наиболее важным из них является способность длительное время (многие годы) поддерживать без затухания электрический ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи. Классическая электронная теория не способна объяснить явление сверхпроводимости. Объяснение механизма этого явления было дано только через 60 лет после его открытия на основе квантово-механических представлений.

Научный интерес к сверхпроводимости возрастал по мере открытия новых материалов с более высокими критическими температурами. Значительный шаг в этом направлении произошел в 1986 году, когда было обнаружено, что у одного сложного керамического соединения $T_{кр} = 35$ К. Уже в следующем 1987 году физики сумели создать новую керамику с критической температурой 98 К, превышающей температуру жидкого азота (77 К). Явление перехода веществ в сверхпроводящее состояние при температурах, превышающих температуру кипения жидкого азота, было названо **высокотемпературной сверхпроводимостью**.

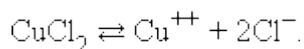
В 1988 году было создано керамическое соединение на основе элементов $Tl-Ca-Ba-Cu-O$ с критической температурой 125 К. В настоящее время ведутся интенсивные

работы по поиску новых веществ с еще более высокими значениями Ткр. Ученые надеются получить вещество в сверхпроводящем состоянии при комнатной температуре. Если это произойдет, это будет настоящей революцией в науке, технике и вообще в жизни людей. Следует отметить, что до настоящего времени механизм высокотемпературной сверхпроводимости керамических материалов до конца не выяснен.

Электрический ток в электролитах

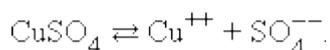
Электролитами принято называть проводящие среды, в которых протекание **электрического тока** сопровождается переносом вещества. Носителями свободных зарядов в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы. К электролитам относятся многие соединения металлов с металлоидами в расплавленном состоянии, а также некоторые твердые вещества. Однако основными представителями электролитов, широко используемыми в технике, являются **водные растворы неорганических кислот, солей и оснований**.

Прохождение электрического тока через электролит сопровождается выделением веществ на электродах. Это явление получило название **электролиза**. Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях. Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (**катоде**), отрицательные ионы – к положительному электроду (аноду). Ионы обоих знаков появляются в водных растворах солей, кислот и щелочей в результате расщепления части нейтральных молекул. Это явление называется **электролитической диссоциацией**. Например, хлорид меди CuCl_2 диссоциирует в водном растворе на ионы меди и хлора:

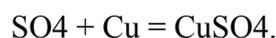


При подключении электродов к источнику тока ионы под действием электрического поля начинают упорядоченное движение: положительные ионы меди движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы хлора – к аноду. Достигнув катода, ионы меди нейтрализуются избыточными электронами катода и превращаются в нейтральные атомы, оседающие на катоде. Ионы хлора, достигнув анода, отдают по одному электрону.

После этого нейтральные атомы хлора соединяются попарно и образуют молекулы хлора Cl_2 . Хлор выделяется на аноде в виде пузырьков. Во многих случаях электролиз сопровождается **вторичными реакциями** продуктов разложения, выделяющихся на электродах, с материалом электродов или растворителей. Примером может служить электролиз водного раствора сульфата меди CuSO_4 (медный купорос) в том случае, когда электроды, опущенные в электролит, изготовлены из меди. Диссоциация молекул сульфата меди происходит по схеме



Нейтральные атомы меди отлагаются в виде твердого осадка на катоде. Таким путем можно получить химически чистую медь. Ион SO_4^{--} отдает аноду два электрона и превращается в нейтральный радикал SO_4 вступает во вторичную реакцию с медным анодом:



Образовавшаяся молекула сульфата меди переходит в раствор. Таким образом, при прохождении электрического тока через водный раствор сульфата меди происходит растворение медного анода и отложение меди на катоде. Концентрация раствора сульфата меди при этом не изменяется.

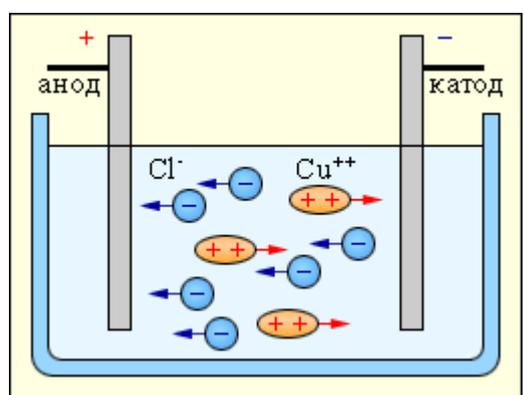


Рисунок 4. Электролиз водного раствора хлорида меди.

Закон электролиза был экспериментально установлен английским физиком М. Фарадеем в 1833 году. **Закон Фарадея** определяет количества первичных продуктов, выделяющихся на электродах при электролизе: **Масса m вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду Q , прошедшему через электролит:**

$$m = kQ = kIt.$$

Величину k называют **электрохимическим эквивалентом**. Масса выделившегося на электроде вещества равна массе всех ионов, пришедших к электроду:

$$m = m_0 N = m_0 \frac{Q}{q_0} = \frac{m_0}{q_0} It.$$

$$N = \frac{Q}{q_0}$$

Здесь m_0 и q_0 – масса и заряд одного иона, N – число ионов, пришедших к электроду при прохождении через электролит заряда Q . Таким образом, электрохимический эквивалент k равен отношению массы m_0 иона данного вещества к его заряду q_0 . Так как заряд иона равен произведению валентности вещества n на элементарный заряд e ($q_0 = ne$), то выражение для электрохимического эквивалента k можно записать в виде

$$k = \frac{m_0}{q_0} = \frac{m_0 N_A}{ne N_A} = \frac{1}{F} \frac{M}{n}.$$

Здесь NA – постоянная Авогадро, $M = m_0NA$ – молярная масса вещества, $F = eNA$ – **постоянная Фарадея**.

$$F = eNA = 96485 \text{ Кл / моль.}$$

Постоянная Фарадея численно равна заряду, который необходимо пропустить через электролит для выделения на электроде одного моля одновалентного вещества. Закон Фарадея для электролиза приобретает вид:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It.$$

Явление электролиза широко применяется в современном промышленном производстве.

Библиографический список

http://fizikaXX.ayp.ru/4/4_13.html

http://class-XXfizika.narod.ru/10_13.htm

http://physics.XXkgsu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=213

http://nika-XXfizika.narod.ru/68_0.htm

<http://www.XXmiruma.ru/elektricheskiy-tok-v-razlichnyih-sredah/>

http://fizika.XXayp.ru/4/4_15.html