

## Тема 13. Электрический ток в различных средах

### 1. Электрический ток в металлах

Еще раз рассмотрим упрощенное строение металла. Электроны на внешних оболочках атомов слабо связаны с ядрами, поэтому могут их покидать и свободно перемещаться между узлами кристаллической решетки. В узлах находятся не нейтральные атомы, а положительные ионы. Электроны движутся хаотично, наподобие молекул газа, поэтому и получили название *электронный газ*. Именно этот электронный газ определяет такие важные свойства металлов как электропроводность и теплопроводность. Под действием внешнего ЭП электроны приходят в упорядоченное движение - возникает электрический ток. Это упорядоченное движение напоминает движение кучки мошкеры под порывом ветра - внутри кучки хаотичное движение сохраняется, но вся кучка смещается по направлению ветра. Электроны также сохраняют хаотичность движения, смещаясь под действием ЭП в определенном направлении. Поэтому средняя скорость упорядоченного движения электронов в металле составляет *миллиметры в секунду*. Возникает вопрос: а почему же, когда мы щелкаем выключателем, лампочки вспыхивают мгновенно? Ответ прост: электроны в проводах почти одновременно начинают двигаться упорядоченно по всей длине проводов потому, что скорость распространения ЭП почти равна скорости света - 300 000 км/с.

**Электрический ток в металлах - это упорядоченное движение электронов.**

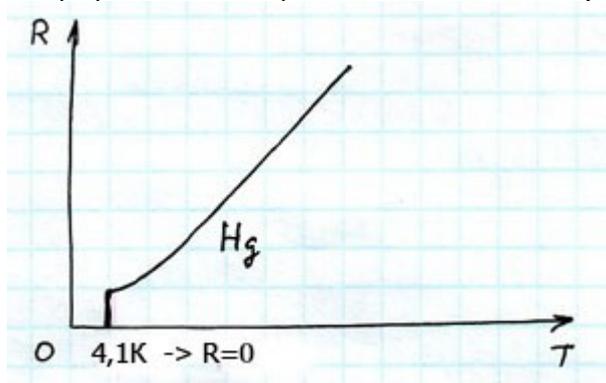
Ионы в узлах кристаллической решетки металла совершают хаотические колебания. Размах этих колебаний зависит от температуры => чем выше температура металла, тем больше его сопротивление, поскольку ионы сильнее препятствуют упорядоченному движению электронов. Наоборот, чем ниже температура, тем сопротивление меньше. Казалось бы, что при  $T=0$ , когда прекращается хаотичное колебательное движение ионов, и сопротивление должно стать равным нулю  $R=0$ . Однако заряд ионов не исчезает, силы электрического притяжения остаются => сопротивление металла не может стать равным нулю даже при абсолютном нуле. Такой вывод можно сделать на основе МКТ.

На графике показана зависимость  $R(T)$ , построенная основе МКТ. Видно, что при  $T=0$  сопротивление металла не равно нулю и имеет некоторое значение  $R_0$ .



В 1911 г голландский физик Камерлинг-Оннес, занимаясь исследованием зависимости сопротивления металлов от температуры, обнаружил странный эффект: при охлаждении ртути (Hg) в жидком гелии (He) ее сопротивление сначала уменьшается в соответствии с приведенным выше графиком, но при температуре 4,1K резко падает до нуля. Это явление было названо сверхпроводимостью.

На графике показана реальная зависимость  $R(T)$  для ртути:



Позже было обнаружено, что аналогично сопротивление зависит от температуры для всех металлов. Разница лишь в том, что разные металлы переходят в сверхпроводящее состояние при разных температурах.

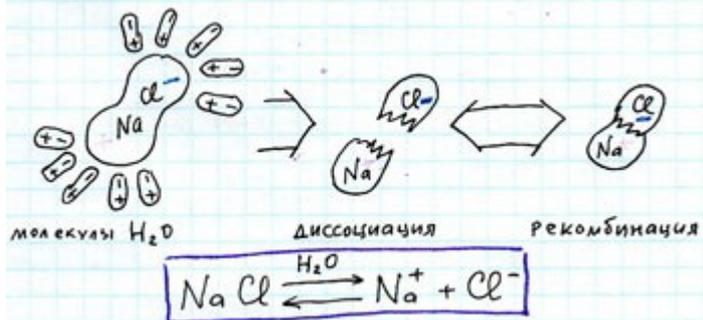
В соответствии с законом Джоуля-Ленца, если  $R=0$  то и  $Q=0$  => в сверхпроводящем проводнике не выделяется тепла и ток течет по нему без потерь. Объяснить явление сверхпроводимости на основе МКТ невозможно.

## 2. Электрический ток в жидкостях

Жидкости могут быть проводниками, если в них имеются свободные носители электрических зарядов. Такие жидкости называют электролитами. К электролитам относятся, например, водные растворы солей, кислот и щелочей.

Рассмотрим образование свободных носителей зарядов на примере простейшего электролита - раствора поваренной соли в воде.

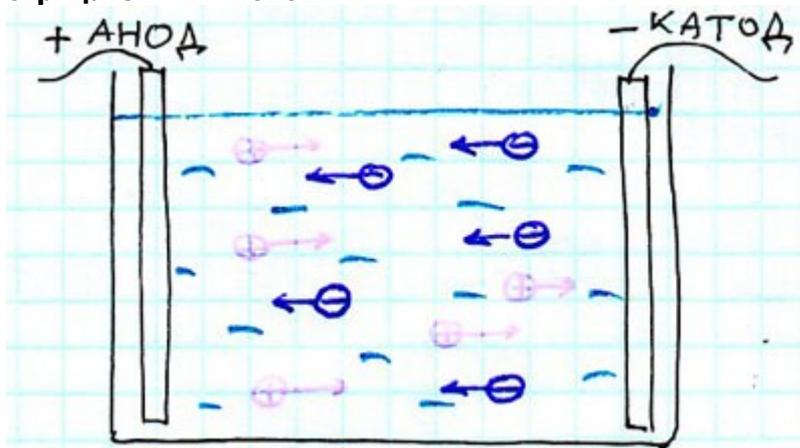
Если в дистиллированную воду бросить несколько крупинок соли, то она растворится - распадется на молекулы **NaCl**. В воде полярные молекулы соли попадают под воздействие также полярных молекул воды,



и под действием этих молекул распадаются на ионы **Na<sup>+</sup>** и **Cl<sup>-</sup>**. Процесс распада нейтральных молекул на ионы называется **электролитической диссоциацией**. Ионы движутся в электролите хаотично → могут сталкиваться друг с другом и вновь образовывать нейтральные молекулы. Процесс образования нейтральных молекул называется **рекомбинацией**. Нейтральные молекулы вновь распадаются и т.д. Таким образом, в электролите постоянно протекают эти два процесса. Если температура электролита не меняется (**T = const**), то в электролите устанавливается *динамическое равновесие* - процессы диссоциации и рекомбинации уравниваются друг друга, а средняя концентрация свободных носителей заряда не меняется. При повышении температуры начинает преобладать диссоциация → количество свободных ионов увеличивается, при понижении температуры - наоборот.

Если в электролит поместить два электрода, подключенных к источнику тока, то под действием ЭП свободные ионы станут двигаться упорядоченно → в электролите возникнет ток.

**Электрический ток в электролитах - это упорядоченное движение положительных и отрицательных ионов.**



При этом на электродах будет выделяться вещество - это называется электролизом. Масса выделившегося вещества рассчитывается по простой формуле:

$$m = kIt \quad \text{закон Фарадея для электролиза}$$

$I$  - сила тока ;  $t$  - время

$k$  - электрохимический эквивалент вещества

$$k = \frac{M}{F \cdot \nu} \quad \begin{array}{l} M - \text{молярная масса} \\ \nu - \text{валентность} \end{array}$$

$$F = 96500 \frac{Кл}{\text{моль}} - \text{постоянная Фарадея}$$

Читается закон Фарадея: масса вещества, выделяющаяся при электролизе, прямо пропорциональна силе тока, времени и зависит от рода вещества.

С помощью постоянной Фарадея впервые удалось рассчитать заряд электрона - элементарный заряд:

$$F = e \cdot N_A, \text{ где } e - \text{ заряд электрона}$$
$$N_A - \text{ пост. Авогадр}$$

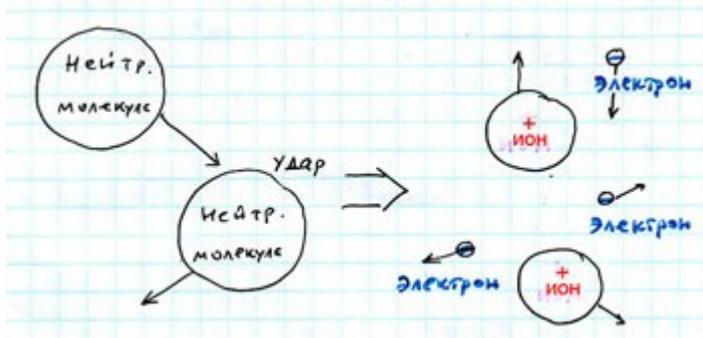
В задачах по электролизу часто используется специальная величина - плотность тока:

$$j = \frac{I}{S} - \text{плотность тока} \quad [j] - 1 \text{ А/м}^2$$

### 3. Электрический ток в газах

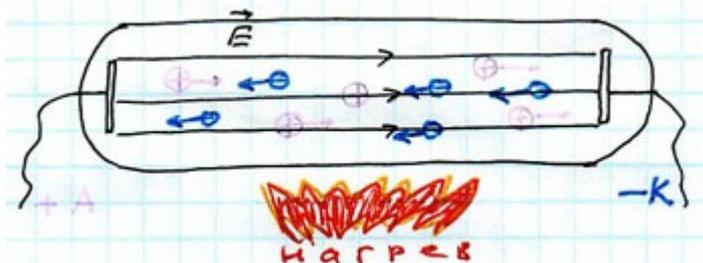
В обычных условиях газы являются диэлектриками. Для того, чтобы они стали проводниками, их необходимо подвергнуть определенным внешним воздействиям: нагреть до высокой температуры, создать ЭП высокой напряженности или подвергнуть радиоактивному облучению. В любом из этих случаев в газах будут образовываться свободные носители электрического заряда. Внешние факторы, под действием которых в газах образуются свободные носители электрического заряда, называются **ионизаторами**. Как видно из названия, в результате их действия образуются, главным образом, ионы. На самом деле, не только ионы.

С повышением температуры возрастает интенсивность хаотического движения нейтральных молекул газа => возрастает их скорость и импульс => при столкновениях выбиваются электроны с внешних оболочек => образуются свободные электроны и положительные ионы - это процесс ионизации (аналогичен процессу диссоциации). Значит в газах свободными носителями заряда являются электроны и положительные ионы.



Само собой, при хаотичном движении ионы могут захватывать электроны и вновь становиться нейтральными молекулами - это процесс рекомбинации в газах. Если температура газа не меняется, то средняя концентрация свободных носителей заряда также остается постоянной - устанавливается динамическое равновесие между процессами ионизации и рекомбинации. При изменении температуры оно нарушается в одну или другую сторону.

Если сосуд с газом, в который впаяны два электрода, нагреть, а на электроды подать напряжение - в газе возникнет ЭП, под действием которого свободные носители станут двигаться упорядоченно - возникнет ток.



**Электрический ток в газах - это упорядоченное движение положительных ионов и электронов.**

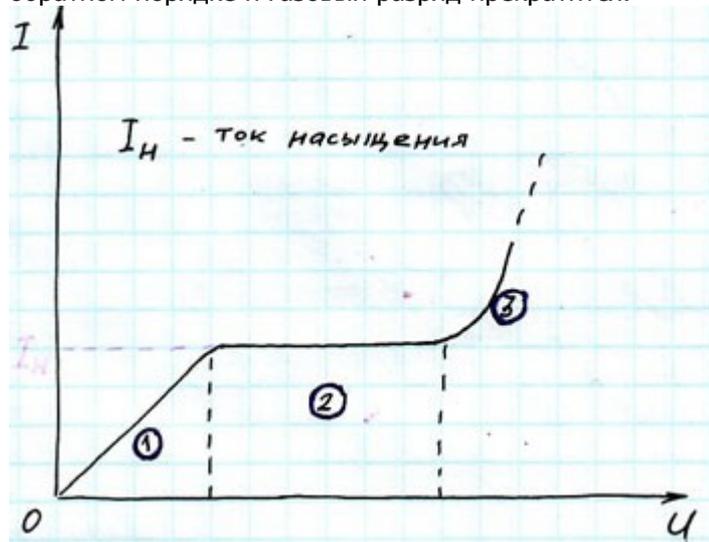
### 4. Газовый разряд

**Газовым разрядом** называют процесс протекания электрического тока через газ. Существует **два типа газовых разрядов**:

а) **несамостоятельный** - для его поддержания необходимо постоянное действие внешнего ионизатора; прекращается действие ионизатора - прекращается разряд.

Рассмотрим график зависимости **I (U)** для газа. Если напряжение между электродами постепенно увеличивать, то в начале сила тока будет возрастать пропорционально напряжению (**область 1**) - выполняется закон Ома. При дальнейшем повышении напряжения (**область 2**) сила тока перестает расти и становится постоянной - наступает **насыщение**. Это происходит потому, что происходит полное

прекращение процесса рекомбинации. Если теперь действие ионизатора прекратить, то все произойдет в обратном порядке и газовый разряд прекратится.



б) **самостоятельный** - продолжается и после прекращения действия внешнего ионизатора.

При достижении достаточно большого напряжения между электродами сила тока в газе резко возрастает. Это объясняется тем, что  $E_k$  электронов становится настолько большой, что они могут выбивать из молекул другие электроны - ударная ионизация. При этом количество свободных носителей резко возрастает => возрастает сила тока (область 3). Если теперь действие внешнего ионизатора убрать - выключить горелку, то ток уже не прекратится.

Самостоятельный разряд поддерживается также тем, что:

а) положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны - вторичная электронная эмиссия;

б) сам катод, разогреваясь, начинает испускать свободные электроны - термоэлектронная эмиссия.

Самостоятельные разряды бывают следующих видов:

- **тлеющий** разряд возникает при небольших токах (порядка нескольких ампер), невысоких напряжениях (от десятков до сотен вольт) и невысоком давлении (порядка 10 Па);

- **коронный** разряд возникает при обычном давлении (100000 Па), очень высокой напряженности ЭП (порядка десятков тысяч В/м) и резкой неоднородности ЭП, особенно на острых выступах;

- **дуговой** разряд возникает при обычном атмосферном давлении, напряжении в несколько десятков или сотен вольт и силе тока в несколько сотен ампер; этот разряд образуется между двумя угольными электродами;

- **искровой** разряд возникает при напряженности в сотни тысяч миллионы В/м, силе тока в десятки тысяч ампер и обычном атмосферном давлении;

- в некоторых случаях после искрового разряда (так называемой линейной молнии) образуется шаровая молния или **шаровой** разряд, физические параметры которой еще пока не изучены.

## 5. Понятие о плазме

**Плазмой** называют частично или полностью ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов примерно равны.

Низкотемпературная плазма имеет температуру до сотен тысяч градусов, высокотемпературная - от миллиона градусов.

Плазма обладает рядом особых свойств, благодаря которым ее относят к **ЧЕТВЕРТОМУ** агрегатному состоянию вещества:

- между частицами плазмы действуют очень мощные силы электрического взаимодействия;

- частицы плазмы легкоподвижные, поэтому в ней легко возникает электрический ток;

- сами по себе частицы очень быстро движутся, поэтому любые нарушения равномерного распределения положительных и отрицательных зарядов быстро самоликвидируются;

- в связи с высокой подвижностью частиц, в плазме легко возникают различные колебания и волны;

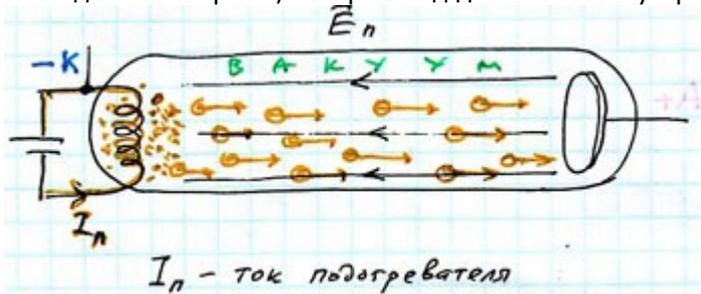
- проводимость плазмы увеличивается с ростом температуры, поэтому полностью ионизированная плазма является почти сверхпроводником.

Из плазмы состоит 99% вещества во Вселенной, например: Солнце, все звезды, туманности, межзвездная среда.

Слой земной атмосферы на высоте от 60 км до 300 км представляет собой разреженный ионизированный и называется ионосферой. Это атмосферный слой влияет, например, на прохождение радиоволн (см. Тема 18, п. 5).

## 6. Ток в вакууме

Вакуум - это пустота. Следовательно, чтобы создать ток в вакууме необходим некий источник свободных носителей заряда. Таким источником может быть подогреваемый катод. Вспомним, что отрицательный электрод способен испускать в окружающее пространство электроны. Это явление называется **термоэлектронной эмиссией**. Итак, если в сосуд, где создан вакуум, поместить два электрода, причем отрицательный разогреть при помощи того же электрического тока, то с его поверхности начнут вылетать свободные электроны, которые под действием ЭП устремятся к аноду:



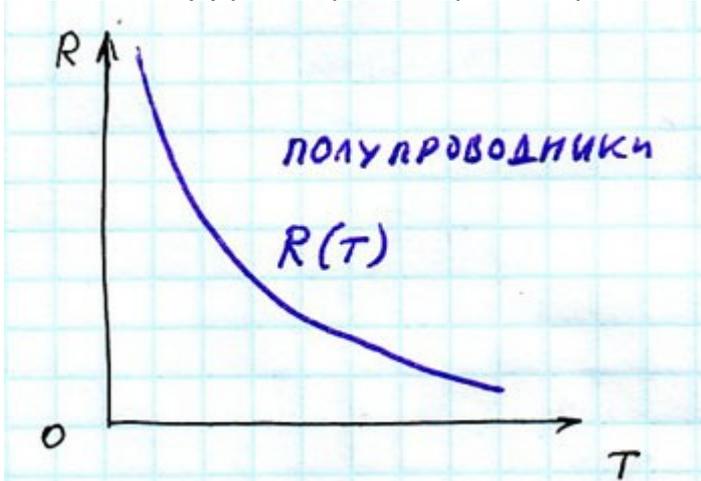
**Электрический ток в вакууме - это упорядоченное движение свободных носителей заряда, создаваемых источником.** Мы взяли конкретный пример - подогреваемый катод создает свободные электроны. Но существуют способы создания в вакууме потока протонов или ионов. Ток в вакууме используется в электронно-лучевых трубках и в электронных лампах.

Поток заряженных частиц в вакууме образует так называемый **пучок**. Так, например, пучки электронов обладают следующими свойствами:

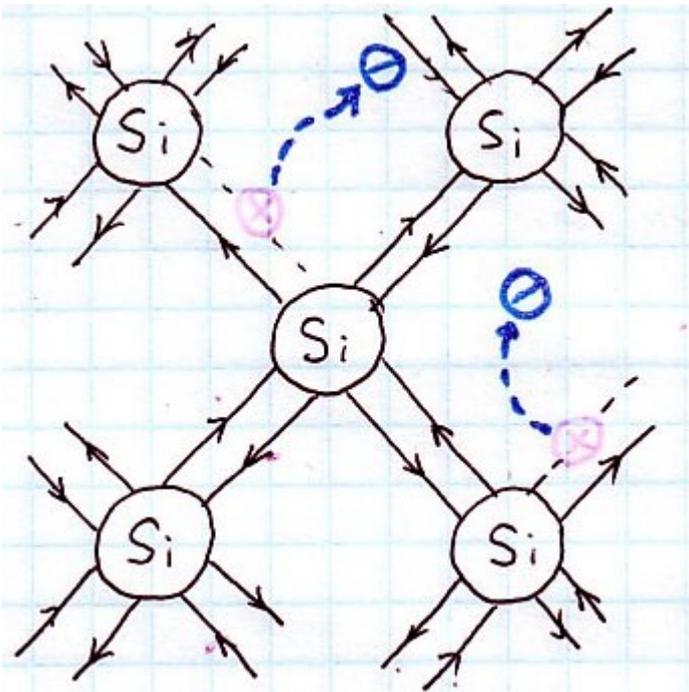
- попадая на поверхность некоторых веществ (стекла) они вызывают свечение;
- легко меняют свое направление под действием электрического и магнитного полей;
- попадая на поверхность твердого тела, вызывают его нагревание;
- при резком торможении создают рентгеновское излучение.

## 7. Ток в полупроводниках

Существует целый класс веществ, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Они проводят электрический ток, но довольно плохо, и их проводимость в значительной степени зависит от внешних факторов - температуры, освещенности, механических нагрузок, магнитного и/или электрического полей, от влажности воздуха или атмосферного давления. Такие вещества называют **полупроводниками**. К ним относятся: **Si, Ge, Se, PbS, CdS** и т.д. Зависимость  $R(T)$  у них обратная: с ростом  $T$  уменьшается  $R$ , с понижением  $T$  - растет  $R$



Рассмотрим образование свободных носителей заряда на примере кремния (Si) - самого широко применяемого в настоящее время полупроводника. В обычном состоянии между атомами в кристалле кремния (он четырехвалентный) существуют устойчивые ковалентные связи за счет обмена четырьмя валентными электронами (на схеме они условно показаны отрезками, соединяющими атомы):



Во время хаотичных тепловых колебаний некоторые ковалентные связи разрываются - в пространство между атомами кристаллической решетки "вылетают" свободные электроны. На месте разорванной связи *как бы* образуется положительный заряд, который называют "**дыркой**".

**Дырка** - это воображаемая положительная частица, возникающая на месте разорванной ковалентной связи. Таких частиц на самом деле нет. Они придуманы для простоты объяснения электрического тока в полупроводниках.

Процесс образования свободных электронов и, соответственно, дырок в полупроводнике также называется *диссоциацией*. Естественно, в обычных условиях этот процесс хаотичен и некоторые электроны, вследствие кулоновского притяжения, могут возвращаться на свои места и восстанавливать разорванные связи - происходит *рекомбинация* электронов и дырок. С ростом температуры начинает преобладать диссоциация => возрастает концентрация свободных носителей заряда. Если температура не меняется, то диссоциация и рекомбинация уравнивают друг друга - наступает динамическое равновесие. С понижением температуры хаотическое движение ослабевает и при **T=0** полупроводник становится идеальным диэлектриком.

Под действием ЭП электроны и дырки начинают двигаться упорядоченно - возникает электрический ток.

**Электрический ток в полупроводниках - это упорядоченное движение электронов и дырок.**

Чистые полупроводники обладают так называемой *собственной электронно-дырочной проводимостью*.

Такие полупроводники используются редко. Гораздо чаще в электронике, например, применяют полупроводники, содержащие примеси. Дело в том, что некоторые вещества могут значительно увеличить проводимость полупроводников, а именно:

- **As** (мышьяк) увеличивает количество свободных электронов за счет того, что он *пятивалентен* и каждый атом **As** вносит один "лишний" свободный электрон - возрастает *электронная проводимость*. Примеси такого типа называют **донорами** - они отдают электроны. Полупроводники с электронной проводимостью называют полупроводниками **n-типа** (от лат. *negativ*).

- **In** (индий) увеличивает количество свободных дырок за счет того, что он *трехвалентен* и каждый атом **In** создает одну "лишнюю" дырку из-за незавершенной связи - возрастает *дырочная проводимость*. Примеси такого типа называют **акцепторами** - они создают дырки. Полупроводники с дырочной проводимостью называют полупроводниками **p-типа** (от лат. *positiv*)

Полупроводники начали применять в начале XX века - из них были сделаны детекторы первых радиоприемников (20-е годы XX века). В настоящее время полупроводники применяются в любом электронном устройстве - на их основе созданы различные полупроводниковые приборы, в том числе процессоры и микроконтроллеры.

## Контрольные вопросы:

1. Опишите строение металла с точки зрения МКТ.
2. Опишите протекание тока с точки зрения МКТ.
3. Что представляет собой ток в металлах?
4. Как сопротивление металлов зависит от температуры?
5. В чем суть явления сверхпроводимости?
6. Что представляет собой простейший электролит?
7. Какой процесс называется электролитической диссоциацией?
8. Какой процесс называется рекомбинацией?
9. Что представляет собой ток в электролитах?
10. Какой процесс называется электролизом?
11. Как читается и записывается закон Фарадея?
12. От каких параметров зависит электрохимический эквивалент вещества?
13. Как впервые удалось рассчитать заряд электрона?
14. Что представляет собой плотность тока и в каких единицах измеряется?
15. При каких условиях газы становятся проводниками?
16. Опишите процесс ионизации газа при повышении температуры?
17. Что называется газовым разрядом?
18. Какие типы газовых разрядов вы знаете?
19. Опишите виды самостоятельного разряда.
20. Что называют плазмой?
21. Почему плазму относят к четвертому агрегатному состоянию вещества?
22. Что необходимо для создания тока в вакууме?
23. Как протекает термоэлектронная эмиссия?
24. перечислите свойства электронных пучков?
25. Какие вещества и почему относят к полупроводникам?
26. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры?
27. Как образуются свободные носители заряда в полупроводниках?
28. Какие примеси и почему называют «донорами»?
29. Какие примеси и почему называют «акцепторами»?
30. Приведите примеры применения полупроводников.