

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

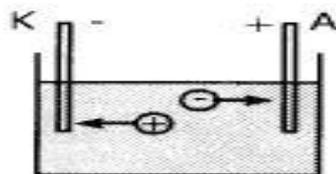
Среды	Носители заряда
Металлы	Свободные электроны
Электролиты	Положительные и отрицательные ионы
Газы, плазма	Электроны и ионы
Вакуум	Электроны, вылетевшие в результате эмиссии с поверхности металла
Полупроводники	Электроны и дырки

## МЕТАЛЛЫ

При образовании кристаллической решетки **валентные электроны** каждого атома "обобществляются", т.е. могут **свободно перемещаться** в пределах данного кристаллического тела. Сопротивление металлов обусловлено дефектами решетки и тепловыми колебаниями ионов (поэтому оно растет при нагревании). У ряда металлов и сплавов при охлаждении ниже некоторой критической температуры возникает **сверхпроводимость**: сопротивление становится равным нулю.

## ЭЛЕКТРОЛИТЫ

В растворах солей, щелочей, кислот постоянно происходит распад молекул на ионы (**электролитическая диссоциация**). При сближении положительных и отрицательных ионов может происходить обратный процесс (**рекомбинация**). Между этими процессами устанавливается динамическое равновесие при определенной степени диссоциации. Количество образовавшихся ионов при нагревании увеличивается, вследствие чего сопротивление электролита уменьшается.



Прохождение тока сопровождается **электролизом** — выделением на электродах веществ, входящих в состав электролита. Если масса и заряд иона  $m_0$  и  $q_0$ , а через электролит проходит заряд  $q = It$ , то

$$\frac{m}{q} = \frac{m_0}{q_0},$$

где  $m$  — масса вещества, выделившегося на электроде.

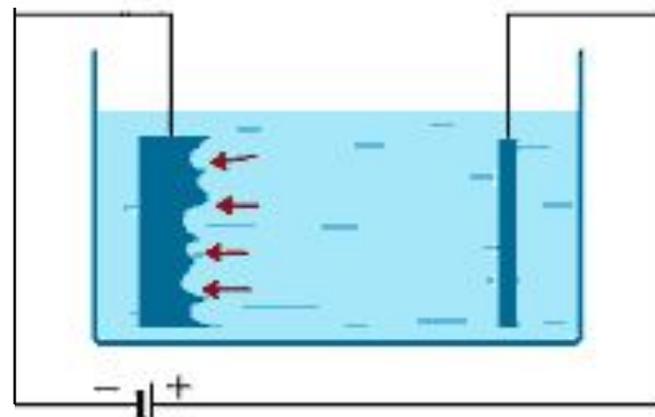
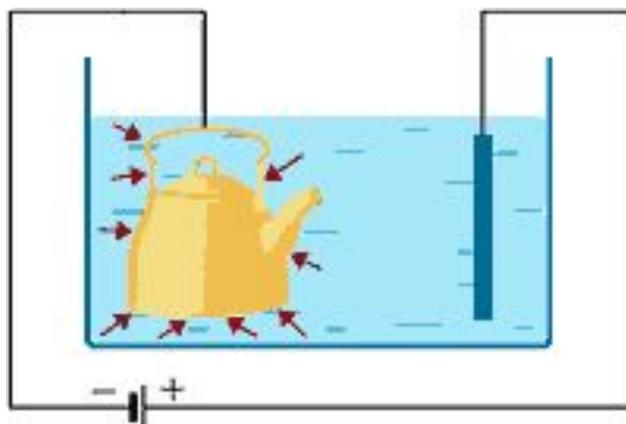
**Закон Фарадея.** Поскольку  $m_0 = \frac{M}{N_A}$ ;  $q_0 = ne$ , получаем

$$m = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n} I \cdot t = k \cdot I \cdot t.$$

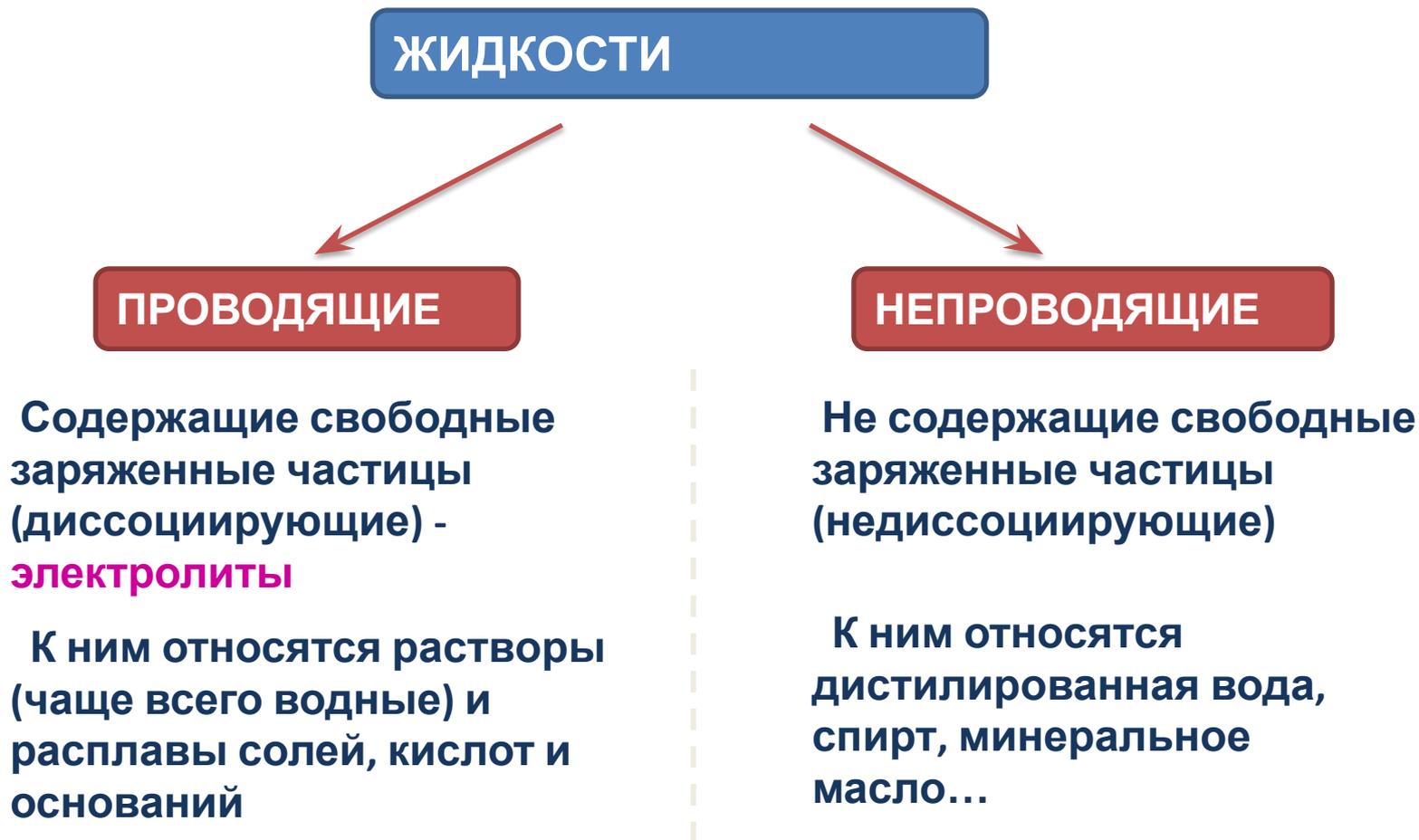
Здесь  $M$  — молярная масса,  $n$  — валентность,  $e$  — элементарный заряд,

$N_A$  — постоянная Авогадро,  $k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n}$  — **электрохимический эквивалент** вещества.

# Электрический ток В ЖИДКОСТЯХ

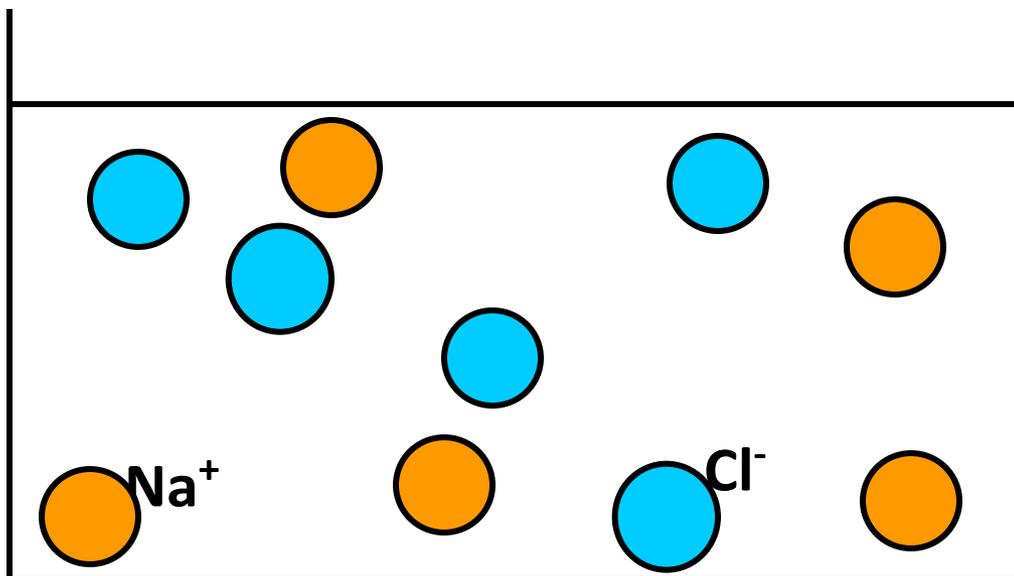
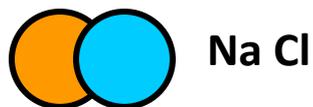


По электрическим свойствам все жидкости можно разделить на 2 группы:

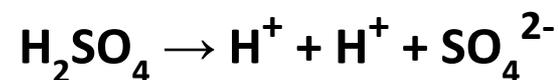


**Электролитической диссоциацией** называется распад нейтральных молекул вещества в растворителе на положительные и отрицательные ионы

## Электролитическая диссоциация поваренной соли

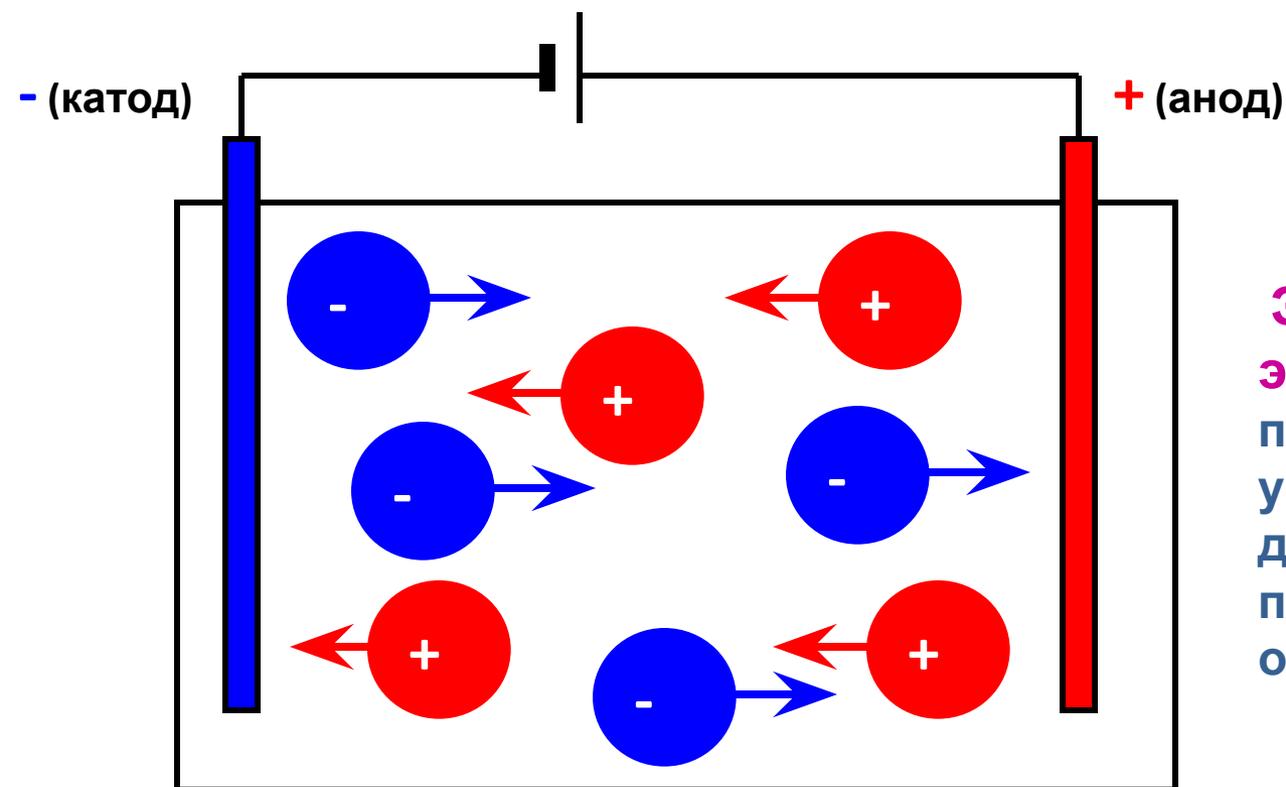


Диссоциация других  
веществ:



При диссоциации ионы металлов и водорода всегда заряжены положительно, а ионы кислотных радикалов и группы OH - отрицательно

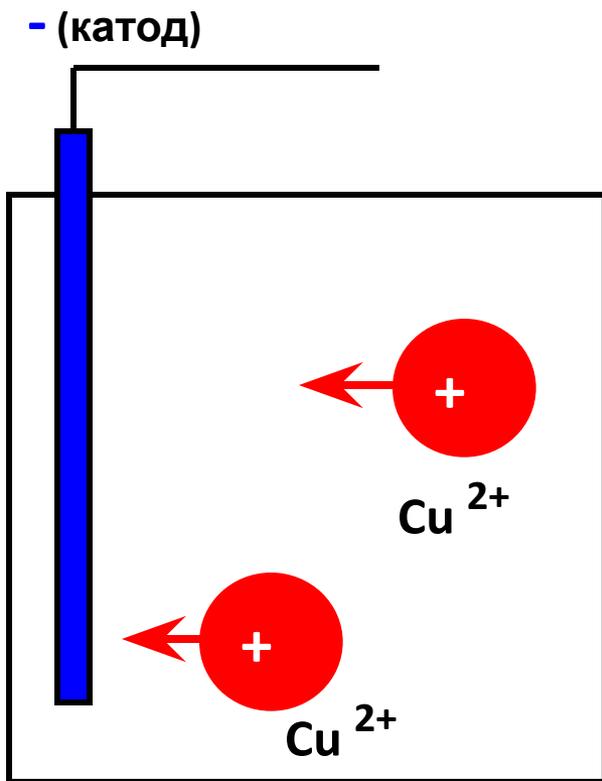
Ионы в электролите движутся хаотично, но при создании электрического поля характер движения становится упорядоченным: **положительные ионы (катионы) движутся к катоду, отрицательные ионы (анионы) движутся к аноду**



**Электрический ток в электролитах** представляет собой упорядоченное движение положительных и отрицательных ионов

Рассмотрим, что происходит, когда ионы достигают электродов (на примере медного купороса)

На катоде:

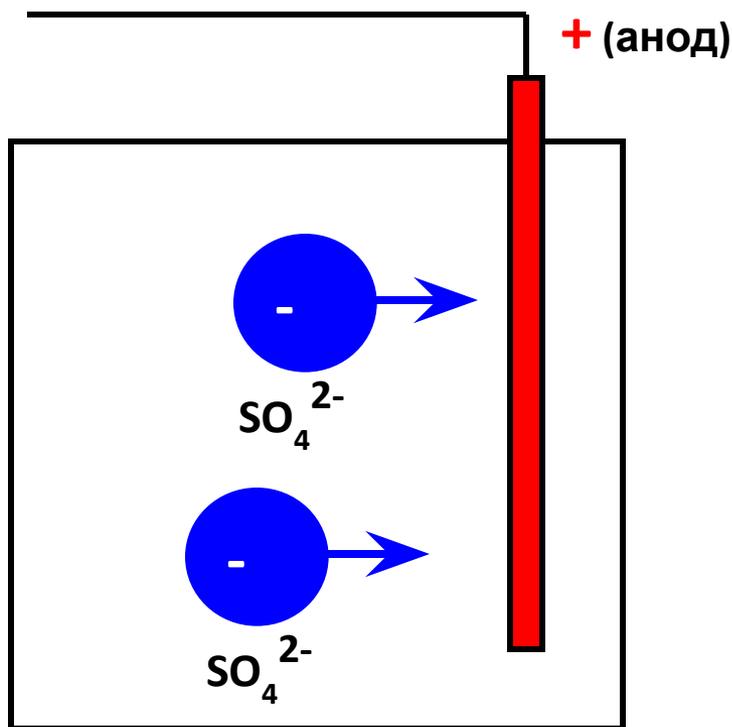


Положительные ионы меди, подходя к катоду, получают два недостающих электрона, восстанавливаясь до металлической меди



В процессе протекания тока через электролит на катоде происходит оседание слоя чистой меди – электролиз раствора медного купороса

На аноде:



Сульфат - ионы  $SO_4^{2-}$ , подходя к аноду, отдают ему два лишних электрона, которые через источник тока поступают на катод и присоединяются к положительным ионам меди

Выделение вещества на электродах вследствие окислительно – восстановительных реакций при прохождении тока через электролит называется **электролизом**

# Законы электролиза

Исследовал электролиз и открыл его законы английский физик Майкл Фарадей в 1834 году



**Майкл Фарадей (1791 – 1867)**

Открыл явление электромагнитной индукции, законы электролиза, ввел представления об электрическом и магнитном поле

## Первый закон электролиза

Масса вещества, выделившегося на электродах при электролизе, прямо пропорциональна величине заряда, прошедшего через электролит

$$m = kq$$

$k$  – электрохимический эквивалент вещества

(равен массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит заряда 1 Кл)

Если учесть, что  $q = I t$ , то

$$m = k \cdot I \cdot t$$

## Второй закон электролиза

При одинаковом количестве электричества (электрическом заряде, прошедшем через электролит) масса вещества, выделившегося при электролизе, пропорциональна отношению молярной массы вещества к валентности

$$m_1 : m_2 = k_1 : k_2 = \frac{M_1}{z_1} : \frac{M_2}{z_2}$$

$m$  – масса выделившегося вещества  
 $k$  – электрохимический эквивалент  
 $M$  – молярная масса вещества  
 $z$  – валентность вещества

Заряд, необходимый для выделения 1 моля вещества, одинаков для всех электролитов. Он называется **числом Фарадея  $F$**

$$F = N_A \cdot e = 9.65 \cdot 10^4 \text{ Кл / моль}$$

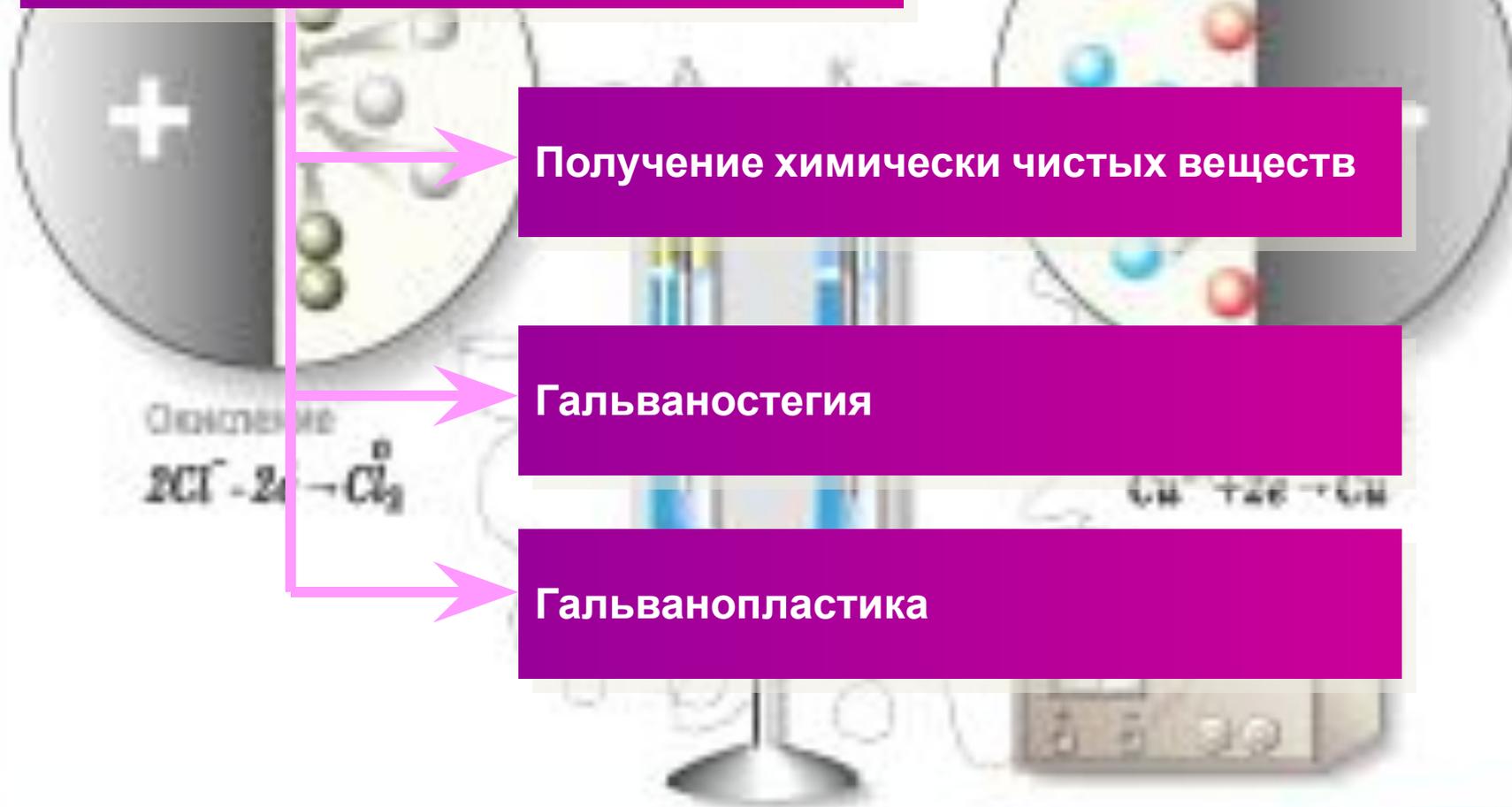
Электрохимический эквивалент и число Фарадея связаны соотношением

$$k = \frac{M}{zF}$$



Как отсюда экспериментально определить заряд электрона?

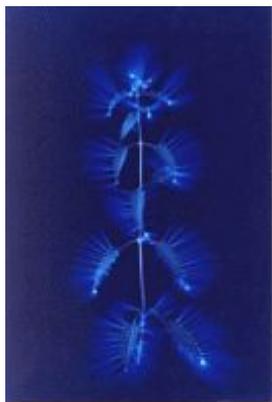
# ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА



Получение химически чистых веществ

Гальваностегия

Гальванопластика

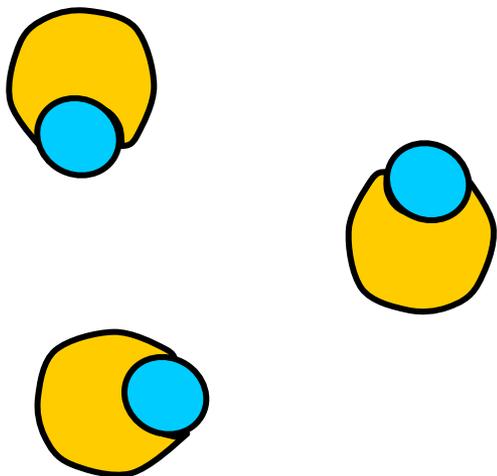


# Электрический ток в газах

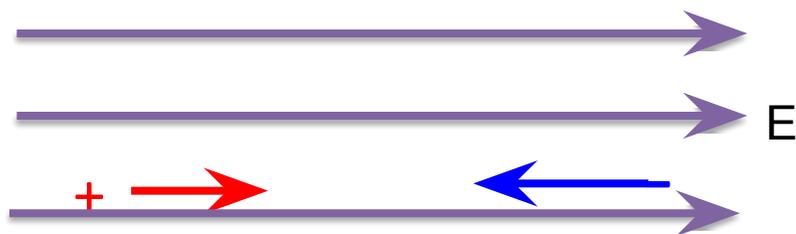


Газы при нормальных условиях являются диэлектриками, т.к. состоят из нейтральных атомов и не содержат свободных заряженных частиц

### Ионизация излучением



Для того, чтобы газ проводил электрический ток, атомы необходимо **ионизировать** – оторвать от них электроны, а значит сообщить атомам извне достаточное количество энергии



Энергия для ионизации может быть передана за счет:

- **сильного нагрева**
- **внешнего излучения** (рентгеновского, радиоактивного)
- **сильного электрического поля**

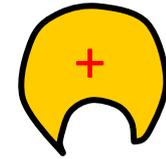
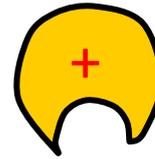
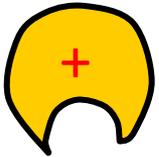
Положительный ион

Свободный электрон

Электрический ток в газах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов и положительных ионов

Если прекратить действие ионизатора (нагрев, излучение ...), то начинает преобладать обратный процесс объединения электронов и ионов в нейтральные атомы - **рекомбинация**

---



В процессе рекомбинации газ снова приобретает диэлектрические свойства



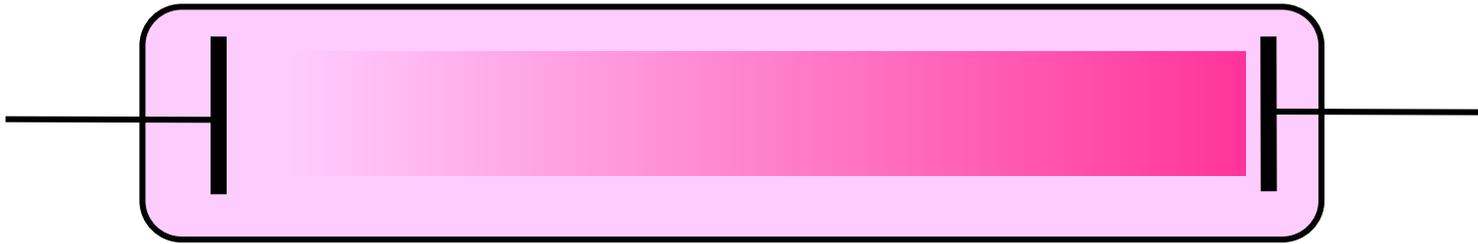
Таким образом электрические свойства газов сильно зависят от действия внешних ионизирующих факторов



# Типы разрядов в газах и их применение

## 1. Тлеющий разряд

---



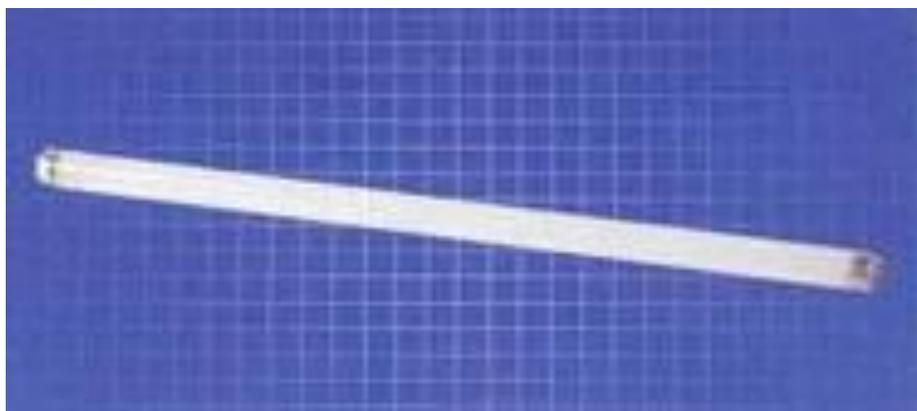
При сильно пониженном давлении самостоятельный разряд сопровождается свечением. Положительные ионы, ударяясь о катод, вызывают вторичную электронную эмиссию.

Положительный столб содержит одинаковое число положительных и отрицательных носителей заряда и является квазинейтральным (плазма). В результате рекомбинации происходит излучение света (УФ – излучение в парах ртути)

---

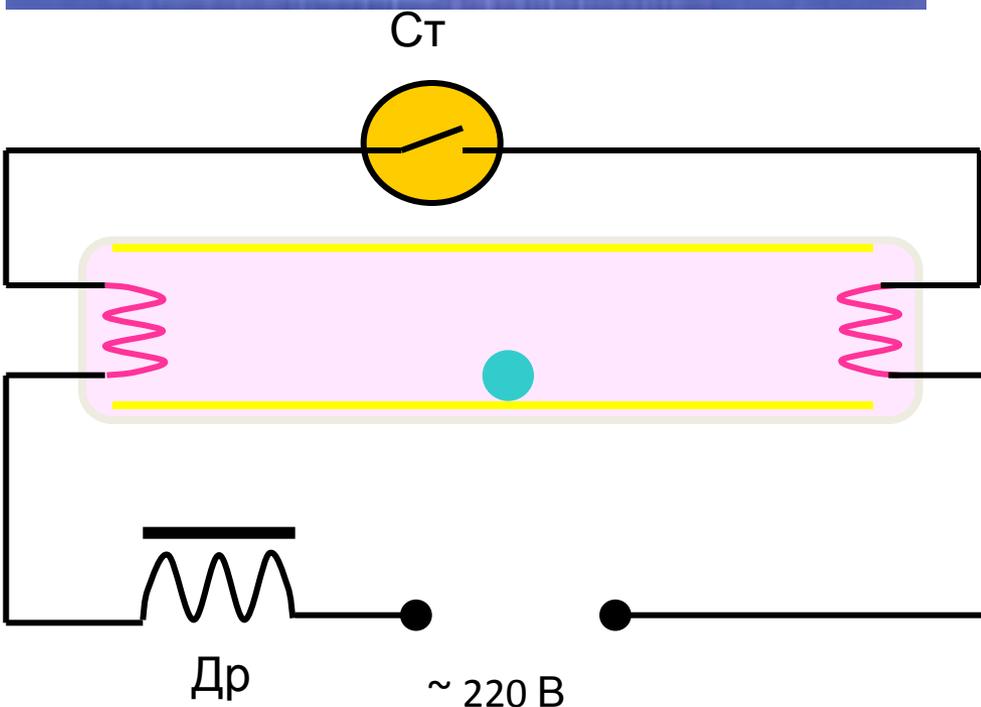
Тлеющий разряд широко применяется в лампах дневного света, газосветных трубках (реклама), ртутных ультрафиолетовых лампах («горное солнце»), неоновых лампах (индикация и стабилизация напряжения), импульсных лампах (лампы – вспышки)

## Применение тлеющего разряда – лампа дневного света



Ст – стартер (неоновая лампочка с биметаллом)

Др – дроссель для ограничения тока при газовом разряде



● - Капелька ртути, при испарении которой пары ртути излучают ультрафиолетовое излучение

— люминофор, преобразующий УФ – излучение паров ртути в видимое

Разберем принцип действия лампы ...

## 2. Искровой разряд

---



При высоком напряжении между электродами (напряженность электрического поля увеличивается до миллиона вольт на метр и выше) в газе происходит **искровой разряд** в виде кратковременной искры (пробой газа, обусловленный ионизацией молекул сильным электрическим полем)

---

Гигантский искровой разряд представляет собой природная молния, приносит искра и пользу человеку – зажигает топливо в камере сгорания двигателей внутреннего сгорания, зажигает газ в газовой плите ...

### 3. Дуговой разряд

---



В месте контакта двух проводников (например угольных электродов) при низких напряжениях (десятки вольт) выделяется большое количество тепла. При раздвигании проводников на расстояние несколько миллиметров в газе возникает разряд – **электрическая дуга**, которая является мощным источником тепла, света, ультрафиолетового излучения.

- выделяемое при этом тепло используется для расплавления и сварки деталей
- выделяемый свет используется в качестве мощных источников света в дуговых осветительных лампах



## 4. Коронный разряд

При атмосферном давлении вблизи заостренных участков проводников, имеющих большой электрический заряд, наблюдается в виде светящегося ореола – **коронный разряд**



На заостренных участках проводников с напряжением в десятки и сотни кВ возникает огромная напряженность электрического поля – свыше миллиона вольт на метр, вследствие чего прилежащий воздух ионизируется и происходит стекание заряда в виде маленьких искр, образующих корону

Особенно проявляется коронный разряд в линиях электропередачи (свыше 100 кВ)

Как борются с потерями энергии в ЛЭП, происходящими за счет коронного разряда?





# Электрический ток в вакууме



**Вакуум** – пространство, не содержащее каких – либо частиц (молекул, атомов, элементарных частиц ...)

---

**Абсолютный вакуум создать невозможно.  
Почему?**

?

**Скажите, где существует относительный вакуум**

?

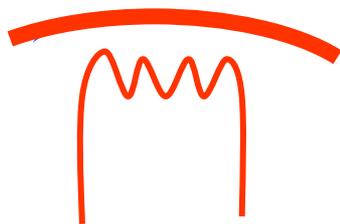
**Почему электрический ток в вакууме невозможен**

## Чтобы ток в вакууме стал возможен, необходим источник свободных заряженных частиц

---

Таким **источником** в вакуумных приборах служит **разогретый до высокой температуры (1000 – 2000<sup>0</sup>С) катод**, из которого вылетают электроны.

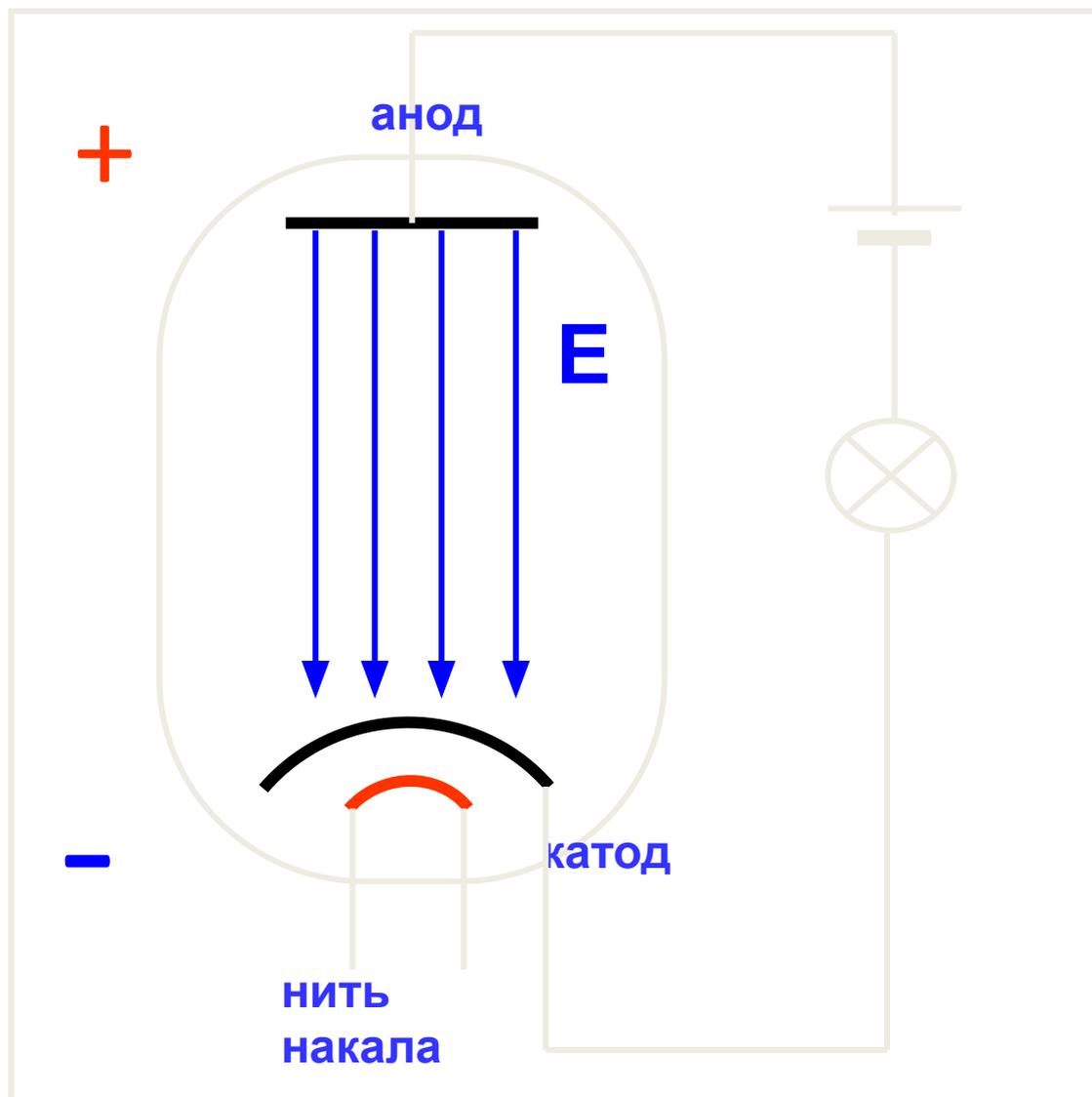
Это явление получило название **термоэлектронной эмиссии**



?

Почему при разогреве катода из него начинают вылетать электроны

# Вакуумный диод

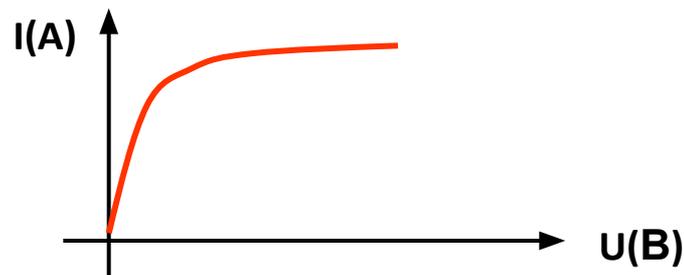


## 1. Прямое включение

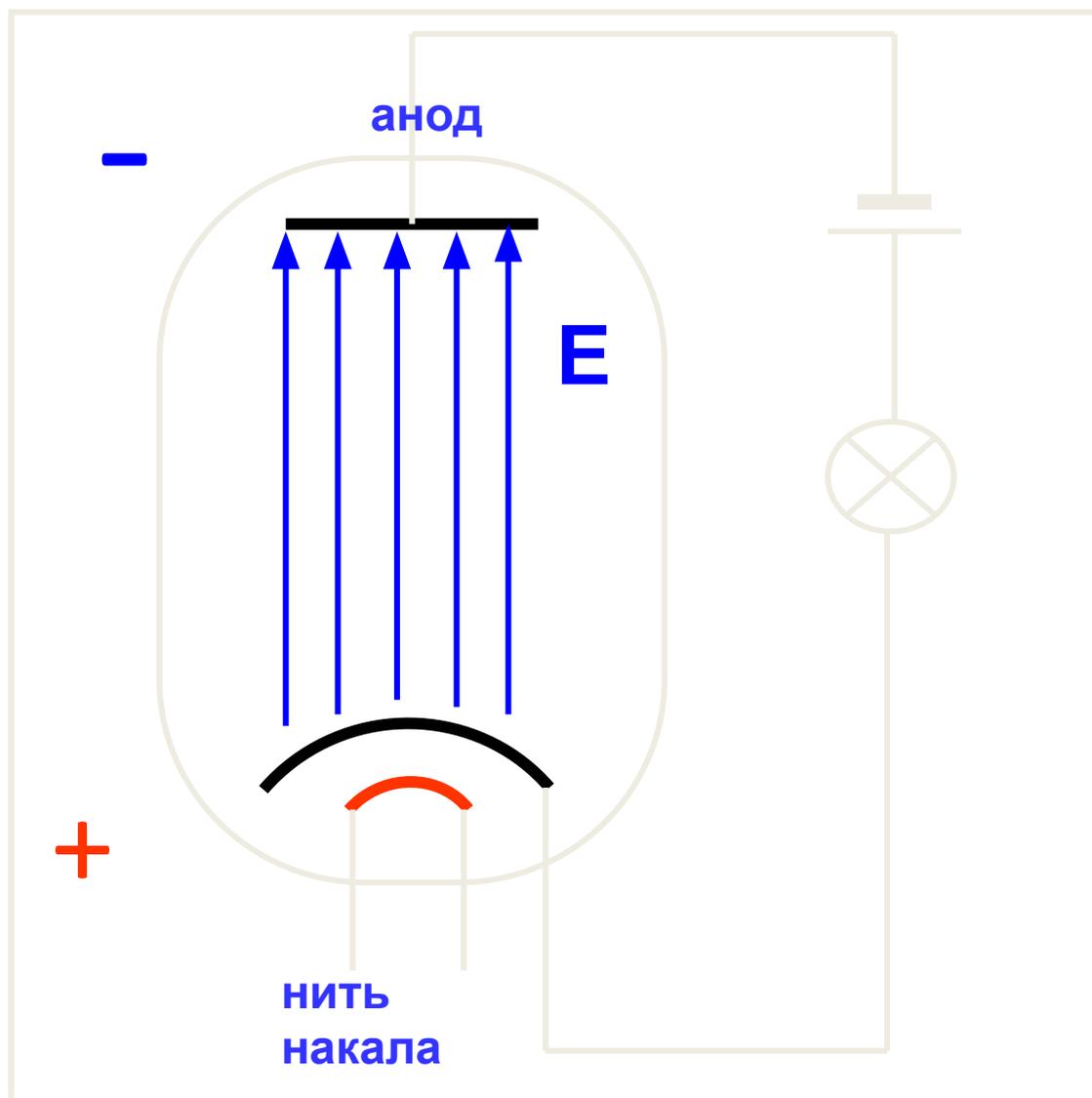
Электроны, вылетевшие из разогретого катода, устремляются к аноду, замыкая цепь

**Вакуумный диод хорошо проводит ток в прямом направлении**

При увеличении напряжения на аноде происходит **насыщение** – все электроны достигают анода



## Вакуумный диод

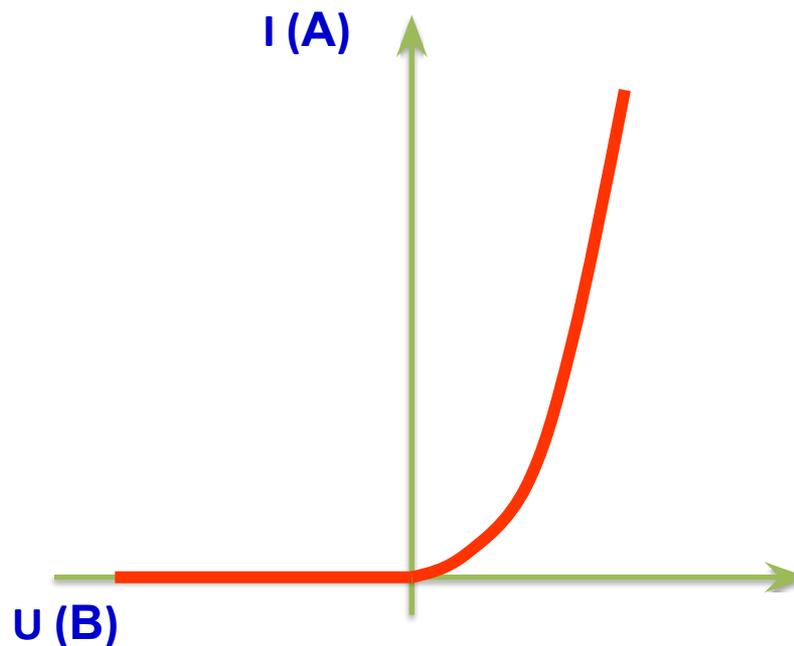


### 2. Обратное включение

Электроны, вылетевшие из разогретого катода, тормозятся электрическим полем и возвращаются к катоду

**Вакуумный диод не проводит ток в обратном направлении**

## Вольт – амперная характеристика вакуумного диода (ВАХ)



Вакуумный диод обладает **односторонней проводимостью** и применяется для выпрямления переменного тока (кенотрон)

# Вакуумный триод

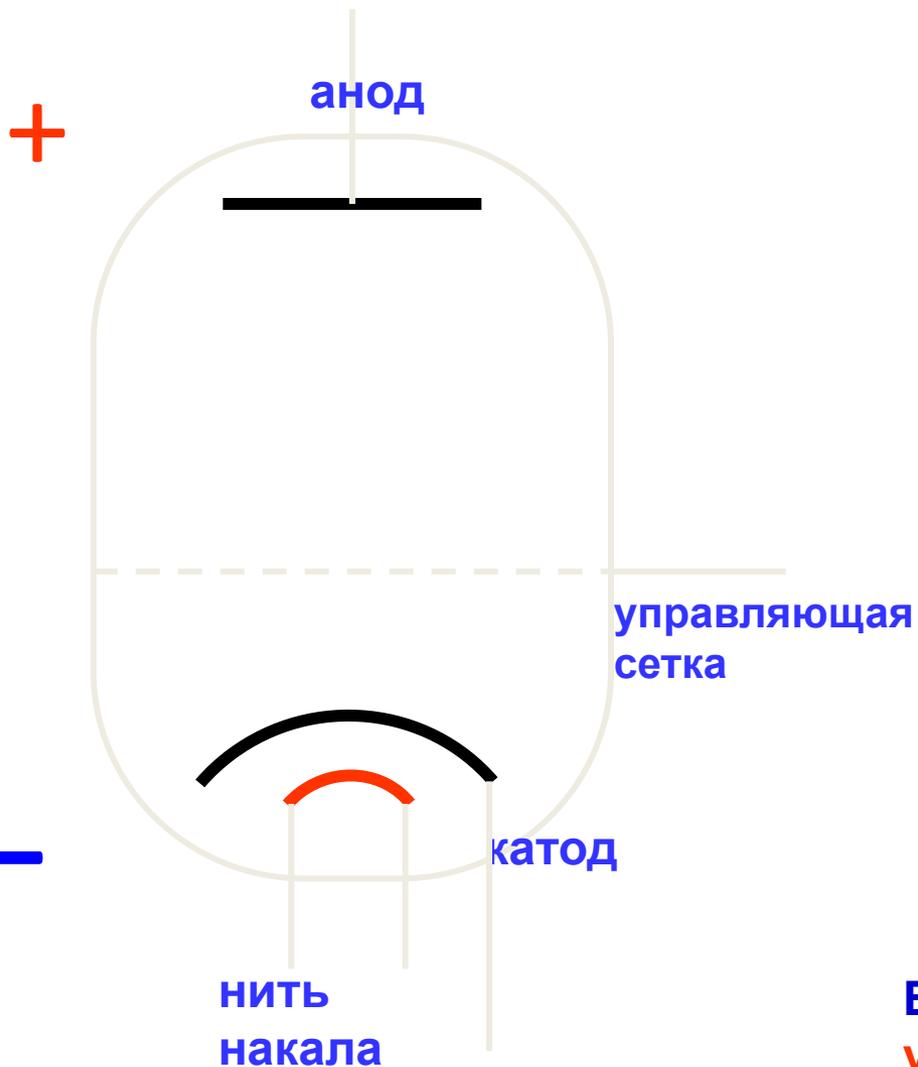
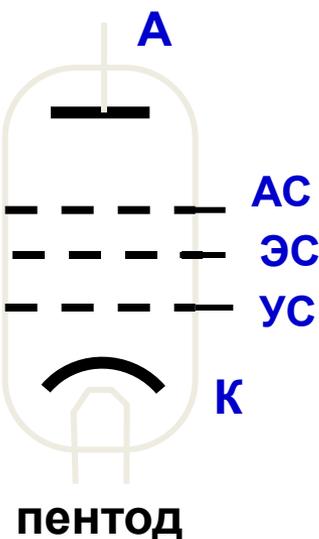
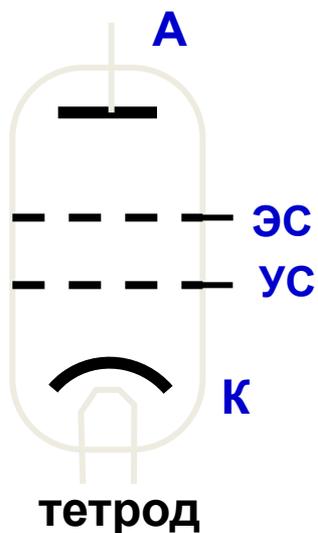


График изменения напряжения между катодом и сеткой

График изменения анодного тока

Вакуумный триод обладает **усилительными** свойствами

## Различные радиолампы



А - анод

К - катод

УС – управляющая сетка

ЭС – экранирующая сетка

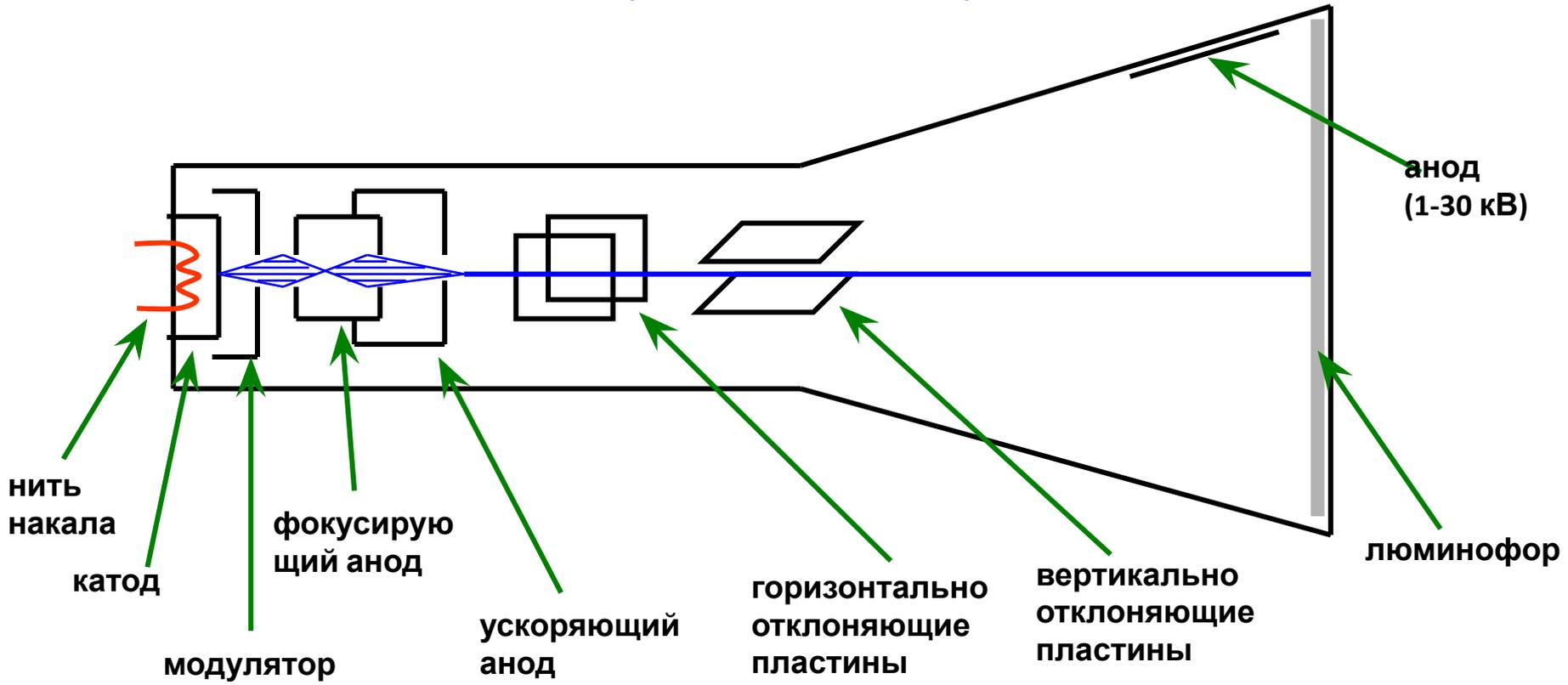
АС – защитная  
(антидинатронная) сетка

Существуют радиолампы с большим числом электродов (**гептод, октод** ...), а также совмещенные лампы (**триод – пентод, триод – триод** и т.д.)

Все они обладают усилительными свойствами и, хотя во многих случаях их заменили полупроводниковые элементы (транзисторы, диоды ...), радиолампы все еще широко используются, особенно при больших мощностях сигналов

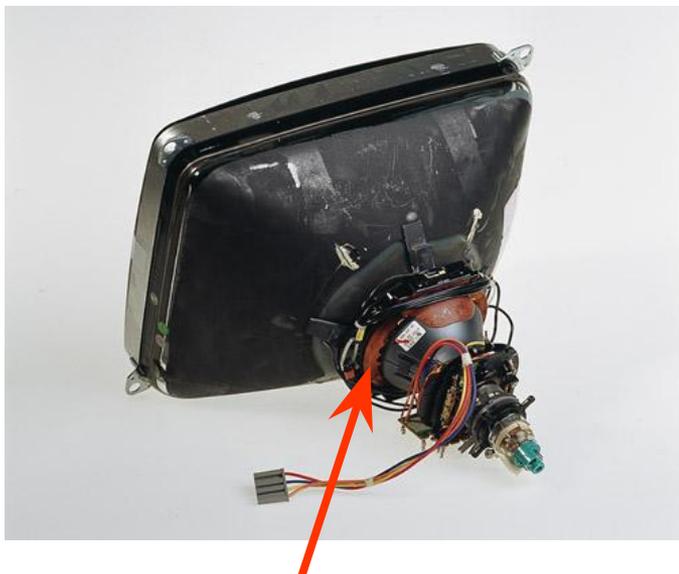
# Электронно – лучевая трубка

Электронно – лучевая трубка – электровакуумный прибор, в котором используется электронный пучок малого сечения, который может отклоняться в любом направлении, и, попадая на люминесцентный экран, создавать изображение



? Объясните принцип действия ЭЛТ и назначение каждого электрода

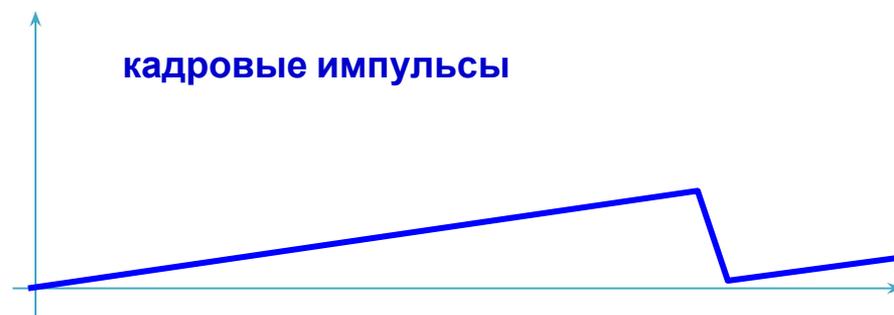
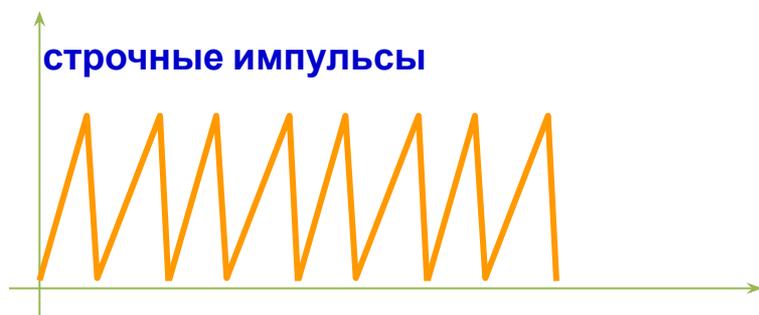
## Кинескоп телевизора



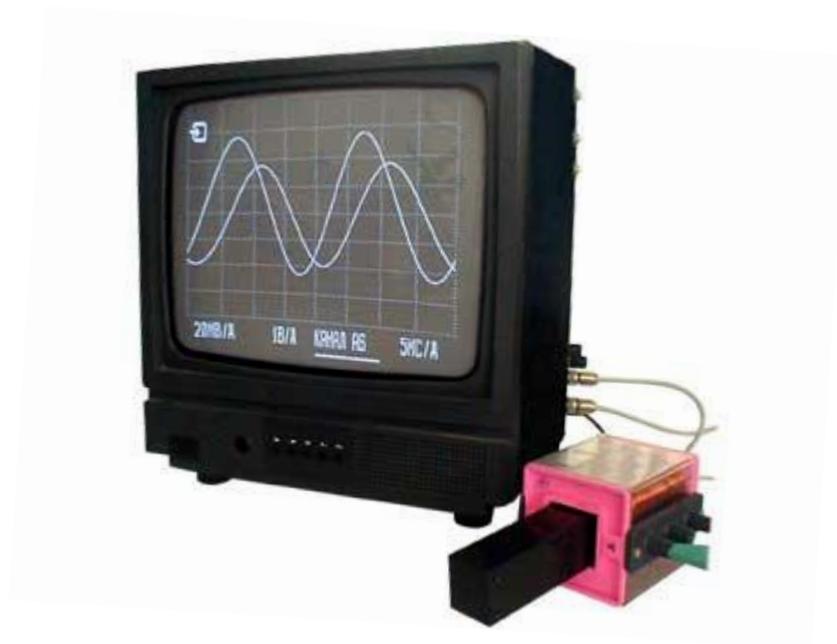
**Кинескоп** – электронно – вакуумная трубка, предназначенная для создания телевизионного изображения

Отличие кинескопа от осциллографической ЭЛТ в способе отклонения электронного луча

Отклонение луча происходит **магнитным полем**, создаваемым строчными и кадровыми катушками отклоняющей системы, находящейся на горловине кинескопа



# Электрический ток в полупроводниках



Разные вещества имеют различные электрические свойства, однако по электрической проводимости их можно разделить на 3 основные группы:

## Электрические свойства веществ

### Проводники

### Полупроводники

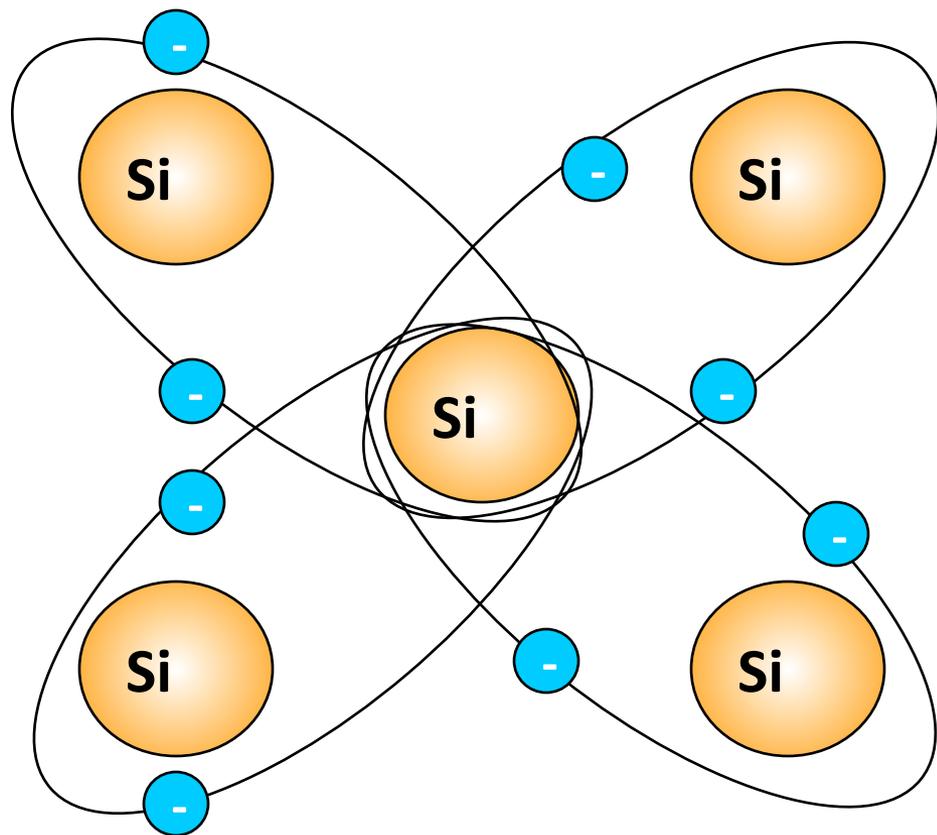
### Диэлектрики

**Хорошо проводят электрический ток**  
К ним относятся металлы, электролиты, плазма ...  
Наиболее используемые проводники – Au, Ag, Cu, Al, Fe ...

Занимают по проводимости **промежуточное положение** между проводниками и диэлектриками  
Si, Ge, Se, In, As

**Практически не проводят электрический ток**  
К ним относятся пластмассы, резина, стекло, фарфор, сухое дерево, бумага ...

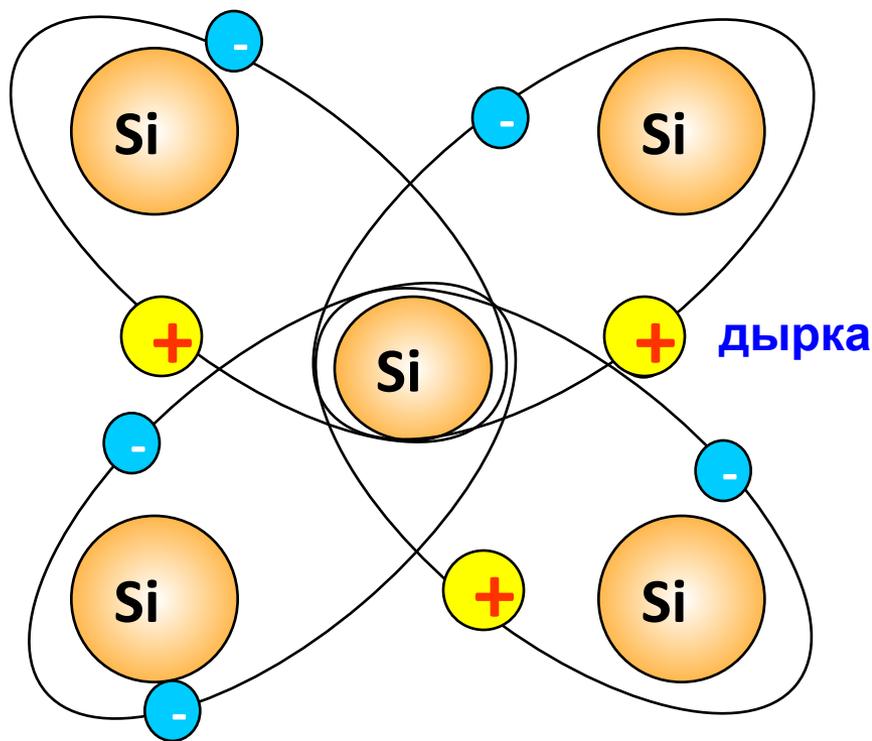
## Рассмотрим проводимость полупроводников на основе кремния Si



Кремний – **4 валентный** химический элемент. Каждый атом имеет во внешнем электронном слое по **4 электрона**, которые используются для образования **парноэлектронных (ковалентных) связей** с 4 соседними атомами

При обычных условиях (невысоких температурах) в полупроводниках отсутствуют свободные заряженные частицы, поэтому полупроводник не проводит электрический ток

Рассмотрим изменения в полупроводнике при увеличении температуры



**свободный электрон**

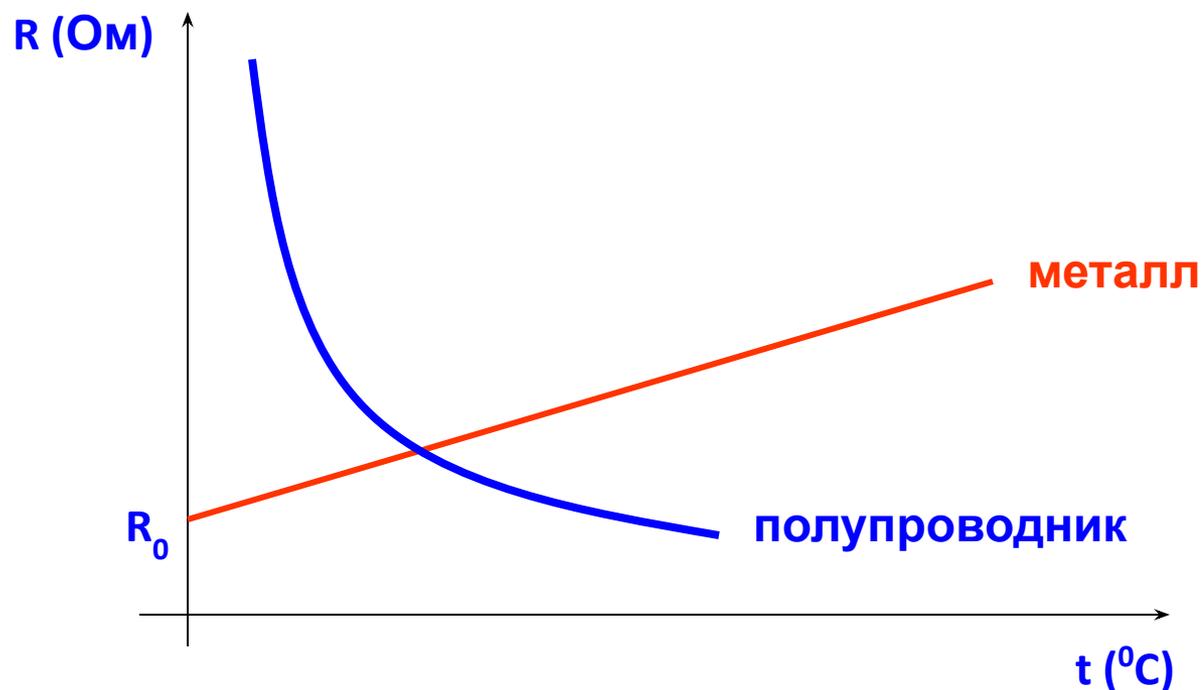
Под воздействием электрического поля электроны и дырки начинают упорядоченное (встречное) движение, образуя электрический ток

При увеличении температуры энергия электронов увеличивается и некоторые из них покидают связи, становясь **свободными электронами**. На их месте остаются некомпенсированные электрические заряды (виртуальные заряженные частицы), называемые **дырками**

Таким образом, **электрический ток в полупроводниках** представляет собой упорядоченное движение **свободных электронов** и положительных виртуальных частиц - **дырок**

---

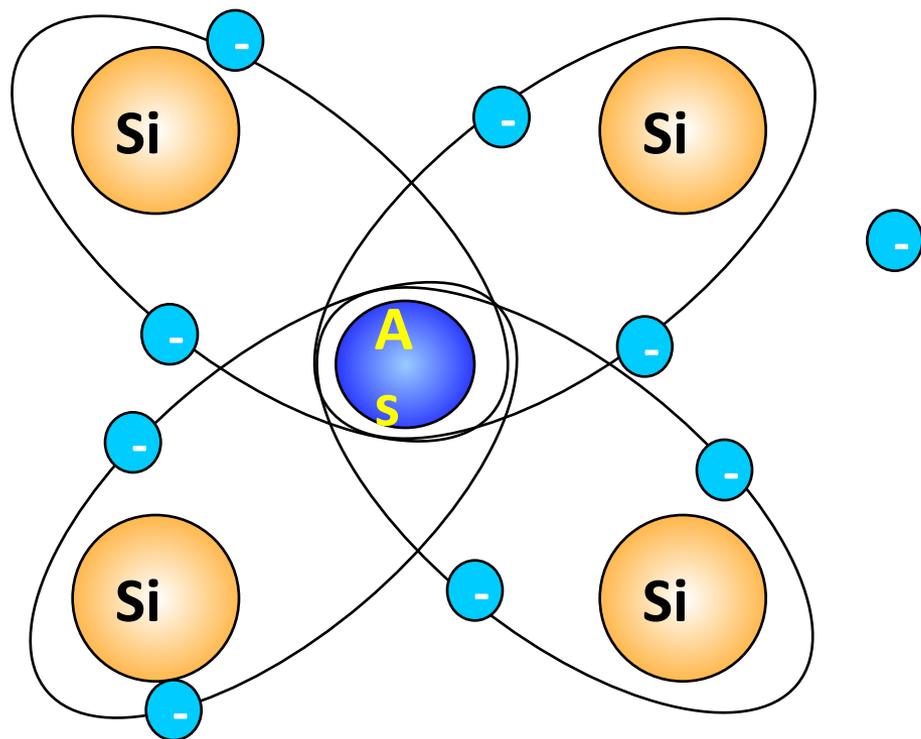
При **увеличении температуры** растет число свободных носителей заряда, **проводимость полупроводников растет**, сопротивление уменьшается



Объясните графики зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры

Собственная проводимость полупроводников явно недостаточна для технического применения полупроводников

Поэтому для увеличения проводимости в чистые полупроводники внедряют примеси (легируют), которые бывают **донорные** и **акцепторные**



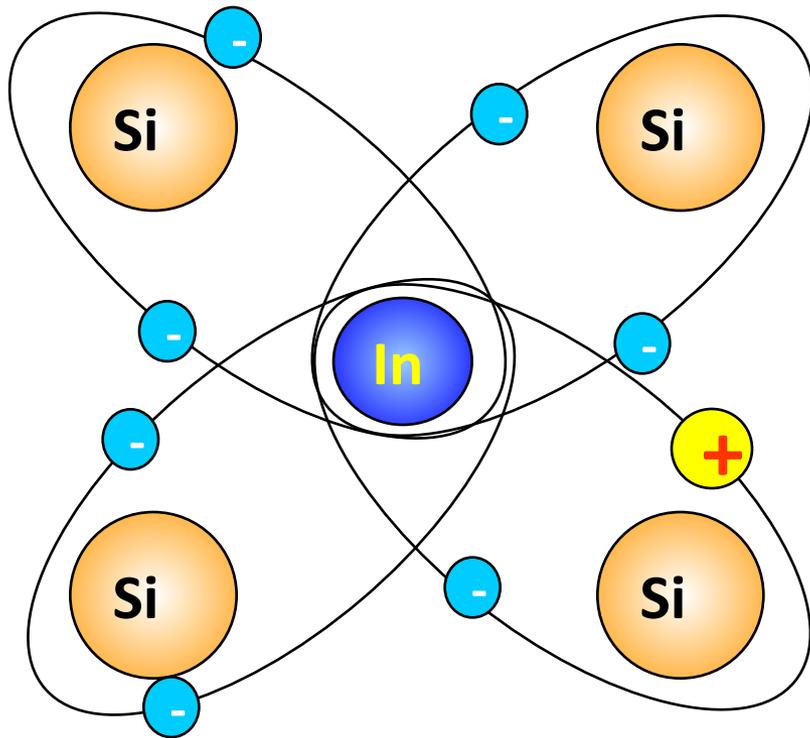
## Донорные примеси

При легировании 4 – валентного кремния Si 5 – валентным мышьяком As, один из 5 электронов мышьяка становится **свободным**. Таким образом изменяя концентрацию мышьяка, можно в широких пределах изменять проводимость кремния.

Такой полупроводник называется полупроводником **n – типа**, основными носителями заряда являются **электроны**, а примесь мышьяка, дающая свободные электроны, называется **донорной**.

## Акцепторные примеси

Если **кремний** легировать трехвалентным **индием**, то для образования связей с кремнием у индия не хватает одного электрона, т.е. образуется **дырка**



Изменяя концентрацию индия, можно в широких пределах изменять проводимость кремния, создавая полупроводник с заданными электрическими свойствами

Такой полупроводник называется полупроводником **p – типа**, **основными носителями** заряда являются **дырки**, а примесь индия, дающая дырки, называется **акцепторной**

Итак, существует 2 типа полупроводников, имеющих большое практическое применение:



**p - типа**

**Основные носители заряда - дырки**



**n - типа**

**Основные носители заряда - электроны**

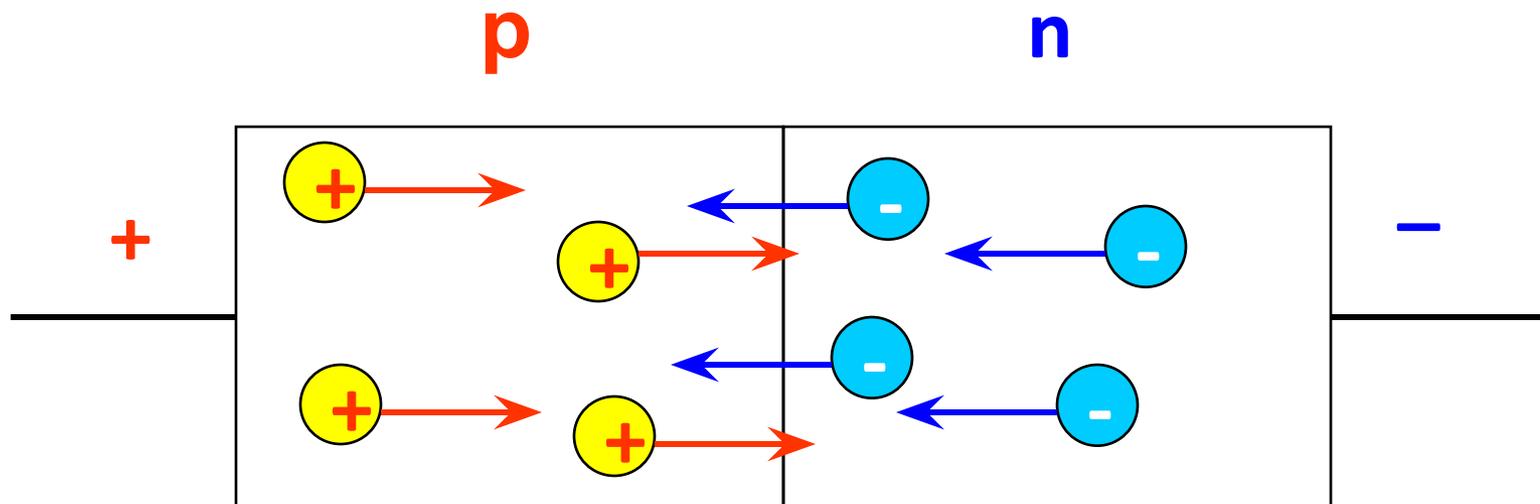
Помимо основных носителей в полупроводнике существует очень малое число неосновных носителей заряда ( в полупроводнике p – типа это электроны, а в полупроводнике n – типа это дырки), количество которых растет при увеличении температуры



**Объясните, как изменяется количество неосновных носителей заряда в примесном полупроводнике при увеличении температуры**

Рассмотрим электрический контакт двух полупроводников  $p$  и  $n$  типа, называемый  $p-n$  переходом

## 1. Прямое включение

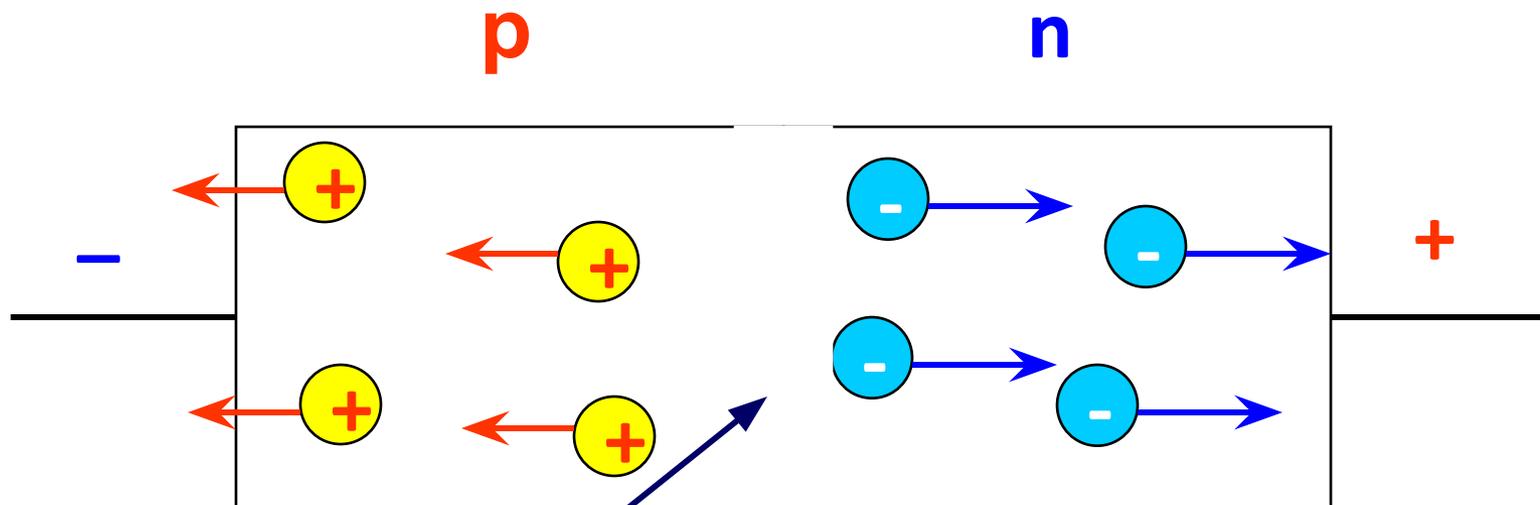


Ток через  $p-n$  переход осуществляется **основными носителями заряда** (дырки двигаются вправо, электроны – влево)

**Сопротивление перехода мало, ток велик.**

Такое включение называется **прямым**, в прямом направлении  $p-n$  переход **хорошо проводит электрический ток**

## 2. Обратное включение



Запирающий слой

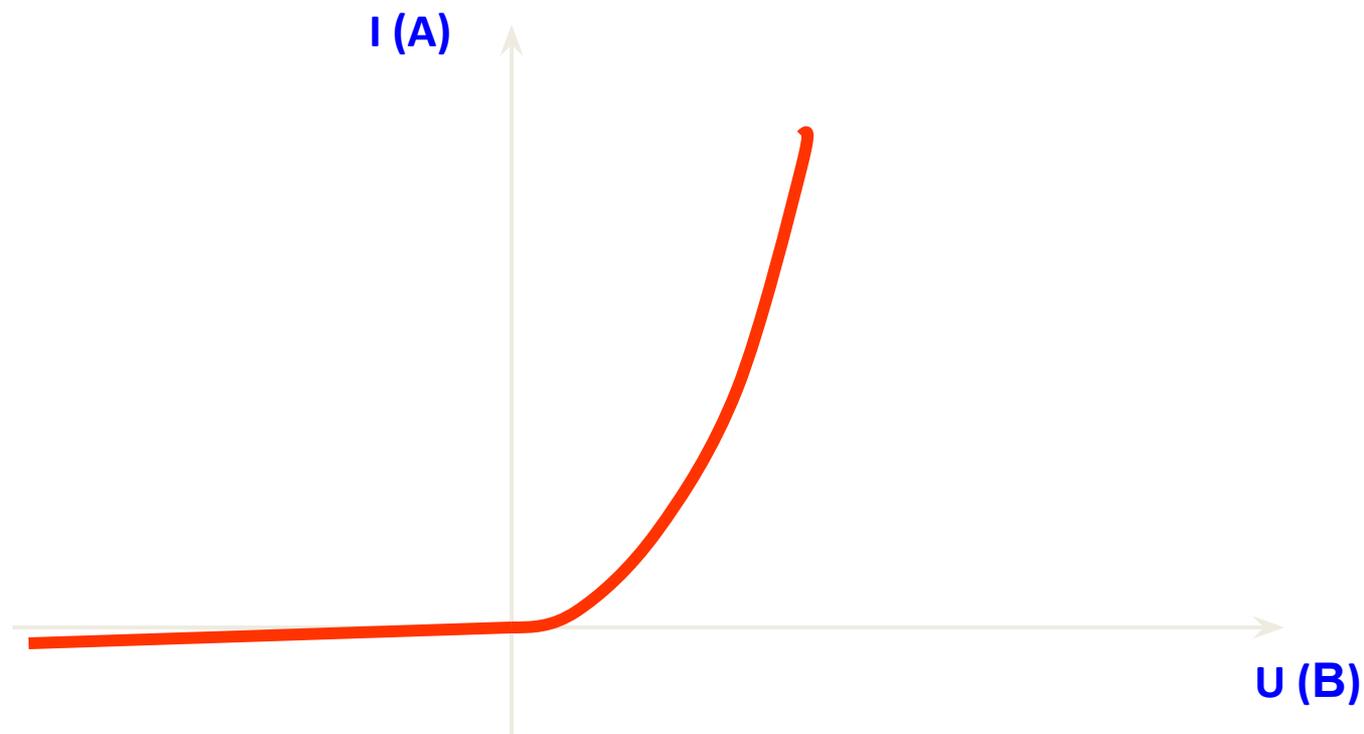
Основные носители заряда не проходят через  $p-n$  переход

**Сопротивление перехода велико, ток практически отсутствует**

Такое включение называется **обратным**, в обратном направлении  $p-n$  переход **практически не проводит электрический ток**

Итак, основное свойство  $p-n$  перехода заключается в его **односторонней проводимости**

### Вольт – амперная характеристика $p-n$ перехода (ВАХ)

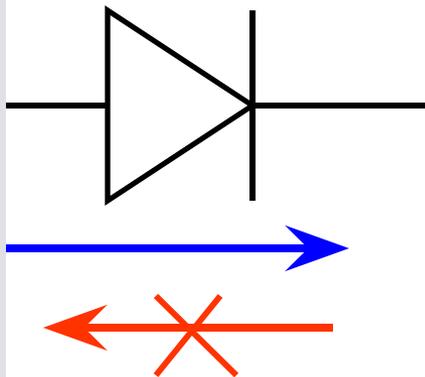


?

Объясните на основе строения полупроводников и свойствах  $p-n$  перехода график зависимости силы тока от напряжения (ВАХ) перехода

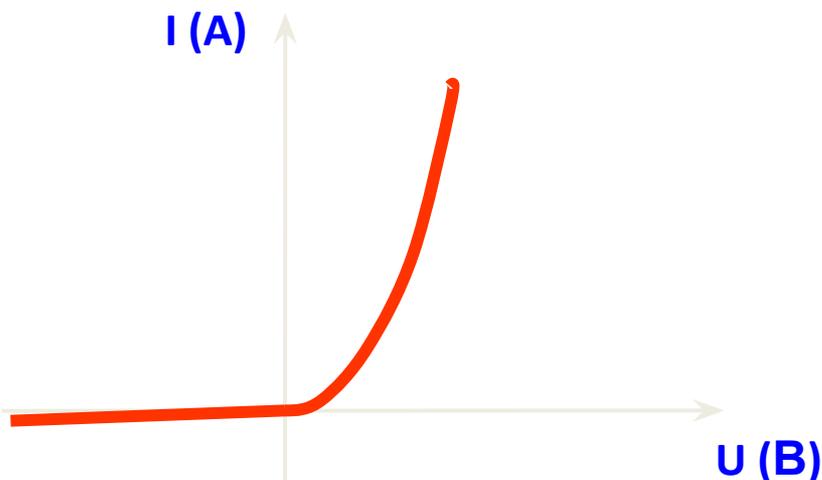


Полупроводниковый диод – это **p – n** переход, заключенный в корпус



Обозначение полупроводникового диода на схемах

Вольт – амперная характеристика полупроводникового диода (ВАХ)



Основное свойство диода – его односторонняя электрическая проводимость

## Применение полупроводниковых диодов

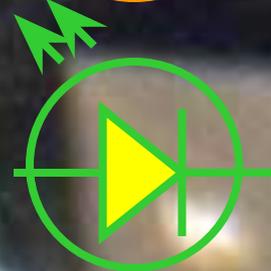
Выпрямление  
переменного тока

Детектирование  
электрических сигналов

Стабилизация тока и  
напряжения

Передача и прием  
сигналов

Прочие применения



# Таблица «Электрический ток в различных средах»

Среда	Свободные носители электрических зарядов	Основные закономерности протекания тока в данной среде (формула, закон, особенности)	Применение закономерностей
Металлы	Свободные электроны	Положительные ионы в узлах кристаллической решетки. Опыт Папалекси и Манделъштама	Науке и технике, производство и передача электроэнергии
Полупроводники	Электроны и дырки	Собственная и примесная (р- и n-типа) проводимость, р-n переход	Полупроводниковые диоды, транзисторы, термисторы, фоторезисторы, солнечные батареи
Вакуум	Электроны, под действием термоэлектронной эмиссии	Термоэлектронная эмиссия, электронно-лучевая трубка	Кинескопы телевизоров, осциллографы, дисплеи ЭВМ
Газ	Электроны и «+» и «-» ионы	Ионизация газа, рекомбинация, самостоятельный и несамостоятельный разряды	Молнии, полярное сияние, Солнце, звезды, лампы дневного света, пламя костра, рекламные трубки
Жидкость	«+» и «-» ионы	Электролитическая диссоциация, закон электролиза (Фарадея) $m = kq = kIt$ ,	Гальванопластика, гальваностегия, гальванические элементы, аккумуляторы, промышленность