

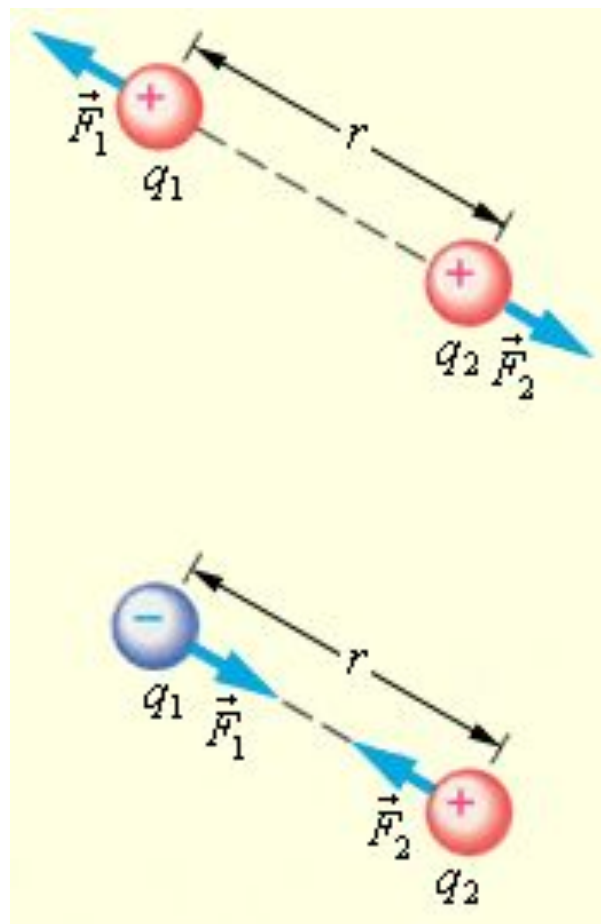
**ЛЕКЦИИ ПРЕЗЕНТАЦИИ ПО
РАЗДЕЛУ 3 «ЭЛЕКТРОДИНАМИКА»
(ЧАСТЬ 1)**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ.
ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА.
ЗАКОН КУЛОНА.
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.
НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ.
ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**



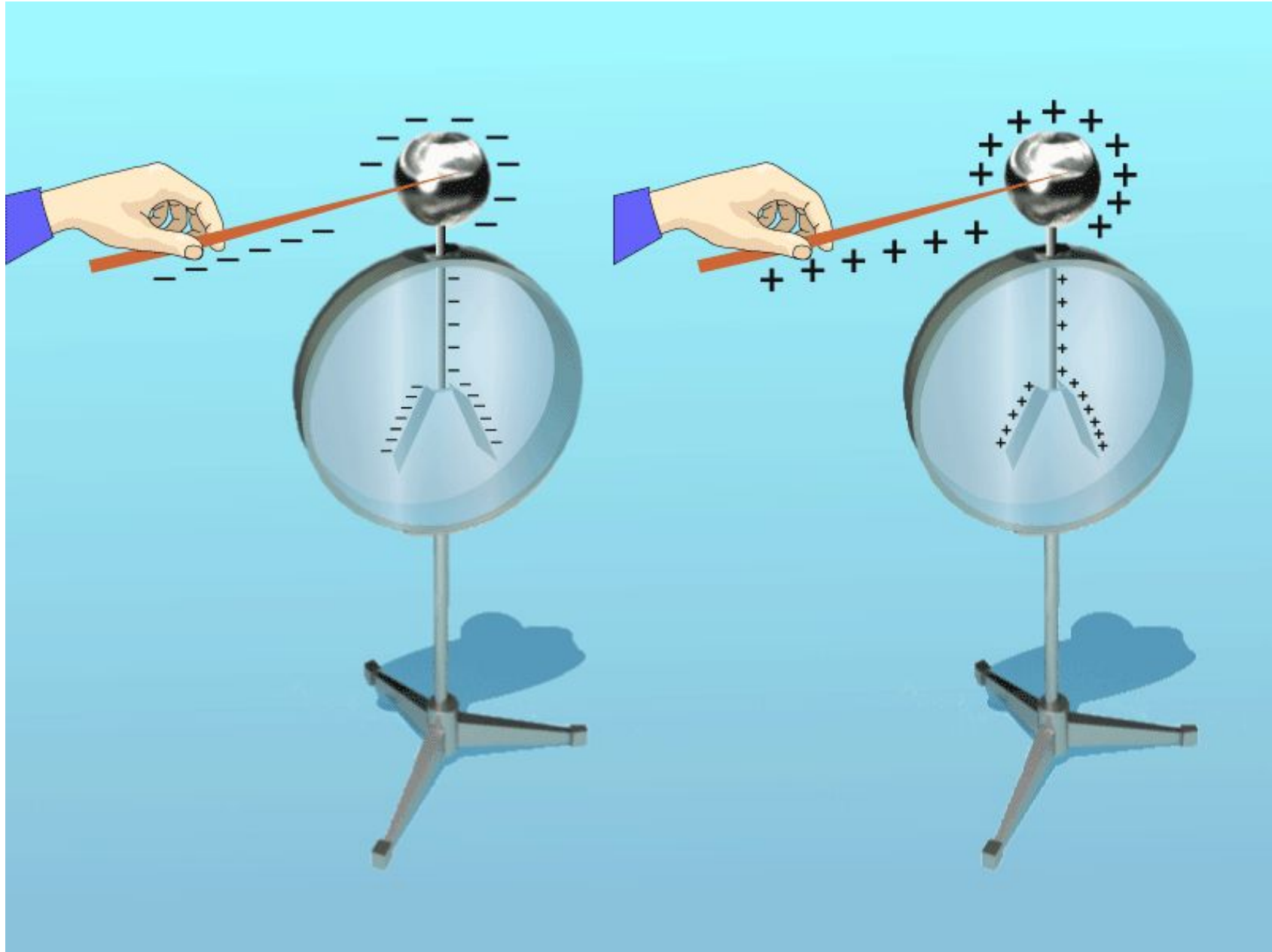
- Электрические заряды бывают двух видов: **положительные и отрицательные.**
- Одноименные заряды - **отталкиваются**, а разноименные – **притягиваются.**
- Между ними действуют электрические силы.
- **Величиной заряда** или количеством электричества данного тела называется избыток электрических зарядов одного знака в каком-либо теле.
- Прибор для обнаружения электрического заряда – **электроскоп.**





Силы взаимодействия одноименных и
разноименных зарядов

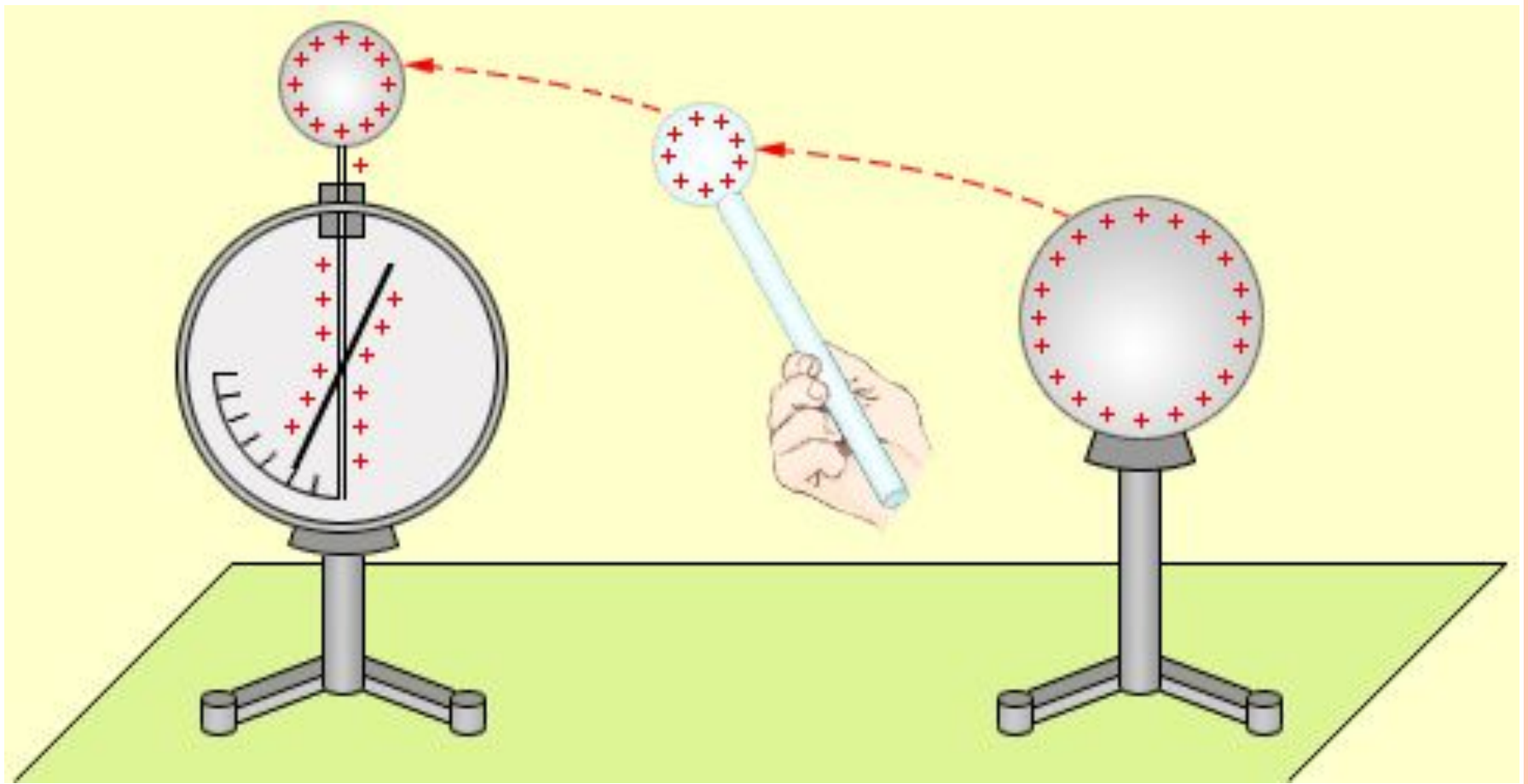




СПОСОБЫ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ТЕЛ:

- трение;
- от заряженного тела незаряженному при соприкосновении;
- электризация нейтральных тел при соприкосновении;
- электризация воздействием (при помещении в электрическое поле).





Перенос заряда с заряженного тела
на электромметр



ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Алгебраическая сумма электрических зарядов в замкнутой системе остается постоянной.

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.}$$

Замкнутая система

- система частиц, в которую не входят извне и не выходят наружу заряженные частицы.

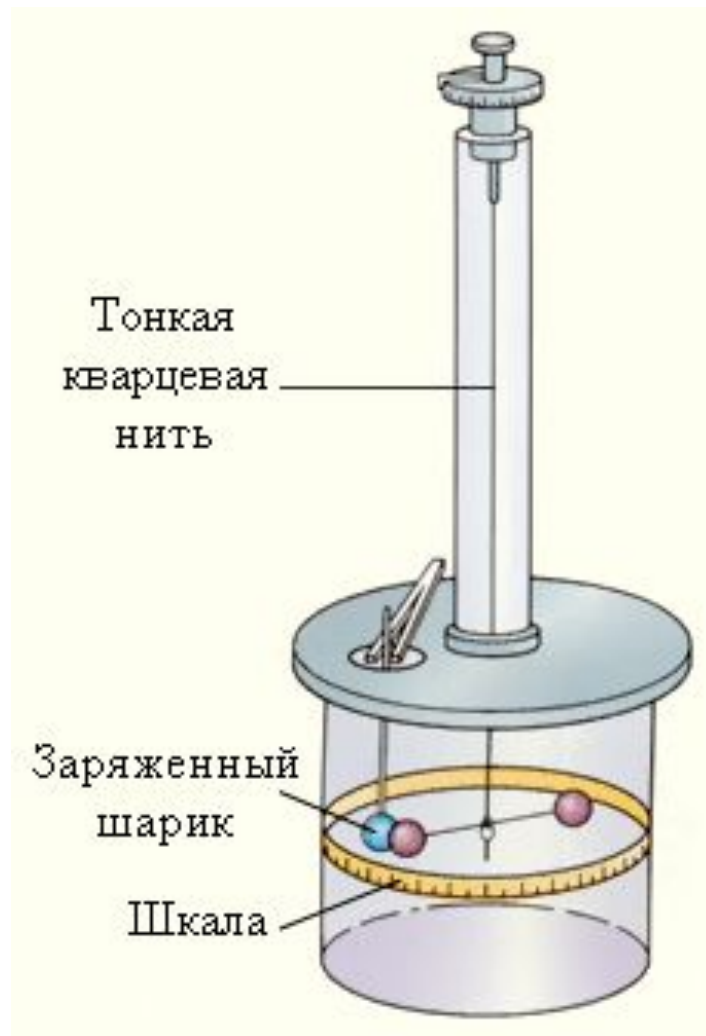


□ ЗАКОН КУЛОНА (1785 г.)

- Сила взаимодействия точечных зарядов прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$F = \frac{k \cdot |q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

- **Точечными** называются заряды, находящиеся на телах размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстояниями между ними.



Прибор Кулона



□
○ В системе СИ: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_c}$

ϵ_c - характеризует зависимость силы взаимодействия между зарядами от окружающей среды

(диэлектрическая проницаемость среды).

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_c r^2}$$

ДЛЯ ВАКУУМА:

$$F_0 = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

ϵ_0 - **электрическая постоянная.**



$$\square \frac{F_0}{F} = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} : \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_c r^2} = \frac{4\pi\epsilon_c r^2 q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2 q_1 \cdot q_2} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} = \epsilon$$

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.

- Относительная диэлектрическая проницаемость показывает во сколько раз сила взаимодействия электрических зарядов в этой среде меньше, чем в вакууме (берут из таблиц).

$$\epsilon_c = \epsilon_0 \epsilon$$

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}$$



В системе СИ единица заряда 1 Кулон (1Кл)

1 Кулон это заряд, который переносится через поперечное сечение проводника за 1 секунду при силе тока 1 ампер.

$$q = I t = 1 \text{ А} \times 1 \text{ с} = 1 \text{ Кл}$$

$$\epsilon_c = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi F r^2} = \frac{1 \text{ Кл} \times 1 \text{ Кл}}{4\pi \left(\frac{1}{4\pi}\right) \text{ Н} \times 1 \text{ м}^2} = 1 \frac{\text{ Кл}^2}{\text{ Н} \cdot \text{ м}^2}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{ Кл}^2}{\text{ Н} \cdot \text{ м}^2} = \frac{1}{36\pi 10^9} \frac{\text{ Кл}^2}{\text{ Н} \cdot \text{ м}^2}$$



- 1. Как изменится сила взаимодействия между двумя точечными зарядами, если величину каждого заряда увеличить в 4 раза, а расстояние между зарядами уменьшить вдвое.
- 2. Во сколько раз силы электростатического отталкивания двух электронов больше, чем силы их гравитационного притяжения?



- Поле, передающее взаимодействие одного неподвижного электрического заряда на другой неподвижный электрический заряд в соответствии с законом Кулона, называется **электростатическим** или **электрическим** полем.
- Электрические сигналы распространяются в безвоздушном пространстве со скоростью **300000 км/с.**

- Чтобы обнаружить электрическое поле, используют **пробный заряд** (он всегда положительный, величина заряда должна быть очень малой по сравнению с зарядом, создающим поле, чтобы не искажать исследуемое поле).
- Силовой характеристикой электрического поля является **напряженность** (\vec{E}).
- Напряженность электрического поля - это вектор, направление которого совпадает с направлением силы, действующей на пробный заряд в данной точке поля.



- **Напряжённость** электрического поля – векторная физическая величина, характеризующая электрическое поле в данной точке и численно равная отношению силы F действующей на неподвижный точечный заряд q , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:

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

- В системе СИ за единицу напряженности принимают напряженность в такой точке электрического поля, в которой на заряд в 1 Кл действует сила в 1 Н.


$$E = \frac{1\text{Н}}{1\text{Кл}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$$

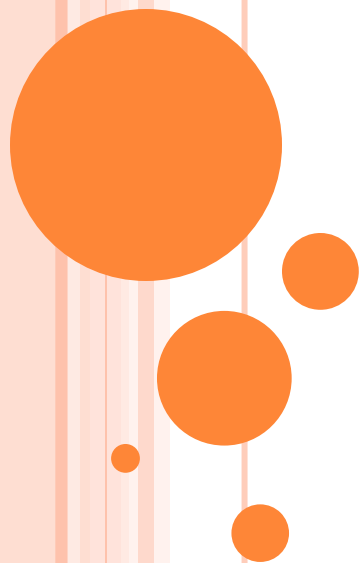
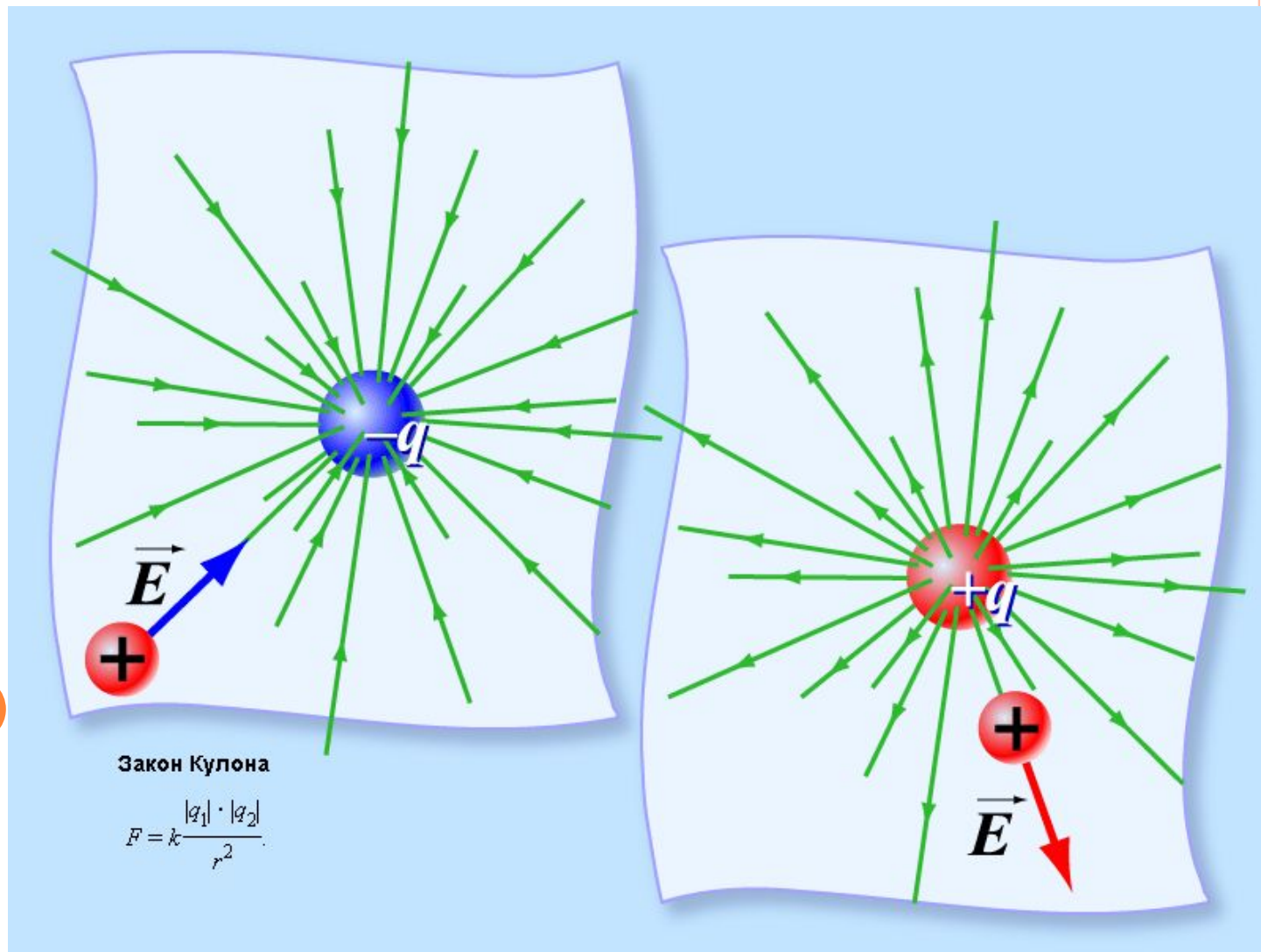


- В соответствии с законом Кулона напряженность электростатического поля, создаваемого точечным зарядом q на расстоянии r от него, равна по модулю

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$$

В кулоновском поле направление вектора зависит от знака заряда q : если $q > 0$, то вектор направлен по радиусу от заряда, если $q < 0$, то вектор направлен к заряду.





- Для наглядного изображения электрического поля используют **силовые линии (линии напряженности)**. Эти линии проводят так, чтобы направление вектора в каждой точке совпадало с направлением касательной к силовой линии. При изображении электрического поля с помощью силовых линий, их густота должна быть пропорциональна модулю вектора напряженности поля.

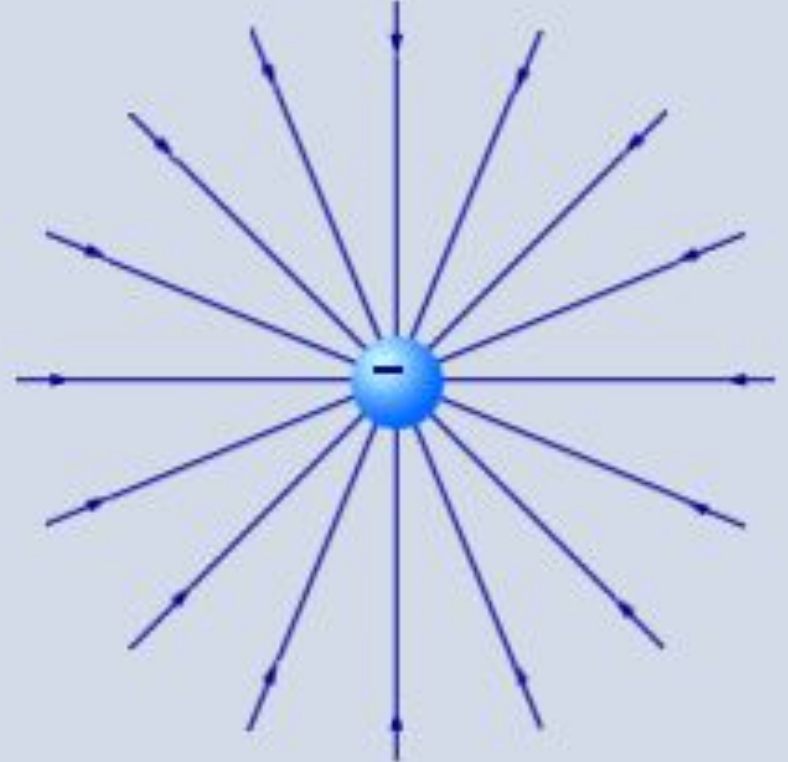
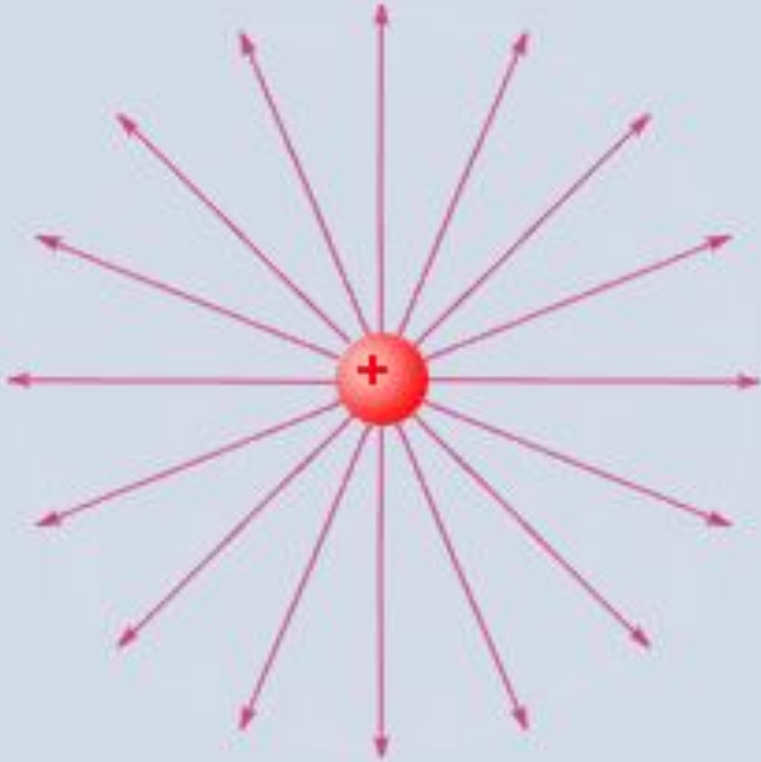


СВОЙСТВА ЛИНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

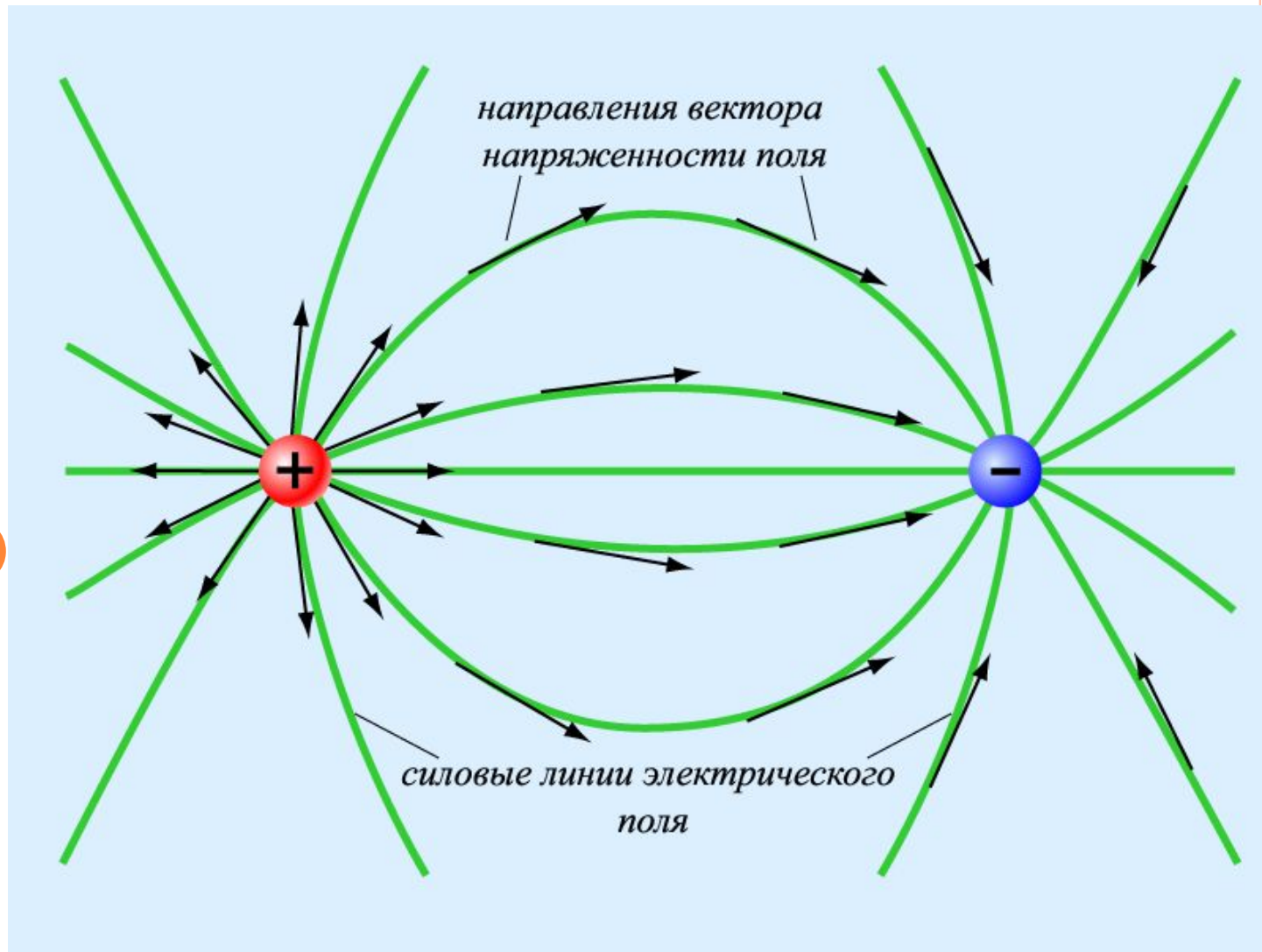
- нигде не пересекаются друг с другом;
- имеют начало на положительных зарядах (в бесконечности), а заканчиваются на отрицательных (в бесконечности), т.е. являются не замкнутыми линиями;
- между зарядами нигде не прерываются;
- перпендикулярны заряженной поверхности.



Электрические поля положительного и отрицательного зарядов



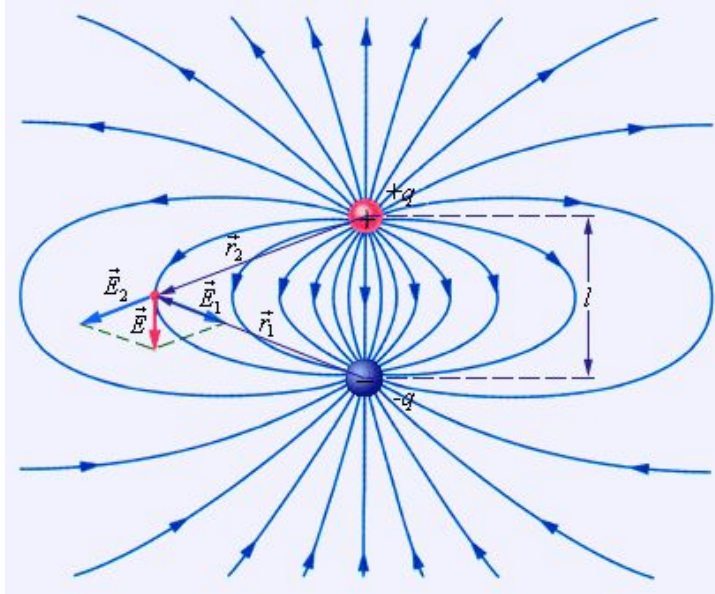
Электрическое поле системы двух разноименных зарядов



ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ

- Напряженность электрического поля, создаваемого системой зарядов в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей электрических полей, создаваемых в той же точке зарядами в отдельности:

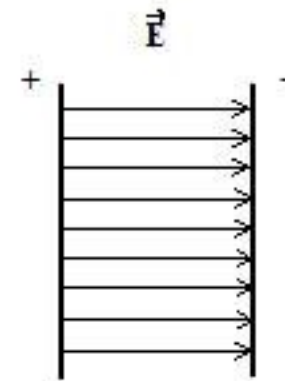
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \text{ и т.д.}$$



ОДНОРОДНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Однородное поле — это электрическое поле, в котором напряжённость одинакова по модулю и направлению во всех точках пространства. Приблизительно однородным является поле между двумя разноимённо заряженными плоскими металлическими пластинами

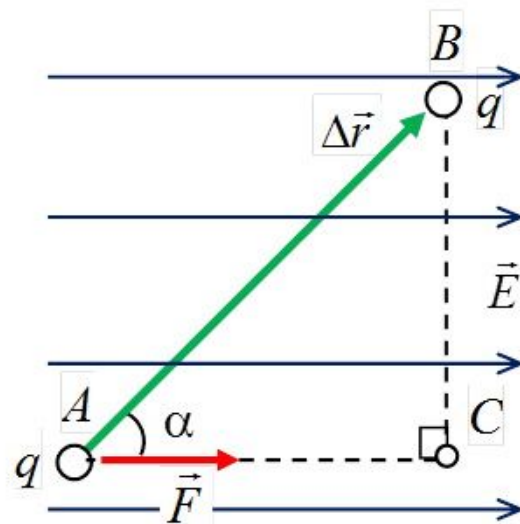
В однородном электрическом поле линии напряжённости направлены параллельно друг другу.



**РАБОТА СИЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.
ПОТЕНЦИАЛ ПОЛЯ.
РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ.
ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ
ПОВЕРХНОСТИ. СВЯЗЬ МЕЖДУ
НАПРЯЖЕННОСТЬЮ И РАЗНОСТЬЮ
ПОТЕНЦИАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ.**



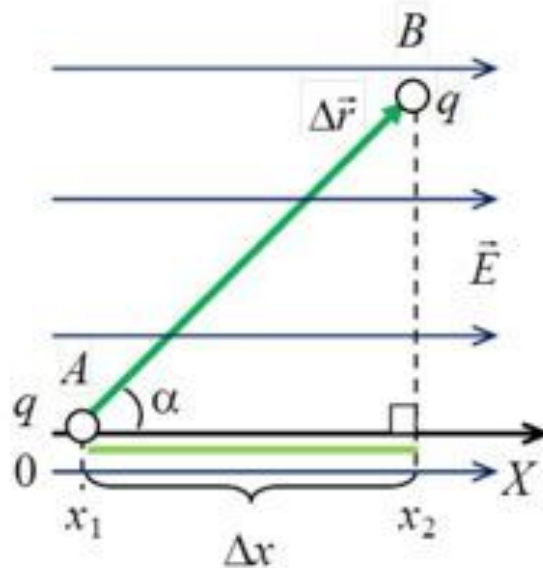
- На электрические заряды в электростатическом поле действуют силы. Поэтому, если заряды перемещаются, то эти силы совершают работу. Рассчитаем работу сил однородного электростатического поля при перемещении положительного заряда q из точки A в точку B .



- На заряд q , помещенный в однородное электрическое поле с напряженностью \vec{E} , действует сила: $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$
- Работу поля можно рассчитать по формуле

$$A_{AB} = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha,$$

где $\Delta r \cdot \cos \alpha = AC = x_2 - x_1 = \Delta x$ — проекция перемещения на силовую линию.




□ Тогда


$$A_{AB} = q \cdot E \cdot \Delta x \quad (1)$$

□ Рассмотрим теперь перемещение заряда по траектории A_{ACB} . В этом случае работа однородного поля может быть представлена как сумма работ на участках AC и CB:

$$A_{ACB} = A_{AC} + A_{CB} = q \cdot E \cdot \Delta x + 0 = q \cdot E \cdot \Delta x$$

(на участке CB работа равна нулю, т.к. \vec{r} перемещение перпендикулярно силе \vec{F}).
Как видно, работа поля такая же, как и при перемещении заряда по отрезку AB.



- Не сложно доказать, что работа поля при перемещении заряда между точками АВ по любой траектории будет находиться все по той же формуле.
 - Таким образом,
 - работа по перемещению заряда в электростатическом поле не зависит от формы траектории, по которой двигался заряд q , а зависит только от начального и конечного положений заряда.
 - это утверждение справедливо и для неоднородного электростатического поля.
- 

- Найдем работу на замкнутой траектории ABCA:

$$\begin{aligned} A_{ABCA} &= A_{AB} + A_{BC} + A_{CA} = \\ &= q \cdot E \cdot \Delta x + 0 - q \cdot E \cdot \Delta x = 0 \end{aligned}$$

- Поле, работа сил которого не зависит от формы пути и на замкнутой траектории равна нулю, называется потенциальным или консервативным.



- Работа консервативных сил служит мерой изменения потенциальной энергии.

$$A_{12} = -(W_2 - W_1) = W_1 - W_2$$

Сравнивая полученное выражение с уравнением 1, можно сделать вывод, что:

$$W = -q_{\text{пр}} \cdot E \cdot x,$$

где x — координата заряда на ось Ox , направленную вдоль силовой линии.



Так как координата заряда зависит от выбора системы отсчета, то и потенциальная энергия заряда так же зависит от выбора системы отсчета.

Если $W_2 = 0$, то в каждой точке электростатического поля **потенциальная энергия заряда** $q_{пр}$ равна работе, которая была бы совершена при перемещении заряда $q_{пр}$ из данной точки в точку с нулевой энергией (в бесконечность).



- Пусть электростатическое поле создано в некоторой области пространства положительным зарядом q . Будем помещать в некоторую точку этого поля различные пробные заряды $q_{\text{пр}}$. Потенциальная энергия их различна, но отношение $\frac{W}{q_{\text{пр}}} = \text{const}$ для данной точки поля и служит характеристикой поля, называемой потенциалом поля φ в данной точке.
- Потенциал электростатического поля φ в данной точке пространства — скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии W , которой обладает точечный заряд $q_{\text{пр}}$ в данной точке пространства, к величине этого заряда:



$$\varphi = \frac{W}{q_{\text{пр}}}$$

- Единицей потенциала в СИ является вольт (В):

$$1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$$

- Потенциал — это энергетическая характеристика электрического поля.
- **Потенциал** поля численно равен работе, совершаемой силами поля, при перемещении единичного положительного заряда из этой точки в бесконечность.

$$\varphi_1 = \frac{A_{1\infty}}{q_{\text{пр}}}$$

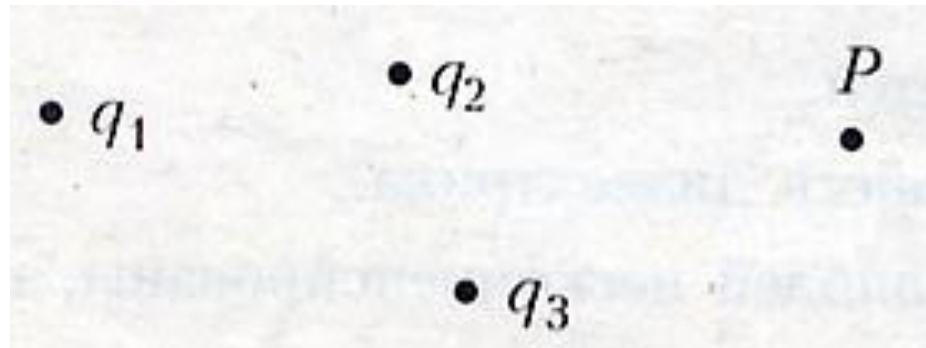
- Потенциал поля точечного заряда:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r}$$



φ – скаляр; $\varphi > 0$, если $+q$, $\varphi < 0$, если $-q$.

Если поле создано несколькими зарядами, то потенциал поля в любой точке равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых в этой точке каждым зарядом (принцип суперпозиции).



$$\varphi = \pm \varphi_1 \pm \varphi_2 \pm \varphi_3$$

(принцип суперпозиции)



Работа сил электростатического поля по перемещению заряда $q_{\text{пр}}$ из точки 1 в точку 2 поля

$$A_{12} = W_1 - W_2$$

Выразим потенциальную энергию через потенциалы поля в соответствующих точках:

$$W_1 = q_{\text{пр}} \cdot \varphi_1, W_2 = q_{\text{пр}} \cdot \varphi_2$$

Тогда

$$A_{12} = q_{\text{пр}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$$

Таким образом, работа определяется произведением заряда на разность потенциалов начальной и конечной точек.



- Из этой формулы разность потенциалов


$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_{\text{пр}}}$$

- Разность потенциалов** — это скалярная физическая величина, численно равная отношению работы сил поля по перемещению заряда между данными точками поля к этому заряду.
- В СИ единицей разности потенциалов является вольт (В).
- 1 В — разность потенциалов между двумя такими точками электростатического поля, при перемещении между которыми заряда в 1 Кл силами поля совершается работа в 1 Дж.

▣ **Разность потенциалов** в отличие от потенциала *не зависит* от выбора нулевой точки. Разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ часто называют электрическим напряжением между данными точками поля и обозначают U :

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

▣ **Напряжение** между двумя точками поля определяется работой сил этого поля по перемещению заряда в 1 Кл из одной точки в другую.

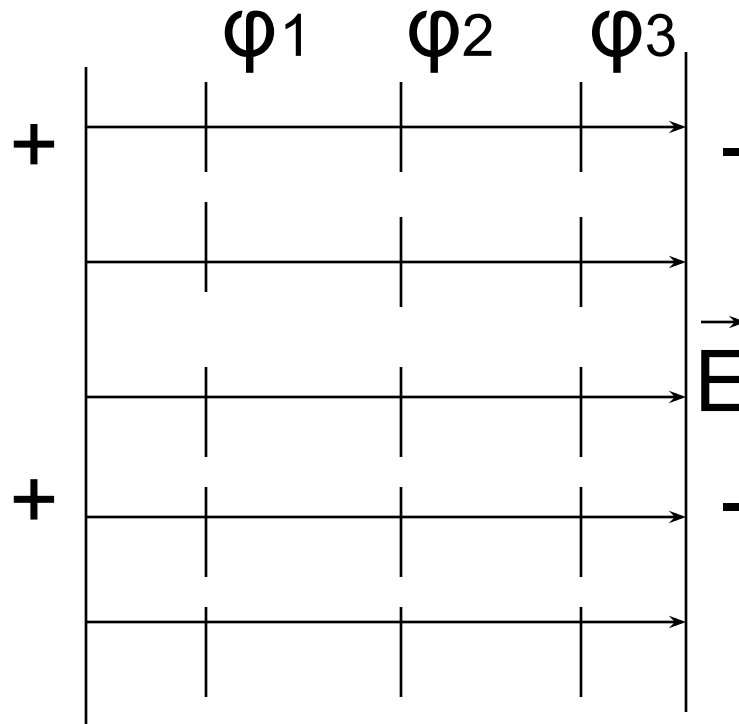


- Работу сил электрического поля иногда выражают не в джоулях, а в электрон вольтах.
- 1 эВ равен работе, совершаемой силами поля при перемещении электрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) между двумя точками, напряжение между которыми равно 1 В.
- $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$
- $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$



ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

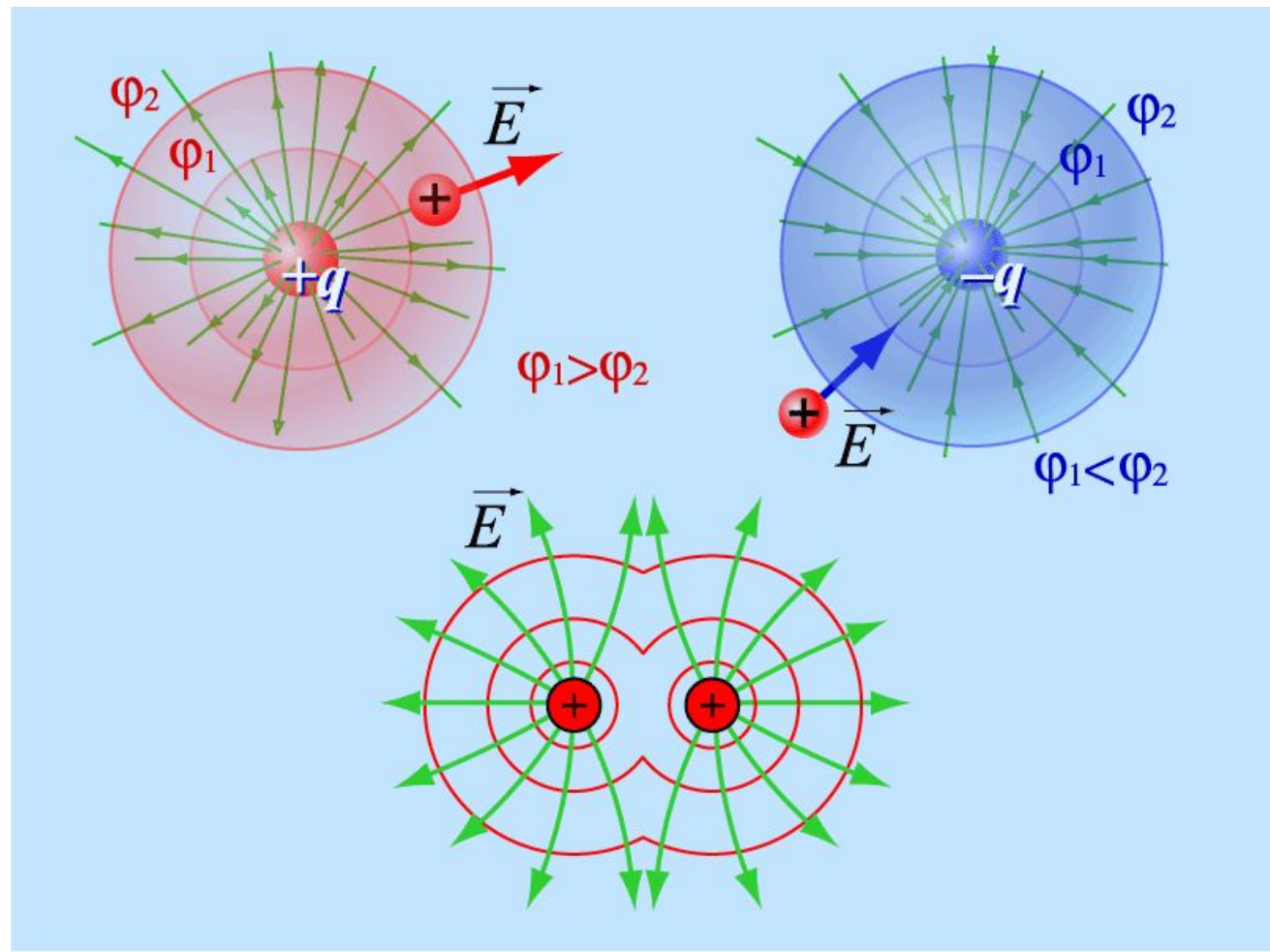
- это поверхности, все точки которых имеют одинаковый потенциал.



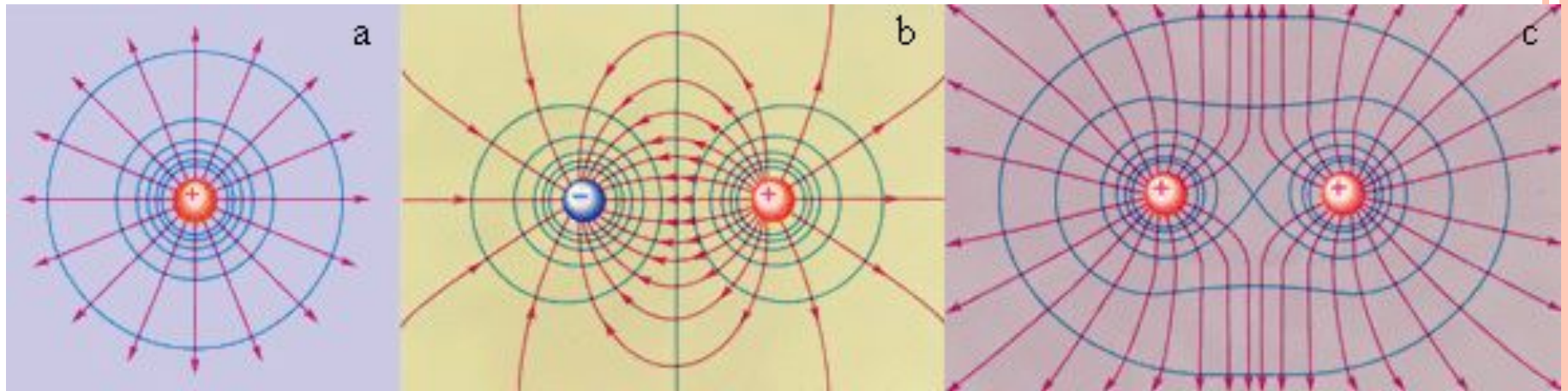
-для однородного поля - это плоскость



Электрическое поле и эквипотенциальные поверхности уединенных зарядов (положительного и отрицательного) и двух одноименных зарядов.



Электрическое поле и эквипотенциальные поверхности уединенного положительного заряда, двух равных разноименных и двух равных одноименных зарядов.



Эквипотенциальные поверхности перпендикулярны силовым линиям.



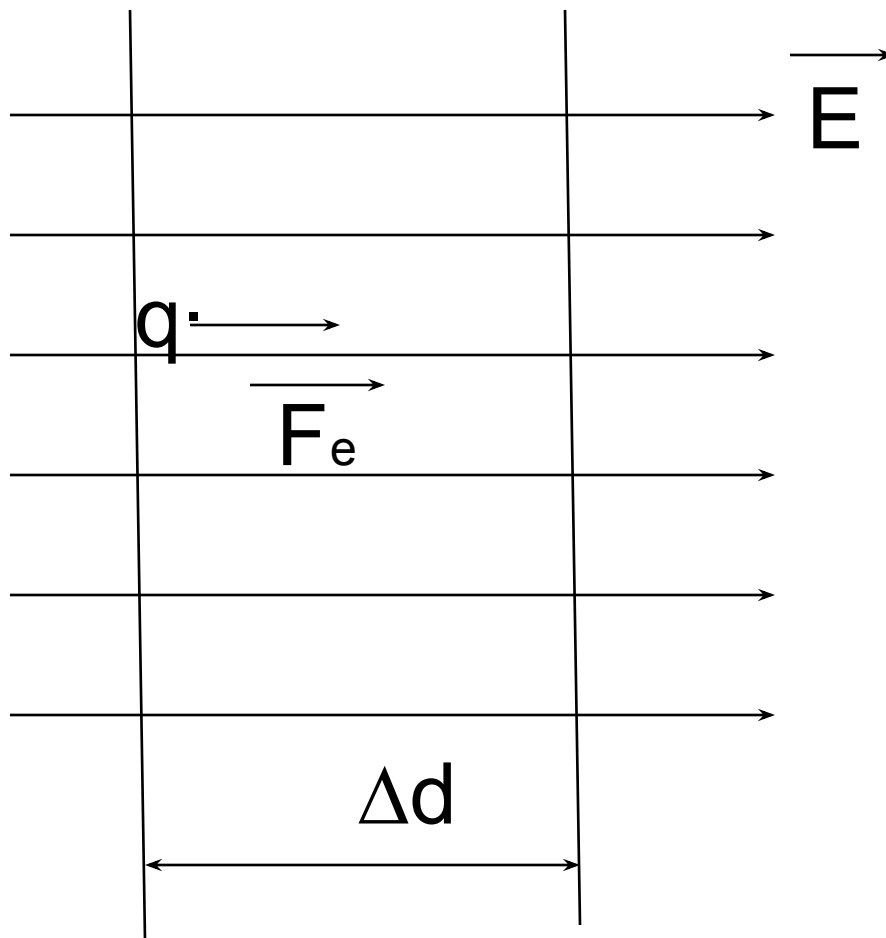
- Работа сил электрического поля по перемещению заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю, т.к. потенциалы всех ее точек одинаковы.
- Эквипотенциальная поверхность имеется у любого проводника в электростатическом поле, т.к. силовые линии перпендикулярны поверхности проводника.
- Все точки внутри и на поверхности проводника имеют одинаковый потенциал.
- Напряженность электрического поля внутри проводника равна 0, значит и разность потенциалов внутри него равна 0.



СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ И РАЗНОСТЬЮ ПОТЕНЦИАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.

φ_1

φ_2



$$A = q \cdot E \cdot \Delta d$$

$$E = \frac{U}{\Delta d} \quad [E] = \text{В/м}$$

$$A = q \cdot U$$

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -(\varphi_2 - \varphi_1) = -\Delta\varphi, \quad E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta d}$$

Напряженность поля показывает каково изменение потенциала на единицу длины линии напряженности.

Чем меньше меняется потенциал на отрезке пути, тем меньше напряженность поля.

Вектор напряженности электрического поля направлен в сторону уменьшения потенциала.

▣ 1 вариант

1. Закон Кулона
(формула, формулировка).
2. Силовые линии электрического поля и их свойства.
3. Дать определение, записать формулу, единицу измерения:
 - потенциальная энергия заряда в электрическом поле;
 - напряжение.
4. $\varphi=200$ В – что это значит?

▣ 2 вариант

1. Напряженность электрического поля
(формула, определение, единица измерения).
2. Физический смысл относительной диэлектрической проницаемости.
3. Дать определение, записать формулу, единицу измерения:
 - потенциал;
 - разность потенциалов.
4. $U=100$ В – что это значит?



**ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.
ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ.**




Вещество, внесенное в электрическое поле, может существенно изменить его. Это связано с тем, что вещество состоит из заряженных частиц. В отсутствие внешнего поля частицы распределяются внутри вещества так, что создаваемое ими электрическое поле в среднем по объемам, включающим большое число атомов или молекул, равно нулю. При наличии внешнего поля происходит перераспределение заряженных частиц, и в веществе возникает собственное электрическое поле. Полное электрическое поле складывается в соответствии с принципом суперпозиции из внешнего поля E_0 и внутреннего поля E_1 , создаваемого заряженными частицами вещества.



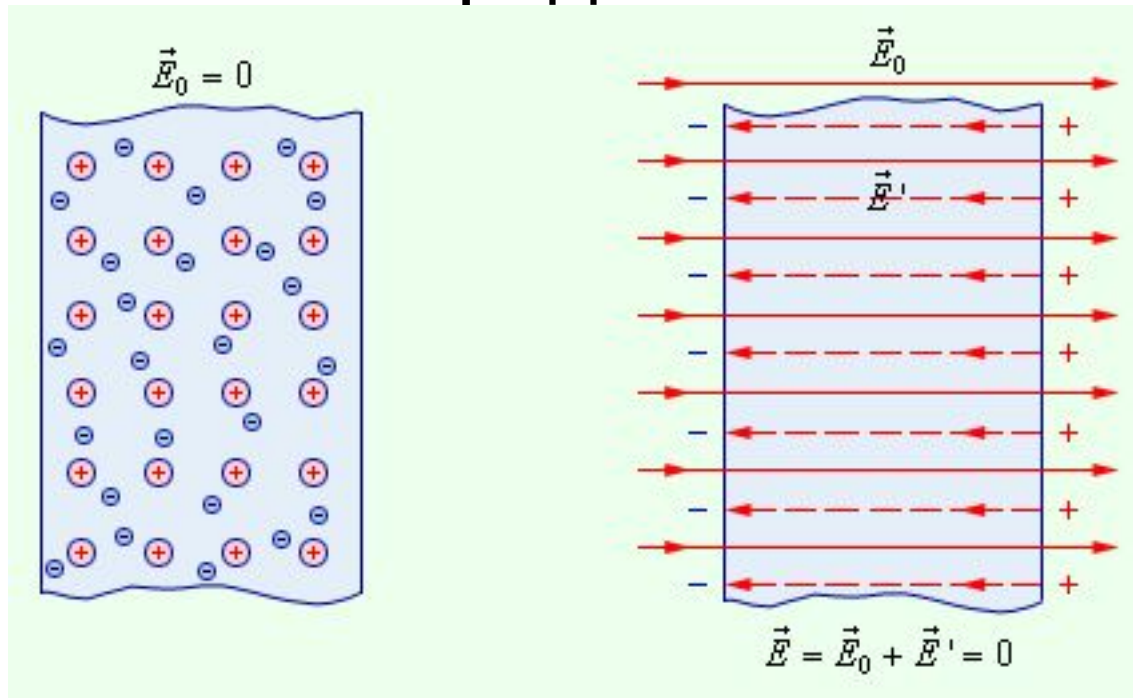
ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Основная особенность **проводников** – наличие свободных зарядов (электронов), которые участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по всему объему проводника. Типичные проводники – металлы.

В отсутствие внешнего поля в любом элементе объема проводника отрицательный свободный заряд компенсируется положительным зарядом ионной решетки.




- В проводнике, внесенном в электрическое поле, происходит перераспределение свободных зарядов (электроны смещаются против поля), в результате чего на поверхности проводника возникают некомпенсированные положительные и отрицательные заряды.



Этот процесс называют **электростатической индукцией**, а появившиеся на поверхности проводника заряды – **индукционными зарядами**.

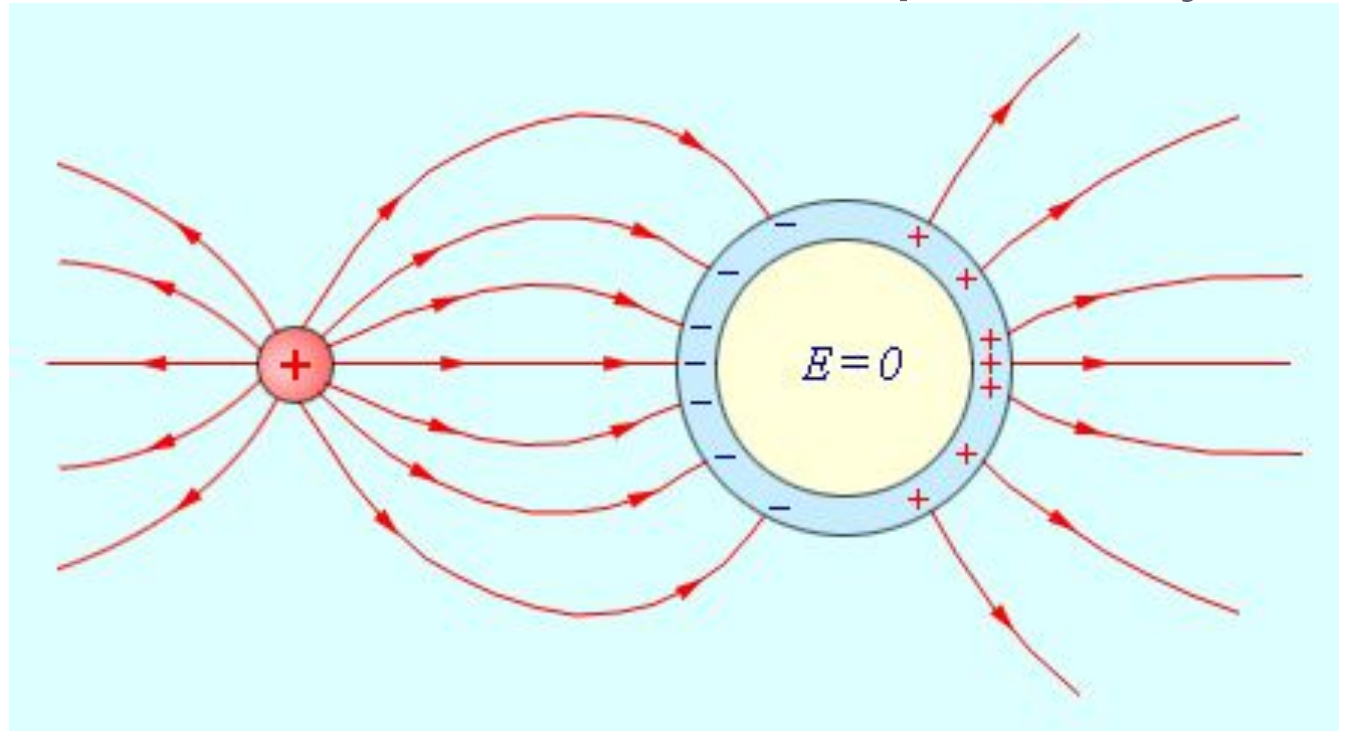
Индукционные заряды создают свое собственное поле \vec{E}_1 , которое компенсирует внешнее поле \vec{E}_0 во всем объеме проводника: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_1 = 0$ (внутри проводника).

Полное электростатическое поле внутри проводника равно нулю, а потенциалы во всех точках одинаковы и равны потенциалу на поверхности проводника.



- Все внутренние области проводника, внесенного в электрическое поле, остаются электронейтральными. Если удалить некоторый объем, выделенный внутри проводника, и образовать пустую полость, то электрическое поле внутри полости будет равно нулю. На этом основана **электростатическая защита** – чувствительные к электрическому полю приборы для исключения влияния внешнего поля помещают в металлические ящики.

Электростатическая защита. Поле в металлической полости равно нулю.



Так как поверхность проводника является эквипотенциальной, силовые линии у поверхности должны быть перпендикулярны к ней.

- При электризации проводника сообщенный ему дополнительный заряд оказывается распределен в области поверхности проводника. Большой заряд будет находиться на остриях. Это распределение заряда будет происходить до тех пор, пока при распределении заряда потенциал поля в любой точке проводника не станет одинаковым.

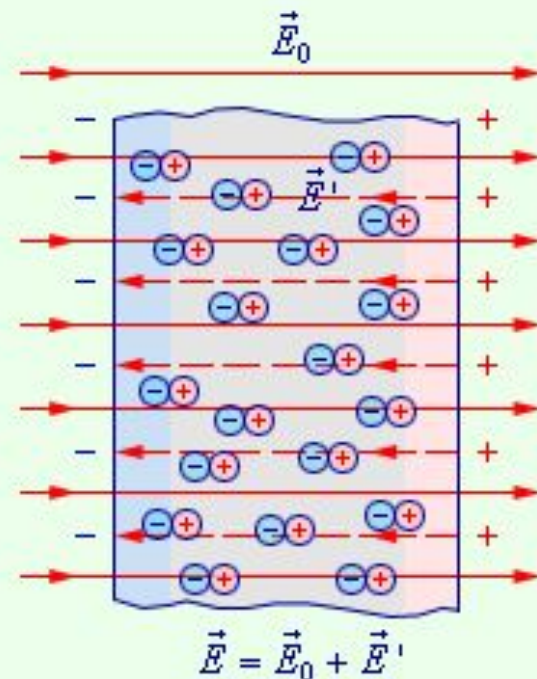
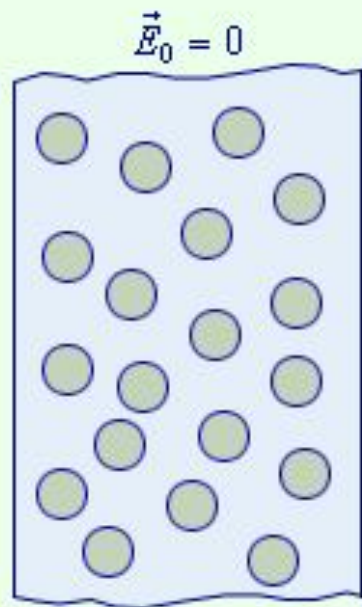


ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

- В отличие от проводников, в **диэлектриках** (изоляторах) нет свободных электрических зарядов. Они состоят из нейтральных атомов или молекул. Заряженные частицы в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика.
- В зависимости от химического строения диэлектрики можно разделить на три группы: **неполярные, полярные, ионные**.

1. *Неполярные диэлектрики* (электронная поляризация).

К ним относятся такие диэлектрики (парафин, бензол, CH_4), у которых центры сосредоточения положительных и отрицательных зарядов совпадают.



Молекулы неполярных диэлектриков не обладают в отсутствие внешнего поля дипольным моментом. Под действием электрического поля молекулы неполярных диэлектриков деформируются – положительные заряды смещаются в направлении вектора E_0 а отрицательные – в противоположном направлении. В результате каждая молекула превращается в **электрический диполь**, ось которого направлена вдоль внешнего поля. На поверхности диэлектрика появляются не скомпенсированные связанные заряды, создающие свое поле \vec{E}_1 , направленное навстречу внешнему полю. Так происходит поляризация неполярного диэлектрика.



- У молекул неполярных диэлектриков возникающий **дипольный электрический момент** при наложении внешнего электрического поля является упругим и пропорционален напряженности электрического поля.

$$\vec{P}_{\text{эл}} = \alpha \vec{E} = ql,$$

где

α – поляризуемость,

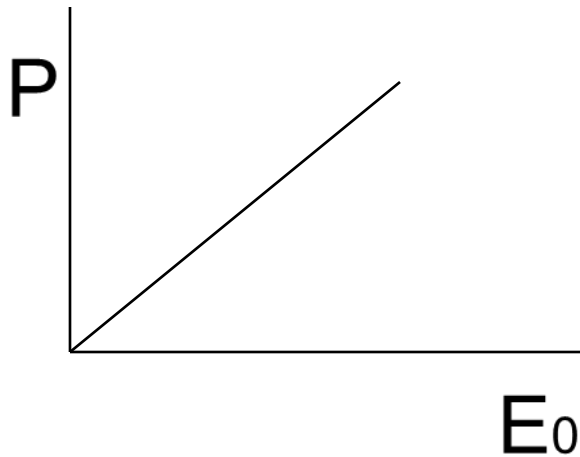
q – заряд,

l – расстояние между зарядами.

Дипольный электрический момент вектор, направленный от минуса к плюсу диполя.

▣ **Вектор поляризации** диэлектрика – это суммарный дипольный электрический момент всех молекул в единице объема диэлектрика:

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^N \frac{\vec{P}_{эл\ i}}{V}$$



○ У неполярных диэлектриков вектор поляризации *от температуры не зависит.*

2. Полярные диэлектрики

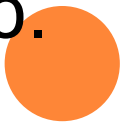
(ориентационная или дипольная поляризация).

К ним относятся такие диэлектрики, у которых центры сосредоточения положительных и отрицательных зарядов не совпадают.

Отличительной особенностью полярных диэлектриков является наличие жесткого дипольного момента у молекул (к таким диэлектрикам относятся вода, нитробензол, H_2S , NO_2 и т. д.).

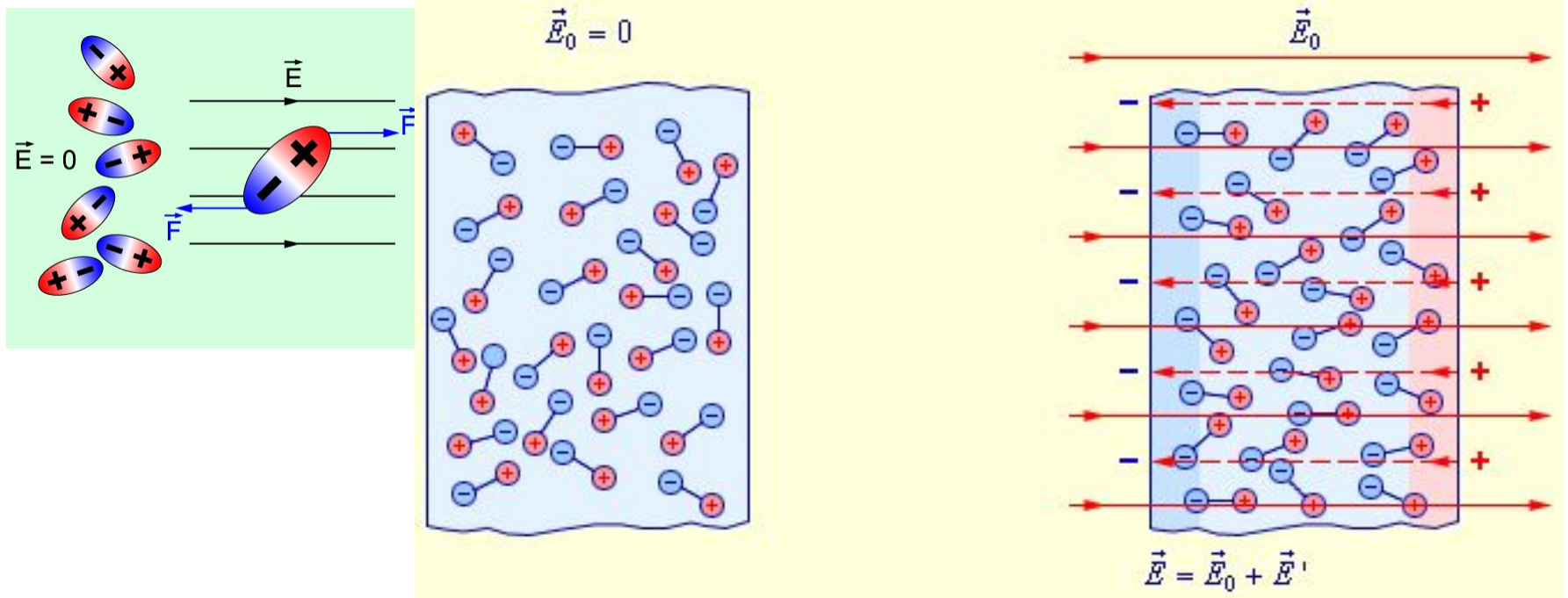


- Молекулы таких диэлектриков представляют собой микроскопические электрические диполи – нейтральную совокупность двух зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.
- При отсутствии внешнего электрического поля оси молекулярных диполей из-за теплового движения ориентированы хаотично, так что на поверхности диэлектрика и в любом элементе объема электрический заряд в среднем равен нулю.



- При помещении полярного диэлектрика во внешнее электрическое поле, дипольный момент каждой молекулы будет стремиться развернуться по полю, в тоже время этому процессу препятствует тепловое хаотическое движение, таким образом дипольный момент для полярного диэлектрика *зависит от температуры*.
- При внесении диэлектрика во внешнее поле \vec{E}_0 возникает частичная ориентация молекулярных диполей. В результате на поверхности диэлектрика появляются не скомпенсированные макроскопические связанные заряды, создающие поле \vec{E}_1 , направленное навстречу внешнему полю \vec{E}_0 .

Ориентационный механизм поляризации полярного диэлектрика



- В случае полярных диэлектриков в сильных полях может наблюдаться эффект **насыщения**, когда все молекулярные диполи выстраиваются вдоль силовых линий. В случае неполярных диэлектриков сильное внешнее поле, сравнимое по модулю с внутриатомным полем, может существенно деформировать атомы или молекулы вещества и изменить их электрические свойства. Однако, эти явления практически никогда не наблюдаются, так как гораздо раньше наступает электрический пробой диэлектрика. ●

3. Ионные диэлектрики.

К ионным диэлектрикам относятся вещества, имеющие ионную структуру (соли или щелочи: NaCl, KCl и т.д.). При помещении ионного диэлектрика во внешнее электрическое поле в отличие от полярных диэлектриков будет наблюдаться смещение положительных зарядов по полю, а отрицательных зарядов против поля. Главное отличие в том, что в разумных интервалах температур энергия связи между ионами оказывается больше, чем энергия теплового движения. Вектор поляризации *от температуры не зависит.*

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

Сегнетоэлектрики - кристаллические диэлектрики, обладающие в определённом интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризацией областей – **доменов**. В каждом домене диполи молекул ориентированы одинаково. Обычно сегнетоэлектрики не являются однородно поляризованными, домены — области с различными направлениями спонтанной поляризации, так что при отсутствии внешнего поля суммарный электрический дипольный момент P образца практически равен нулю.



□ Сегнетоэлектрические свойства веществ сильно зависят от температуры. Для каждого сегнетоэлектрика есть определенная температура, выше которой его данные необычные свойства исчезают и он превращается в обычный диэлектрик. Эта температура называется **точкой Кюри** (в честь французского физика Пьера Кюри (1859—1906)). Обычно, сегнетоэлектрики обладают только одной точкой Кюри; исключение составляют лишь сегнетова соль (-15 и $+22,5^{\circ}\text{C}$) и изоморфные с нею соединения.

- Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков во много раз больше единицы (сегнетова соль – $\epsilon = 10000$, титанат бария – $\epsilon = 7000$).
- Зависимость поляризации от внешнего поля имеет вид петли гистерезиса.
- **Гистерезис** – запаздывание (возникает из-за дефектов, неоднородностей кристаллических структур).

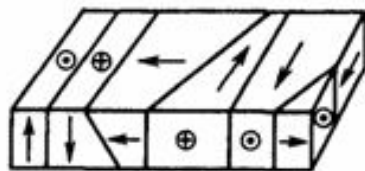


Рис. 1

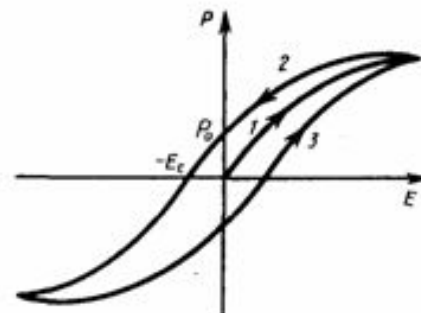
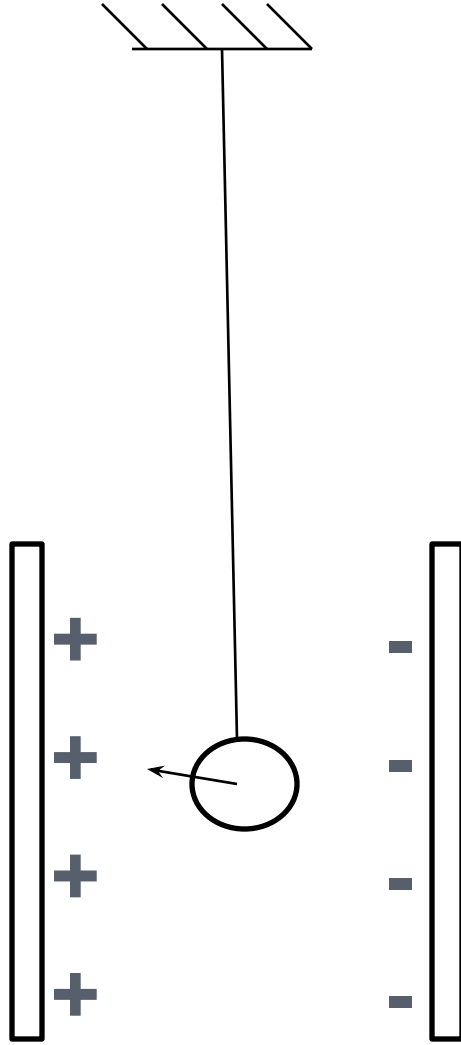
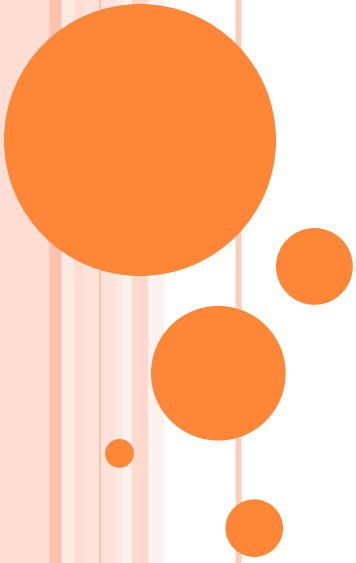


Рис. 2



- ▣ **Пьезоэлектрики** (кварц, сегнетоэлектрики) — кристаллические вещества, в которых при растяжении или сжатии в некоторых направлениях возникает электрическая поляризация даже в отсутствие внешнего электрического поля (**прямой пьезоэффект**). Можно наблюдать и **обратный пьезоэффект** — появление механической деформации под действием электрического поля.
- ▣ Применение: прямой – в устройстве микрофонов, звукозаписывающих устройств; обратный – для получения ультразвука, в громкоговорителях, стабилизаторах частоты.

- 1. Напряженность электрического поля у поверхности Земли равна 130 В/м . При ходьбе человека разность потенциалов, возникающая между головой и ступнями ног человека, равна примерно 220 В . Почему мы не ощущаем электрическое поле Земли?
- 2. Между двумя разноименно заряженными металлическими пластинами с равными по модулю зарядами помещен легкий шарик на шелковой нити. Что будет происходить, если шарик привести в движение в сторону положительно заряженной пластины, если шарик – проводник, шарик – диэлектрик?



**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ.
КОНДЕНСАТОРЫ.
ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО
КОНДЕНСАТОРА.
ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**



□ ЕМКОСТЬ УЕДИНЕННОГО ПРОВОДНИКА.

- Уединенным будем называть проводник, размеры которого много меньше расстояний до окружающих тел. Пусть это будет шар радиусом r . Если потенциал на бесконечности принять за 0, то потенциал заряженного уединенного шара равен:

$$\varphi = \frac{q}{C},$$

где q – заряд,

C – **электроемкость** определяется геометрической формой, размерами проводника и свойствами среды.



- ▣ **Электрическая ёмкость** – способность проводника накапливать электрические заряды.

$$C = \frac{q}{\phi}$$

Единицы емкости:

$$[C] = \left[\frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}} = 1 \text{ Ф} \right]$$

Емкостью 1 Ф (фарад) обладает такой проводник, у которого потенциал возрастает на 1 В при сообщении ему заряда в 1 Кл.

$1 \text{ Ф} = 10^6 \text{ мкФ}$ (микрофарад) = 10^9 нФ (нанофарад) = 10^{12} пФ (пикофарад).



- Емкостью 1Ф обладал бы уединенный шар, радиус которого был бы равен 13 радиусам Солнца (в 23 раза больше, чем расстояние от Земли до Луны).

Емкость Земли 700 мкФ.

Потенциал шара:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r'}$$

отсюда емкость шара:

$$C = 4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r$$



- Чем больше заряд вмещает проводник при данной разности потенциалов, тем больше ёмкость.
- Если проводник не уединенный, то потенциалы складываются по правилу суперпозиции и емкость проводника меняется.
- Присутствие в пространстве других проводников и диэлектриков приводит к увеличению емкости уединенного проводника.



КОНДЕНСАТОРЫ

- Можно создать систему проводников, емкость которой не зависит от окружающих тел. Первые **конденсаторы** - лейденская банка (Мушенбрук, сер. XVII в.).
- **Конденсатор** представляет собой систему из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Проводники называются обкладками конденсатора.



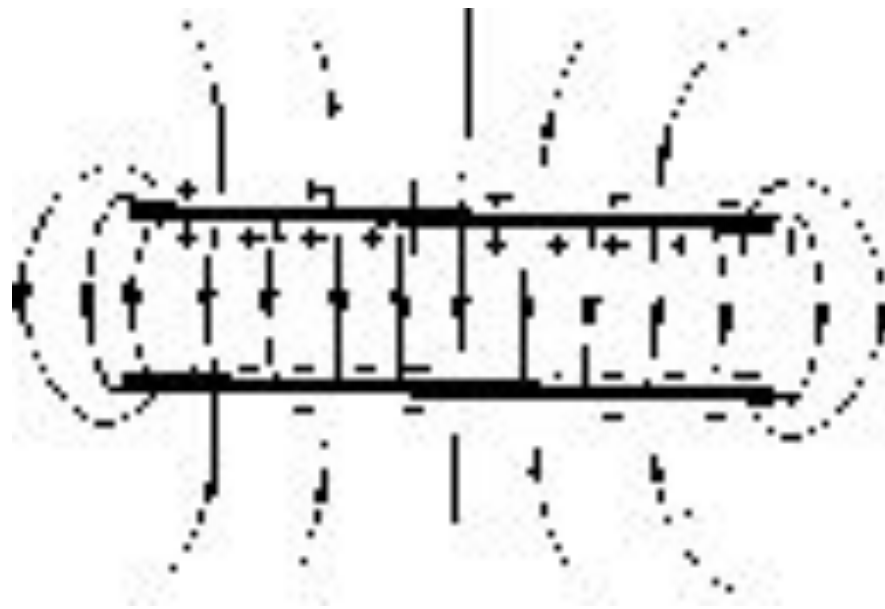
- Если заряды пластин конденсатора одинаковы по модулю и противоположны по знаку, то под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из его обкладок.
- Электроемкостью конденсатора называют отношение заряда конденсатора к разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{U}$$

ЕМКОСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

Емкость плоского конденсатора зависит только от его размеров, формы и диэлектрической проницаемости.





$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

где

S – площадь одной из обкладок конденсатора;

d – толщина диэлектрика.



□ Для создания конденсатора большой емкости необходимо увеличить площадь пластин и уменьшить толщину слоя диэлектрика.

□ Роль диэлектрика:

- не позволяет нейтрализоваться зарядам на обкладках;

- увеличивает емкость конденсатора.

Для защиты от механических повреждений конденсатор помещают в корпус, на котором указывают его емкость, допустимое напряжение, марку, ГОСТ, дату изготовления.



ВИДЫ КОНДЕНСАТОРОВ



Воздушный



Бумажный



Слюдяной



*Электроли-
тический*



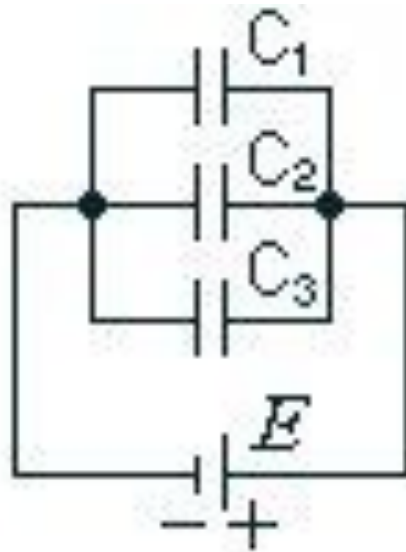
НАЗНАЧЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

- Накапливать на короткое время заряд или энергию для быстрого изменения потенциала.
- Не пропускать постоянный ток.
- В радиотехнике: колебательный контур, выпрямитель.



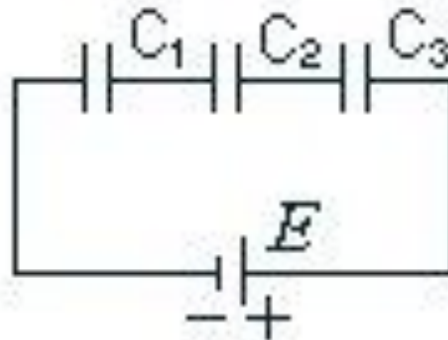
СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

1. При *параллельном* соединении напряжение на всех обкладках одинаковое $U_1 = U_2 = U_3$, а емкость батареи равняется сумме емкостей отдельных конденсаторов $C = C_1 + C_2 + C_3$.



2. При **последовательном** соединении заряд на обкладках всех конденсаторов одинаков $q_1 = q_2 = q_3 = q$, а напряжение батареи равняется сумме напряжений отдельных конденсаторов $U = U_1 + U_2 + U_3$. Емкость всей системы последовательно соединенных конденсаторов рассчитывается из соотношения:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$



ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

- Энергия заряженного плоского конденсатора E_k равна работе A , которая была затрачена при его зарядке, или совершается при его разрядке

$$E_k = A = qU_{\text{cp}} = \frac{q(0+U)}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Энергия заряженного конденсатора сосредоточена в его электрическом поле.

**УСЛОВИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.**

СИЛА ТОКА И ПЛОТНОСТЬ ТОКА.

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ БЕЗ ЭДС.

**ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ МАТЕРИАЛА, ДЛИНЫ И
ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ
ПРОВОДНИКА. СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ**



- Направленное движение свободных зарядов в проводнике под действием сил электрического поля называется электрическим током.

УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

1. Наличие свободных носителей заряда.
2. Замкнутость цепи.
3. Наличие разности потенциалов (электрического поля в проводнике).



- Величину, характеризующую быстроту переноса заряда в проводнике через его поперечное сечение, называют силой тока. Сила тока в проводнике численно равна количеству электричества, проходящего через поперечное сечение проводника за единицу времени.

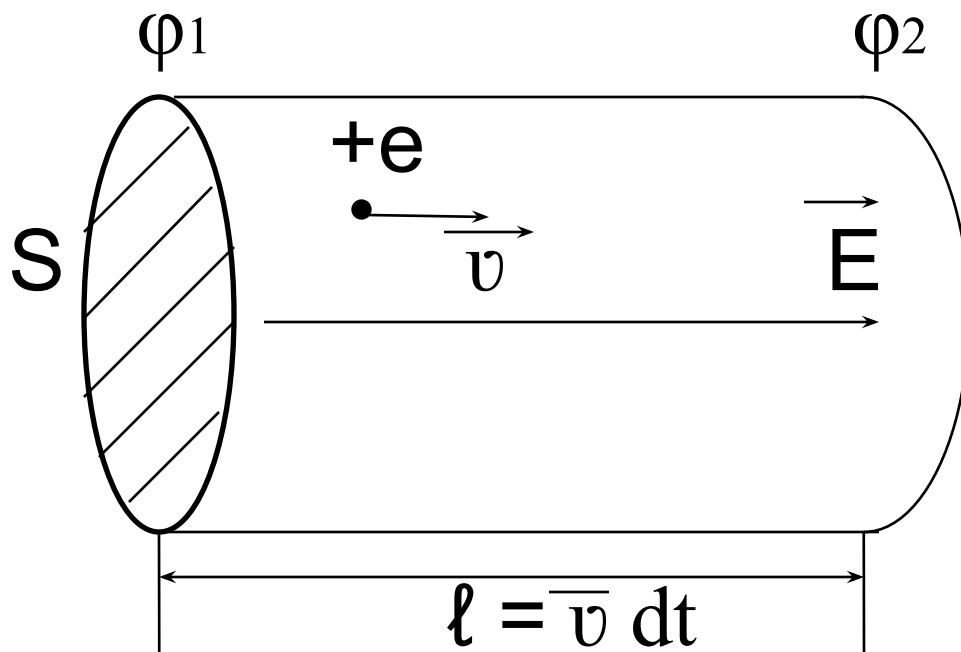
$$I = \frac{q}{t}, \quad [I] = \frac{1\text{Кл}}{1\text{с}} = 1\text{А (Ампер)}$$

- Величину, характеризующую быстроту переноса заряда в проводнике через единицу площади его поперечного сечения, называют плотностью тока.

$$j = \frac{I}{S}, \quad [j] = \frac{1\text{А}}{1\text{м}^2} = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$



- Выясним чем определяется плотность тока в проводнике. Предположим, что $E \perp S$, а все носители имеют заряд $+e$, число подвижных носителей в единице объема проводника n_0 , а скорость их направленного движения в проводнике \bar{v} .



- Внутри цилиндра будет находиться носителей тока $n_0 S l$, а их заряд $dq = e n_0 S l$.

За время dt все эти носители пройдут через основание цилиндра, при этом сила тока:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{e n_0 S l}{dt} = \frac{e n_0 S \bar{v} dt}{dt} = e n_0 S \bar{v},$$

а плотность тока: $j = e n_0 \bar{v}$

$$\bar{v} = \frac{(v_{\max} + 0)}{2},$$

$$v_{\max} = a \tau = \frac{e E \lambda}{m \bar{v}},$$

где τ – среднее время свободного пробега,
 λ – средняя длина свободного пробега,
 \bar{v} – средняя скорость теплового хаотического движения ($\vec{E} = 0$).

$$\bar{v} = \frac{eE\lambda}{2m\bar{u}},$$
$$\vec{I} = \frac{e^2 n_0 S E \lambda}{2m\bar{u}}$$

За направление электрического тока принимают направление движения положительных зарядов (техническое направление).

$$\vec{j} = \frac{e^2 n_0 E \lambda}{2m\bar{u}}$$

Если плотность тока с течением времени не изменяется, то ток называется постоянным.

$$E = \frac{U}{l}$$
$$I = \frac{e^2 n_0 S U \lambda}{2m\bar{u} l}$$



□ Проводимость:

$$g = \frac{e^2 n_0 S \lambda}{2 m \mu l},$$

$$I = g \bar{U},$$

Сопротивление: $R = \frac{1}{g},$

$I = \frac{U}{R}$ – **закон Ома** для участка цепи:

сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на этом участке и обратно пропорциональна его сопротивлению, если оно не меняется.

$$R = \frac{U}{I}, [R] = \left[\frac{1\text{В}}{1\text{А}} = 1\text{Ом} \right]$$

Сопротивление проводника численно равно напряжению, необходимому для получения в нем силы тока 1 Ампер.

$$g = \frac{1}{R}, \quad [g] = \left[\frac{1}{1 \text{ Ом}} = 1 \text{ См} \right]$$

1 Сименс – это проводимость проводника сопротивлением 1 Ом.

Падение напряжения на участке цепи:

$U = IR$ – это работа электрических сил по перемещению заряда на данном участке цепи (идет на нагревание проводника).

$$R = \frac{2m\bar{u} \ell}{e^2 n_0 S \lambda}$$

Удельное сопротивление характеризует зависимость сопротивления проводника от рода материала и внешних условий (берут из таблиц):

$$\rho = \frac{2m\bar{u}}{e^2 n_0 \lambda}$$



$$R = \frac{\rho \ell}{S},$$
$$\rho = \frac{RS}{\ell},$$

$$[\rho] = \left[\frac{1 \text{ Ом} \times 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Ом} \times \text{м} = 1 \times 10^6 \frac{\text{Ом} \times \text{мм}^2}{\text{м}} \right]$$

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

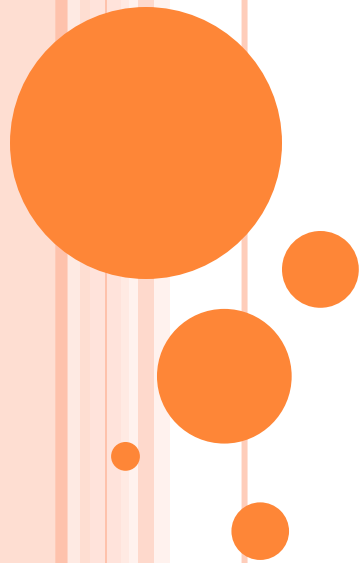
Удельная проводимость:

$$\sigma = \frac{1}{\rho},$$

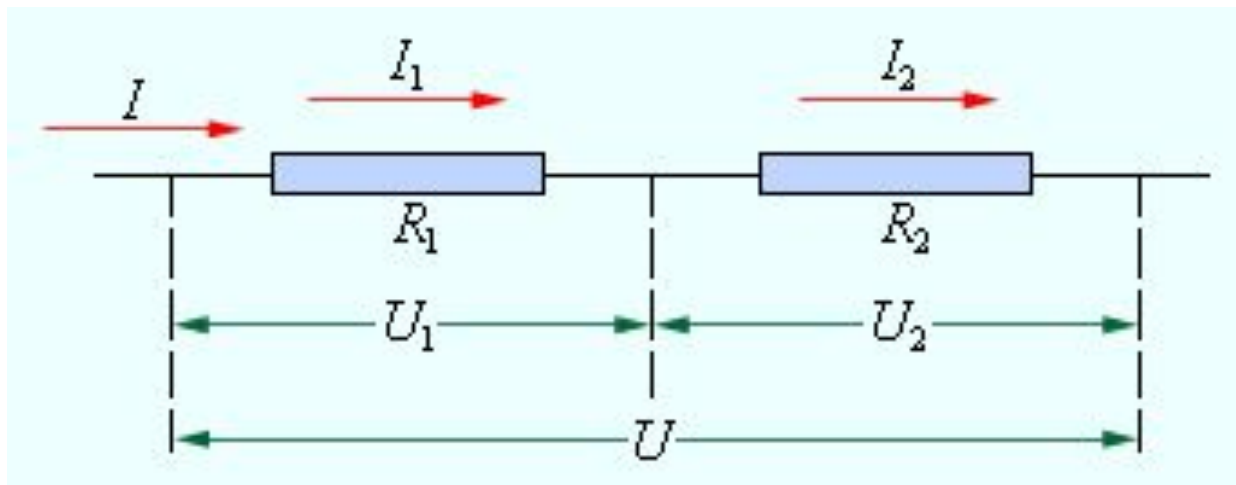
$$[\sigma] = \left[\frac{1}{1 \text{ Ом} \times \text{м}} = 1 \frac{\text{См}}{\text{м}} \right].$$



СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ



1. При **последовательном** соединении проводников сила тока во всех проводниках одинакова: $I_1 = I_2 = I$



Последовательное соединение проводников


По закону Ома, напряжения U_1 и U_2 на проводниках равны: $U_1 = IR_1$, $U_2 = IR_2$



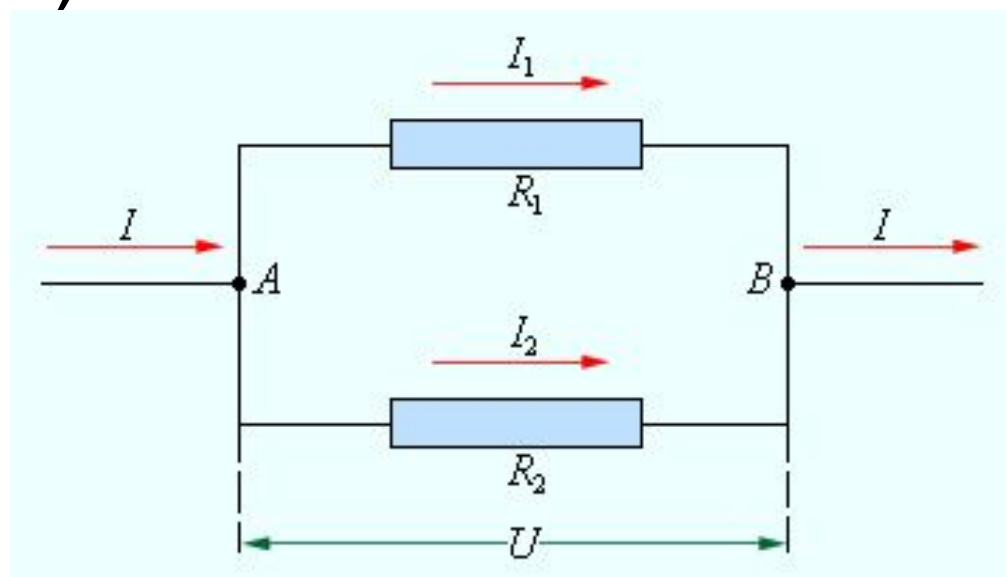
- Общее напряжение U на обоих проводниках равно сумме напряжений U_1 и U_2 :

$$U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR,$$

где R – электрическое сопротивление всей цепи.

- Отсюда следует: $R = R_1 + R_2$.
 - При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников.
 - Этот результат справедлив для любого числа последовательно соединенных проводников.
- 

- 2. При **параллельном** соединении напряжения U_1 и U_2 на обоих проводниках одинаковы: $U_1 = U_2 = U$.
- Сумма токов $I_1 + I_2$, протекающих по обоим проводникам, равна току в неразветвленной цепи: $I = I_1 + I_2$ (1 закон Кирхгофа).



Параллельное соединение проводников

○ Записывая на основании закона Ома:

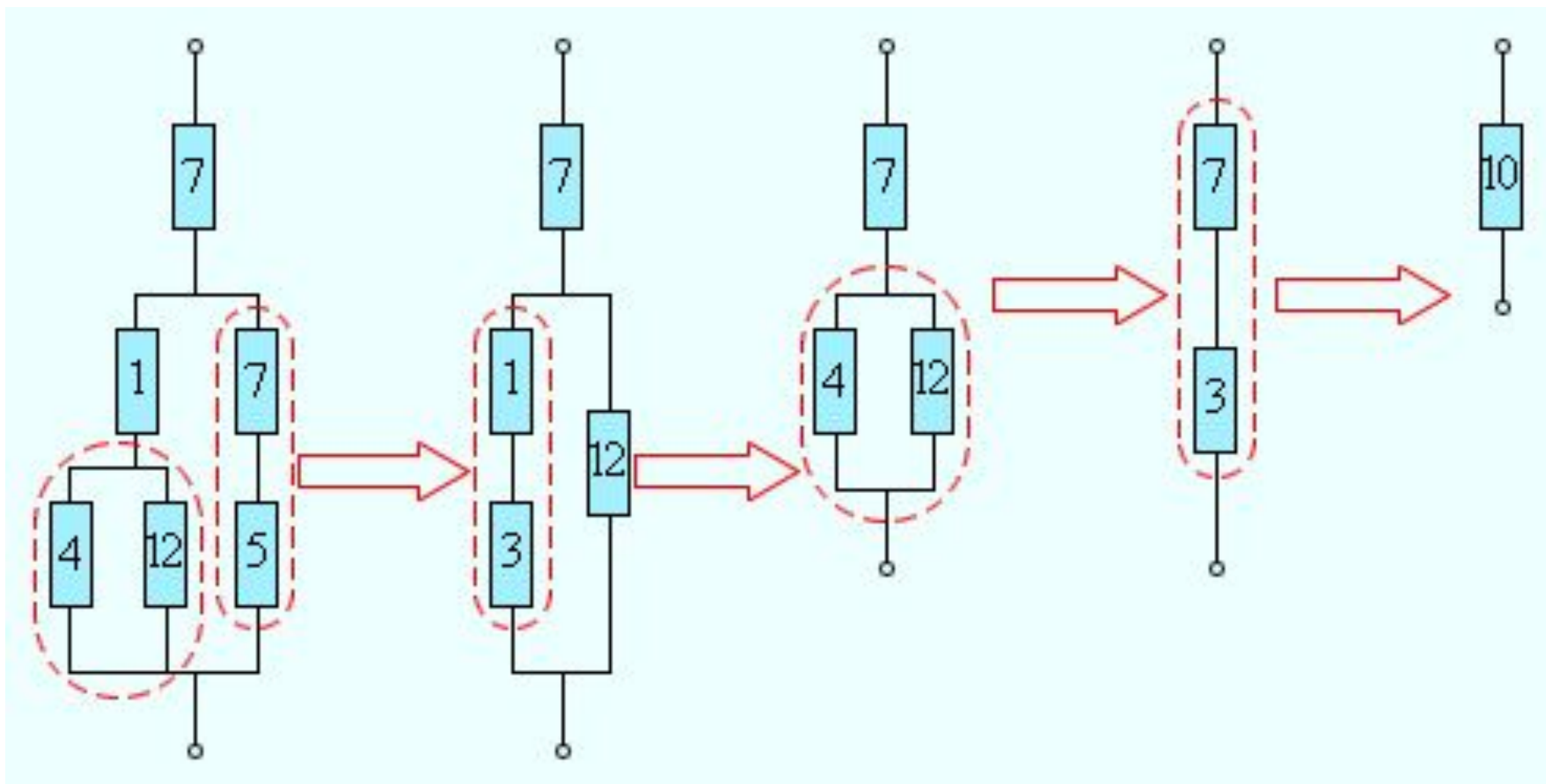
$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I = \frac{U}{R}$$

где R – электрическое сопротивление всей цепи, получим:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно включенных проводников.

Этот результат справедлив для любого числа параллельно включенных проводников.



Расчет сопротивления сложной цепи.
 Сопротивления всех проводников указаны в
 омах (Ом)

1. Как изменится сопротивление проводника, если его длину увеличить в два раза, а сечение уменьшить в 4 раза?



ПИСЬМЕННЫЙ ОПРОС

□ ВАРИАНТ 1

1. Физический

СМЫСЛ ВЕЛИЧИН:

- $I=3\text{A}$

- $g = 1/3 \text{ (См)}$

- $\rho = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$

2. Решить задачу:

$g = 0,5 \text{ (См)}$

R - ?

□ ВАРИАНТ 2

1. Физический

СМЫСЛ ВЕЛИЧИН:

- $j = 5 \text{ A/м}^2$

- $U=3 \text{ В}$

- $R=10 \text{ Ом}$

2. Решить задачу:

$I/U = 0,2 \text{ См}$

R - ?



ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.



- Поведение электронов в металле подобно поведению молекул одноатомного газа. Средняя кинетическая энергия теплового хаотического движения электронов:

$$\frac{m\bar{u}^2}{2} = \frac{3kT}{2}$$

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$$\rho = \frac{2m}{e^2 n_0 \lambda} \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Отсюда, в соответствии с классической теорией, $\rho \sim \sqrt{T}$



□ Опыты показывают:

$$\Delta\rho = \rho_0\alpha\Delta t$$

$$\Delta\rho = \rho_t - \rho_0$$

$$\Delta t = t - 0 = t$$

$$\rho_t - \rho_0 = \rho_0\alpha t$$

$$\rho_t = \rho_0 + \rho_0\alpha t$$

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где

α – **температурный коэффициент удельного сопротивления.**

То есть $\rho \sim T$ (классическая теория не учитывала колебания ионов кристаллической решетки).

▫ **Температурный коэффициент удельного сопротивления** показывает на какую часть удельного сопротивления, взятого при нуле градусах Цельсия, изменяется удельное сопротивление при нагревании на 1 градус Цельсия.

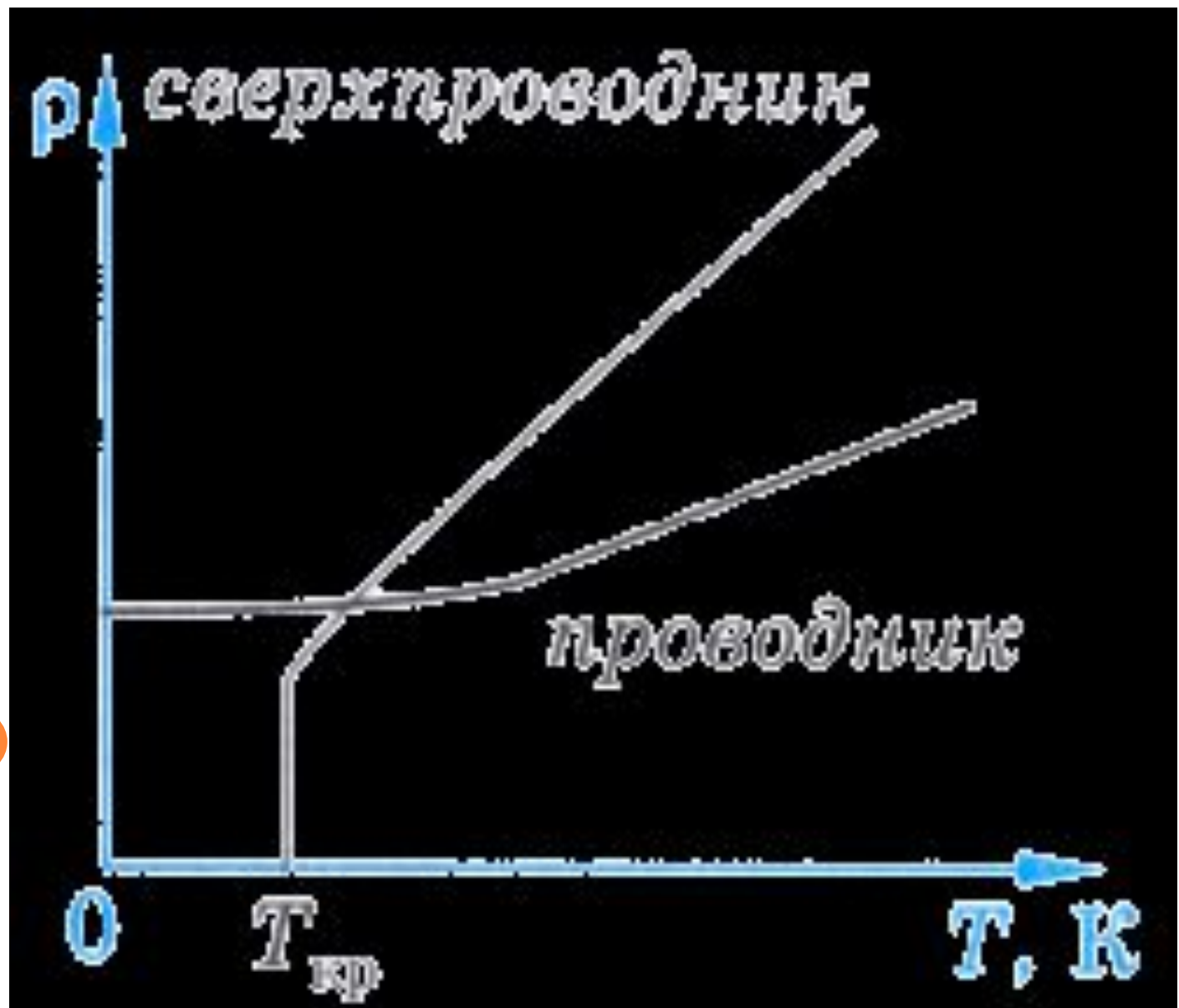
$$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho_0 \Delta t},$$

$$[\alpha] = \left[\frac{1 \text{ Ом}\cdot\text{м}}{1 \text{ Ом}\cdot\text{м} \times 1 \text{ град}} = 1 \text{ К}^{-1} \right]$$

Для металлов $\alpha = \frac{1}{273} \text{ К}^{-1} = 0,004 \text{ К}^{-1}$

Для сопротивления справедливо соотношение:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$




От 0,01К до 21К

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

При охлаждении некоторых металлических проводников до определённой температуры их удельное сопротивление скачкообразно падает практически до нуля (например, у свинца оно уменьшается в 10^{14} раз по сравнению с ρ_0). Это явление было открыто в 1911 г. голландским физиком Х. Камерлинг-Оннесом и названо ***сверхпроводимостью***.

Сверхпроводящее состояние представляет собой упорядоченное состояние электронов проводимости металлов.





- Магнит, левитирующий над высокотемпературным сверхпроводником, охлаждаемым жидким азотом



- Это явление объясняется образованием куперовских пар электронов.
- Температура перехода в сверхпроводящее состояние зависит от массы ионов в кристаллической решётке.
- Электрический ток в сверхпроводнике обусловлен согласованным движением куперовских пар электронов (в каждом металле пары движутся в своей фазе).
- В сверхпроводящем состоянии отталкивание электронов в паре меньше, чем в нормальном за счет деформации кристаллической решетки.



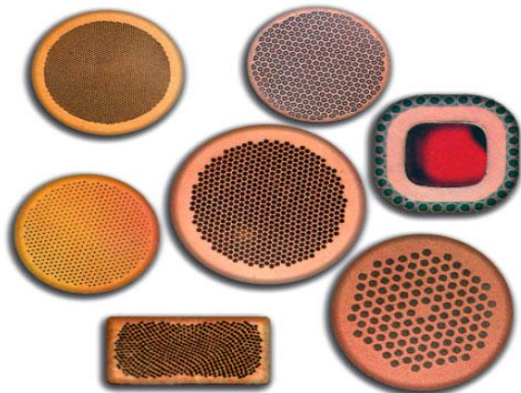
- Электронную куперовскую пару образуют только электроны с противоположными спинами.

ПРИМЕНЕНИЕ

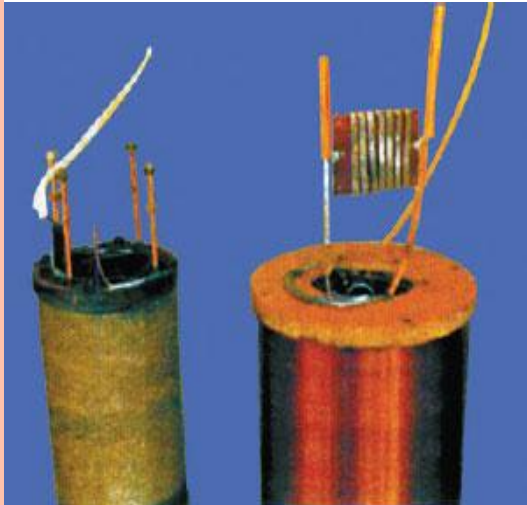
Сверхпроводники проводят ток практически без потерь, если поддерживать их при сверхнизких температурах (низкотемпературная сверхпроводимость – НТСП), поэтому они представляют собой идеальный материал для изготовления *многожильных проводников электромагнитов.*



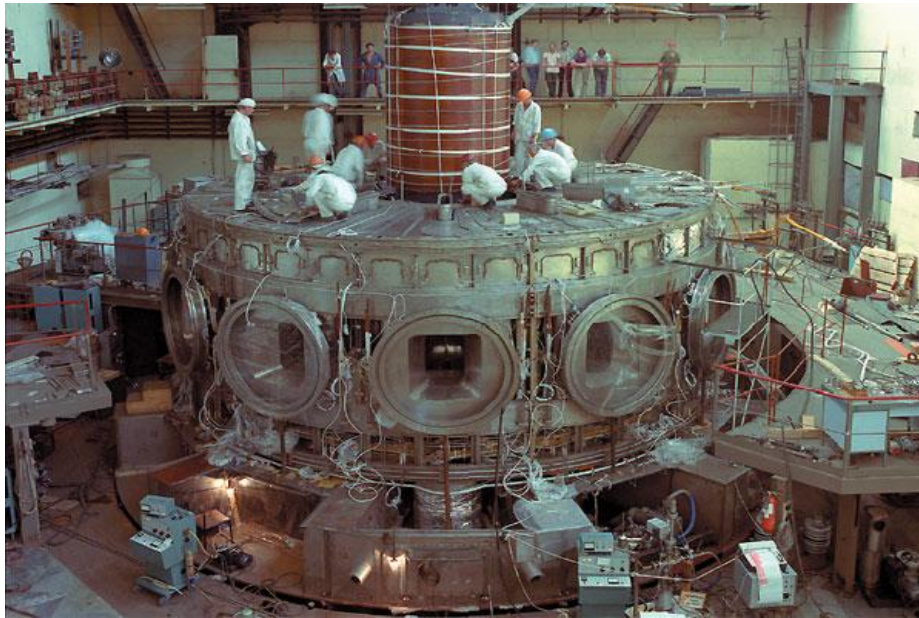
- Сверхпроводящие жилки провода имеют диаметр менее 0,1 мм и располагаются в медной матрице. Их покрывают медью и скручивают, затем это проделывают с полученными более толстыми жилками. Общее число сверхпроводящих ниточек в сечении провода достигает десятков и сотен тысяч. В медной матрице оставляют специальные каналы для охлаждения жидким гелием.

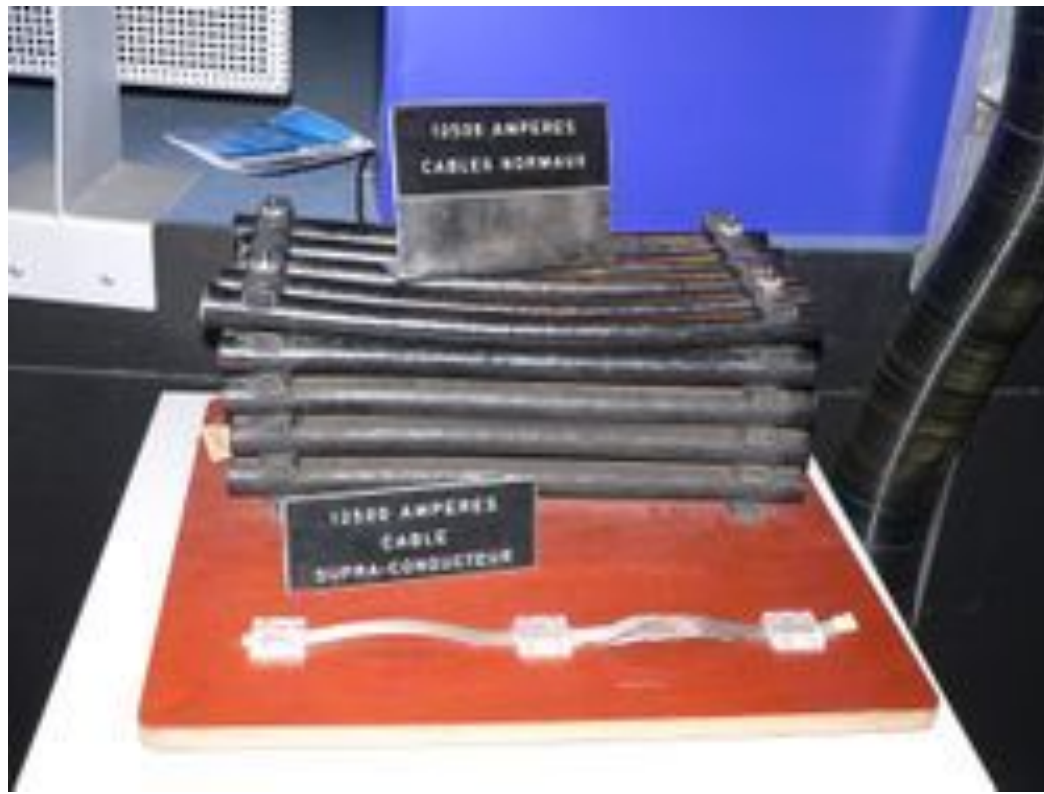


□ *Сверхпроводящие катушки* используются для пузырьковых водородных камер, для крупных ускорителей элементарных частиц. Изготовление таких катушек для ускорителей довольно сложно, так как требование исключительно высокой однородности магнитного поля вызывает необходимость точного соблюдения заданных размеров.



□ Наиболее широкое реальное применение сверхпроводимость находит при создании крупных *электромагнитных систем*. Уже в 80-х гг. прошлого века в СССР был осуществлен запуск первой в мире установки термоядерного синтеза Т-7 со сверхпроводящими катушками тороидального магнитного поля.





- Электрические кабели для ускорителей в CERN: сверху обычные кабели для Большого электрон-позитронного коллайдера; внизу — сверхпроводящие для Большого адронного коллайдера. ●

▣ *Экранирование*: сверхпроводник не пропускает магнитный поток, следовательно, он экранирует электромагнитное излучение. Используется в микроволновых устройствах, а также при создании установок для защиты от излучения при ядерном взрыве.

▣ *Магниты*:

- научно-исследовательское (оборудование НТСП магниты используются в ускорителях частиц и установках термоядерного синтеза);
- магнитная левитация (интенсивно проводятся работы по созданию поездов на магнитной подушке. Прототип в Японии использует НТСП)

В Японии в 2005 г. была введена в эксплуатацию магнитная трасса длиной 9 км. На линии располагается девять станций. Маглевы считаются транспортом будущего. Уже в 2025 г. планируется открыть новую сверхскоростную трассу в такой стране, как Япония. Поезд на магнитной подушке будет перевозить пассажиров из Токио в один из районов центральной части острова. Его скорость составит 500 км/ч.

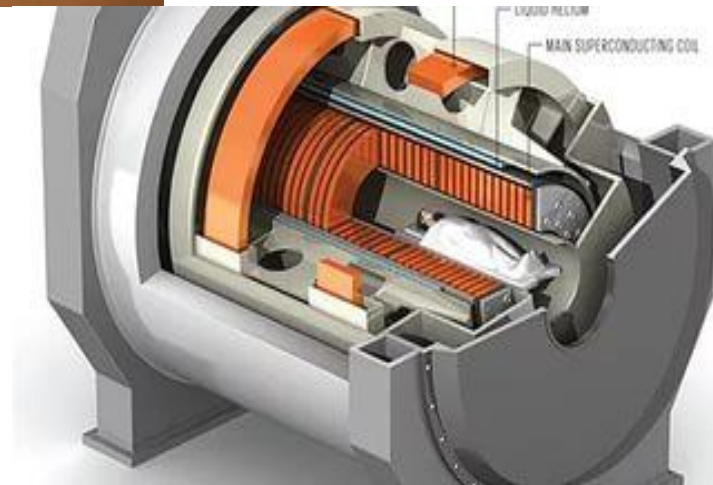
Для реализации проекта понадобится около сорока пяти миллиардов долларов.



- ▣ **Россия:** Создание высокоскоростного поезда планируется и РЖД. К 2030 г. маглев в России соединит Москву и Владивосток. Путь в 9300 км пассажиры преодолеют за 20 часов. Скорость поезда на магнитной подушке будет доходить до пятисот километров в час.



- В *медицине* широко используется такая медико-диагностическая процедура как электронная томография.

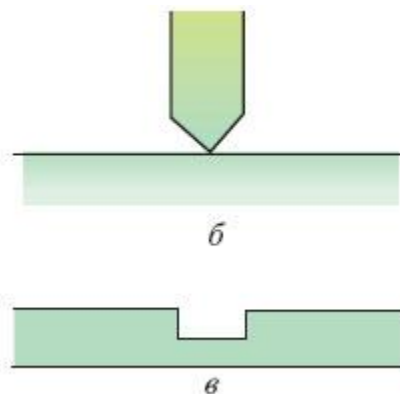
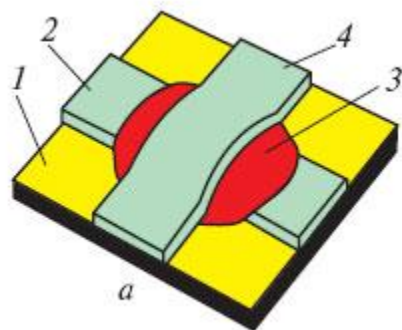


- ▣ *Передача энергии:* прототипные линии НТСП уже продемонстрировали свою перспективность.
- ▣ *Аккумуляция:* возможность аккумулировать электроэнергию в виде циркулирующего тока.
- ▣ *Вычислительные устройства:* комбинация полупроводниковых и сверхпроводящих приборов открывает новые возможности в конструировании аппаратуры.



- В последние годы явление сверхпроводимости все более широко используется при разработке турбогенераторов, электродвигателей, жестких и гибких кабелей, коммутационных и токоограничивающих устройств, магнитных сепараторов и др. Следует также отметить такое направление в работах по сверхпроводимости как создание устройств для измерения давлений, на основе сквидов создают сверхточные измерители напряженности магнитного поля, чувствительные вольтметры, низкотемпературные термометры, детекторы электромагнитного излучения, их используют для получения электромагнитных волн в диапазоне СВЧ и т.д.





Рисунки *а*, *б*, *в* схематически показывают возможности создания слабых сверхпроводящих звеньев (это только примеры, в технике используется значительно большее число вариантов): *а* — на подложку *1* напыляется полоска сверхпроводника *2*, затем прослойка диэлектрика *3* и, наконец, сверху полоска сверхпроводника *4*. Показанные на рисунке слои образуют джозефсоновский контакт. Реально это может быть только часть напыленного на той же подложке более сложного устройства; *б* — в разрезе показан точечный контакт одного сверхпроводника с другим, который тоже образует слабое звено; *в* — можно также сделать канавку в пленке сверхпроводника. На рисунке показан поперечный разрез такой пленки с канавкой. Существенно, чтобы поперечные размеры канавки были порядка ξ (длина корреляции).



**ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА
ИСТОЧНИКА ТОКА.**

**ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ.
СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В
БАТАРЕЮ.**



- Электрический ток возникает в замкнутой цепи под действием источника электрической энергии (источника тока).
- ***Источник электрической энергии*** представляет собой прибор, преобразующий какой-либо вид энергии в электрическую. Он создает и поддерживает на своих зажимах разность потенциалов. Таким образом в проводящей среде создается электрическое поле, которое и вызывает упорядоченное, направленное движение носителей электрических зарядов, т. е. электрический ток.



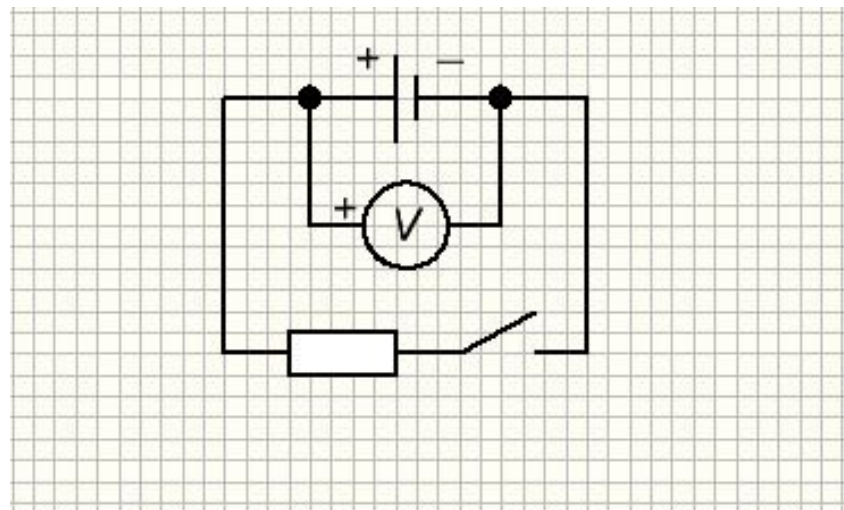
- Происхождение электрического тока сопровождается непрерывным расходом энергии на преодоление сопротивления. Эту энергию доставляет источник электрической энергии, в котором происходит процесс преобразования механической, химической, тепловой или других видов энергии в электрическую.
- Способность источника электрической энергии создавать и поддерживать на своих зажимах определенную разность потенциалов называется **электродвижущей силой**, сокращенно **э. д. с.**

- Численно электродвижущая сила измеряется работой, совершаемой источником электрической энергии при переносе единичного положительного заряда по всей замкнутой цепи.
- Если источник энергии, совершая работу $A_{ст}$, обеспечивает перенос по всей замкнутой цепи заряда q , то его электродвижущая сила (\mathcal{E}) будет равна:

- $$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$$

За единицу измерения электродвижущей силы в системе СИ принимается вольт (В).

- Источник электрической энергии обладает эдс в 1 вольт, если при перемещении по всей замкнутой цепи заряда в 1 кулон совершается работа, равная 1 джоулю.
- Измеряется эдс с помощью электроизмерительных приборов-вольтметров.



Для измерения эдс вольтметр подключается к зажимам источника тока с соблюдением полярности и обязательно при разомкнутой цепи.

□ Источники тока могут соединяться друг с другом последовательно и параллельно.


1. При последовательном соединении источников тока общая электродвижущая сила равна сумме электродвижущих сил всех входящих в соединение источников:

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

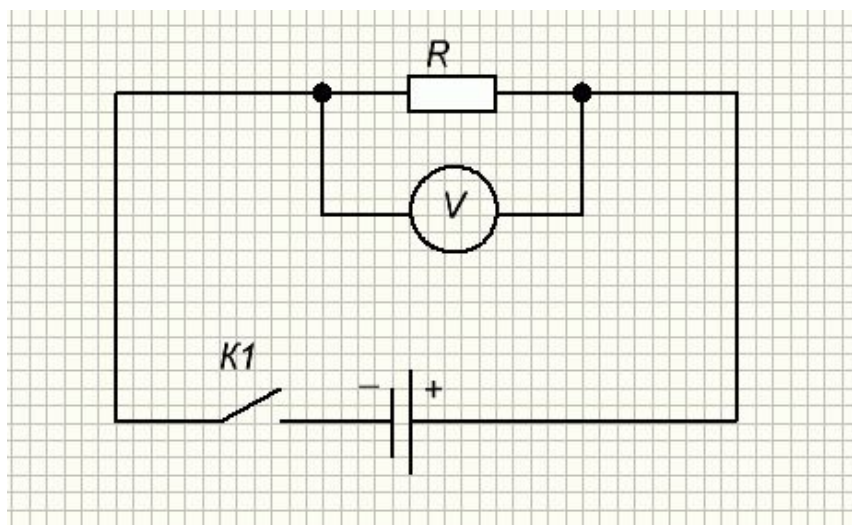
Поэтому последовательное соединение источников тока применяется в тех случаях, когда нужно получить увеличение эдс.

- При параллельном соединении источников тока общая электродвижущая сила останется такой же, как у каждого отдельного источника тока, входящего в соединение: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_4$.
- Параллельно можно соединять источники, имеющие одинаковые ЭДС и одинаковые внутренние сопротивления. Параллельное соединение применяется в тех случаях, когда необходимо получить значительную величину тока.



- Любая электрическая цепь состоит из двух участков: **внутреннего и внешнего** участка цепи.
 - Внутренний участок цепи - это источник тока. Его сопротивление называется внутренним сопротивлением источника тока и обозначается буквой r .
 - Все, что подключено к источнику тока, называется внешним участком электрической цепи, сопротивление которого обозначается R .
 - Таким образом сопротивление всей цепи равно $R+r$.
- 

- Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника тока (внутренний участок цепи), сопротивления R и ключа K_1 (внешний участок цепи).



Эдс источника (\mathcal{E}) при замыкании рубильника K_1 обеспечивает перенос электрических зарядов по всей замкнутой цепи.

- Часть эдс , затрачиваемая на перенос зарядов по внутреннему участку цепи, называется *падением напряжения на внутреннем участке цепи* и обозначается U_0 .
- Часть эдс, затрачиваемая на перенос зарядов по внешнему участку цепи, называется *падением напряжения во внешней цепи* или просто *напряжением на внешнем участке цепи* и обозначается U .



- Таким образом, термин "падение напряжения" или "напряжение" обозначает часть эдс, затрачиваемую на преодоление сопротивления данного участка цепи.
- Эдс источника представляет собой сумму падений напряжения на внутреннем и внешнем участках цепи: $\mathcal{E} = U_0 + U$.
- Из этого следует $U = \mathcal{E} - U_0$.
- Т. е. напряжение на зажимах источника тока меньше его электродвижущей силы на величину падения напряжения на внутреннем участке цепи.



- Эдс источника тока распределяется по участкам замкнутой последовательной цепи прямо пропорционально сопротивлениям этих участков. Это значит что к большему сопротивлению приложено и большее напряжение.

$$\mathcal{E} = Ir + IR$$

$$\mathcal{E} = I(r+R)$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r+R}$$

Две последние формулы выражают **закон Ома для полной цепи**: сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС в цепи и обратно пропорциональна общему сопротивлению цепи.

- Коротким замыканием называют состояние, когда сопротивление нагрузки меньше внутреннего сопротивления источника питания.
- Ток короткого замыкания ограничивается только внутренним сопротивлением источника тока:

$$I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

При коротком замыкании резко и многократно возрастает сила тока, протекающего в цепи, что, согласно закону Джоуля — Ленца приводит к значительному тепловыделению, и, как следствие, возможно расплавление электрических проводов, с последующим возникновением возгорания и распространением пожара.



**ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА.
РАБОТА И МОЩНОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ТЕПЛОВОЕ
ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.**



РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Работа электрического тока показывает, какая работа была совершена электрическим полем при перемещении зарядов по проводнику.

Зная две формулы: $I = \frac{q}{t}$ и $U = \frac{A}{q}$

можно вывести формулу для расчета работы электрического тока:

$$A = UIt$$

Полная работа электрического тока равна произведению силы тока на напряжение и на время протекания тока в цепи.



□ *Тепловая работа* электрического тока:

$$A_T = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}$$

Единица измерения работы электрического тока в системе СИ:

$$[A] = [1A \times 1V \times 1c = 1 \text{ Дж}]$$

○ *Работа сторонних сил*, которая оценивается полученным в источнике количеством электрической энергии за счет других видов энергии:

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E} q = \mathcal{E} I t$$

○ При расчетах работы электрического тока часто применяется внесистемная кратная единица работы электрического тока: 1 кВт·ч (киловатт-час).

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 3\,600\,000 \text{ Дж}$$

В каждой квартире для учета израсходованной электроэнергии устанавливаются специальные приборы-счетчики электроэнергии которые показывают работу электрического тока, совершенную за какой-то отрезок времени при включении различных бытовых электроприборов.



Эти счетчики показывают работу электрического тока (расход электроэнергии) в "кВтхч".



МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

- **Мощность** электрического тока показывает работу тока, совершенную в единицу времени и равна отношению совершенной работы ко времени, в течение которого эта работа была совершена.

$$P = \frac{A}{t}$$

- Мощность электрического тока равна:

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

Единица мощности электрического тока в системе СИ:

$$[P] = 1 \text{ Вт (ватт)} = 1 \text{ А} \times 1 \text{ В}$$



- Мощность, затрачиваемая на получение других видов энергии (мощность источника тока):

$$P_{\text{ист}} = \mathcal{E} \cdot I$$

Мощность тока во всей цепи при любом соединении равна сумме мощностей на отдельных участках цепи.



ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

В XIX веке независимо друг от друга, англичанин Дж.Джоуль и россиянин Э.Х. Ленц изучали нагревание проводников электрическим током и опытным путём установили закономерность: количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

$$Q = I^2 R t$$



Q – количество теплоты, Дж;

I – сила тока в проводнике, А;

R – сопротивление проводника, Ом;

t – время прохождения тока, с.

- Если по активному сопротивлению (проводнику) течет постоянный ток, то работа тока на этом участке идет на преобразование электрической энергии во внутреннюю. Увеличение внутренней энергии проводника приводит к повышению его температуры (проводник нагревается).

- По закону сохранения энергии количество теплоты (Q), выделяющееся в проводнике при прохождении электрического тока, равно тепловой работе тока по преодолению сопротивления проводника:

$$Q = A_{\tau}$$

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}$$

1. При последовательном соединении проводников большее количество теплоты выделяется в проводнике с большим сопротивлением.
2. При параллельном соединении проводников большее количество теплоты выделяется в проводнике с меньшим сопротивлением.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

1. **В быту:** освещение, нагревательные приборы (электрические плитки, утюги, чайники, кипятильники), плавкие предохранители.
2. **В промышленности** тепловое действие тока используют для выплавки специальных сортов стали и многих других металлов, для электросварки.
3. **В сельском хозяйстве** с помощью электрического тока обогревают теплицы, кормозапарники, инкубаторы, сушат зерно, готовят силос.



**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ И
ВАКУУМЕ. ИОНИЗАЦИЯ ГАЗА.
ВИДЫ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ.
ПОНЯТИЕ О ПЛАЗМЕ. СВОЙСТВА И
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ.**



Электрический ток в газах

Процесс протекания электрического тока через газ называется газовым разрядом.

При комнатных температурах газы практически не проводят электрический ток, так как состоят из нейтральных атомов, т. е. являются диэлектриками.



- При нагреве или облучении ультрафиолетовым светом, рентгеновскими лучами либо другим видом излучения атомы газа получают дополнительную энергию, которая может привести к ионизации. Так, например, при нагреве за счет увеличения скорости молекул часть из них при столкновениях друг с другом распадается на положительно заряженные ионы и электроны.
- Проводимость газов обеспечивается как электронами, так и положительно заряженными ионами.



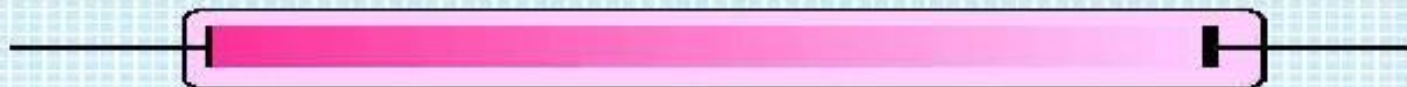
Виды газовых разрядов:

- **несамостоятельный;**

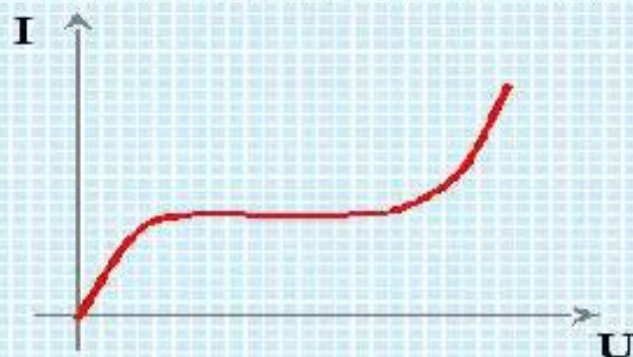
- **самостоятельный.**

Самостоятельный и несамостоятельный разряд

Разряд в газе, который может происходить под действием внешних ионизирующих факторов, называется **несамостоятельным разрядом** (ток прекращается после окончания действия ионизатора)



При увеличении напряжения между электродами трубки, заполненной газом, энергия движущихся ионов и электронов возрастает, возникает явление выбивания ионами из нейтральных молекул электронов – **ударная ионизация**, которая приводит к лавинному увеличению числа носителей заряда и резкому возрастанию тока



Такой разряд не нуждается в действии ионизатора, т.к. заряженные частицы образуются за счет ударной ионизации и называется **самостоятельным**

Ток при таком разряде необходимо ограничивать. Для этого в цепях переменного тока обычно применяется дроссель (индуктивное сопротивление)

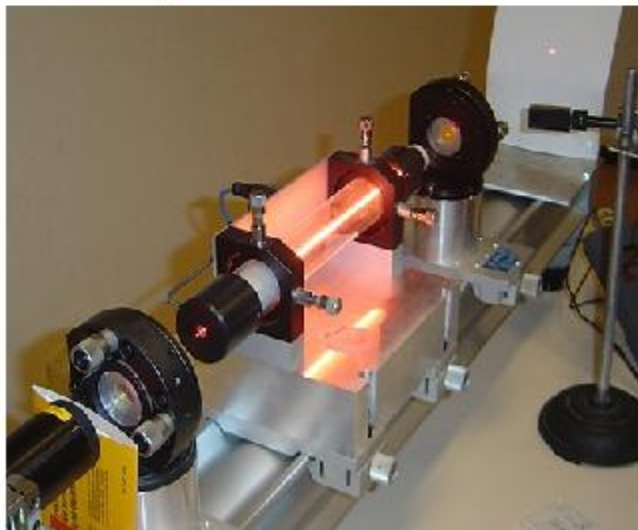
Виды самостоятельного газового разряда



1. Тлеющий разряд

Условия возникновения:

1. низкие давления
(доли мм рт.ст.)
2. высокая напряженность
электрического поля



Техническое применение:

- в лампах дневного света
- в рекламе: неоновые лампы, рекламные трубки
- в медицине: ртутные ультрафиолетовые лампы
- на производстве, в быту: неоновые лампы (индикация и стабилизация напряжения)
- в исследованиях: газовые лазеры



Цвета тлеющих разрядов в различных газах.



Гелий



Неон



Криптон



Аргон



Ксенон

Виды самостоятельного газового разряда

2. Дуговой разряд

Условия возникновения:

- Большая сила тока
(10 -100 А при малой
напряженности
электрического поля)

Техническое применение

- Дуговые ртутные лампы, источники света: прожектора.
- Сварка и резка металлов.
- Получение инструментальной стали (90%) в дуговых печах



Коронный разряд

Коронный разряд возникает, если давление газа близко к атмосферному, и есть сильное неоднородное электрическое поле. Оно существует вблизи заострённых частей проводников, подключенных к высоковольтным источникам тока, а также находящимся во влажном атмосферном воздухе во время грозы. На фотографии показан коронный разряд вокруг листа растения, находящегося в высокочастотном электромагнитном поле.

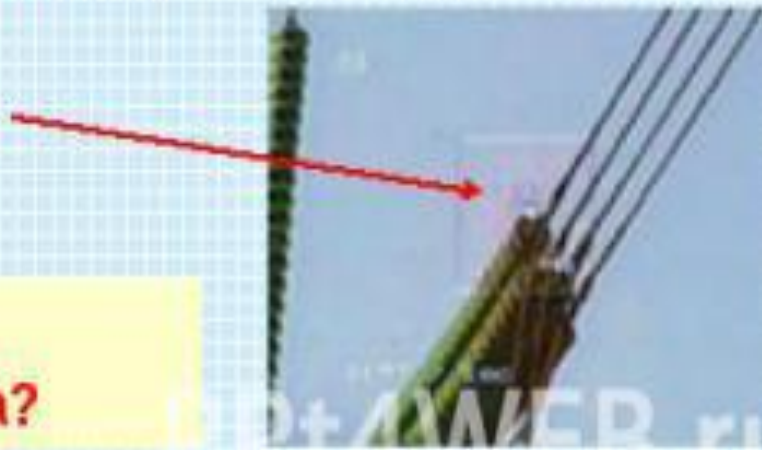


При атмосферном давлении вблизи заостренных участков проводников, имеющих большой электрический заряд, наблюдается в виде светящегося ореола – **коронный разряд**



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?



Коронный разряд рядом с острыми концами корабельных мачт много столетий вызывал ужас мореплавателей, которые не могли правильно объяснить их природу.

«Огни святого Эльма»



Искровой разряд

Гигантский искровой разряд - природная молния - разряд между грозовым облаком и Землей



Газ вблизи искры нагревается до высокой температуры и внезапно расширяется, отчего возникают звуковые волны, и мы слышим характерный треск.

Искровой разряд на трансформаторе Тесла



- Искра в виде ярко светящегося тонкого со сложным образом изогнутого и разветвленного канала (стримера)

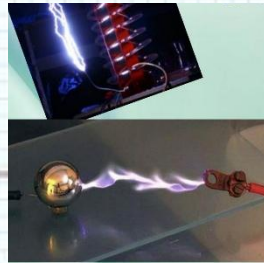


Искровой разряд в ДВС

- Искровой разряд в ДВС применяется для воспламенения горючей смеси
- Для образования мощной искры на свечу зажигания подается напряжение 20 – 30 кВ

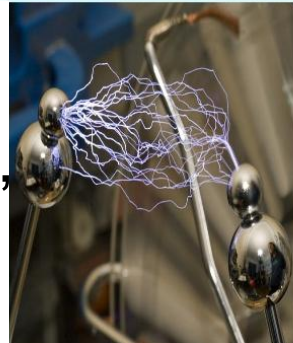


При высоком напряжении между электродами (напряженность электрического поля увеличивается до миллиона вольт на метр и выше) в газе происходит **искровой разряд** в виде кратковременной искры (пробой газа, обусловленный ионизацией молекул сильным электрическим полем)



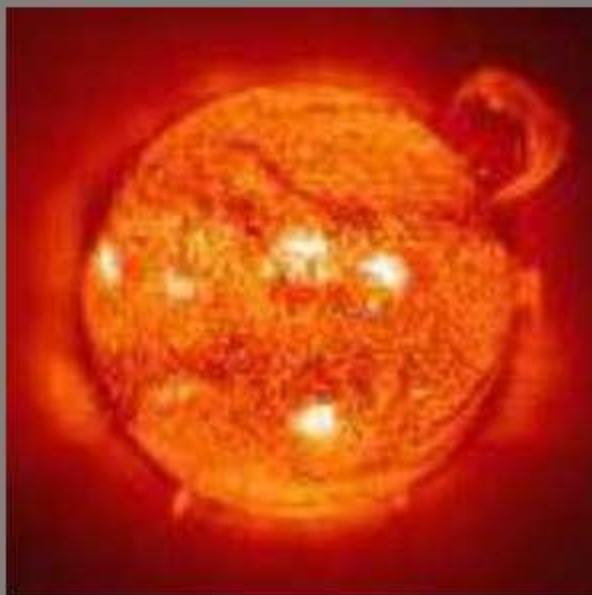
Гигантский искровой разряд представляет собой природная молния, приносит искра и пользу человеку – зажигает топливо в камере сгорания двигателей внутреннего сгорания, зажигает газ в газовой плите ...

Молния: $U=10^8$ В, $I=10^5$ А, продолжительность 10^{-6} с, диаметр канала 10 - 20 см.



ПЛАЗМА

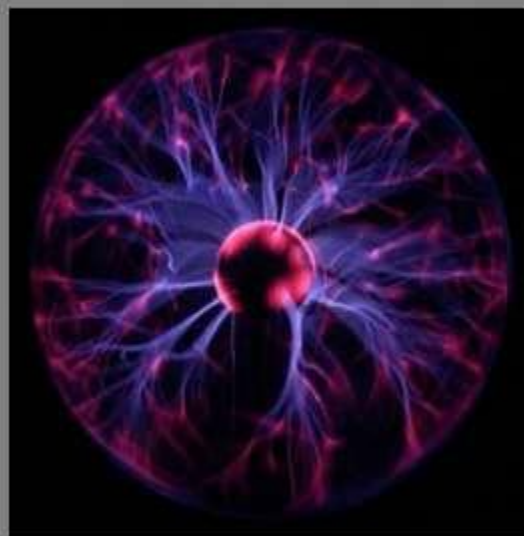
Виды ионизированной
плазмы



Солнце

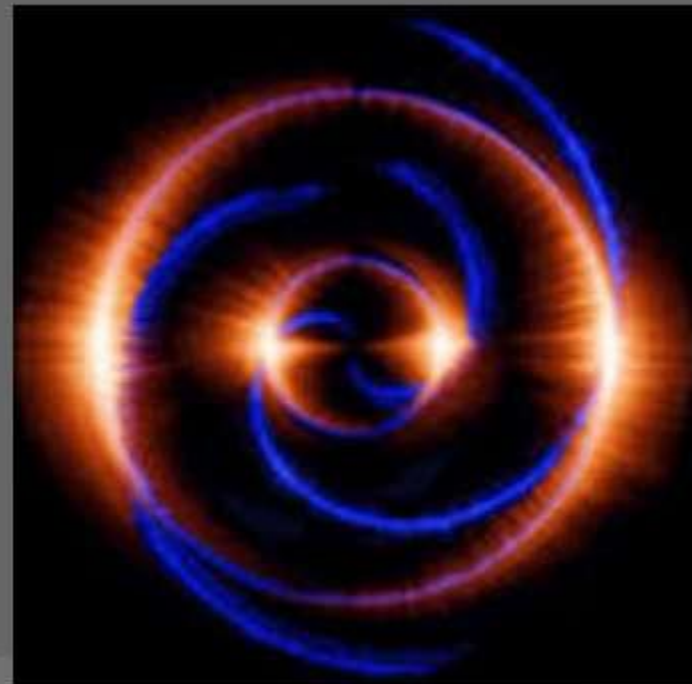
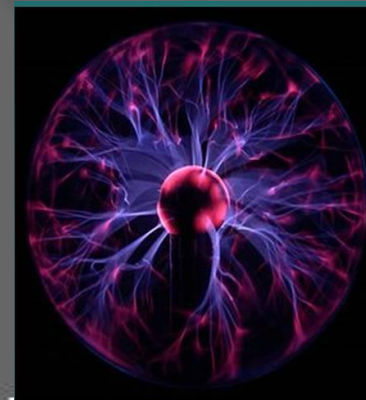


Межзвездные облака



Плазменная лампа XXI века

▮ Плазма – это частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.

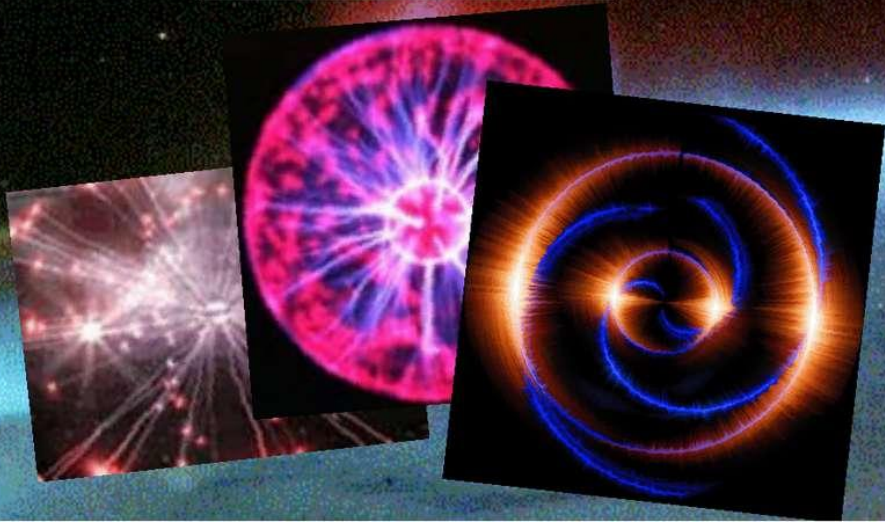


- Низкотемпературная плазма: $T < 10^5$ К.
- Высокотемпературная плазма: $T > 10^5$ К.

Можно наблюдать: пламя костра, рекламные газовые трубки, медицинские кварцевые лампы.
Большое значение: получение термоядерной реакции.

Плазма во Вселенной

99% веществ Вселенной находятся в состоянии плазмы.



Плазма в нашей жизни

Плазменный телевизор



Плазменная лампа

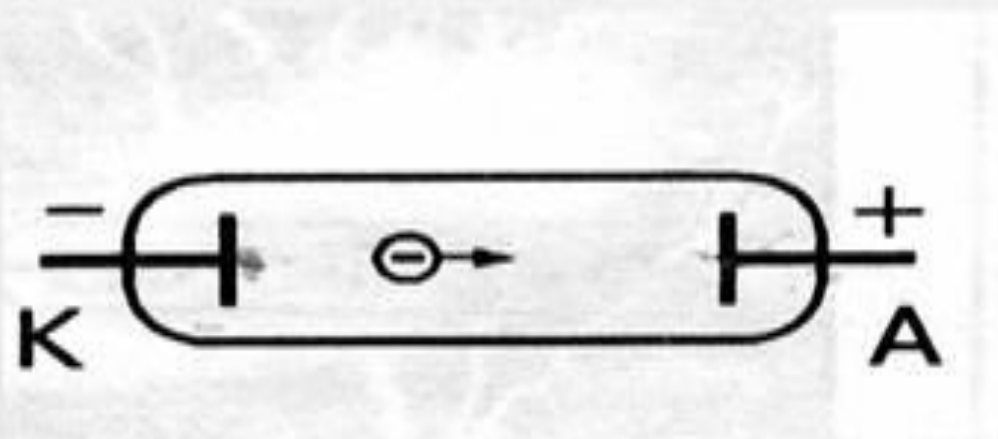


Электрический ток в вакууме

Термоэлектронная эмиссия

- Процесс испускания электронов сильно нагретыми веществами называют термоэлектронной эмиссией.

Вакуумом называется такая степень разряжения газа, при которой можно считать, что длина свободного пробега молекул превышает линейные размеры сосуда.

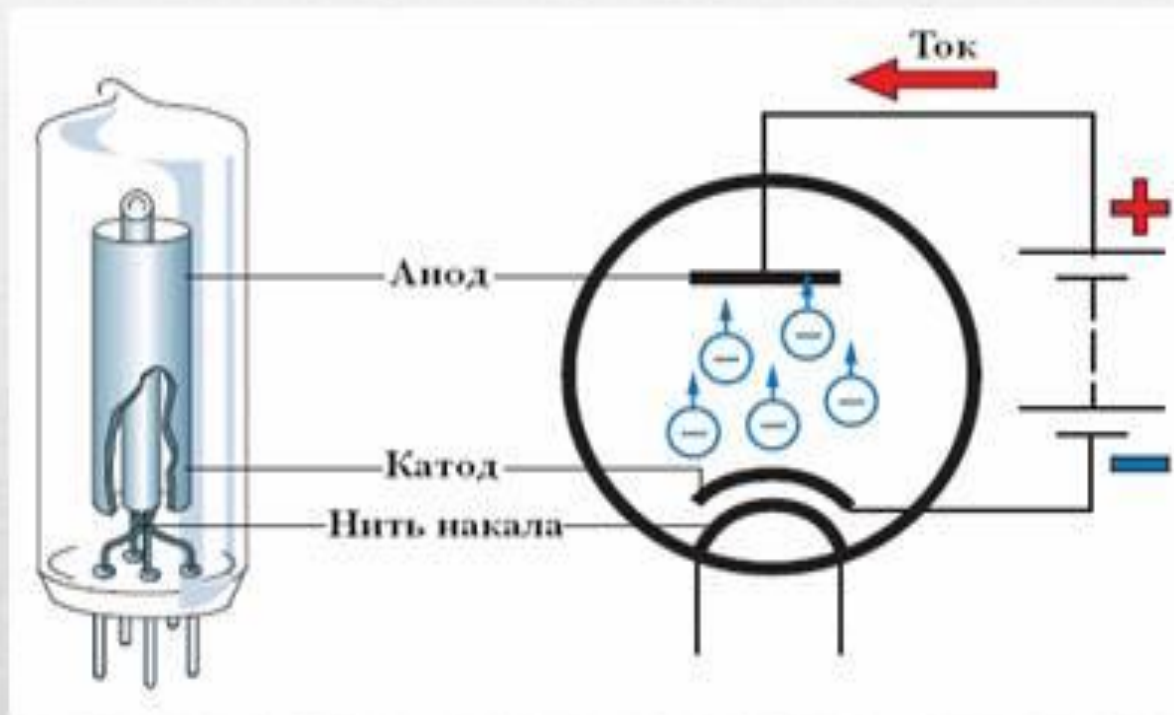


Электрический ток в вакууме отсутствует, т.к. нет свободных носителей заряда.

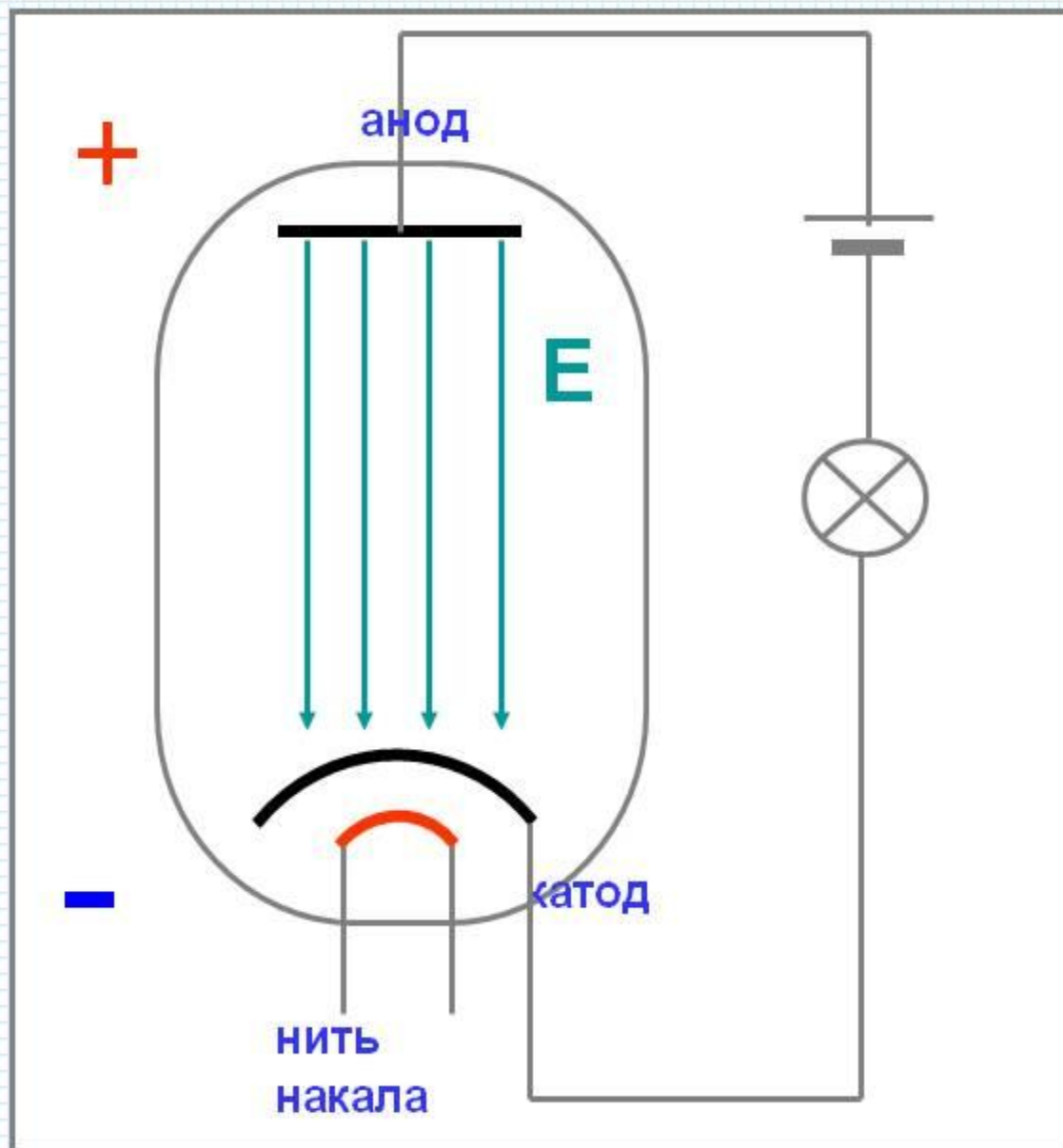
Ток в вакууме осуществляется за счет термоэлектронной эмиссии и представляет собой направленное движение электронов от катода к аноду.

ВАКУУМНЫЙ ДИОД

Вакуумный диод представляет собой сосуд (баллон), в котором создан высокий вакуум. В баллоне размещены два электрода — катод и анод. Катод диода нагревается до температур, при которых возникает термоэлектронная эмиссия.



Вакуумный диод



1. Прямое включение

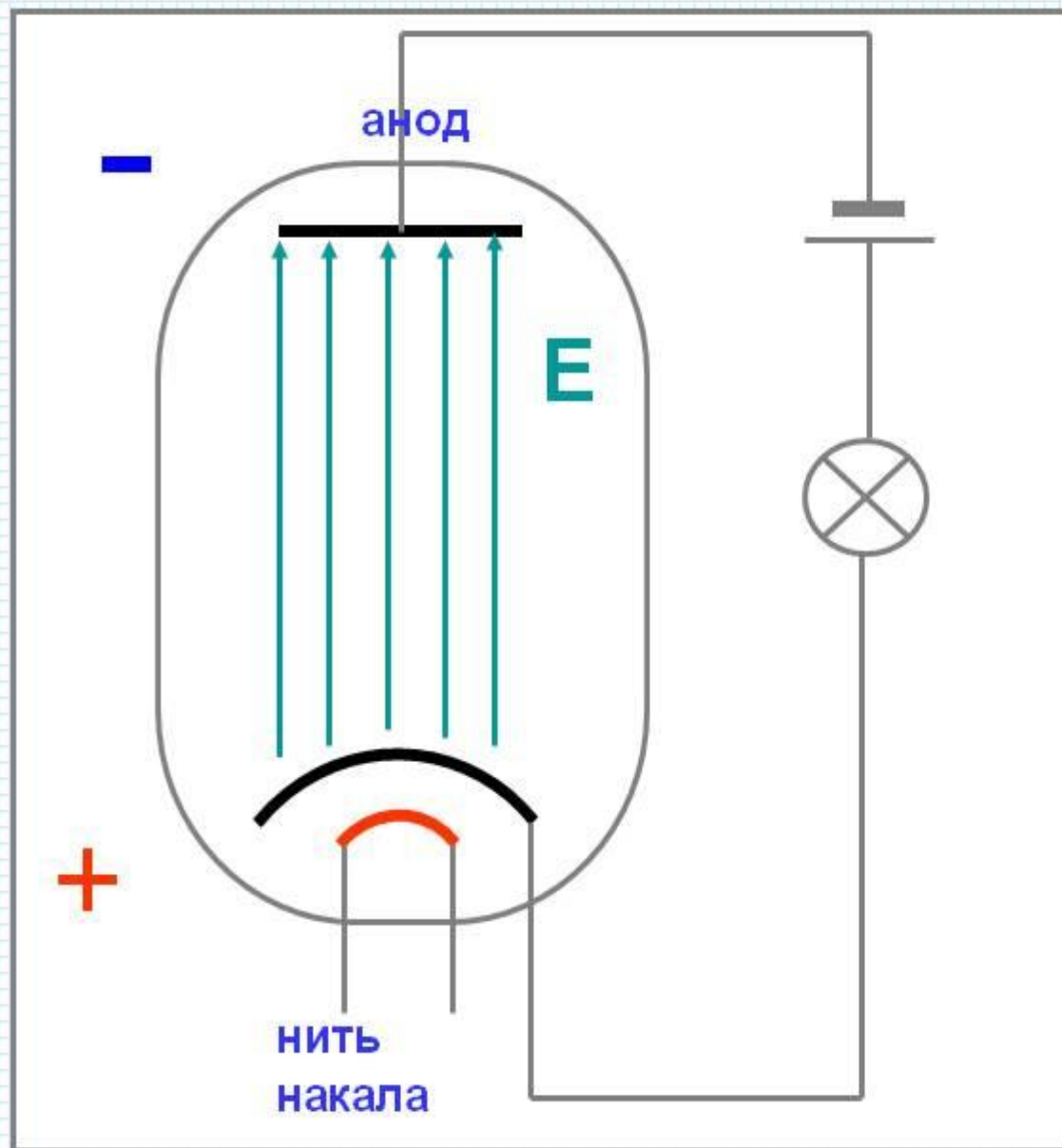
Электроны, вылетевшие из разогретого катода, устремляются к аноду, замыкая цепь

Вакуумный диод хорошо проводит ток в прямом направлении

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



Вакуумный диод

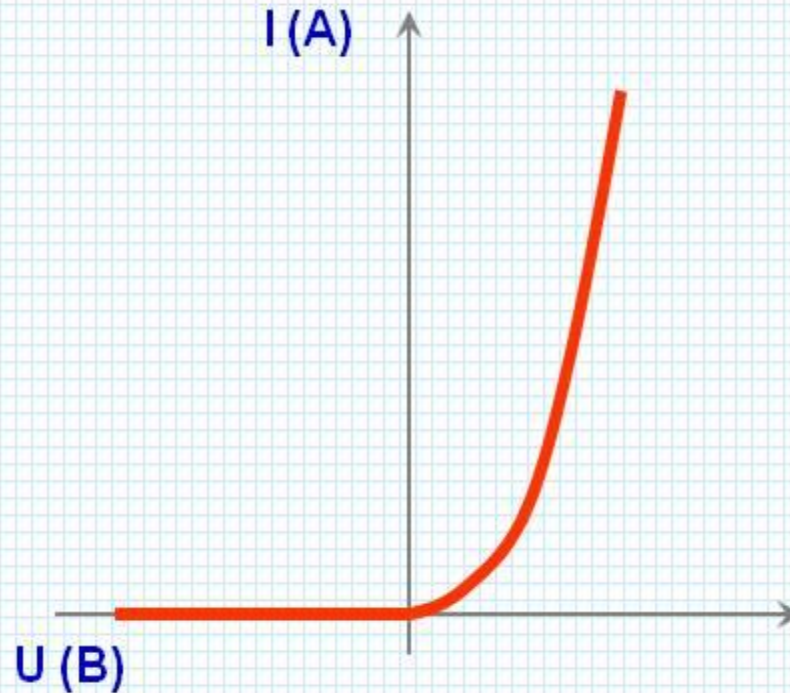


2. Обратное включение

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)



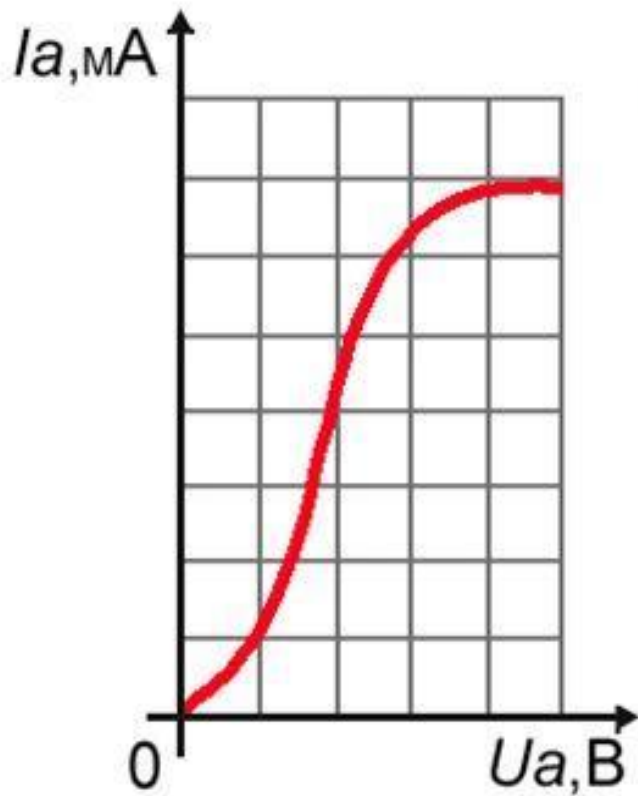
Вакуумный диод обладает **односторонней проводимостью** и применяется для выпрямления переменного тока (кенотрон)

- **Свойство диода выпрямлять приложенное к нему напряжение используется для выпрямления переменного тока и детектирования сигналов высокой частоты.**

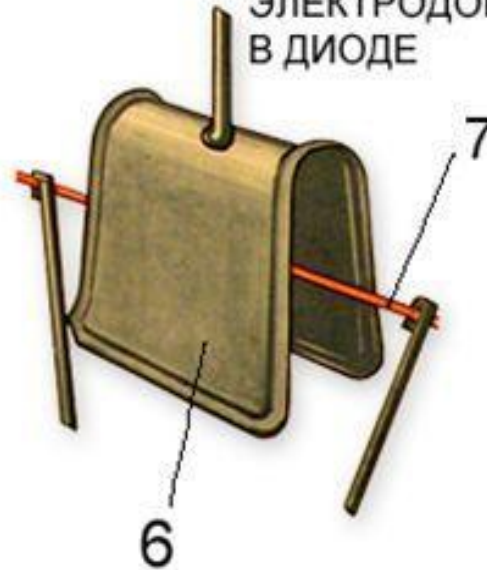
Вакуумные диоды широко применяются при создании различных генераторов и стабилизаторов напряжения.



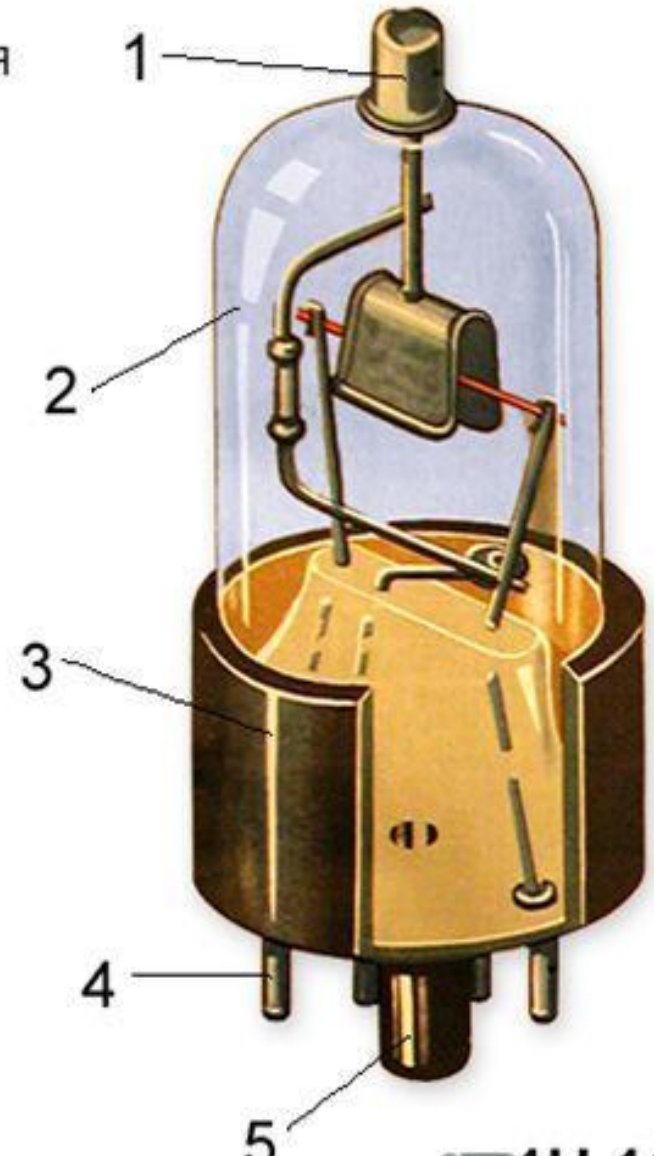
ВАКУУМНЫЙ ДИОД



КОНСТРУКЦИЯ
ЭЛЕКТРОДОВ
В ДИОДЕ



1. Вывод анода
2. Баллон
3. Цоколь
4. Ножка
5. Ключ
6. Анод
7. Катод

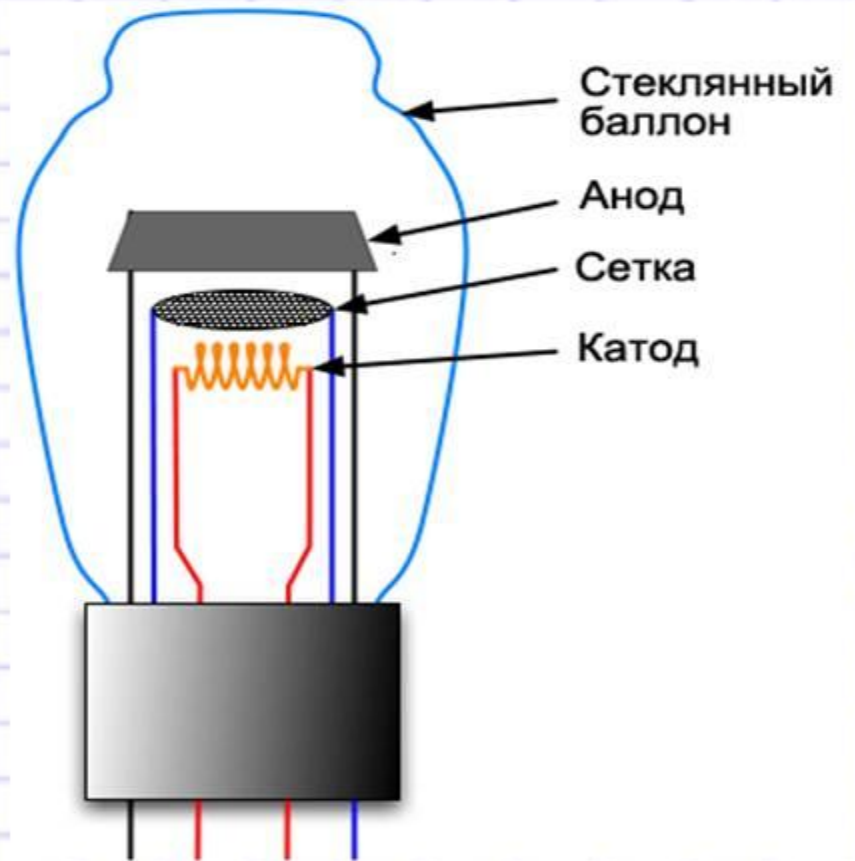
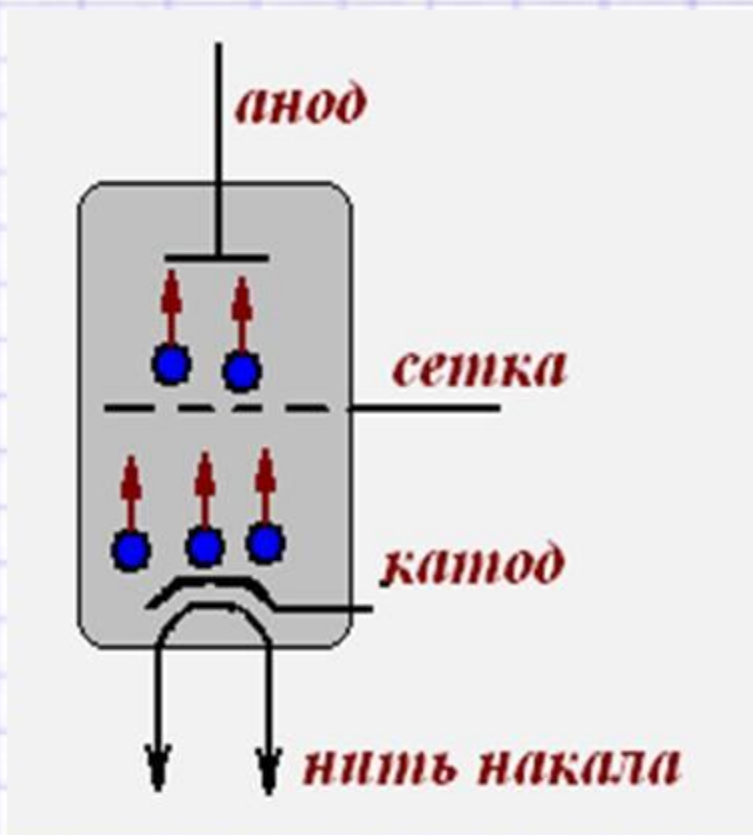


Вакуумный триод

Триод. Поток 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.

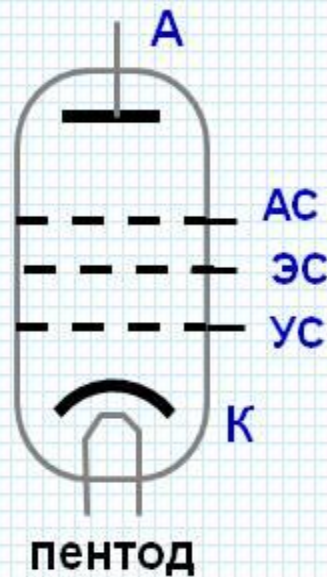
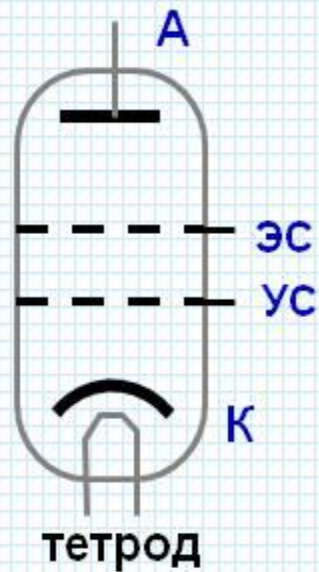
Если на сетку подается положительный потенциал относительно катода, то значительная часть электронов пролетает от катода к аноду, и в цепи анода существует электрический ток. При подаче на сетку отрицательного потенциала относительно катода электрическое поле между сеткой и катодом препятствует движению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





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

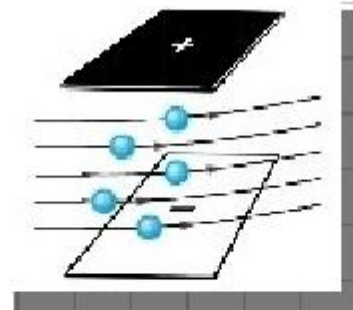
СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

1. При попадании на тело электронный пучок вызывает его нагревание.
2. При попадании на тело электронов и их резком торможении возникает рентгеновское излучение.
3. При попадании на некоторые вещества (стекло, сульфиды цинка и кадмия), заставляют их светиться.
4. Электронные пучки отклоняются электрическим полем.
5. Электронные пучки отклоняются магнитным полем.

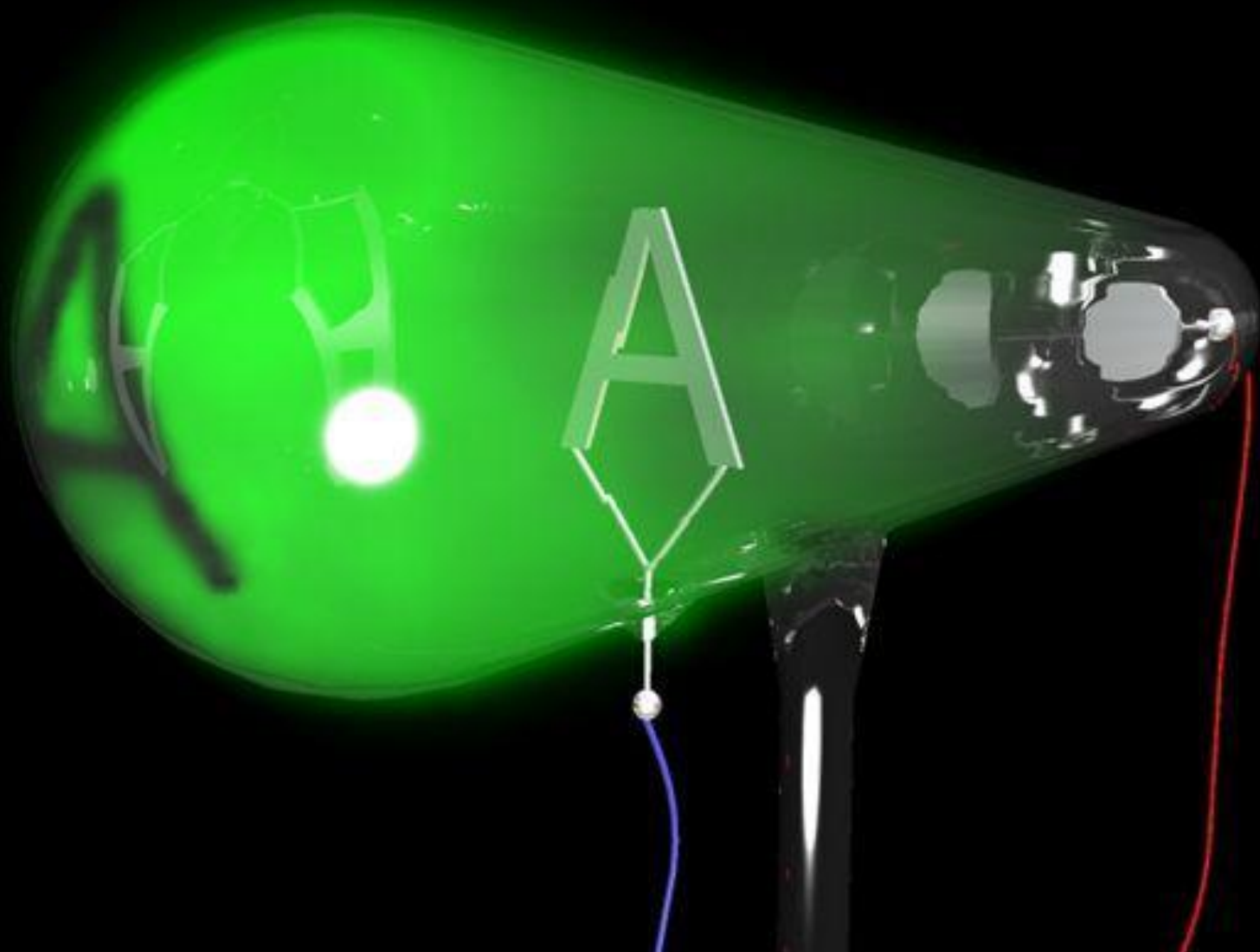
Электронная плавка в вакууме сверхчистых металлов

Рентгеноскопия

Экраны кинескопов

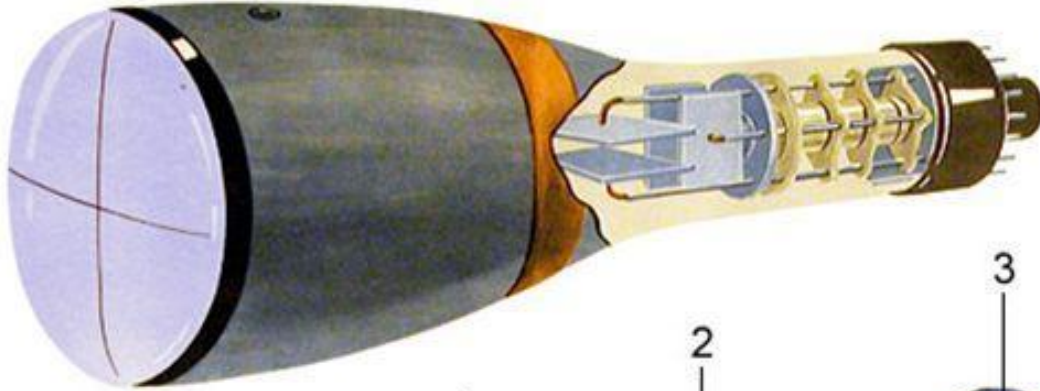


6. Распространяются прямолинейно.



ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

ВНЕШНИЙ ВИД ТРУБКИ



1. Горизонтальные пластины
2. Вертикальные пластины
3. Второй анод
4. Первый анод (фиксирующий)
5. Управляющий цилиндр
6. Катод
7. Нить накала

РАСПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ
В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ
ТРУБКЕ

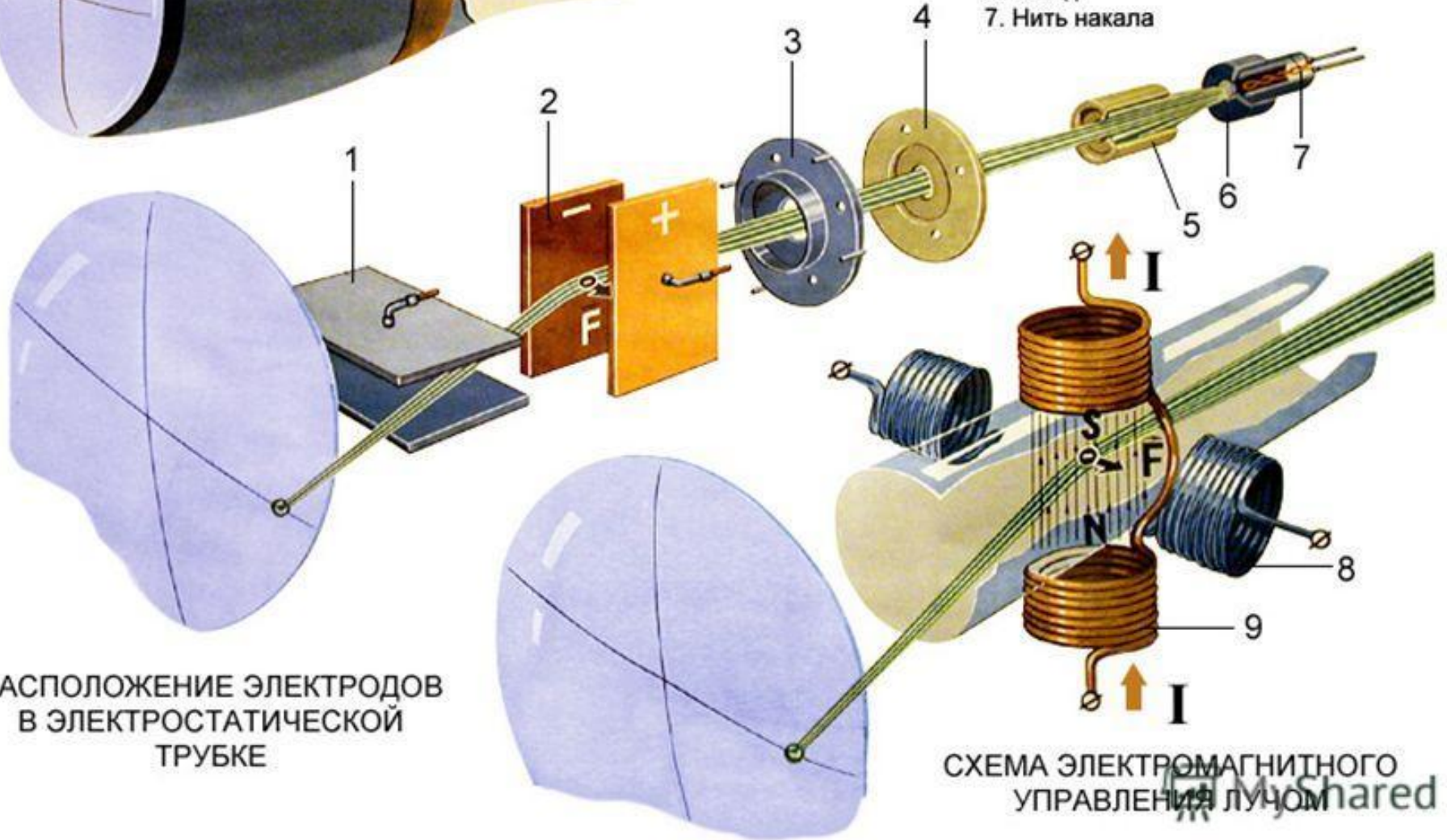
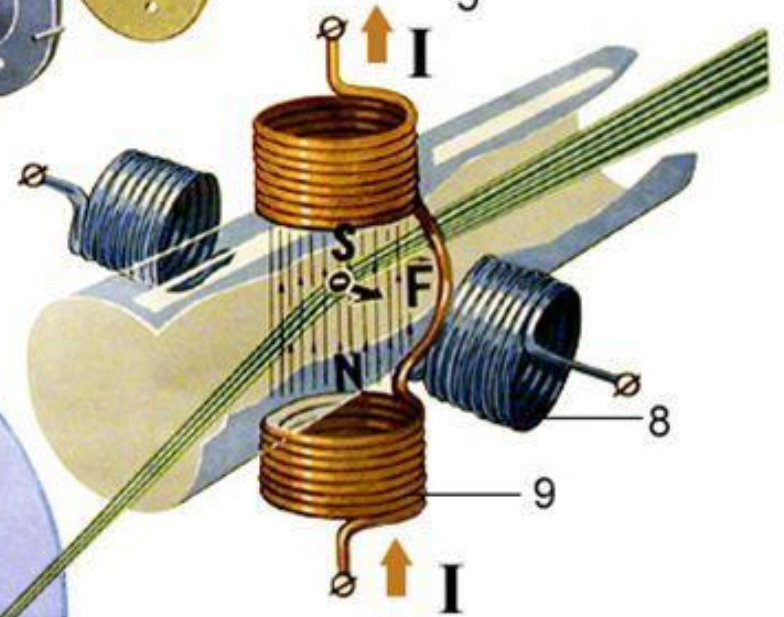


СХЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ЛУЧОМ



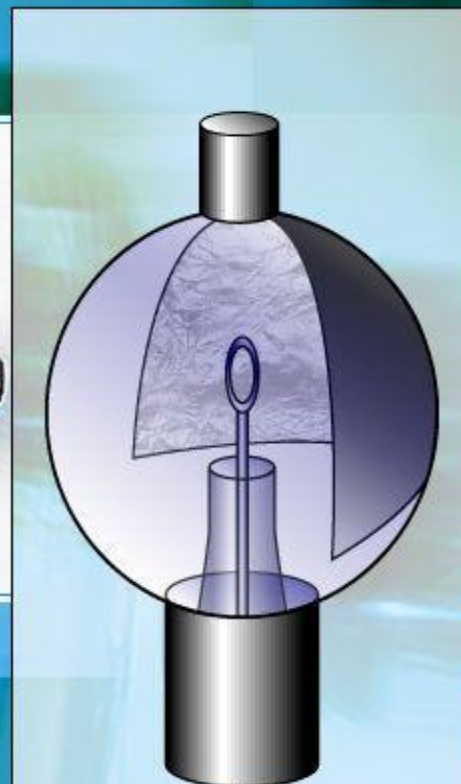
Применение электронно-вакуумных ламп.



Применение электронно-вакуумных ламп. Мониторы.



Вакуумные приборы. Вакуумный фотоэлемент.



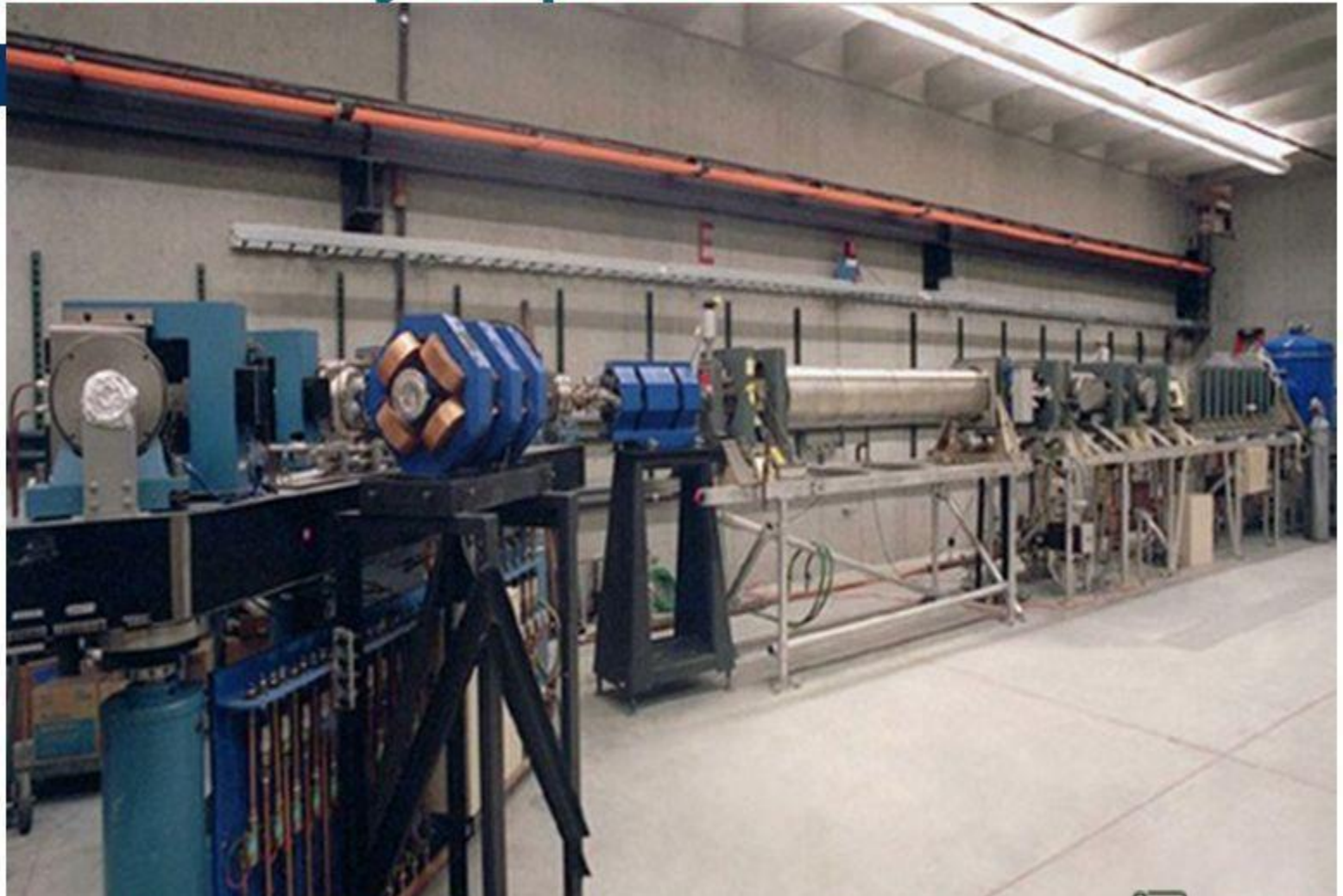
Вакуумные приборы. Вакуумные лампы.



Вакуумные приборы. Вакуумный триод.



Применение вакуумных приборов. Линейный ускоритель.



Применение вакуумных приборов. Большой линейный ускоритель.



Гигиенические требования использования электронно-вакуумных приборов:

- Работа с устройствами не более 2-х часов в сутки;
- Рабочая область экрана на расстоянии не менее 30 см от глаз;
- Установка защитных экранов;
- Опасность удара электрическим током (до 2000 В).

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В
ПОЛУПРОВОДНИКАХ. СОБСТВЕННАЯ И
ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ.
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ**



□ По способности проводить электрический ток твёрдые тела первоначально разделяли на проводники и диэлектрики. Позже было замечено, что некоторые вещества проводят электрический ток хуже, чем проводники, но и к диэлектрикам их тоже нельзя отнести. Их выделили в отдельную группу ***полупроводников***.

□ Характерные отличия полупроводников от проводников:

1. Значительная зависимость проводимости полупроводников от температуры.

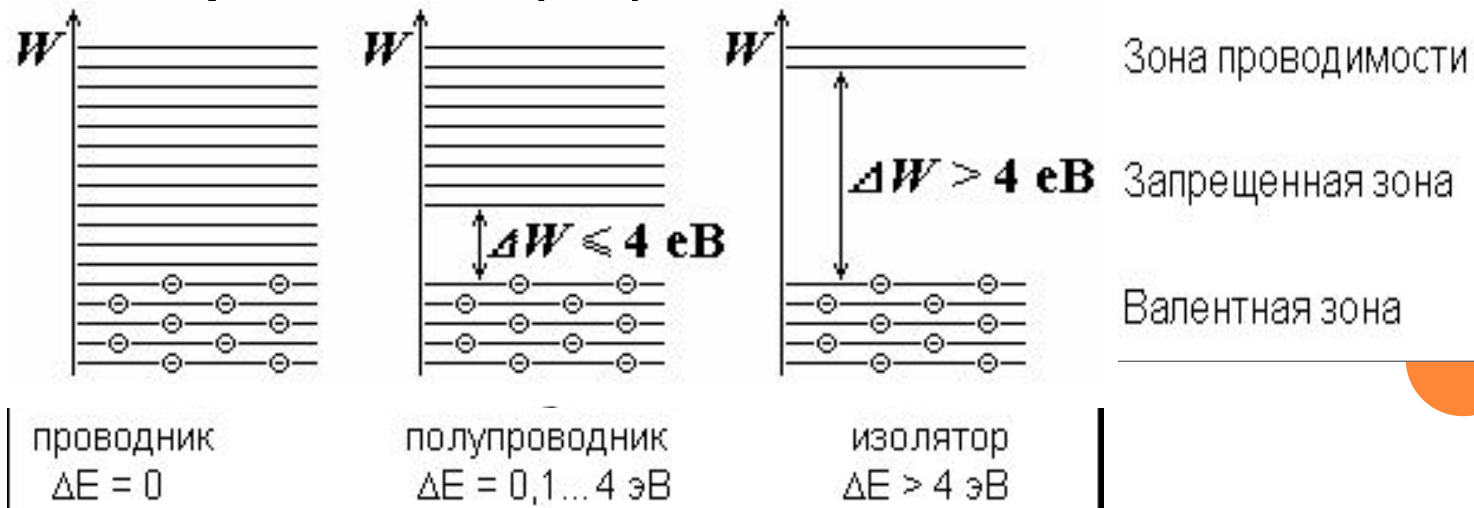


2. Сильное влияние на проводимость полупроводников даже незначительного количества примесей.

3. Влияние на их проводимость различных излучений (световых, радиационных и др.).

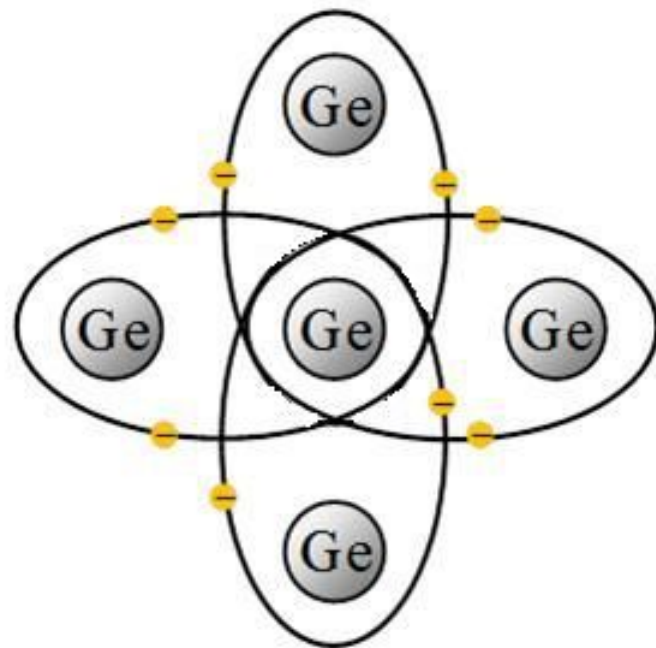
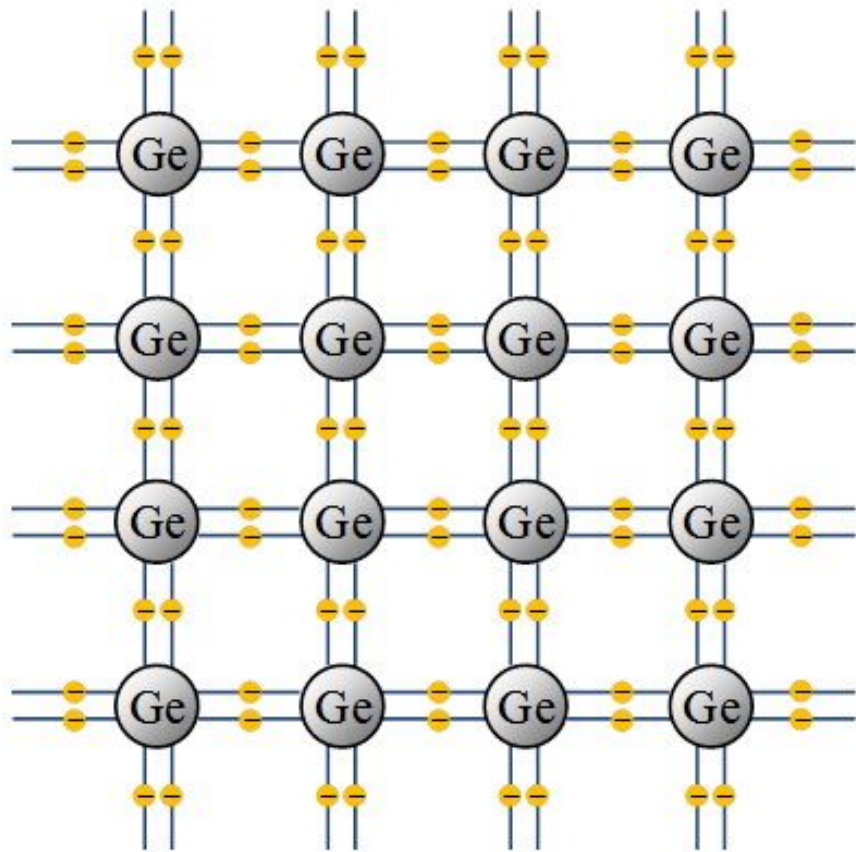
Зонная теория проводимости

Ширина запрещенной зоны германия (Ge) – 0,67 эв, кремния (Si) – 1,12 эв.



- Наиболее широко используются полупроводники **германий и кремний**. Они относятся к **IV** группе периодической системы Менделеева. На внешней оболочке атома германия (или кремния) находятся **4 валентных электрона**. Каждый из них образует с соседними четырьмя атомами **ковалентные** связи. Они образуются двумя электронами, каждый из которых принадлежит одному из соседних атомов.
- Это справедливо для химически чистого полупроводника, находящегося при температуре близкой к 0 К (абсолютный нуль).



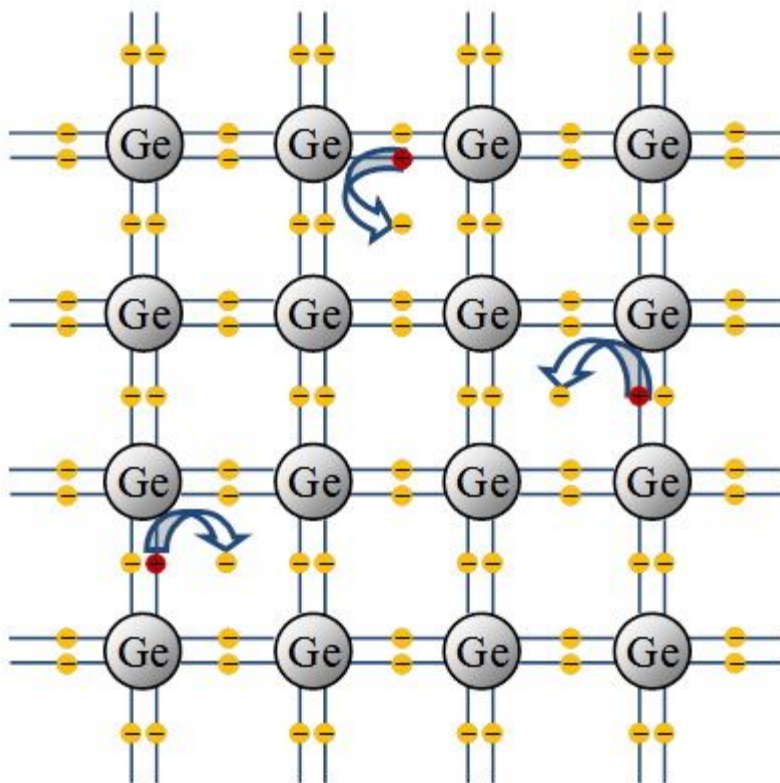


- При повышении температуры атомы полупроводника начинают совершать тепловое колебательное движение. Энергия этого движения передаётся электронам, и для некоторых из них она оказывается достаточной, чтобы оторваться от своих атомов. Эти атомы превращаются в **положительные ионы**, а оторвавшиеся **электроны** могут свободно перемещаться, т.е. становятся **носителями тока**.
- Отсутствие электрона в связи называется **«дыркой»**.

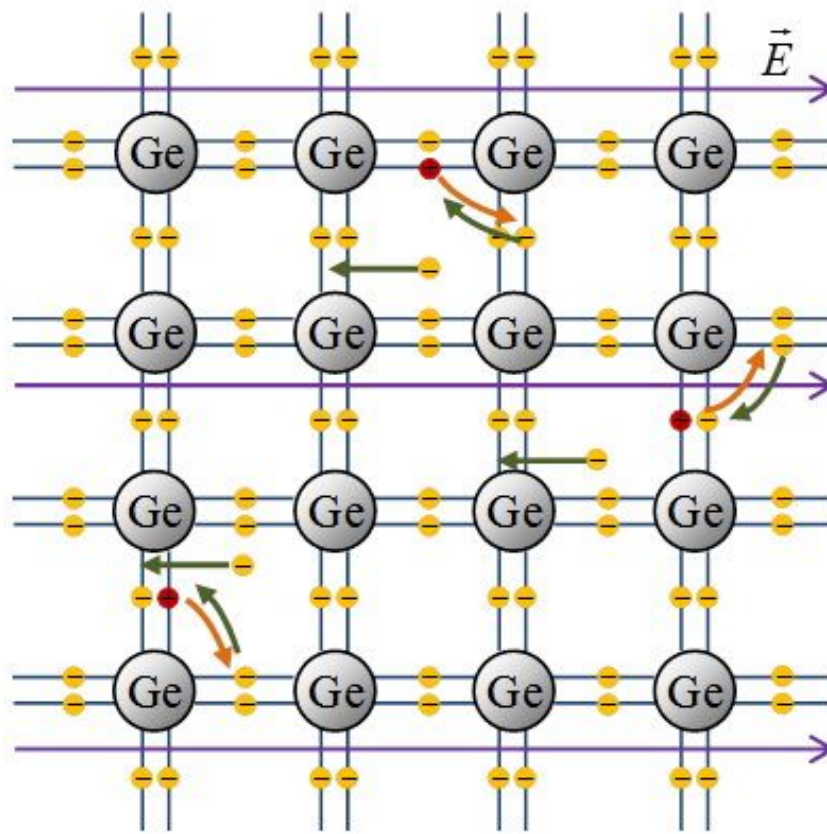
- «Дырка» имеет положительный заряд равный по абсолютной величине заряду электрона. Дырка может быть занята одним из электронов соседней связи, при этом образуется дырка в соседней связи. Переход электрона из одной связи в другую соответствует перемещению дырки в обратном направлении.
- Проводимость, которая возникает в объёме полупроводника за счёт нарушения связей, называется ***собственной проводимостью***.



- Нарушение валентных связей может происходить не только за счёт тепловой энергии, но и за счёт энергии света. Это относится к чистым полупроводникам, т.е. к полупроводникам без примесей.



- В отсутствие внешнего электрического поля эти свободные электроны и «дырки» движутся в кристалле полупроводника хаотически.
- Во внешнем электрическом поле электроны перемещаются в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля. Положительные «дырки» перемещаются в направлении напряженности электрического поля.
- Электропроводность полупроводника складывается из дырочной и электронной проводимостей.

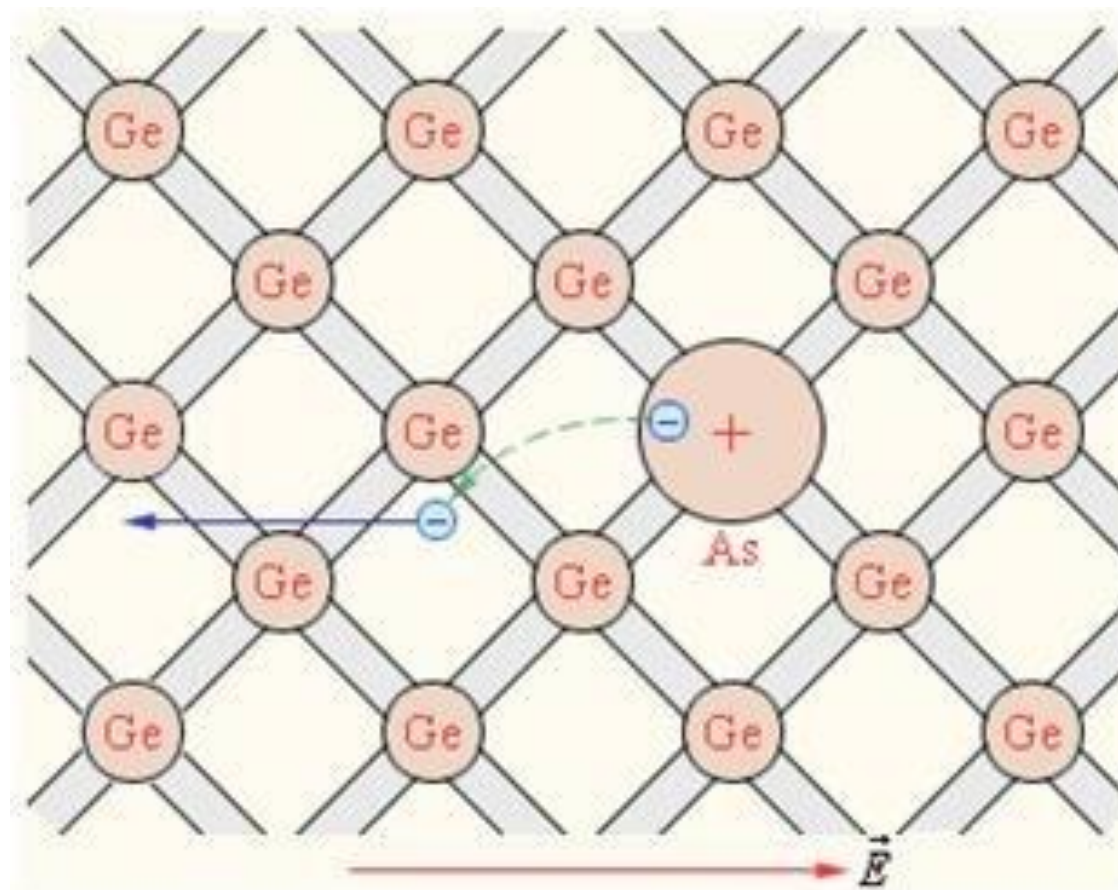


У чистых полупроводников число электронов проводимости всегда равно числу дырок. Поэтому говорят, что чистые полупроводники обладают **электронно-дырочной** проводимостью.

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Донорная примесь

- От латинского «donare» — давать, жертвовать.
- Рассмотрим механизм электропроводности полупроводника с донорной пентавалентной примесью мышьяка **As**, которую вводят в кристалл, например, германия.
- Пентавалентный атом мышьяка отдает четыре валентных электрона на образование ковалентных связей, а пятый электрон оказывается незанятым в этих связях.



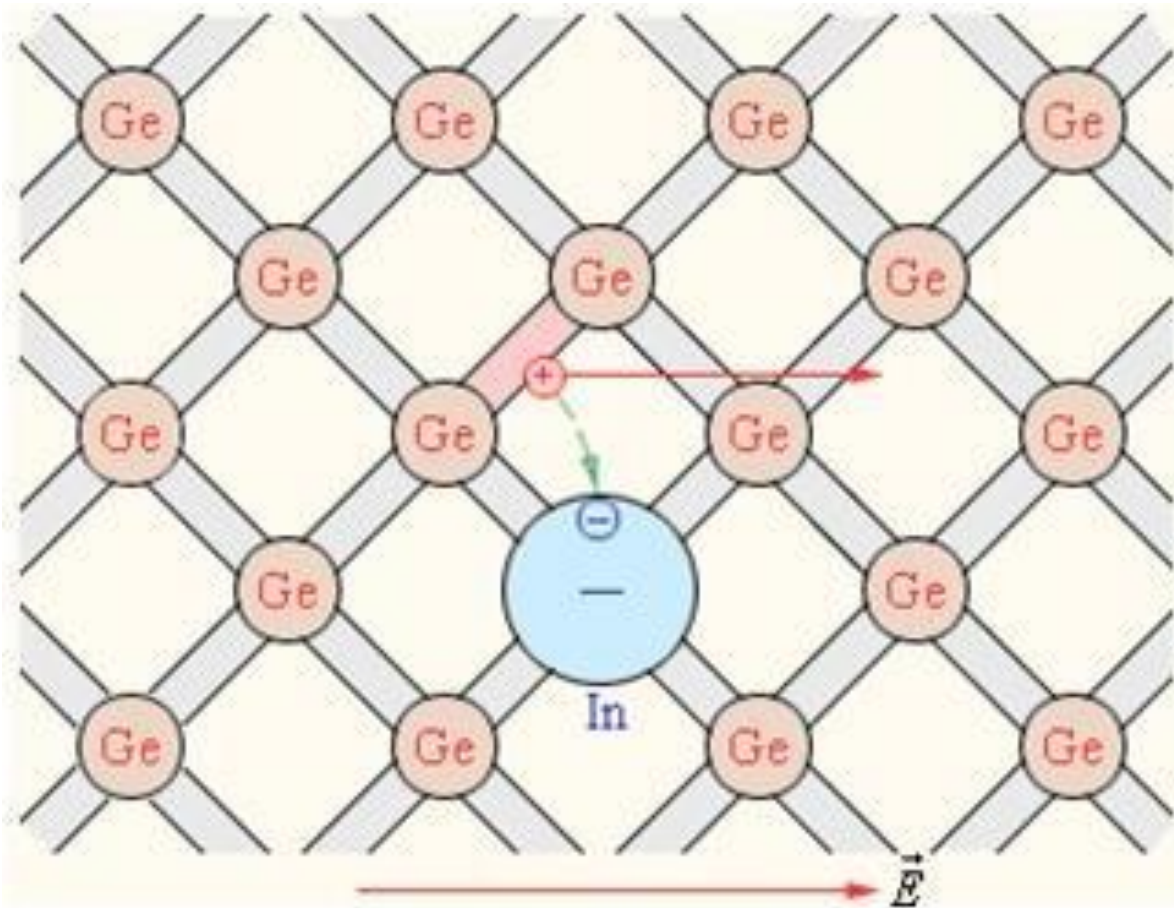
Положительные ионы мышьяка, прочно стоящие в узлах кристаллической решетки, не могут захватить электроны соседних атомов, так как все четыре связи у них уже укомплектованы электронами.

- При наличии электрического поля свободные электроны приходят в упорядоченное движение в кристалле полупроводника, и в нем возникает электронная примесная проводимость. В итоге мы получаем полупроводник с преимущественно электронной проводимостью, называемый полупроводником n-типа. (От лат. *negativus* — отрицательный).
- Поскольку в полупроводнике n-типа число электронов значительно больше числа дырок, то электроны являются основными носителями заряда, а дырки — неосновными.



Акцепторная примесь

- От латинского «асцептор» — приемщик.
- В случае акцепторной примеси, например, трехвалентного индия **In** атом примеси может дать свои три электрона для осуществления ковалентной связи только с тремя соседними атомами кремния, а одного электрона «недостает». Один из электронов соседних атомов германия может заполнить эту связь, тогда атом **In** станет неподвижным отрицательным ионом, а на месте ушедшего от одного из атомов германия электрона образуется «дырка».



- Акцепторные примеси, захватывая электроны и создавая тем самым подвижные «дырки», не увеличивают при этом числа электронов проводимости.

- Основные носители заряда в полупроводнике с акцепторной примесью — «дырки», а неосновные — электроны.
- Полупроводники, у которых концентрация «дырок» превышает концентрацию электронов проводимости, называются полупроводниками p-типа (от лат. positivus — положительный).
- Для создания значительной примесной проводимости в расплав четырехвалентного элемента достаточно внести 10^{-5} % примеси.



ТЕРМИСТОРЫ

- Зависимость электрического сопротивления полупроводников от температуры используют для измерения температуры по силе тока в цепи с полупроводником. Такие приборы называют терморезисторами или термисторами.
- Изменение сопротивления терморезисторов при нагревании или охлаждении позволяет использовать их в приборах для измерения температуры, для поддержания постоянной температуры в автоматических устройствах — в закрытых камерах-термостатах, для обеспечения противопожарной сигнализации и т.д.

Существуют термисторы для измерения как очень высоких ($T \approx 1300 \text{ K}$), так и очень низких ($T \approx 4 - 80 \text{ K}$) температур.



Схематическое изображение
и фотография термистора

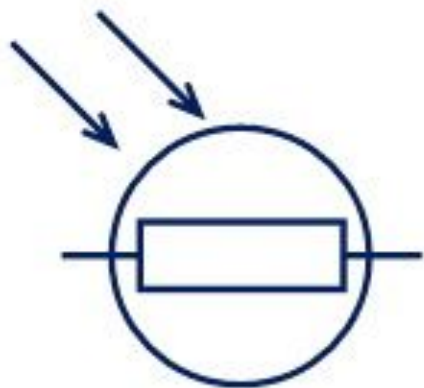


ФОТОРЕЗИСТОР

- Приборы, в которых учитывается зависимость электрической проводимости полупроводников от освещения, называют фоторезисторами.
- Материалами для изготовления фоторезисторов служат соединения типа CdS, CdSe, PbS и ряд других.
- Миниатюрность и высокая чувствительность фоторезисторов позволяют использовать их для регистрации и измерения слабых световых потоков.



- С помощью фоторезисторов определяют качество поверхностей, контролируют размеры изделий и т.д.



Схематическое изображение
и фотография фоторезистора



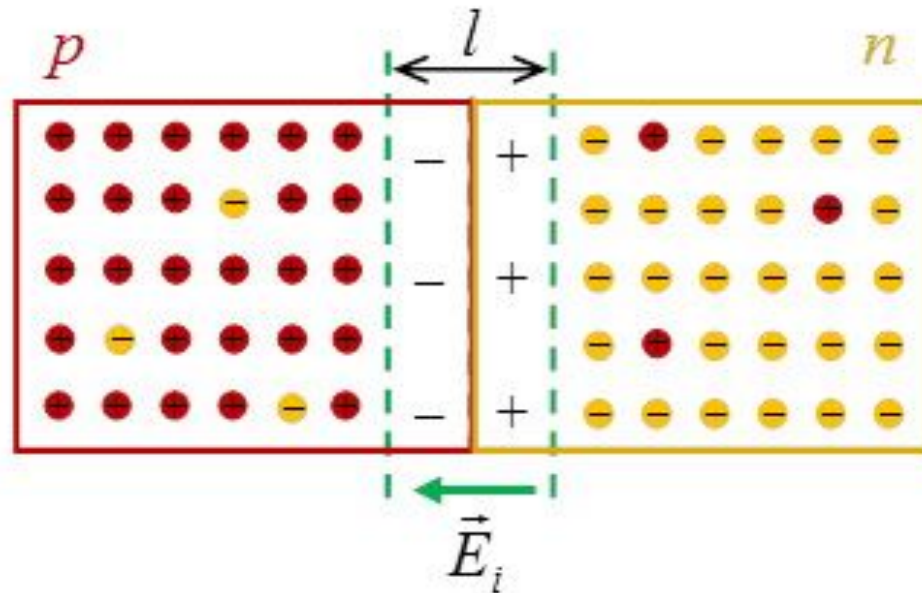
**ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД.
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД.
ТРАНЗИСТОР.**




ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

- Электронно-дырочный переход (сокращенно р-п переход) возникает в полупроводниковом кристалле, имеющем одновременно области с n-типа (содержит донорные примеси) и р-типа (с акцепторными примесями) проводимостями на границе между этими областями.
- Если в кристалле слева находится область полупроводника с дырочной (р-типа), а справа — с электронной (n-типа) проводимостью. Благодаря тепловому движению при образовании контакта электроны из полупроводника n-типа будут диффундировать в область р-типа.

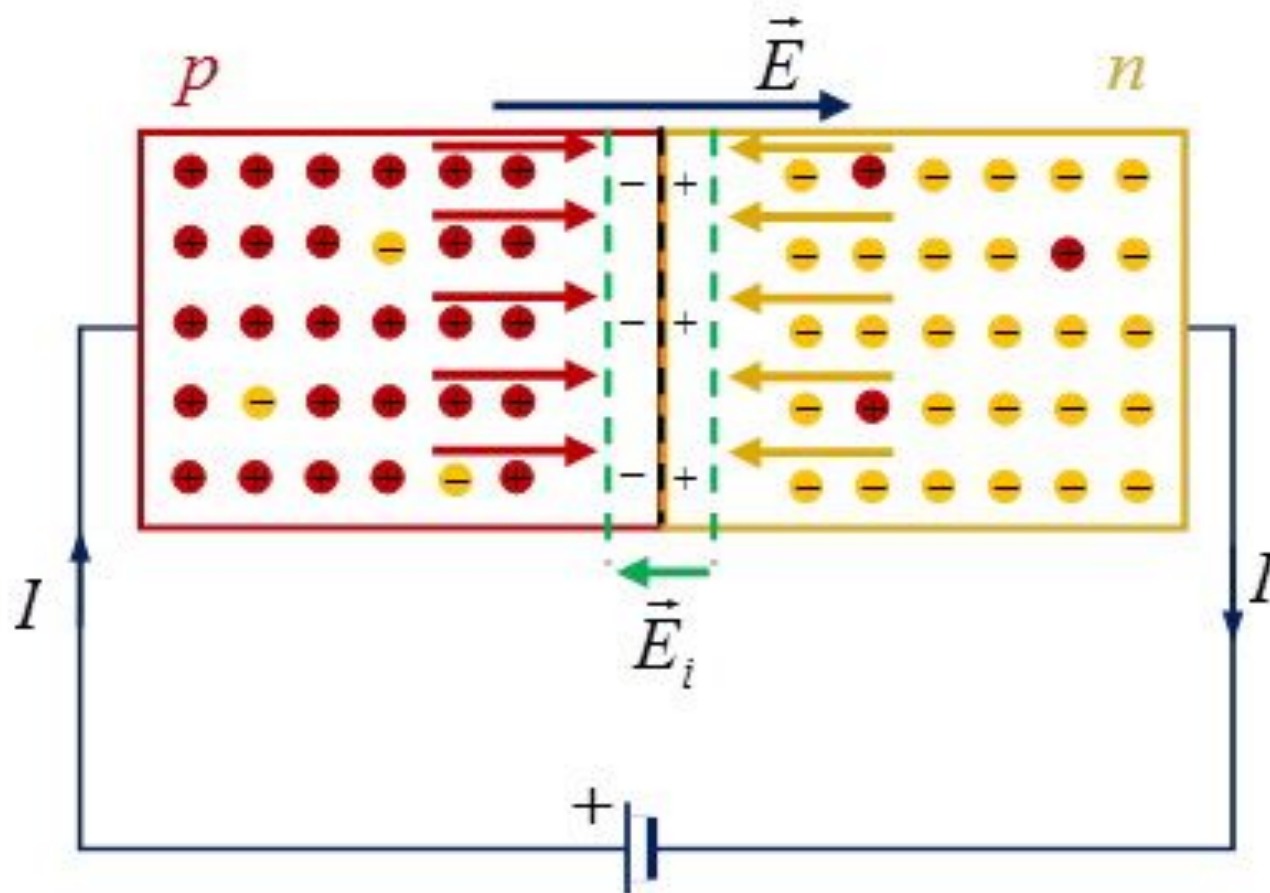
- При этом в области n-типа останется нескомпенсированный положительный ион донора. Перейдя в область с «дырочной» проводимостью, электрон очень быстро рекомбинирует с «дыркой», при этом в области p-типа образуется нескомпенсированный ион акцептора.



- В результате диффузии на границе между этими областями образуется двойной электрический слой разноименно заряженных ионов примесей, толщина ℓ которого не превышает долей микрометра.
- Между слоями ионов возникает электрическое поле с напряженностью E_i . Электрическое поле электронно-дырочного перехода (p-n переход) препятствует дальнейшему переходу электронов и «дырок» через границу раздела двух полупроводников. Запирающий слой имеет повышенное сопротивление по сравнению с остальными объемами полупроводников.

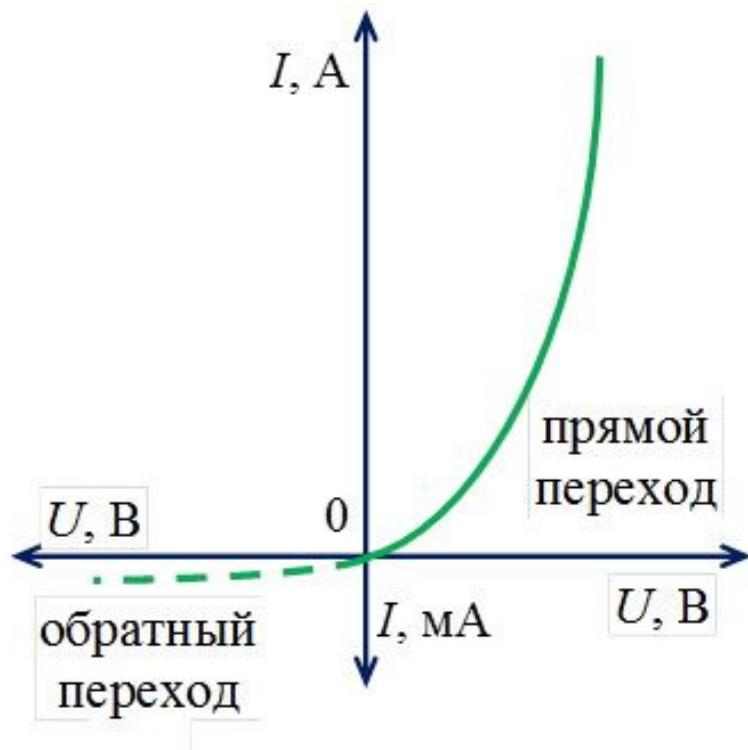
- Внешнее электрическое поле с напряженностью E влияет на сопротивление запирающего электрического поля.
 - Если n -полупроводник подключен к отрицательному полюсу источника, а плюс источника соединен с p -полупроводником, то под действием электрического поля электроны в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике будут двигаться навстречу друг другу к границе раздела полупроводников. Электроны, переходя границу, «заполняют» дырки. В этом направлении электрический ток проходит через p - n переход.
- 

- При таком прямом направлении внешнего электрического поля толщина запирающего слоя и его сопротивление непрерывно уменьшаются.



Рассмотренное направление р-n перехода называют прямым.

- Зависимость силы тока от напряжения, т.е. вольт-амперная характеристика перехода, изображена на рисунке ниже.



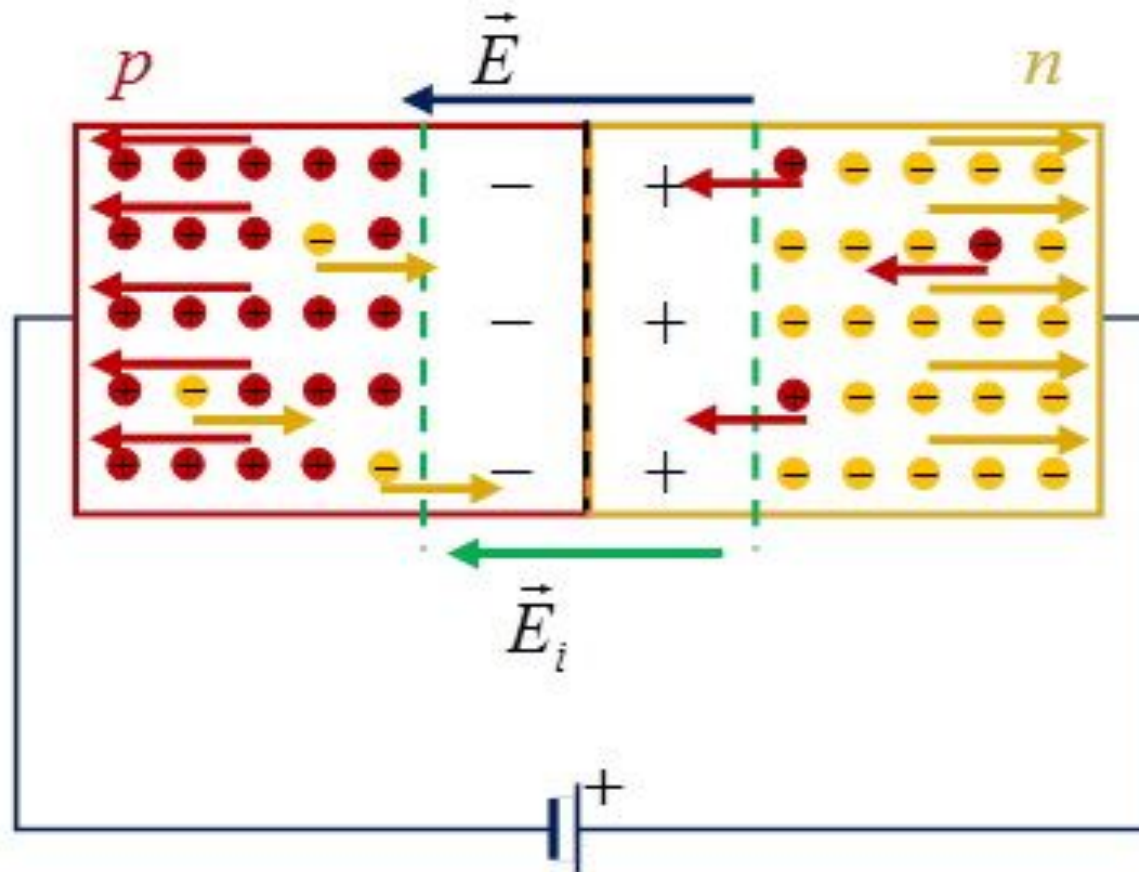
- Если n-полупроводник соединен с положительным полюсом источника, а p-полупроводник — с отрицательным, то электроны в n-полупроводнике и дырки в p-полупроводнике под действием электрического поля будут перемещаться от границы раздела в противоположные стороны.
- Это приводит к утолщению запирающего слоя и увеличению его сопротивления. Направление внешнего электрического поля, расширяющее запирающий слой, называется запирающим (обратным).



- При таком направлении внешнего поля электрический ток основных носителей заряда через контакт двух n- и p-полупроводников не проходит.
- Ток через p-n-переход теперь обусловлен электронами, которые есть в полупроводнике p-типа, и дырками из полупроводника n-типа.
- Но неосновных носителей заряда очень мало, поэтому проводимость перехода оказывается незначительной, а его сопротивление — большим.



Рассмотренное направление р-п-перехода называют обратным, его вольт-амперная характеристика изображена на предыдущем рисунке штриховой линией.



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

- Способность р-n перехода пропускать ток в одном направлении используется в полупроводниковых приборах, называемых диодами. Полупроводниковые диоды изготавливают из германия, кремния, селена и других веществ.
- Полупроводниковые диоды являются основными элементами выпрямителей переменного тока (если точнее, служат для преобразования переменного тока в пульсирующий ток постоянного направления).





Схематическое изображение и фотография
полупроводникового диода



СВЕТОДИОДЫ

- Светодиод или светоизлучающий диод — полупроводниковый прибор с p-n переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока.
- Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра, его спектральные характеристики зависят в том числе от химического состава использованных в нём полупроводников.
- Применение светодиодов: в освещении, в качестве индикаторов

- (индикатор включения на панели прибора, буквенно-цифровое табло), как источник света в фонарях и светофорах, в качестве источников оптического излучения (пульты ДУ, светотелефоны), в подсветке ЖК-экранов (мобильные телефоны, мониторы, телевизоры) и т. д.



Схематическое изображение
и фотография светодиода



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТРАНЗИСТОР

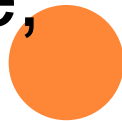
- *Транзистор* - полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления электрического тока и управления им.
- *Транзистор* — это полупроводниковый кристалл, разделенный на три части, которые называются эмиттером, базой и коллектором.



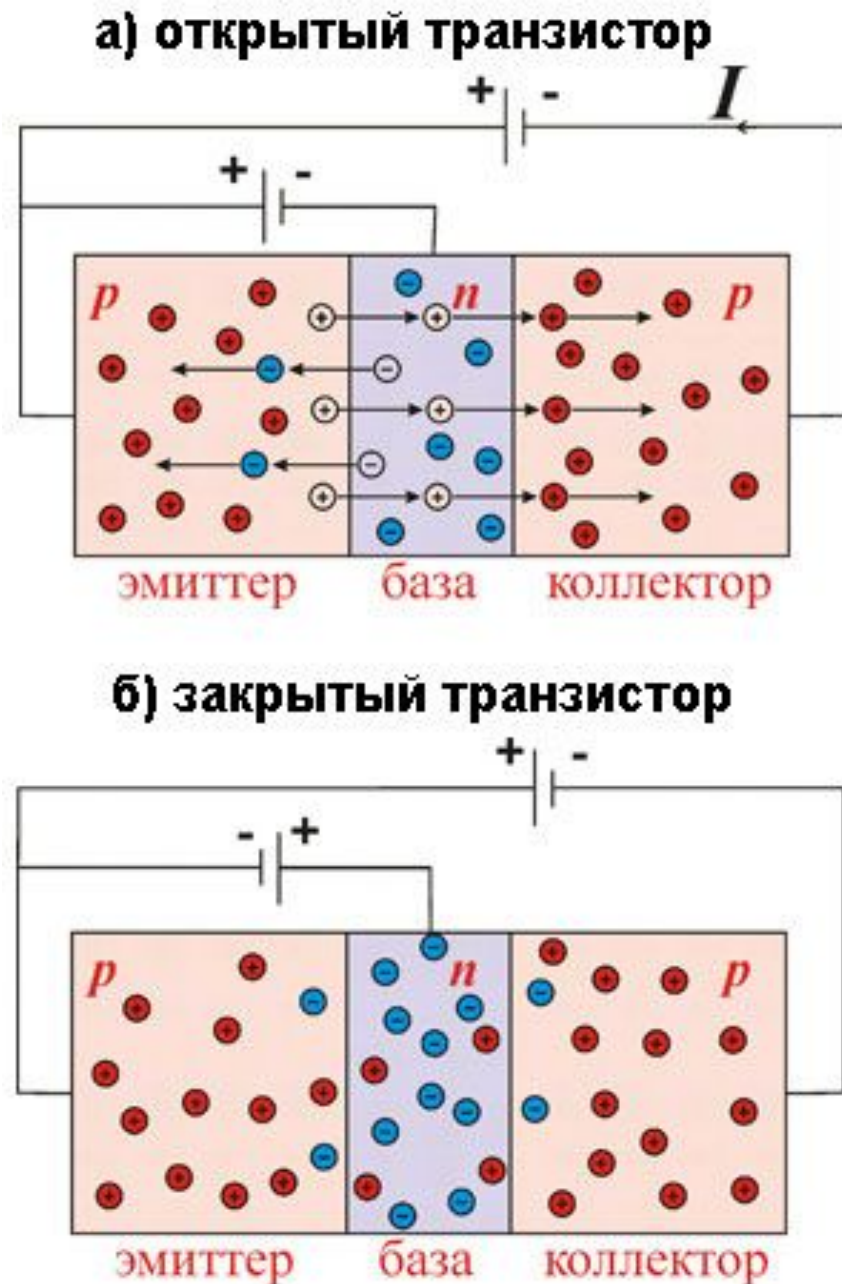
За счет введения в эти области различных примесей соотношение свободных дырок и электронов в них различно.

Транзистор типа р-п-р

В эмиттере и коллекторе дырок существенно больше, чем электронов (говорят, что эти области обладают проводимостью р-типа). В базе же, наоборот, больше электронов (проводимость п-типа). Концентрация носителей в базе на два порядка меньше, чем в эмиттере и коллекторе.



Пусть как на коллектор, так и на базу транзистора подан отрицательный потенциал относительно эмиттера — на базу меньший, на коллектор больший. Тогда электрическое поле на контакте база—эмиттер направлено слева направо и способствует движению дырок из эмиттера в базу, а электронов — наоборот, из базы в эмиттер.



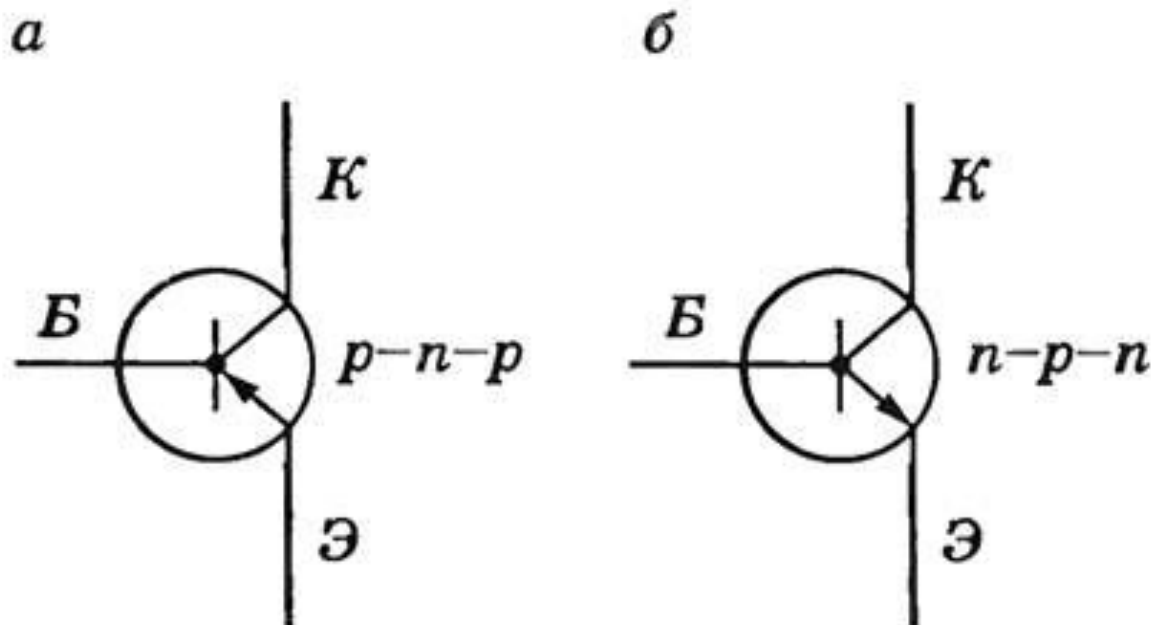
- Поле на контакте база—коллектор направлено также направо и препятствует переходу дырок из коллектора в базу и электронов из базы в коллектор. Однако дырки, попавшие в базу из эмиттера не являются основными носителями в этой области, и под действием этого поля свободно проходят в коллектор. Обычно базу делают достаточно тонкой (порядка 1 мкм), поэтому в коллектор переходят практически все дырки из эмиттера, так как не успевают рекомбинировать с электронами базы, и в коллекторной цепи течет достаточно большой ток (несколько миллиампер).

□ Теперь предположим, что потенциал базы относительно эмиттера стал положительным, а потенциал коллектора по-прежнему отрицателен. Тогда электрическое поле на контакте эмиттер—база направлено влево, а на контакте база—коллектор — направо. Таким образом, поле препятствует выходу электронов из базы в обе стороны, так же как и попаданию в нее дырок. Поэтому через контакты течет только ток, связанный с движением неосновных зарядов — дырок в базе и электронов в эмиттере и коллекторе.

- Так как число таких зарядов весьма невелико по сравнению с основными, то и ток в этом случае пренебрежимо мал.
- Таким образом, варьируя напряжение между базой и эмиттером, можно изменять значение коллекторного тока от максимального до почти нулевого, то есть «открывать» и «закрывать» транзистор. Это значит, что транзистор, как и вакуумный триод, может выполнять функцию «электронного вентиля».



- Ток базы на два порядка меньше тока в эмиттере и коллекторе и обусловлен электронами, перешедшими из базы в эмиттер и дырками, успевшими рекомбинировать в базе.

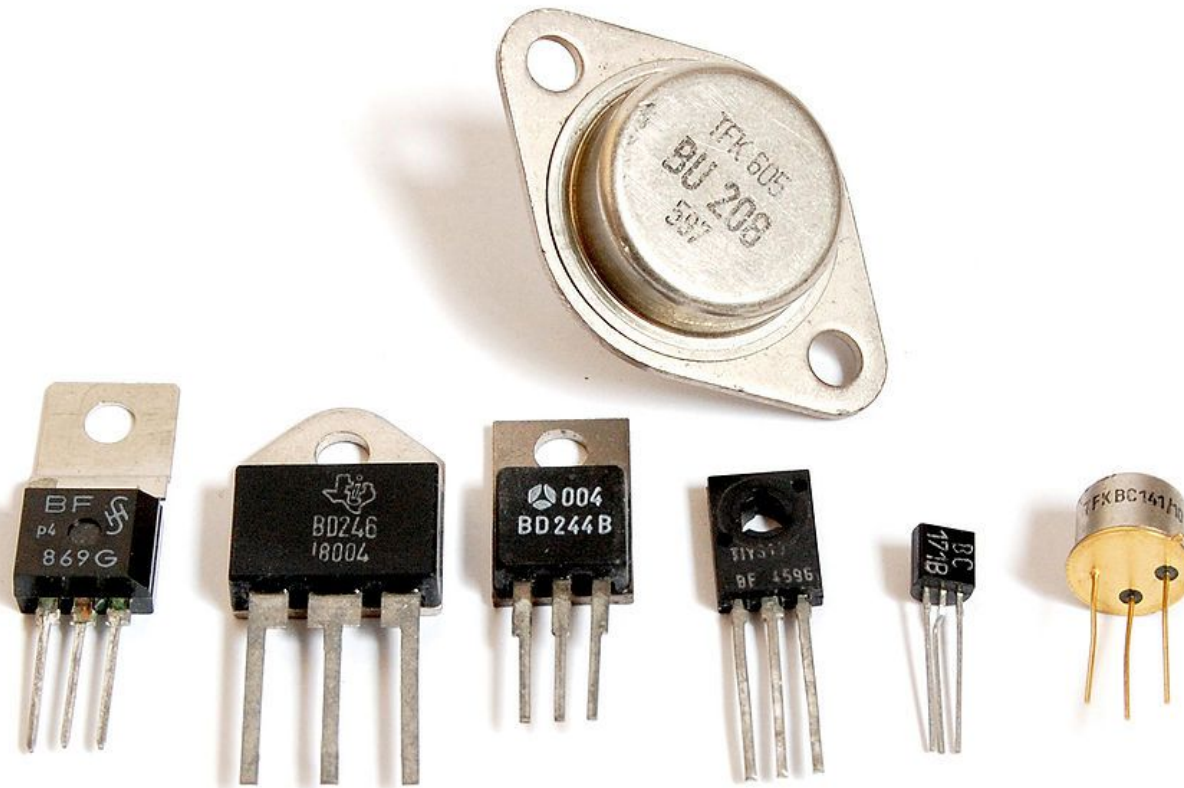


Условное изображение транзисторов на схемах



- С помощью современных технологий изготовить транзистор гораздо проще, чем триод. Его можно сделать очень маленьким, а значит, быстрым в работе и потребляющим малую мощность. Из-за этих преимуществ современные компьютеры производятся на транзисторах, а не на лампах. Изобретение интегральных микросхем, способных объединить на одном кристалле миллионы транзисторов, прочно закрепило их преимущество перед лампами.





Дискретные транзисторы в различном конструктивном оформлении



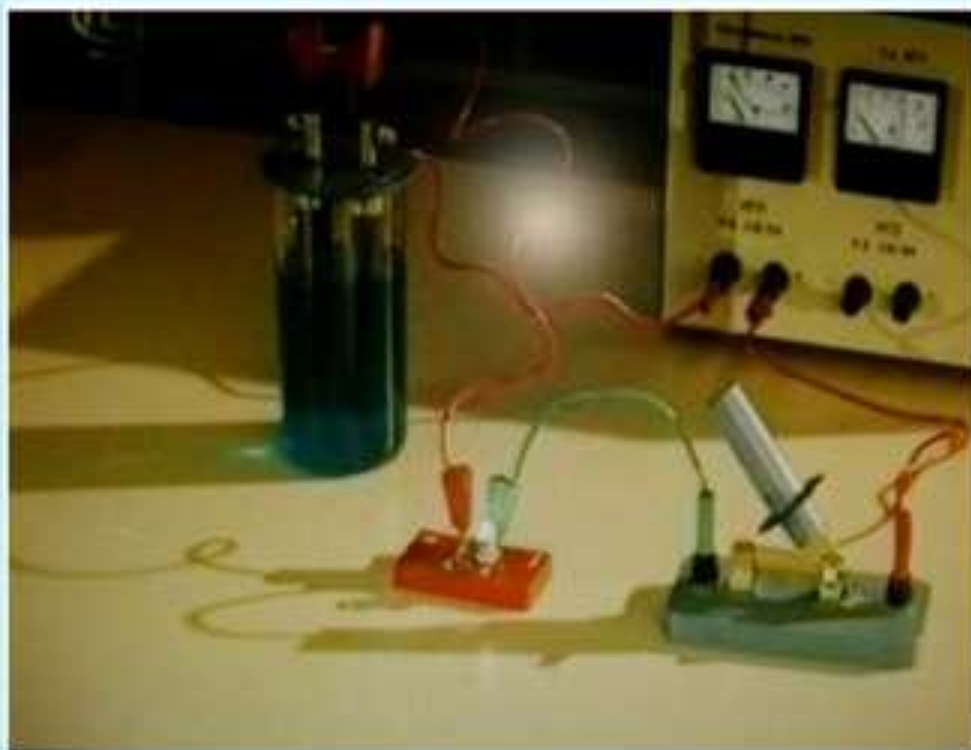
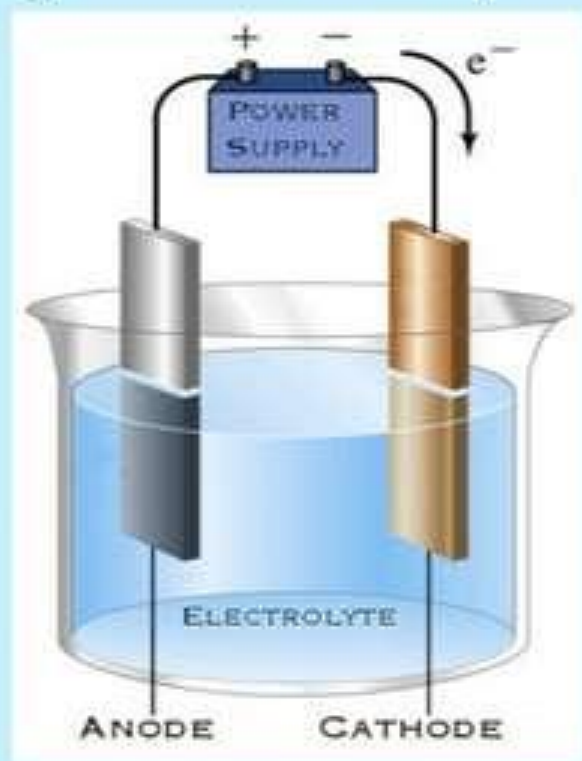
**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В
ЭЛЕКТРОЛИТАХ. ЭЛЕКТРОЛИЗ.
ЗАКОНЫ ФАРАДЕЯ. ПРИМЕНЕНИЕ
ЭЛЕКТРОЛИЗА В ТЕХНИКЕ**



- Распад молекул на ионы под действием растворителя называют *электролитической диссоциацией*.
- Жидкий проводник, в котором носителями зарядов являются только ионы называется *электролитом*.
- Прохождение электрического тока через электролиты, которое сопровождается химическими превращениями вещества и его выделением на электродах, называется *электролизом*.



Электролиз – это окислительно-восстановительный процесс, протекающий на электродах в растворах или расплавах электролитов при пропускании электрического тока. Сущность электролиза заключается в том, что за счет электрической энергии осуществляется химическая реакция, которая не может протекать самопроизвольно.



Электролиз с неактивным анодом

При электролизе водных растворов электролитов с инертными (неактивными) электродами используют следующие **правила**:

1. При электролизе водного раствора соли активного металла (от Li до Al включительно) и кислородсодержащей кислоты на катоде выделяется водород, а на аноде – кислород, и электролиз сводится к электролитическому разложению воды:

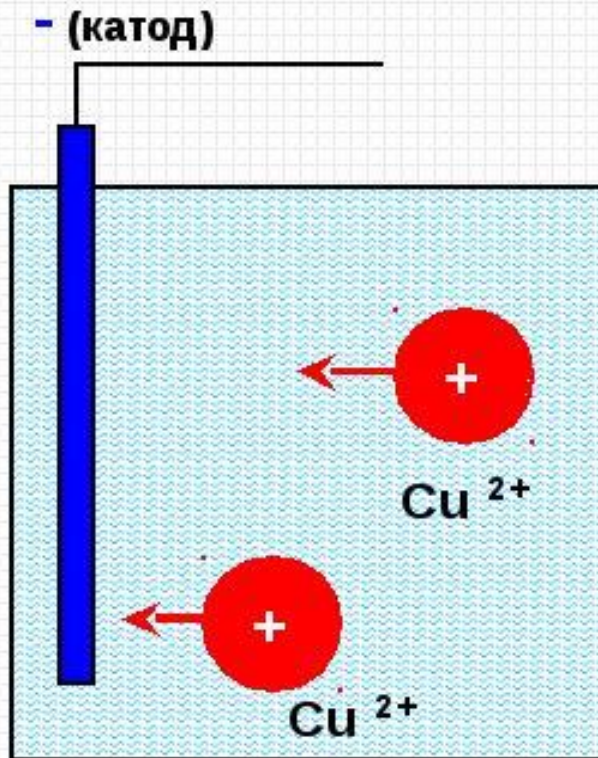


Растворенная соль остается в неизменном виде. В ходе электролиза наблюдается концентрирование раствора за счет уменьшения содержания растворителя.

Электролиз с активным анодом

Концентрация раствора не меняется ,
пока анод не растворится полностью.

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**

Первый закон Фарадея

- *Масса вещества, выделяющегося при электролизе, прямо пропорциональна количеству электричества, прошедшего через раствор.*

$$m = kq$$

где m – масса вещества, k – электрохимический эквивалент.

Электрохимический эквивалент показывает, какая масса вещества выделяется на электроде при прохождении через электролит заряда в 1 кулон

$$k = \frac{m}{q}, [k] = \left[1 \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}\right]$$

Учитывая, что $I = \frac{q}{t}$, получим первый закон Фарадея в виде: $m = kIt$



Второй закон Фарадея

- *Электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам.*

$$k = \frac{1}{F} \frac{\mu}{n}$$

где

$F = 96500$ Кл/моль – число Фарадея

μ - масса моля

n – валентность



Объединенный закон Фарадея

$$m = \frac{1}{F} \frac{\mu}{n} It$$

- Число Фарадея равно заряду, при прохождении которого через электролит на электроде выделяется 1 моль вещества в расчете на единицу валентности этого вещества.

Определение величины элементарного заряда


$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{9,65 \times 10^4}{6,02 \times 10^{23}} = 1,6 \times 10^{-19} \frac{\text{Кл}}{\text{ион}}$$



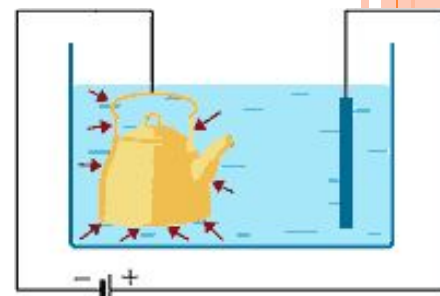
Применение электролиза

1. Электрометаллургия. Исключительно с помощью электролиза получают алюминий из расплавленных руд. В процессе электролиза получают натрий, магний, кальций и прочие вещества.

2. Рафинирование (очищение) металлов. Для этого металл отливают в пластины и используют их в качестве анодов в электролитических ваннах. Электролит — раствор соли данного металла. При определенных значениях плотности тока лишь чистый металл выделяется на катоде. Примеси выпадают в осадок, из них также получают полезные вещества. Так, например, очищают медь.

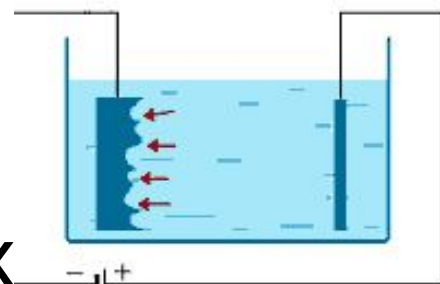


3. Гальванопластика. Это осаждение металла на поверхности разных тел для воспроизведения их формы: формы для отливания деталей, скульптур, печатных клише и т.п.



гальваностегия

4. Гальваностегия — электролитическое нанесение определенных металлов или других веществ с целью защиты их от коррозии, соответствующего эстетического оформления (покрытие хромом, никелем, серебром, золотом, платиной и т. п.).



гальванопластика



Применение электролиза



➤ *Очистка металлов от примесей*

➤ *Электрометаллургия*



➤ *Гальваностегия*



➤ *Гальванопластика*



5. Электрохимические процессы широко применяются в различных областях современной техники, в **аналитической химии**, **биохимии** и т. д. В **химической промышленности** электролизом получают хлор и фтор, щелочи, хлораты и перхлораты, надсерную кислоту и персульфаты, химически чистые водород и кислород и т. д. При этом одни вещества получают путем восстановления на катоде (альдегиды, парааминофенол и др.), другие электроокислением на аноде (хлораты, перхлораты, перманганат калия и др.).



6. Получение **оксидных защитных пленок** на металлах (анодирование);

7. Электрохимическая обработка поверхности металлического изделия (**полировка**);

8. Электрохимическое **окрашивание** металлов (например, меди, латуни, цинка, хрома и др.);

9. **Очистка воды** – удаление из нее растворимых примесей. В результате получается так называемая мягкая вода (по своим свойствам приближающаяся к дистиллированной);

10. Электрохимическая **заточка** режущих инструментов (например, хирургических ножей, бритв и т.д.)



Применение электролиза

Гальваностегия



Гальванопластика



Электрофорез



Цинкование



Никелирование

