

Лекция №12

Электрический ток

План лекции

1. Понятие о токе проводимости. Вектор тока и сила тока.
2. Дифференциальная форма закона Ома.
3. Последовательное и параллельное соединение проводников.
4. Причина появления электрического поля в проводнике, физический смысл понятия сторонних сил.
5. Вывод закона Ома для всей цепи.
6. Первое и второе правила Кирхгофа.
7. Контактная разность потенциалов.
Термоэлектрические явления.
8. Электрический ток в различных средах.
9. Ток в жидкостях. Электролиз. Законы Фарадея.

1. Понятие о токе проводимости. Вектор тока и сила тока

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов. Носителями тока могут быть электроны, ионы, заряженные частицы.

- Если в проводнике создать электрическое поле, то в нем свободные электрические заряды придут в движение – возникает ток, называемый **током проводимости**.
- Если в пространстве перемещается заряженное тело, то ток называется **конвекционным**.

- **За направление тока** принято принимать направление движения положительных зарядов.

Для возникновения и существования тока необходимо:

1. наличие свободных заряженных частиц;
 2. наличие электрического поля в проводнике.
- Основной характеристикой тока является **сила тока**, которая равна величине заряда, прошедшего за 1 секунду через поперечное сечение проводника.

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

$$I = \left[\frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А} \right]$$

Где Δq – величина заряда;

Δt – время прохождения заряда;

Сила тока величина скалярная.

Электрический ток по поверхности проводника может быть распределен неравномерно, поэтому в некоторых случаях пользуются понятием плотность тока j .

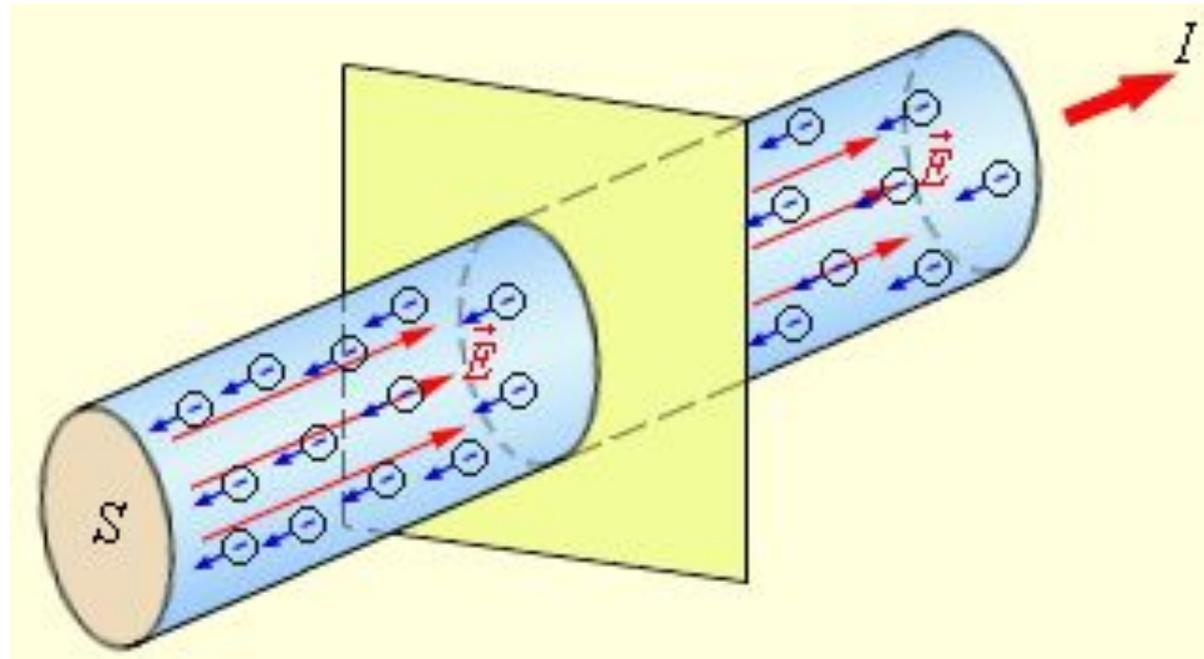
Средняя плотность тока равна отношению силы тока к площади поперечного сечения проводника.

$$\langle j \rangle = \frac{\Delta I}{\Delta S} \quad j = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{dI}{dS} \quad \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

Где Δj – изменение тока;

ΔS – изменение площади.

Плотность тока



2. Дифференциальная форма закона Ома

В 1826 г. немецкий физик Ом опытным путем установил, что сила тока J в проводнике прямо пропорциональна напряжению U между его концами

$$I = k \cdot U$$

Где k – коэффициент пропорциональности, называемый электропроводностью или проводимостью; $[k] = [См]$ (сименс).

Величина $R = \frac{1}{k} [Ом]$ называется **электрическим сопротивлением проводника.**

закон Ома для участка электрической цепи, не содержащей источника тока

$$I = \frac{U}{R}$$

Выражаем из этой формулы R

$$R = \frac{U}{I} \quad \left[\frac{B}{A} \right] = [Om]$$

Электрическое сопротивление зависит от формы, размеров и вещества проводника.

Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения S

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

Где ρ – характеризует материал, из которого изготовлен проводник и называется **удельным сопротивлением проводника**.

Выразим ρ : $\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Ом} \cdot \text{м} \right]$

Сопротивление проводника зависит от температуры. С увеличением температуры сопротивление увеличивается

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

Где R_0 – сопротивление проводника при 0°C ;
 t – температура; α – температурный коэффициент сопротивления (для металла $\alpha \approx 0,04$ град-1).

Формула справедлива и для удельного сопротивления

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

Где ρ_0 – удельное сопротивление проводника при 0°C .

При низких температурах (<8К) сопротивление некоторых металлов (алюминий, свинец, цинк и др.) скачкообразно уменьшается до нуля: металл становится **абсолютным проводником**.

Это явление называется **сверхпроводимостью**.

Подставим

$$I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{US}{\rho l}$$

Перегруппируем члены выражения

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l}$$

Где $I/S=j$ – плотность тока;

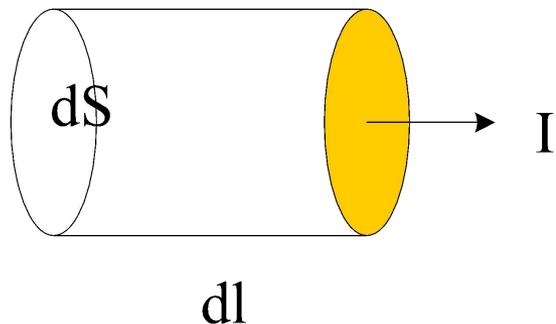
$1/\rho=\gamma$ – удельная проводимость вещества проводника;

$U/l=E$ – напряженность электрического поля в проводнике.

$$i = \gamma \cdot E$$

закон Ома в дифференциальной форме.

Закон Ома для однородного участка цепи. Дифференциальная форма закона Ома.



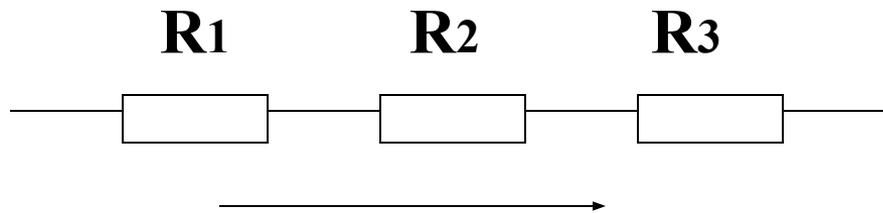
$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad \gamma = \frac{1}{\rho}$$
$$\vec{j} = \gamma \cdot \vec{E}$$

$$d\varphi = E \cdot dl \quad I = j \cdot dS$$

$$j \cdot dS = \frac{E \cdot dS}{\rho}$$

3. Последовательное и параллельное соединение проводников

Последовательное соединение проводников



$I = \text{const}$ (по закону сохранения заряда);

$$U = U_1 + U_2$$

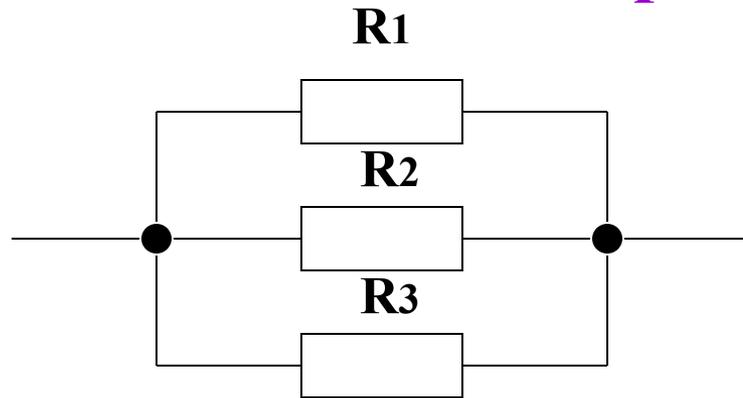
$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{\text{общ}} = R_i$$

$$R = N * R_1$$

(Для N одинаковых проводников)

Параллельное соединение проводников



$$U = \text{const} \quad I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$U_1 = U_2 = U$$

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

$$R = \frac{R_1}{N} \quad \text{Для } N \text{ одинаковых проводников}$$

4. Причина появления электрического тока в проводнике. Физический смысл понятия сторонних сил

Для поддержания постоянного тока в цепи, необходимо разделять положительные и отрицательные заряды в источнике тока, для этого на свободные заряды должны действовать силы неэлектрического происхождения, называемые **сторонними силами**.

За счет создаваемого сторонними силами поля электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля.

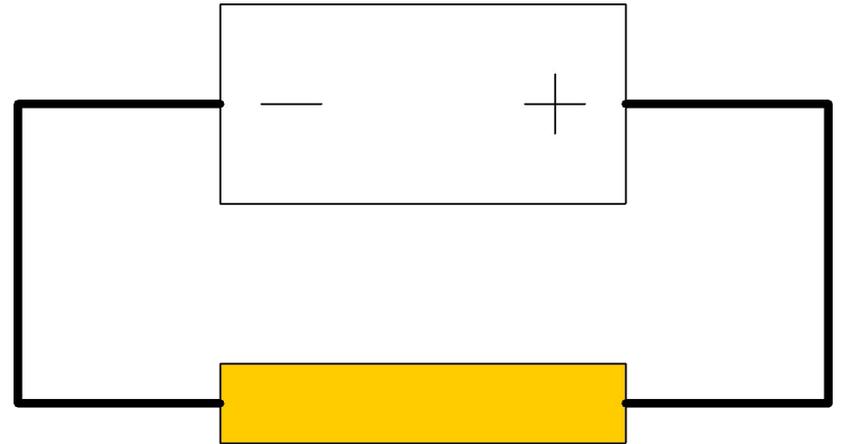


Благодаря этому на концах внешней цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи идет постоянный электрический ток.

Сторонние силы вызывают разделение разноименных зарядов и поддерживают разность потенциалов на концах проводника. Добавочное электрическое поле сторонних сил в проводнике создается **источниками тока** (гальваническими элементами, аккумуляторами, электрическими генераторами).

ЭДС источника тока

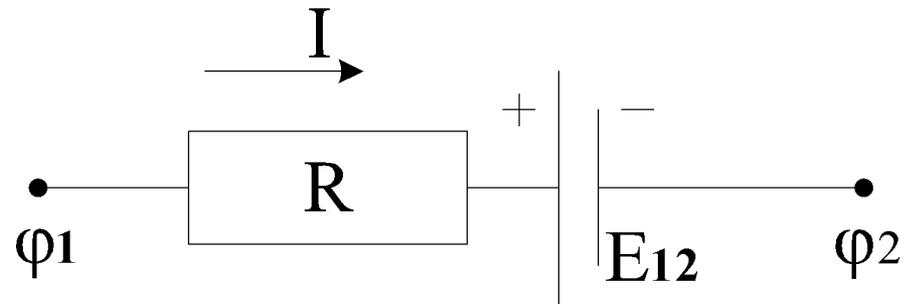
Физическая величина равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда между полюсами источника называется электродвижущей силой источника тока (ЭДС).



$$E = \frac{A_{\text{ст}}}{q} \quad q = +1$$

$$E = A_{\text{ст}}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи



$$A_{12} = A_1 + A_2$$

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q \cdot E_{12}$$

$$A_1 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$A_2 = E_{12} \cdot I \cdot t = E_{12} \cdot q$$

$$U = \frac{A_{12}}{q}$$

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + E$$

5. Вывод закона Ома для замкнутой электрической цепи

Пусть замкнутая электрическая цепь состоит из источника тока с ε , с внутренним сопротивлением r и внешней части, имеющей сопротивление R .

R – внешнее сопротивление;

r – внутреннее сопротивление. $\varepsilon = U + \frac{A'}{q}$

где $U = \varphi_1 - \varphi_2$ – напряжение на внешнем сопротивлении;

A' – работа по перемещению заряда q внутри источника тока, т. е. работа на внутреннем сопротивлении.

Тогда $A = IUR$

так как $U = IR + Ir$

$$A = I^2 R t$$

перепишем выражение для ε : $q = It$

$$\varepsilon = IR + \frac{I^2 R t}{It}$$

$$\varepsilon = IR + Ir$$

Так как согласно закону Ома для замкнутой электрической цепи ($\varepsilon = IR + Ir$)

IR и Ir – падение напряжения на внешнем и внутреннем участках цепи,

То

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

- закон Ома для замкнутой электрической цепи

В замкнутой электрической цепи **электродвижущая сила источника** тока равна сумме падений напряжения на всех участках цепи.

6. Первое и второе правила Кирхгофа

Первое правило Кирхгофа является условием постоянства тока в цепи.

Алгебраическая сумма сил тока в узле разветвления равна нулю

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

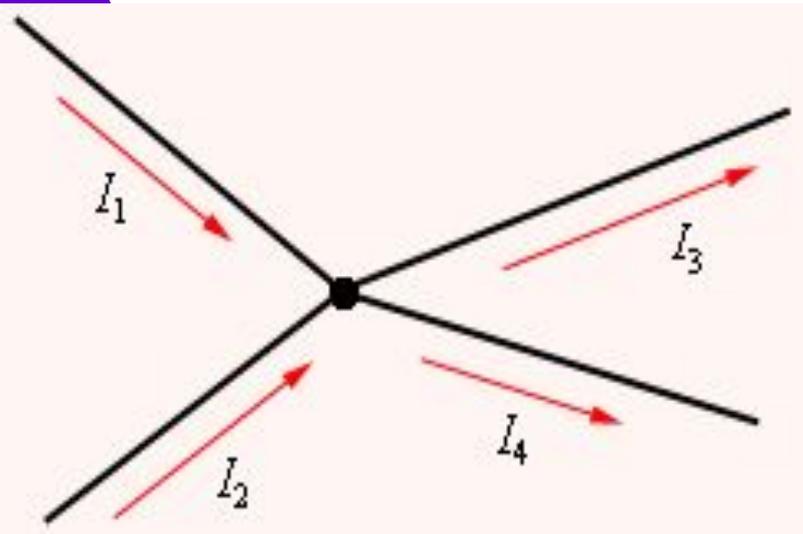
где n – число проводников;

I_i – токи в проводниках.

Токи, подходящие к узлу, считаются **положительными**, выходящие из узла – **отрицательными**. Для узла A первое правило Кирхгофа запишется:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

Первое правило Кирхгофа



Узлом электрической цепи называется точка в которой сходится не менее трех проводников.

Сумма токов сходящихся в узле равна нулю – первое правило Кирхгофа.

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0$$

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда – в узле электрический заряд накапливаться не может.

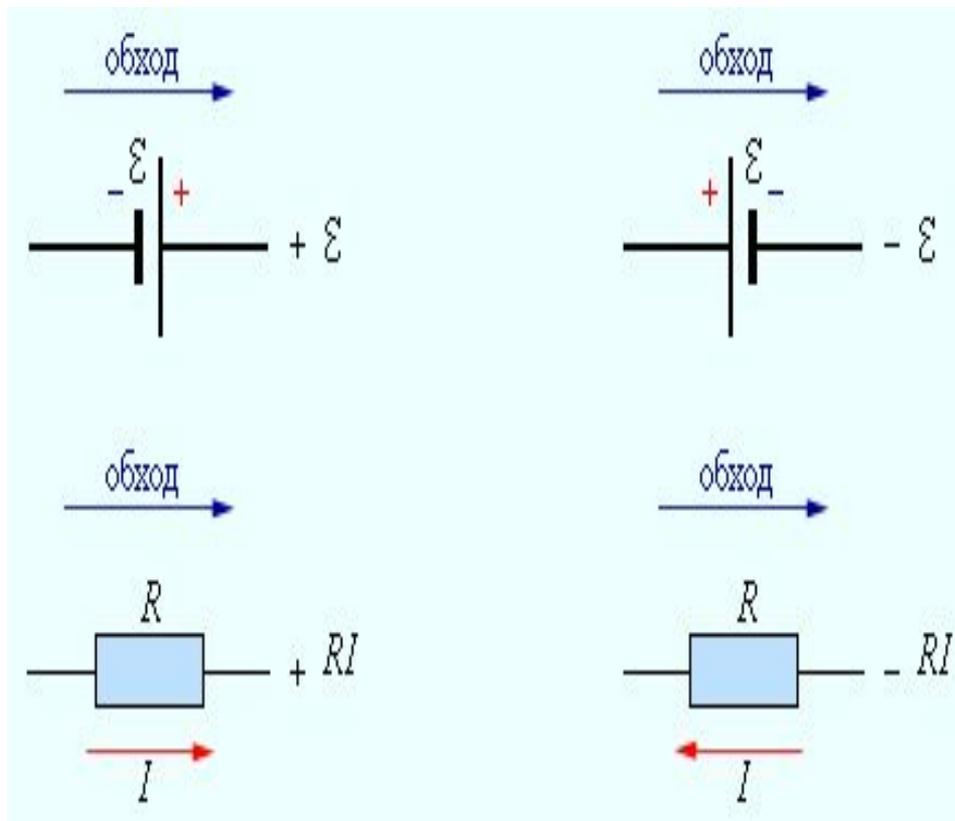
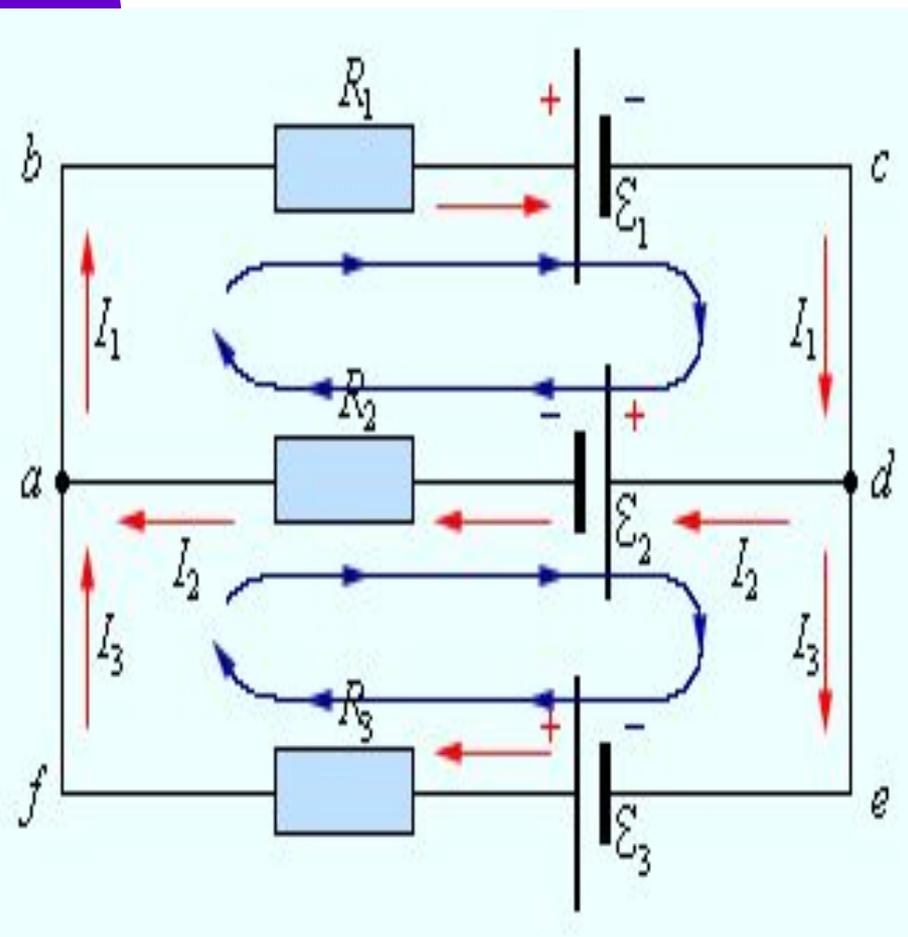
Второе правило Кирхгофа

Второе правило Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии.

В любом замкнутом контуре разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма I_i на сопротивления R_i соответствующих участков этого контура равна сумме приложенных в нем ЭДС ε_i

$$\sum_{i=1}^n I_i \cdot R_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$$

Второе правило Кирхгофа



Для составления уравнения необходимо выбрать **направление обхода** (по часовой стрелке или против нее). Все токи, совпадающие по направлению с обходом контура, считаются положительными. ЭДС источников тока считаются положительными, если они создают ток, направленный в сторону обхода контура. Так, например, правило Кирхгофа для I, II, III к.

$$\text{I} \quad I_1 r_1 + I_1 R_1 + I_2 r_2 + I_2 R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

$$\text{II} \quad -I_2 r_2 - I_2 R_2 + I_3 r_3 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$\text{III} \quad I_1 r_1 + I_1 R_1 + I_3 r_3 + I_3 R_3 = -\varepsilon_1 + \varepsilon_3$$

На основании этих уравнений производится расчет цепей.

7. Контактная разность потенциалов. Термоэлектрические явления

- Электроны, обладающие наибольшей кинетической энергией, могут вылететь из металла в окружающее пространство. В результате вылета электронов образуется “электронное облако”. Между электронным газом в металле и “электронным облаком” существует динамическое равновесие.
- Работа выхода электрона – это работа, которую нужно совершить для удаления электрона из металла в безвоздушное пространство.
- Поверхность металла представляет собой двойной электрический слой, подобный очень тонкому конденсатору.

- Разность потенциалов между обкладками конденсатора зависит от работы выхода электрона.

$$\Delta\phi = \frac{A}{e}$$

Где e – заряд электрона;

$\Delta\phi$ – контактная разность потенциалов между металлом и окружающей средой;

A – работа выхода (электрон-вольт – Э-В).

- Работа выхода зависит от химической природы металла и состояния его поверхности (загрязнение, влага).

Законы Вольта:

- 1. При соединении двух проводников, изготовленных из различных металлов, между ними возникает контактная разность потенциалов, которая зависит только от химического состава и температуры.
- 2. Разность потенциалов между концами цепи, состоящей из последовательно соединенных металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от химического состава промежуточных проводников. Она равна контактной разности потенциалов, возникающих при непосредственном соединении крайних проводников.

- Рассмотрим замкнутую цепь, состоящую из двух металлических проводников 1 и 2. ЭДС, приложенная к этой цепи равна алгебраической сумме всех скачков потенциала.

Если температуры слоев равны ($T_{1a} = T_{2a} = T_{2b} = T_{1b}$)
то $\varepsilon = 0$.

- Если температуры слоев различны, например, тогда

Где α — постоянная, характеризующая свойства контакта двух металлов.

В этом случае в замкнутой цепи появляется *термоэлектродвижущая сила*, прямо пропорциональная разности температур обоих слоев.

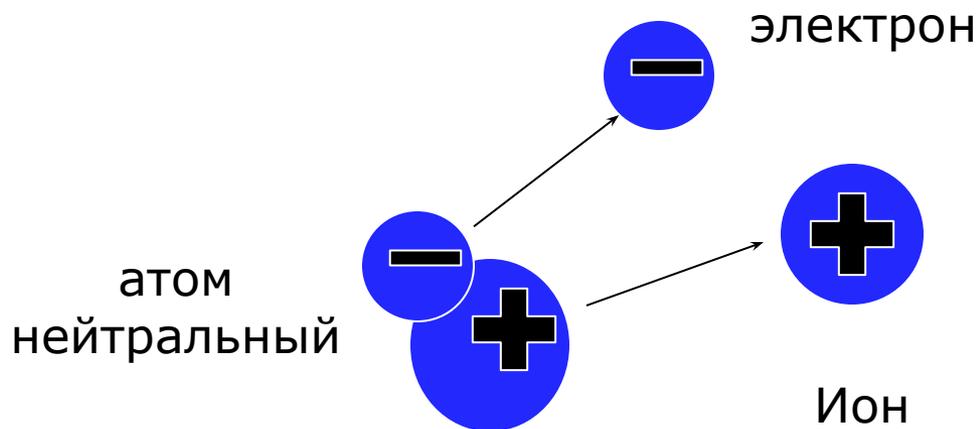
- Термоэлектрические явления в металлах широко используются для измерения температуры. Для этого используются термоэлементы или термопары, представляющие собой две проволоки, изготовленные из различных металлов и сплавов. Концы этих проволок спаяны. Один спай помещается в среду, температуру T_1 которой нужно измерить, а второй – в среду с постоянной известной температурой.
- Термопары имеют ряд преимуществ перед обычными термометрами: позволяют измерять температуры в широком диапазоне от десятков до тысяч градусов абсолютной шкалы.



Газы в нормальных условиях являются *диэлектриками* $R \Rightarrow \infty$, состоят их электрически нейтральных атомов и молекул. При ионизации газов возникают носители электрического тока (положительные заряды).

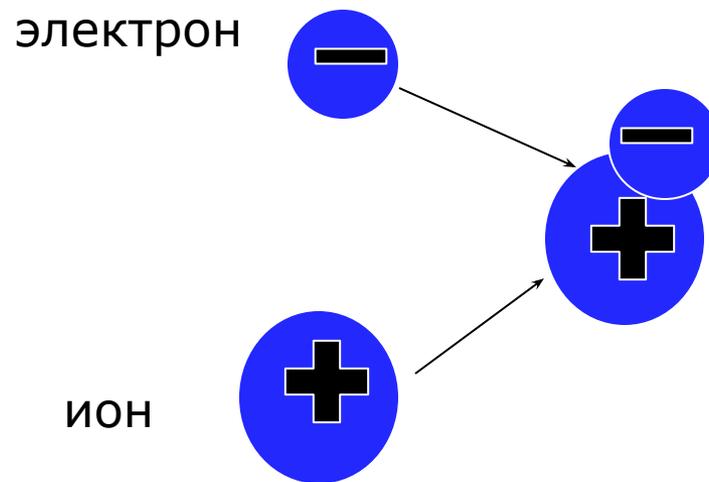
Электрический ток в газах называется *газовым разрядом*. Для осуществления газового разряда к трубке с ионизированным газом должно быть электрическое или магнитное поле.

Ионизация газа - это распад нейтрального атома на положительный ион и электрон под действием ионизатора (внешних воздействий – сильного нагревания, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, радиоактивных излучений, при бомбардировке атомов (молекул) газов быстрыми электронами или ионами).



- 
- Мерой процесса ионизации является *интенсивность ионизации*, измеряемая числом пар противоположно заряженных частиц, возникающих в единичном объеме газа за единичный промежуток времени.
 - *Ударной ионизацией* называется отрыв от атома (молекулы) одного или нескольких электронов, вызванный соударением с атомами или молекулами газа электронов или ионов, разогнанных электрическим полем в разряде.

Рекомбинация - это соединение электрона с ионом в нейтральный атом. Если действия ионизатора прекращается, газ снова становится диэлектриком.



- 1. Несамостоятельный газовый разряд – это разряд, существующий только под действием внешних ионизаторов.

Вольтамперная характеристика газового разряда:
по мере увеличения U растет число заряженных частиц, достигающих электрода и возрастает ток до $I=I_k$, при котором все заряженные частицы достигают электродов.
При этом $U=U_k$

$$I_n = e N_0$$

ток насыщения

Где e – элементарный заряд;

N_0 – максимальное число пар одновалентных ионов, образующихся в объеме газа за 1 с.

2. Самостоятельный газовый разряд – разряд в газе, который сохраняется после прекращения действия внешнего ионизатора. Поддерживается и развивается за счет ударной ионизации.

Несамостоятельный газовый разряд переходит в самостоятельный при U_3 – напряжении зажигания. Процесс такого перехода называется электрическим пробоем газа.

Различают:

- ❖ **Коронный разряд** – возникает при высоком давлении и в резко неоднородном поле с большой кривизной поверхности, применяется при обеззараживании семян сельскохозяйственных культур.
- ❖ **Тлеющий разряд** – возникает при низких давлениях, используется в газосветных трубках, газовых лазерах.
- ❖ **Искровой разряд** – при $P=P_{\text{атм}}$ и при больших E электрического поля - молния (токи до нескольких тысяч Ампер, длина – несколько километров).
- ❖ **Дуговой разряд** – возникает между близко сдвинутыми электродами, ($T=3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ – при атмосферном давлении. Используется как источник света в мощных прожекторах, в проекционной аппаратуре.



Плазма – особое агрегатное состояние вещества, характеризующееся высокой степенью ионизации его частиц. Плазма подразделяется на:

- слабо ионизированную (α – доли процента – верхние слои атмосферы, ионосфера);
- частично ионизированную (несколько %);
- полностью ионизированную (солнце, горячие звезды, некоторые межзвездные облака).

Искусственно созданная плазма используется в газоразрядных лампах, плазменных источниках электрической энергии, магнитодинамических генераторах.

Эмиссионные явления:

1. **Фотоэлектронная эмиссия** – вырывание под действием света электронов с поверхности металлов в вакууме.
2. **Термоэлектронная эмиссия** – испускание электронов твердыми или жидкими телами при их нагревании.
3. **Вторичная электронная эмиссия** – встречный поток электронов с поверхности, бомбардируемой электронами в вакууме.
Приборы, основанные на явлении термоэлектронной эмиссии, называются **электронными лампами**.

- 
- В твердых телах электрон взаимодействует не только со своим атомом, но и с другими атомами кристаллической решетки, происходит расщепление энергетических уровней атомов с образованием **энергетической полосы**.
 - Энергия этих электронов может находиться в пределах заштрихованных областей, называемых **разрешенными энергетическими зонами**. Дискретные уровни разделены областями **недозволенных значений энергии** – запрещенными зонами (ширина их соизмерима с шириной запретных зон).

Различия в электрических свойствах различных типов твердых тел объясняется:

- 1) шириной запрещенных энергетических зон;
- 2) различным заполнением электронами разрешенных энергетических зон

Многие жидкости очень плохо проводят электрический ток (дистиллированная вода, глицерин, керосин и т.д.). Водные растворы солей, кислот и щелочей хорошо проводят электрический ток.

Электролиз – прохождение тока через жидкость, вызывающее выделение на электродах веществ, входящих в состав электролита.

Электролиты – вещества, обладающие ионной проводимостью. **Ионная проводимость** – упорядоченное движение ионов под действием электрического поля. **Ионы** – атомы или молекулы, потерявшие или присоединившие к себе один или несколько электронов. Положительные ионы – **катионы**, отрицательные – **анионы**.



- Электрическое поле создается в жидкости электродами (“+” – анод, “–” – катод). Положительные ионы (катионы) движутся к катоду, отрицательные – к аноду.
- Возникновение ионов в электролитах объясняется электрической диссоциацией – распадом молекул растворимого вещества на положительные и отрицательные ионы в результате взаимодействия с растворителем (Na+Cl-; H+Cl-; K+I-...).

- **Степенью диссоциации α** называется число молекул n_0 , диссоциировавших на ионы, к общему числу молекул n_0

$$\alpha = \frac{n_0}{n_0}$$

- При тепловом движении ионов происходит и обратный процесс воссоединения ионов, называемый **рекомбинацией**.

Законы М. Фарадея (1834 г.).

1. Масса вещества, выделяющегося на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду q , прошедшему через электролит

$$m = k \cdot q \quad \text{или} \quad m = kIt$$

Где k – электрохимический эквивалент вещества; равен массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит единицы количества электричества. $q = I \cdot t$

Где I – постоянный ток, проходящий через электролит.

2. Электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны отношениям их атомных (молярных) масс к валентности n

$$k = C \frac{A}{n} = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}$$

где A – атомная масса; n – валентность.

$$F = \frac{1}{C}$$

постоянная Фарадея

где C – универсальная постоянная для всех элементов.

$$F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$$

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

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q$$

- **Физический смысл:** постоянная Фарадея (F) равна количеству электричества, которое необходимо пропустить через электролит для выделения на электроде 1 грамм-эквивалента вещества.

$$q = \pm \frac{nF}{N_A}$$

Где n – валентность иона;

F – постоянная Фарадея;

N_A – число Авогадро.

Заряд 1-валентного иона равен элементарному заряду

$$q = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Любой электрический заряд кратен элементарному:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$



**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ**