

ТЕМА XIV. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК



1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

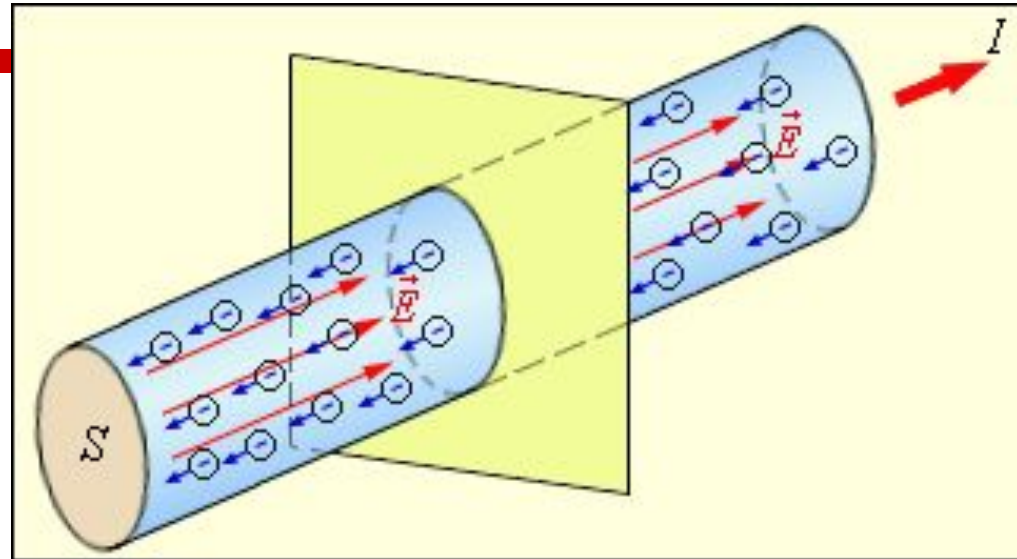
Если через некоторую поверхность переносится электрический заряд, то говорят, что через эту поверхность течет **электрический ток**.

Электрический ток –

это направленное движение электрически заряженных частиц.

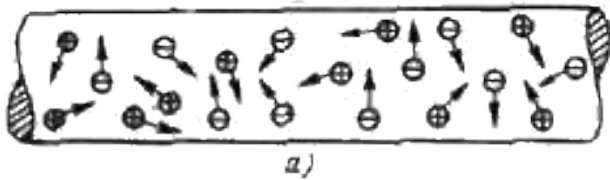
Для протекания тока необходимо наличие в данном тел (среде) **заряженных частиц**, которые могут перемещаться в пределах всего тела (среды). Такие частицы называются **носителями тока**.

Электрический ток возникает при условии, что внутри тела (среды) существует **электрическое поле**, которое обеспечивает направленное движение носителей тока на фоне их хаотического движения.



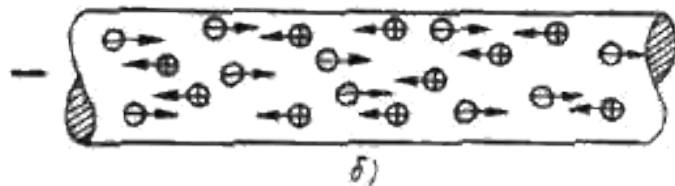
2. СИЛА ТОКА

Количественной характеристикой электрического тока служит сила тока – величина электрического заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность в единицу времени $I = \frac{dq}{dt}$.



Если ток создаётся носителями обоих знаков, то

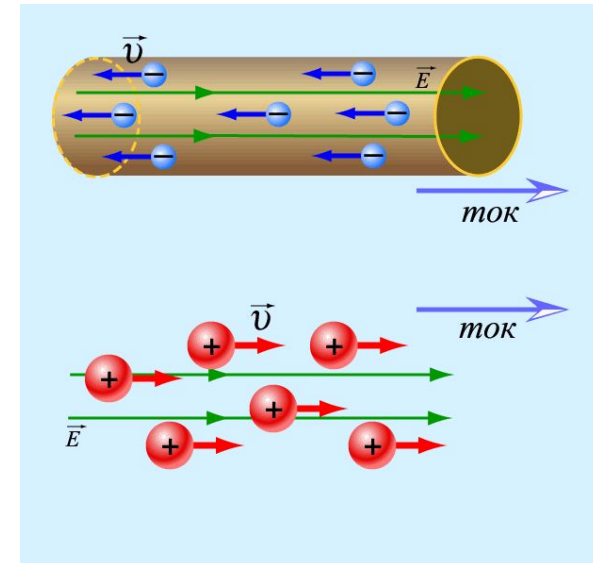
$$I = \frac{dq^+}{dt} + \left| \frac{dq^-}{dt} \right|.$$



$$[I] = 1 \frac{Кл}{с} = 1 А.$$

Единица силы тока ампер устанавливается на основе магнитного взаимодействия токов

За направление тока принимается направление, в котором перемещаются положительные носители заряда.



3. ПЛОТНОСТЬ ТОКА

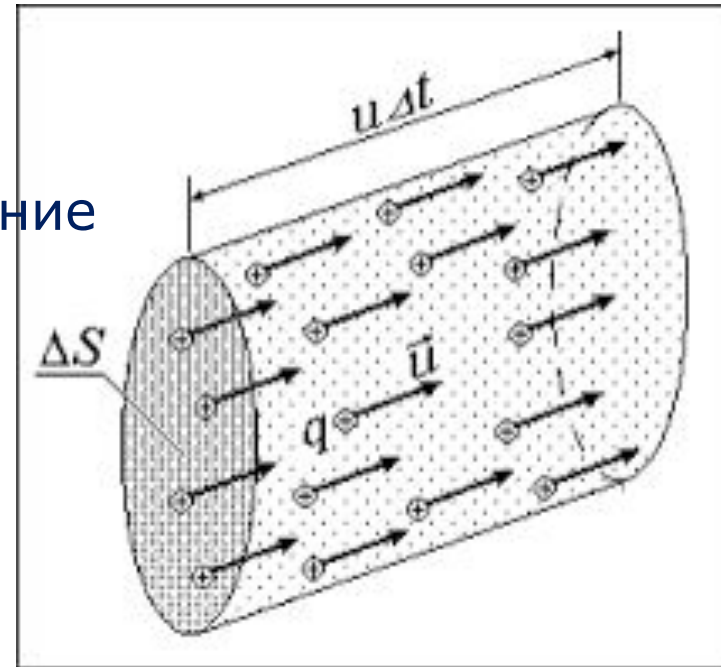
Распределение тока по рассматриваемой поверхности можно характеризовать с помощью вектора плотности тока \vec{j} .

Величина плотности тока численно равна отношению силы тока через площадку, расположенную в данной точке перпендикулярно к направлению движения носителей заряда, к её площади

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \Rightarrow j = \frac{dq}{dS_{\perp} dt}, \quad [j] = 1 \frac{A}{m^2}.$$

За направление \vec{j} принимают направление скорости упорядоченного движения положительных носителей

$$\vec{j} = q_0^+ n^+ \vec{u}^+ + q_0^- n^- \vec{u}^-; \quad I = \int_S \vec{j} d\vec{S}.$$
$$\vec{j} = \rho^+ \vec{u}^+ + \rho^- \vec{u}^-.$$



4. УРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ (I)

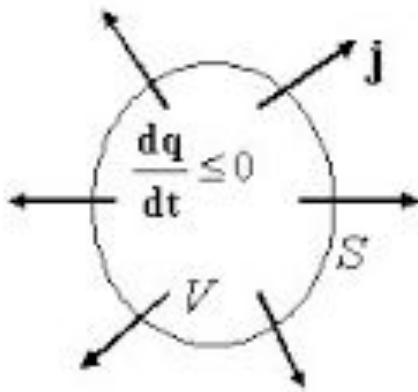


Рис. 4.1

Рассмотрим в среде с током произвольную замкнутую поверхность.

Поток плотности тока

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}$$

даёт заряд, скорость убывания заряда, содержащегося в объёме под этой поверхностью.

Выразим заряд в этом объёме как интеграл от плотности заряда по объёму:

$$q = \int_V \rho dV \Rightarrow \oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV.$$

Операции интегрирования по координатам и дифференцирования по времени можно поменять местами:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \Rightarrow \oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV.$$

По теореме Остроградского-Гаусса

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = \int_V \nabla \cdot \vec{j} dV \Rightarrow \int_V \nabla \cdot \vec{j} dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \Rightarrow \nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

4. УРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ (II)

Соотношение $\nabla \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ называют уравнением непрерывности.

Оно отражает закон сохранения электрического заряда в дифференциальной форме.

Уравнение $\oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}$ также отражает

закон сохранения заряда, но в интегральной форме.

Согласно этим уравнениям в точках, которые являются источниками вектора \vec{j} , происходит убывание заряда.

Для постоянного тока $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \Rightarrow \nabla \vec{j} = 0$. Это означает, что линии тока замкнуты, т.е. непрерывны.

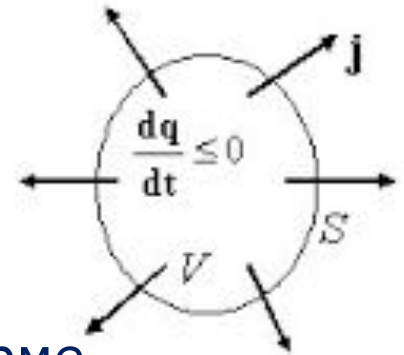
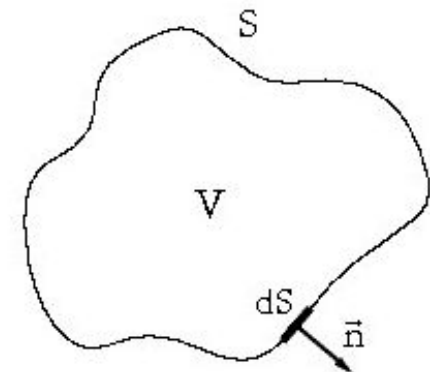
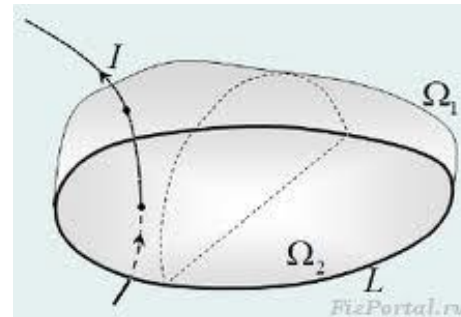


Рис. 4.1



5. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

$\oint_L \vec{E} dl = 0 \Rightarrow$ В замкнутой цепи необходимы участки, на которых носители движутся против электростатических сил.

Перемещение носителей на этих участках возможно лишь с помощью сил неэлектростатического происхождения, называемых **сторонними силами**.

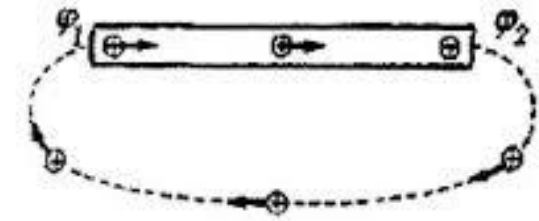


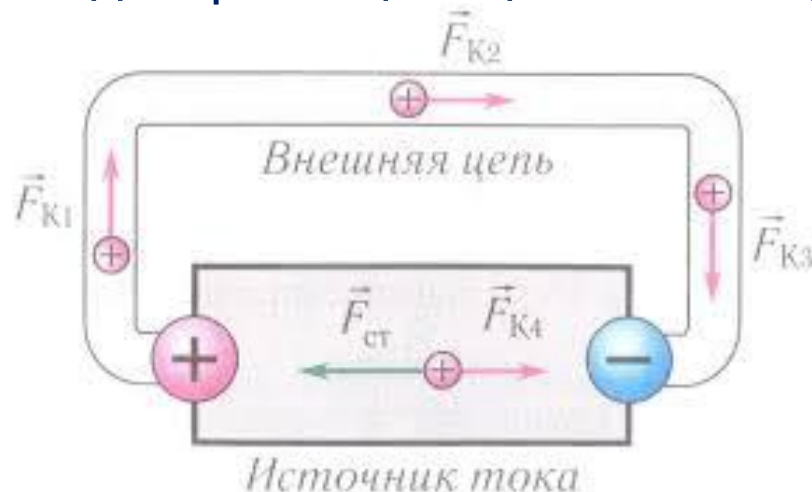
Рис. 5.3

Сторонние силы характеризуют работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами:

$$A_{12}^* = \int_1^2 \vec{F}^* dl = q \int_1^2 \vec{E}^* dl.$$

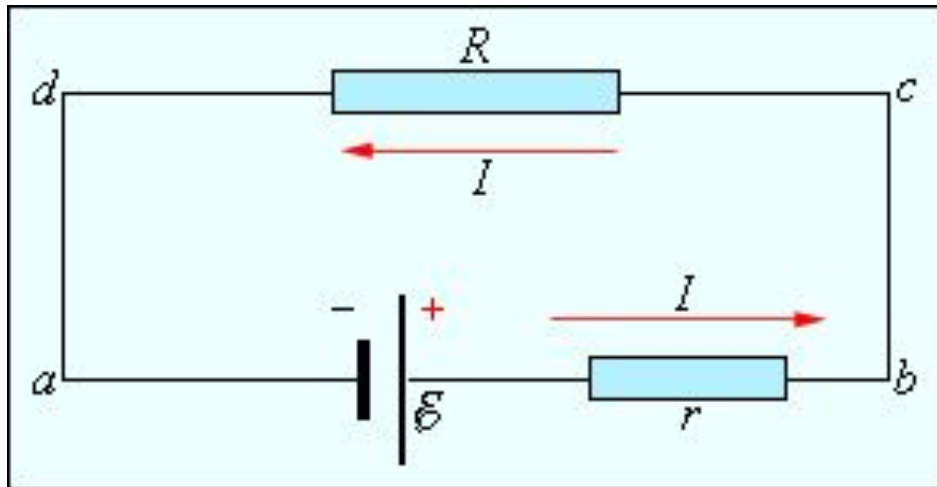
Отношение работы сторонних сил к заряду, над которым она совершена называется **электродвижущей силой**:

$$\varepsilon_{12} = \frac{A_{12}^*}{q} = \int_1^2 \vec{E}^* dl, \quad \varepsilon = \oint_L \vec{E}^* dl.$$



6. НАПРЯЖЕНИЕ

Результирующая сила, действующая в каждой точке на заряд равна сумме электростатической и сторонней силы: $\vec{F}' = q(\vec{E}' + \vec{E}^*)$.
Работа, совершаемая этой силой над зарядом на участке ab определяется выражением: $A_{ab} = q \int_a^b \vec{E} dl + q \int_a^b \vec{E}^* dl \Rightarrow$

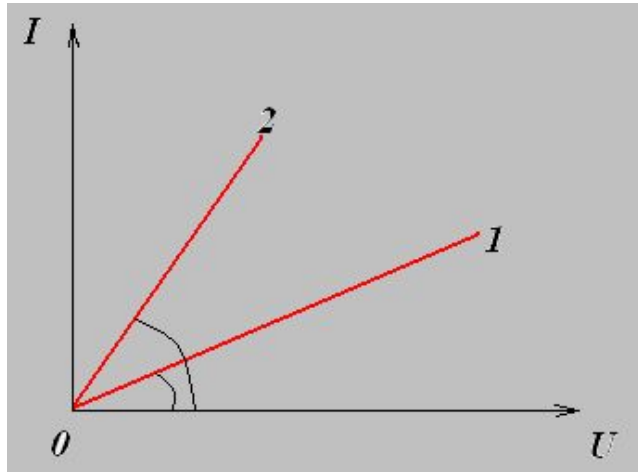


$$A_{ab} = q(\varphi_a - \varphi_b) + q\varepsilon_{ab}.$$

$$U_{ab} \equiv \frac{A_{ab}}{q} = \varphi_a - \varphi_b + \varepsilon_{ab}.$$

Величина, численно равная работе, совершаемой сторонними и электростатическими силами над единичным положительным зарядом, называется **напряжением на данном участке цепи**.

7. ЗАКОН ОМА (I)



Георг Ом экспериментально установил, что сила тока, текущего по однородному участку цепи, пропорциональна напряжению на этом участке: $I = \frac{1}{R}U$.

Величина R , обратная коэффициенту пропорциональности между силой тока

и напряжением называется сопротивлением этого участка цепи.

Для однородного цилиндрического проводника $R = \rho \frac{l}{S}$,

ρ – удельное электрическое сопротивление,

l – длина проводника, S – площадь его поперечного сечения.

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

$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow [R] = 1 \frac{В}{А} = 1 \text{ Ом}; \quad \rho = R \frac{S}{l} \Rightarrow [\rho] = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

7. ЗАКОН ОМА (II)

В изотропном проводнике упорядоченное движение носителей тока происходит в направлении напряжённости поля, т.е. направления векторов \vec{j} и \vec{E} совпадают.

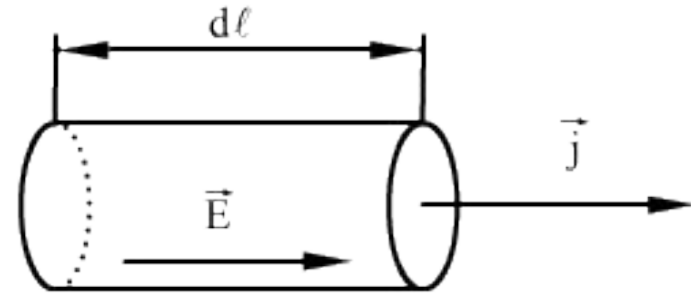


рис. 17.2

Применим закон Ома $I = \frac{1}{R}U$ для элементарного участка проводника. Через поперечное сечение течёт ток силой $dI = jdS$. Напряжение на участке цепи $dU = Edl$.

Сопротивление выделенного элементарного участка $dR = \rho \frac{dl}{dS}$.

Подставим эти выражения в закон Ома $jdS = \frac{Edl}{\rho dl} dS \Rightarrow j = \frac{E}{\rho}$.

В векторном виде $\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E}$ – **з-н Ома в дифференциальной ф-е.**

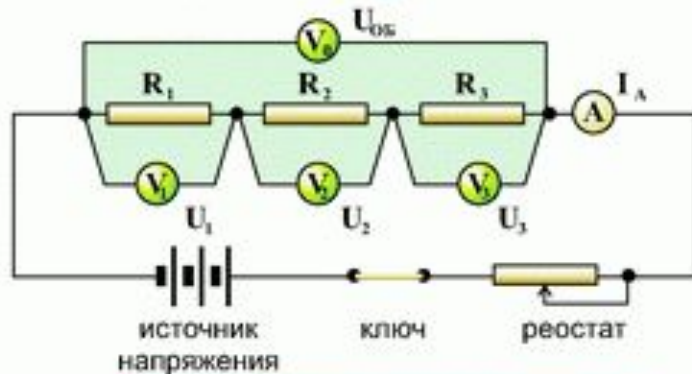
$\sigma = \frac{1}{\rho}$ – удельная электрическая проводимость.

$$[\sigma] = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{См}}{\text{м}}$$

8. СОЕДИНЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Электрические цепи. Последовательное соединение проводников



Законы последовательного соединения

1. Сила тока I_A одна и та же во всех последовательно соединенных проводниках

$$I_A = \text{const}$$

2. Общее падение напряжения $U_{\text{об}}$ равно сумме падений напряжения на каждом проводнике

$$U_{\text{об}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

3. Общее сопротивление равно сумме всех последовательно включенных сопротивлений

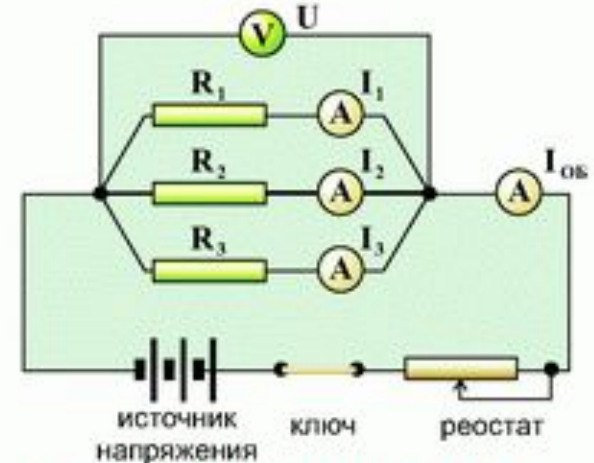
$$R_{\text{об}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

4. Чем меньше сопротивление, тем меньше на нем падение напряжения (и наоборот)

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (\text{Прямпропорциональная зависимость})$$

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Электрические цепи. Параллельное соединение проводников



Законы параллельного соединения

1. $I_{\text{об}} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$

2. $U = \text{const}$

3. Общее сопротивление находят по формуле

$$\frac{1}{R_{\text{об}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad \text{Если } R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R \text{ то}$$

$$R_{\text{об}} = \frac{R}{n}$$

n - проводников одинакового сопротивления

4. Через проводник меньшего сопротивления течет больший ток и наоборот

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (\text{Обратнопропорциональная зависимость})$$



9. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

ФИЗИКА

137

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Измерение силы тока

Сила электрического тока измеряется амперметром

Амперметр включается в цепь последовательно.

Его внутреннее сопротивление должно быть сравнительно мало.

Для увеличения предела измеряемого тока параллельно к амперметру включают шунт - дополнительную "дорогу" для электрического тока



Вспользуемся четвертым законом параллельного соединения

$$\frac{I_A}{I_{ш}} = \frac{R_{ш}}{R_A} \Rightarrow R_{ш} = \frac{I_A \cdot R_A}{I_{ш}} = \frac{I_A \cdot R_A}{I_0 - I_A}$$

или

$$R_{ш} = \frac{R_A}{\frac{I_0}{I_A} - 1} = \frac{R_A}{n - 1}$$

Здесь I_0 - величина тока, на который нам необходимо рассчитать данный амперметр с пределом I_A

$\frac{I_0}{I_A} = n$ - коэффициент, показывающий во сколько раз увеличилась цена деления шкалы амперметра

ФИЗИКА

138

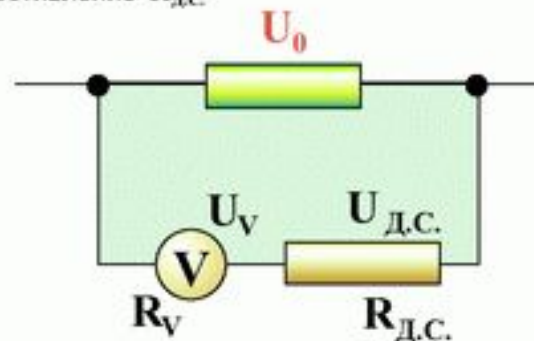
ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Измерение напряжения

Электрическое напряжение измеряется вольтметром

Вольтметр включается в цепь параллельно. Его внутреннее сопротивление должно быть сравнительно большим.

Для увеличения предела измеряемого напряжения последовательно к нему включают дополнительное сопротивление $R_{д.с.}$



Вспользуемся четвертым законом последовательного соединения

$$\frac{R_V}{R_{д.с.}} = \frac{U_V}{U_{д.с.}} \Rightarrow R_{д.с.} = R_V \frac{U_{д.с.}}{U_V} = R_V \frac{U_0 - U_V}{U_V}$$

$$R_{д.с.} = R_V \left(\frac{U_0}{U_V} - 1 \right) = R_V (n - 1) \quad R_{д.с.} = R_V (n - 1)$$

Здесь n - коэффициент, показывающий во сколько раз увеличилась цена деления шкалы вольтметра

10. ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

На неоднородном участке цепи на носители тока действуют не только электростатические, но и сторонние силы: $F = q_0 E + q_0 E^*$.

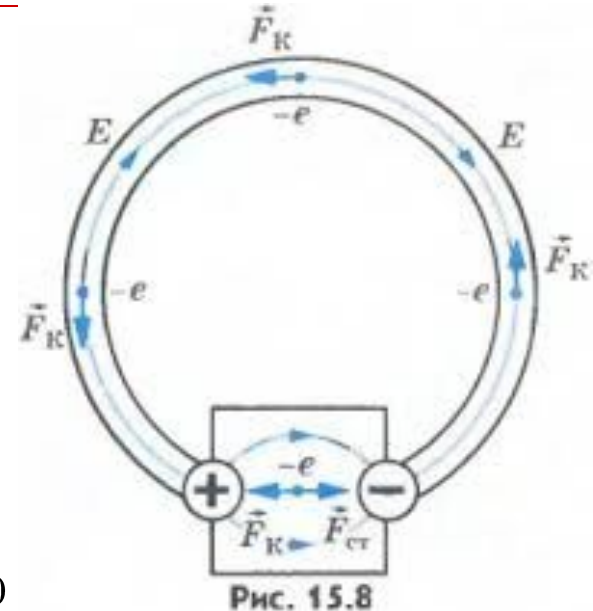
По закону Ома для однородного участка средняя скорость упорядоченного движения носителей тока пропорциональна электростатической силе. Покажем это:

$$j = \sigma E, \quad j = q_0 n \vec{u}, \quad E = F/q_0 \Rightarrow q_0 n \vec{u} = \sigma F/q_0$$

При наличии нескольких сил, действующих на носители тока, средняя скорость носителей пропорциональна сумме сил, поэтому

$$q_0 n \vec{u} = \sigma (q_0 E + q_0 E^*)/q_0 \Rightarrow j = \sigma (E + E^*) \Rightarrow j = (E + E^*)/\rho.$$

Это закон Ома для неоднородного участка цепи в дифференциальной форме.



11. ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Переведём векторную дифференциальную форму закона Ома $\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}^*)$ в скалярную интегральную форму. Для этого: выразим удельную электрическую проводимость σ через удельное электрическое сопротивление ρ ; умножим обе части закона Ома скалярно на элемент линии тока dl и на площадь элементарного объёма проводника dS :

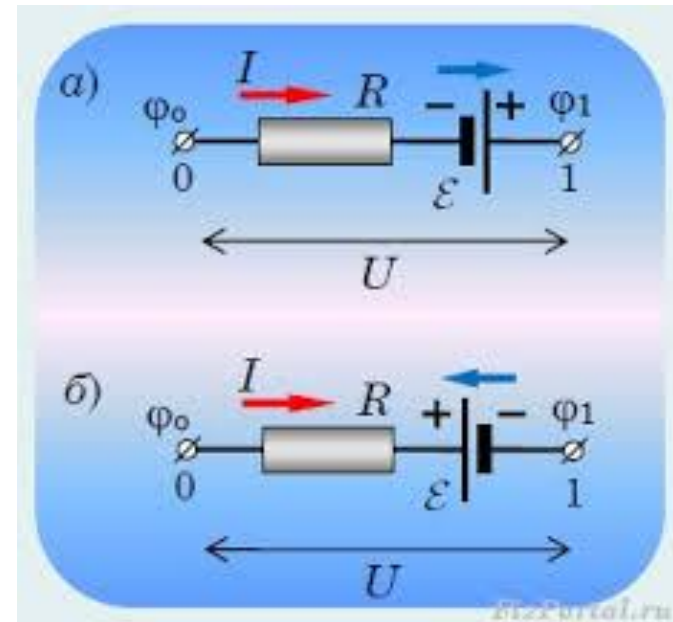
$$dS \vec{j} dl = dS \frac{1}{\rho} (\vec{E} dl + \vec{E}^* dl).$$

$$j dl = j dl \Rightarrow \rho dS j dl = dS (\vec{E} dl + \vec{E}^* dl);$$

$$dS j = dI \Rightarrow dI \frac{\rho dl}{dS} = \vec{E} dl + \vec{E}^* dl.$$

Интегрируя по длине и площади, получим:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}.$$



12. МОЩНОСТЬ ТОКА

Электростатические и сторонние силы, действующие на данном участке цепи, совершают над прошедшим зарядом работу $A = qU$.

Разделив работу на время, за которое она совершена, получим мощность развиваемую током на рассматриваемом участке цепи:

$$P = qU/t = UI = (\varphi_1 - \varphi_2)I + \varepsilon_{12}I.$$

Отношение мощности, развиваемой током в проводнике к объему этого проводника называется **удельной мощностью тока** P_{yd} .

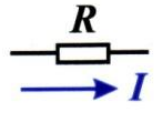
Мощность ΔP , развиваемую в объёме ΔV , найдём, умножив число носителей в этом объёме ΔN на мощность P' результирующей силы, действующей на каждый носитель тока.

$$P' = dA'/dt = F'dS/dt = F'u = q_0(E + E^*)u. \Delta N = n\Delta V \Rightarrow \Delta P = P'\Delta N = q_0(E + E^*)un\Delta V = j(E + E^*)\Delta V \Rightarrow P_{yd} = j(E + E^*).$$

13. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

Закон Джоуля-Ленца

В интегральной форме

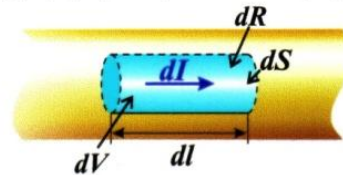


$$Q = \int_0^t I^2 R dt$$

если $I = const$, то

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

В дифференциальной форме



$$w = \frac{dQ}{dV dt} \quad dQ = dI^2 dR dt$$

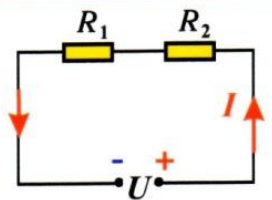
$$dR = \frac{\rho dl}{dS} \quad dI = j dS$$

$$w = \rho j^2 = \sigma E^2$$

удельная
тепловая мощность

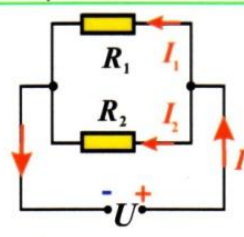
Теплота, выделяемая в проводниках

последовательное
соединение



$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= I R_1^2 t \\ Q_2 &= I R_2^2 t \end{aligned} \right\} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

параллельное



$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{U^2}{R_1} t \\ Q_2 &= \frac{U^2}{R_2} t \end{aligned} \right\} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$P_{y\partial} = j(\dot{E} + \dot{E}^*).$$

Для однородного участка цепи

$$\dot{E}^* = 0 \Rightarrow P_{y\partial} = j\dot{E}.$$

По закону Ома

$$j = \sigma E = \frac{E}{\rho} \Rightarrow$$

$$P_{y\partial} = \frac{E^2}{\rho} = \sigma E^2;$$

$$P_{y\partial} = \rho j^2 = \frac{j^2}{\sigma}.$$

Это закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме.

10. ПРАВИЛА КИРХГОФА

Правила Кирхгофа

Первое правило:

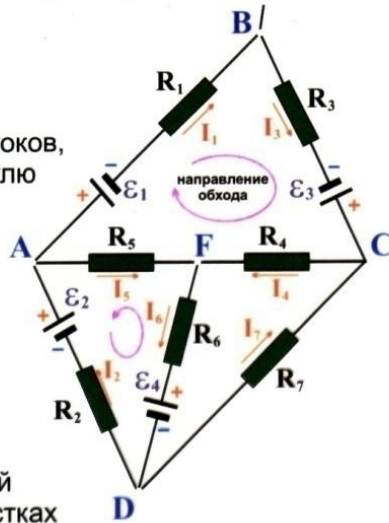
$$\sum_k I_k = 0$$

Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\text{Узел A: } I_2 - I_1 - I_5 = 0$$

$$\text{Узел D: } I_6 - I_2 - I_7 = 0$$

$$\text{Узел F: } I_4 + I_5 - I_6 = 0$$



Второе правило:

$$\sum I_i R_i = \sum \mathcal{E}_k$$

Алгебраическая сумма падений напряжений на отдельных участках замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре

$$\text{Контур ABCFA: } I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_5 R_5 = \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_1$$

$$\text{Контур AFDA: } I_5 R_5 + I_6 R_6 + I_2 R_2 = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_4$$

Порядок применения второго правила:

1. Показать направления токов на каждом участке цепи;
2. Показать направление стороннего поля в источнике ЭДС;
3. Выбрать направление обхода контура;
4. При совпадении силы тока или стороннего поля с направлением обхода перед падением напряжения и ЭДС ставится плюс, а при несовпадении - минус.

ТОЭ

2. Методы расчета и свойства линейных цепей

2.3. Задача расчета цепи

Применения законов Кирхгофа



- Известны: схема цепи (p ветвей, q узлов) и параметры всех ветвей R, E, J
- Определить: токи и напряжения на всех ветвях

Пример

В схеме 6 неизвестных токов -
нужно 6 независимых уравнений

Для узлов:

$$1 \quad -I_2 - I_6 + I_3 + J_6 = 0$$

$$2 \quad I_4 + I_6 - I_5 - J_6 = 0$$

$$3 \quad +I_2 - I_1 + I_5 = 0$$

$$4 \quad -J_4 - I_1 + I_3 = 0$$

Это уравнение не годится - оно является суммой 3-х первых

Для контуров:

$$1 \quad +R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_1$$

$$2 \quad -R_2 I_2 + R_5 I_5 + R_6 I_6 = E_5$$

$$3 \quad R_6 I_6 + U_{J6} = 0$$

$$4 \quad R_4 I_4 - R_3 I_3 - R_6 I_6 = -E_4$$

Не годится -
сумма трех первых

$$4 \quad R_4 I_4 + R_5 I_5 = E_1 + E_5 - E_4$$

По первому закону ($q - 1$) уравнений

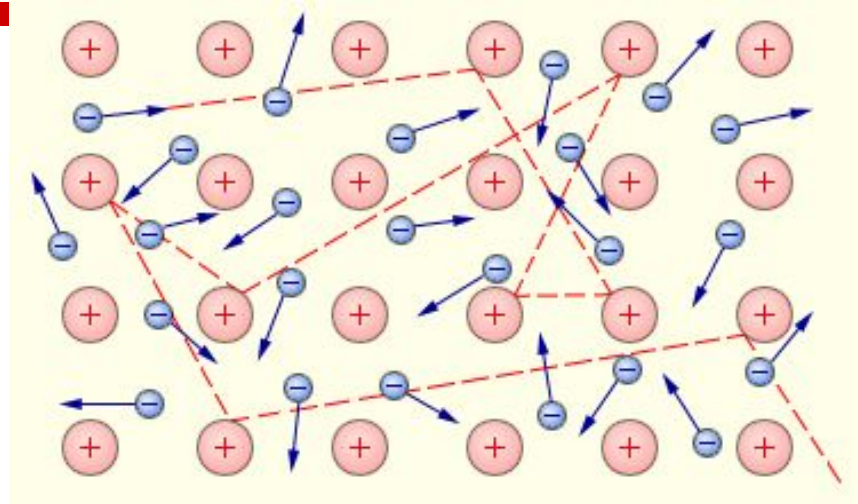
По второму: $p - (q - 1)$

(p - число ветвей без источников тока!)

444444, Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, ФЭИ (ФЭИ), тел. (2617) 45-55-55, http://www.fei.ru, e-mail: fei@yandex.ru, Южно-Уральский Государственный Университет, 454080

11. КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

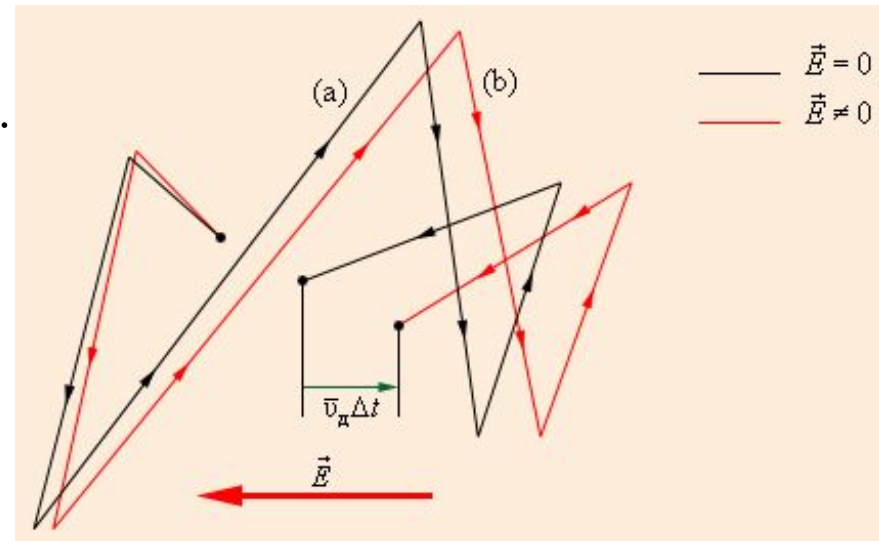
Электроны проводимости в металле ведут себя подобно молекулам газа. В промежутках между столкновениями они движутся свободно, проходя путь λ между столкновениями (в среднем). Электроны сталкиваются в основном не между собой, а с ионами решетки.



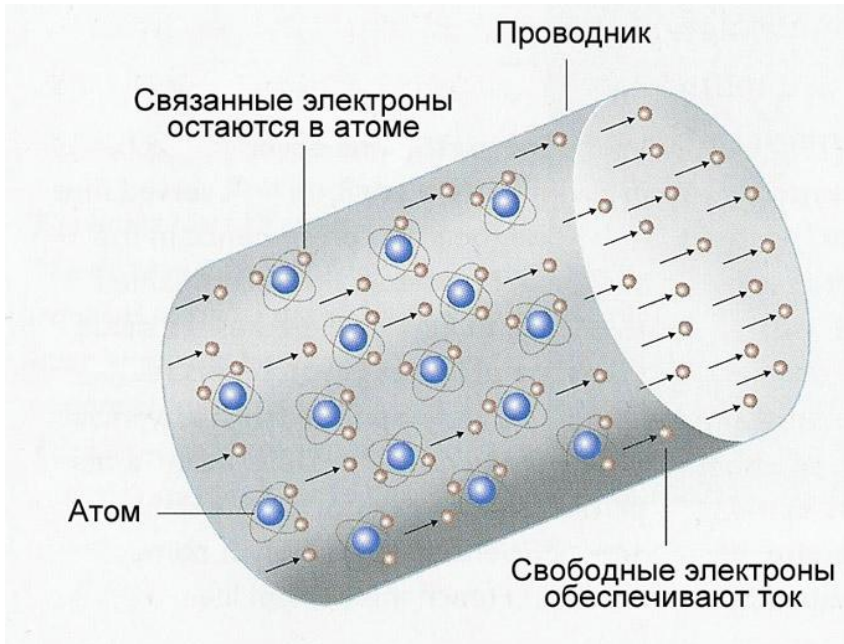
$$M_c \in \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,1 \cdot 10^5 \text{ / .}$$

$$\frac{I}{S} = enu_d \Rightarrow u_d = \frac{I}{enS};$$

$$m_d \in \frac{10}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{29} \cdot 10^{-6}} \approx 6,2 \cdot 10^{-4} \text{ / .}$$



12. ЗАКОН ОМА В КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ



$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}; \quad V_{dm} = a\tau;$$

$$\tau = \frac{\lambda}{V_c} \Rightarrow V_{dm} = \frac{eE\lambda}{mV_c}.$$

$$\bar{V}_d = \frac{V_{dm}}{2} = \frac{eE\lambda}{2mV_c}; \quad j = en\bar{V}_d \Rightarrow$$

$$j = \frac{ne^2\lambda}{2mV_c} E;$$

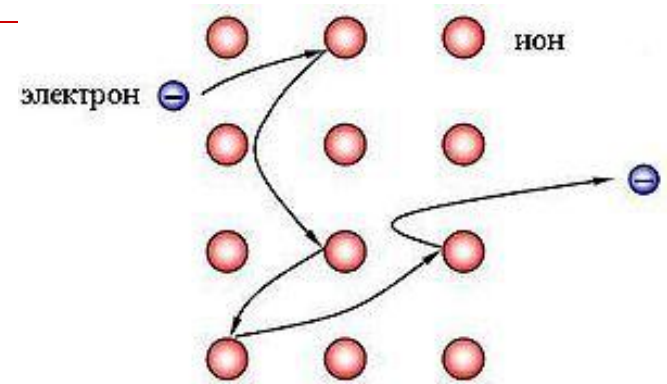
$$j = \gamma E \Rightarrow$$

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{2mV_c}{e^2 n \lambda}.$$

13. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА В КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

К концу свободного пробега электрон приобретает дополнительную кинетическую Энергию

$$\Delta W_k = \frac{mV_{dm}^2}{2} = \frac{m}{2} \left(\frac{eE\lambda}{mV_c} \right)^2 = \frac{e^2 \lambda^2}{2mV_c^2} E^2.$$



Каждый электрон претерпевает за секунду $\frac{1}{\tau} = \frac{V_c}{\lambda}$ столкновений.

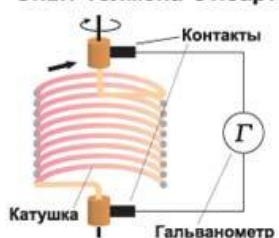
$$q \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta V} = n \frac{1}{\tau} \Delta W_k = n \frac{V_c}{\lambda} \frac{e^2 \lambda^2}{2mV_c^2} E^2 = \frac{e^2 n \lambda}{2mV_c} E^2. \quad \Delta Q = I^2 R \Delta t;$$

$$I = jS = \frac{E}{\rho} S; \quad R = \rho \frac{\Delta L}{S} \Rightarrow q = \frac{I^2 R}{\Delta L S} = \frac{E^2 S^2}{\rho^2 \Delta L S} \rho \frac{\Delta L}{S} = \frac{E^2}{\rho}.$$

14. ЗАТРУДНЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

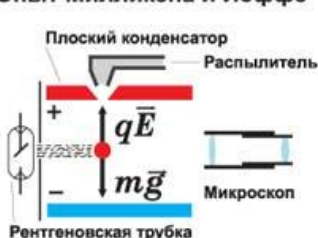
1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Опыт Толмена-Стюарта



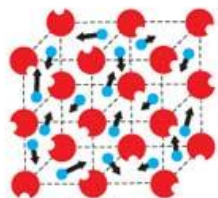
$$\frac{e}{m} = \frac{lv_0}{Rq} \quad \frac{e}{m} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

Опыт Милликена и Иоффе

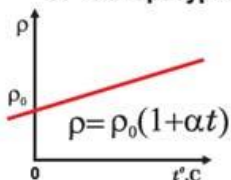


$$q = \frac{mg}{E} \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

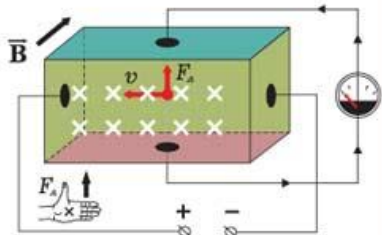
Модель строения металла



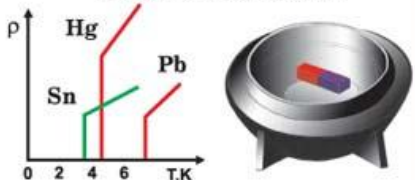
Зависимость сопротивления от температуры



Эффект Холла



Сверхпроводимость

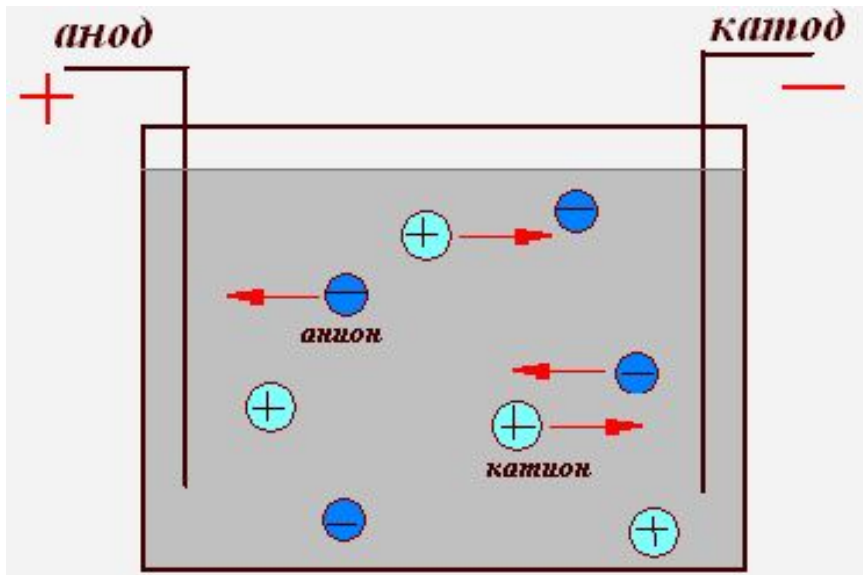
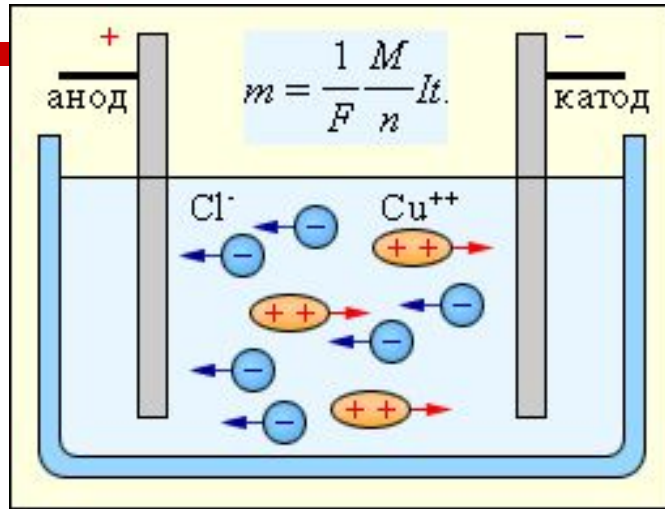


$$\rho = \frac{2mV_c}{e^2 n \lambda}; \quad V_c = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \Rightarrow$$

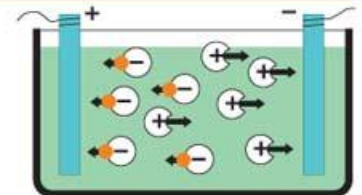
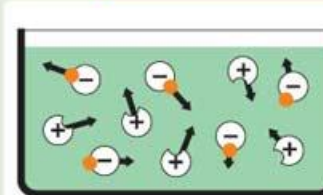
$$\rho = \frac{4}{e^2 n \lambda} \sqrt{\frac{2}{\pi} m k T} \Rightarrow \rho \sim \sqrt{T}.$$

Из классической теории электропроводности металлов следует, что сопротивление металлов должно возрастать как корень квадратный из абсолютной температуры. Это противоречит опытными данным, согласно которым сопротивление металлов растет пропорционально T . В рамках классической теории невозможно объяснить сверхпроводимость.

15. ЭЛЕКТРОЛИЗ

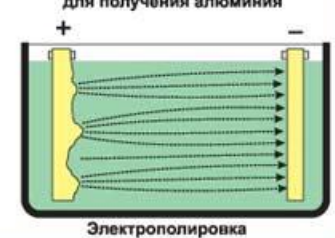
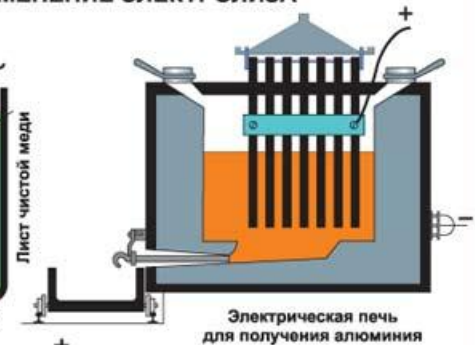
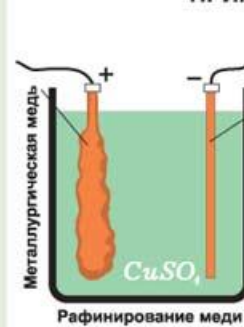


8 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ



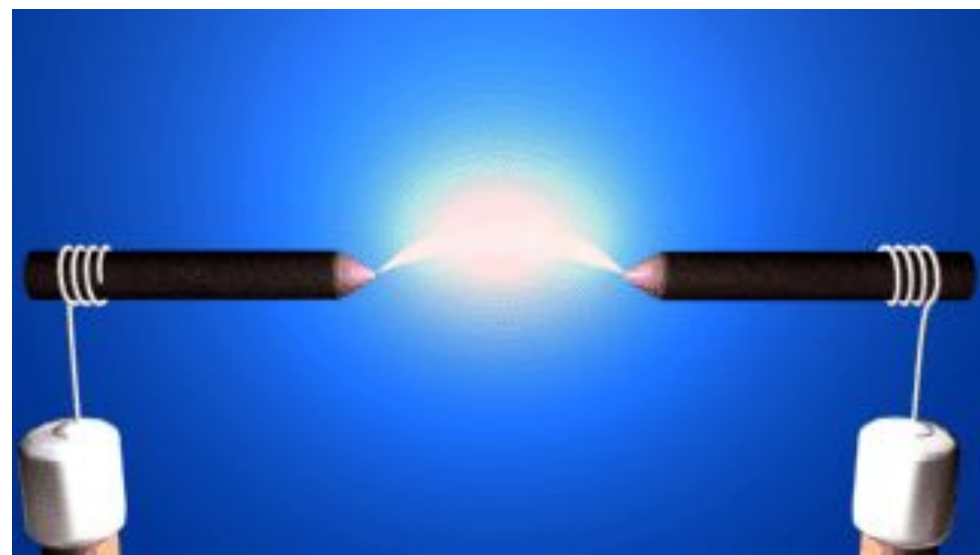
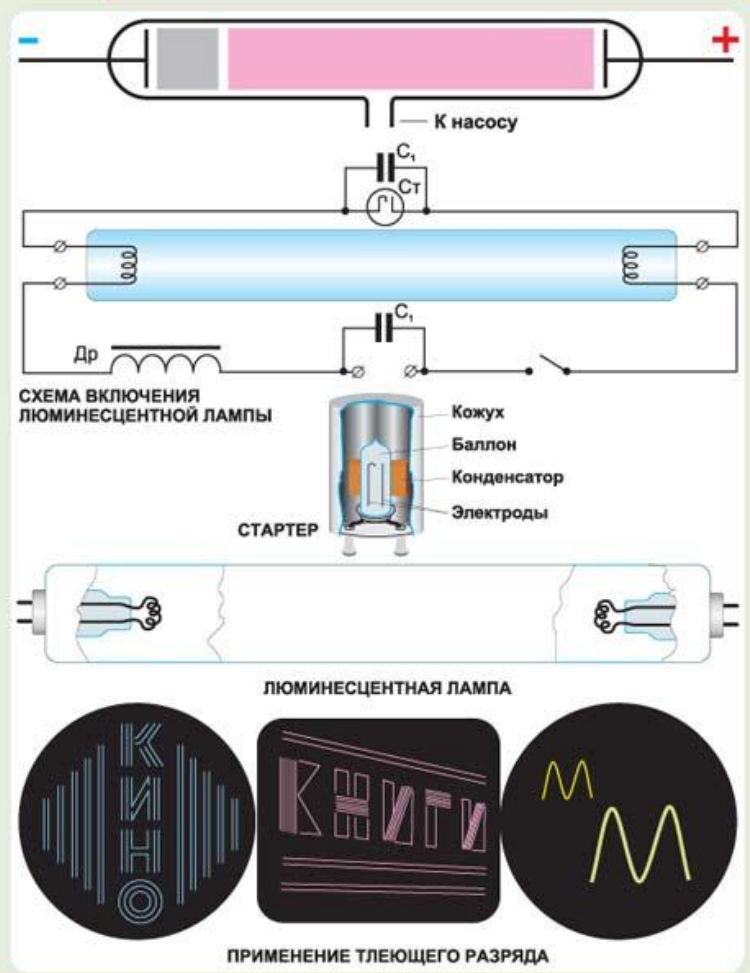
ЗАКОН ЭЛЕКТРОЛИЗА $k = \frac{M}{N_A e n}$ $m = \frac{M}{N_A e n} q$ $m = kq$

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА

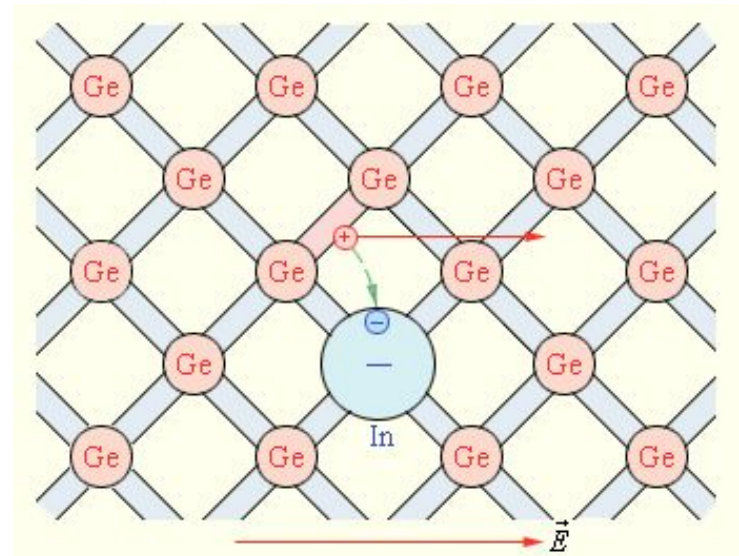
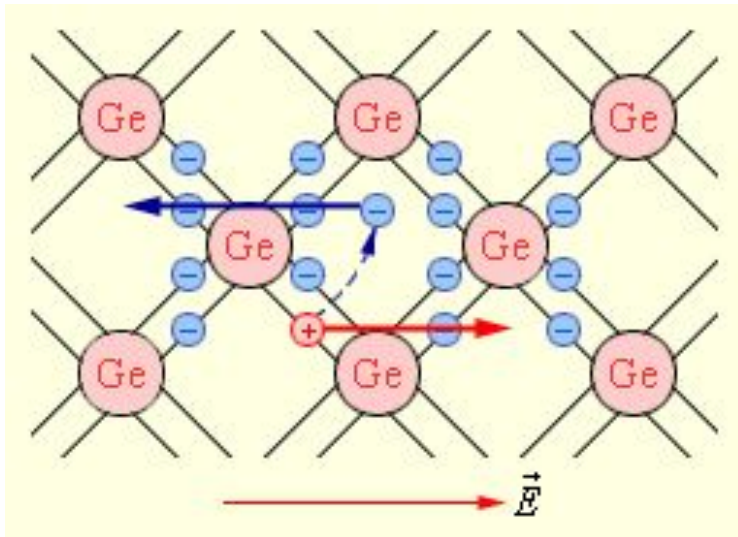
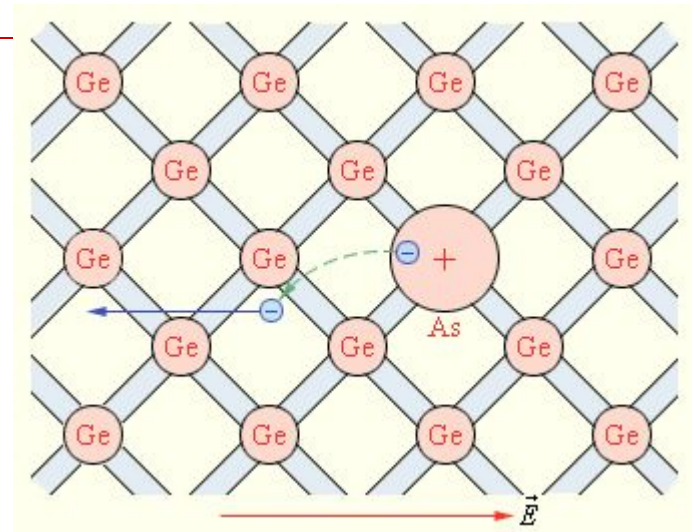
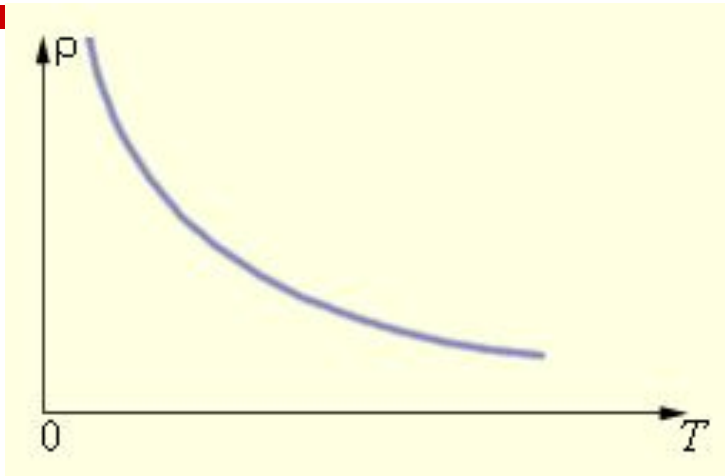


17. САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

7 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД



18. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



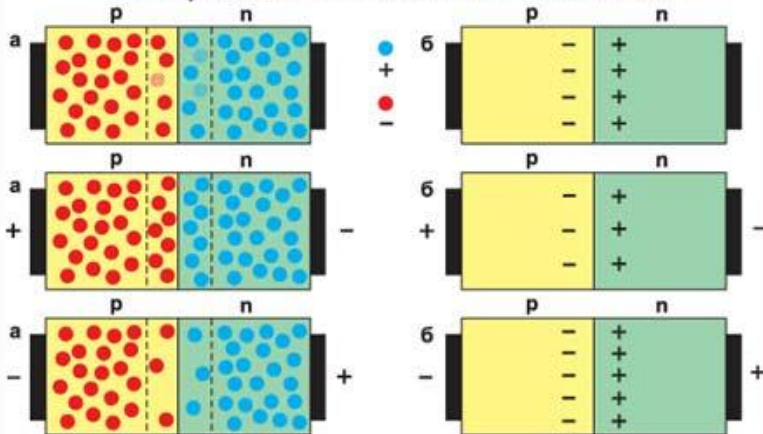
19. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

3 p-n ПЕРЕХОД

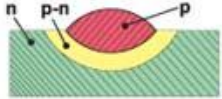
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ



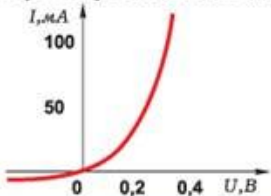
ПРОЦЕССЫ В ПРИКОНТАКТНОМ СЛОЕ



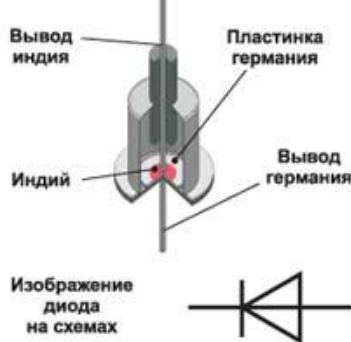
Образование p-n перехода



Вольт-амперная характеристика диода



Устройство диода



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

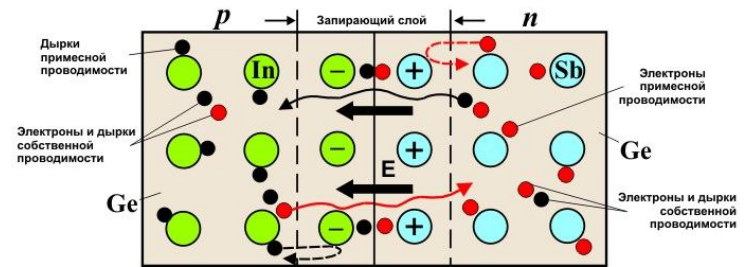
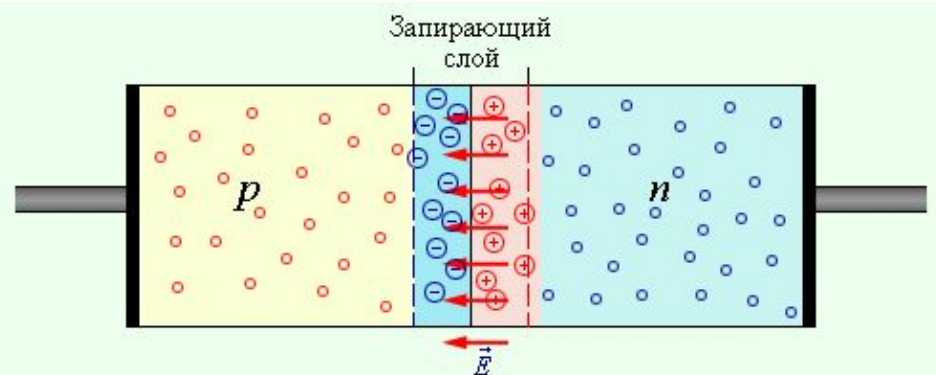
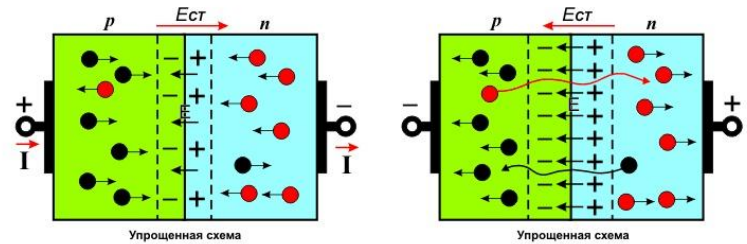
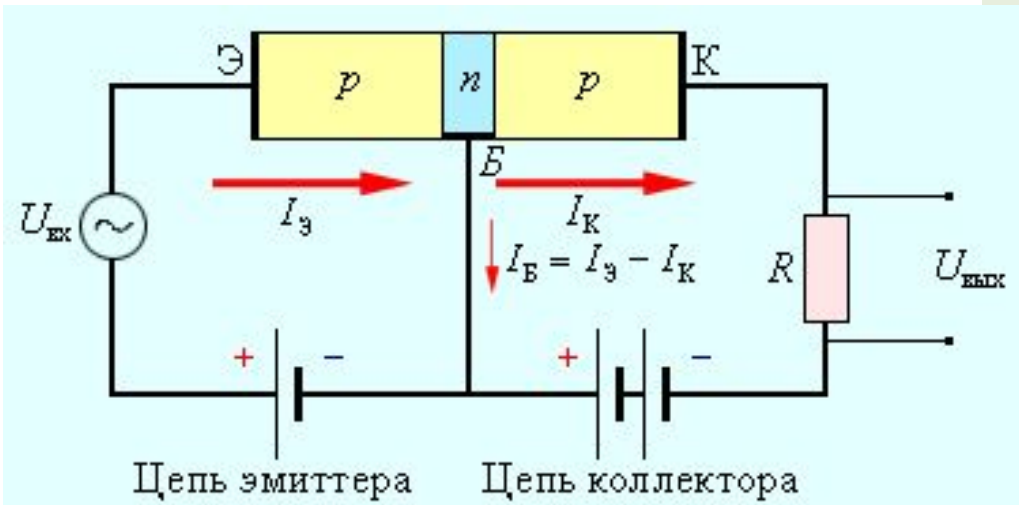
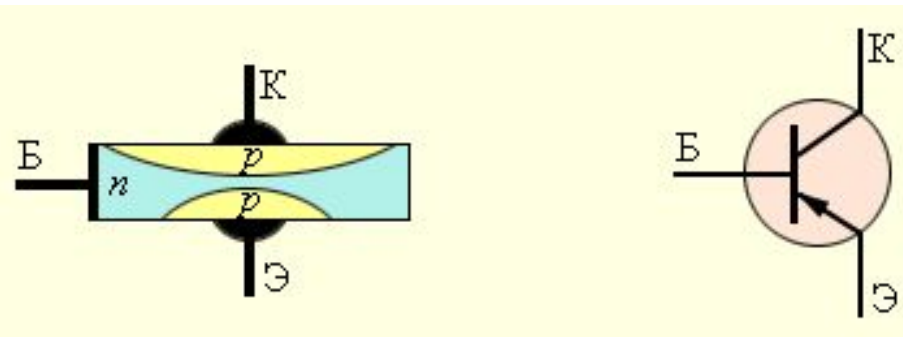
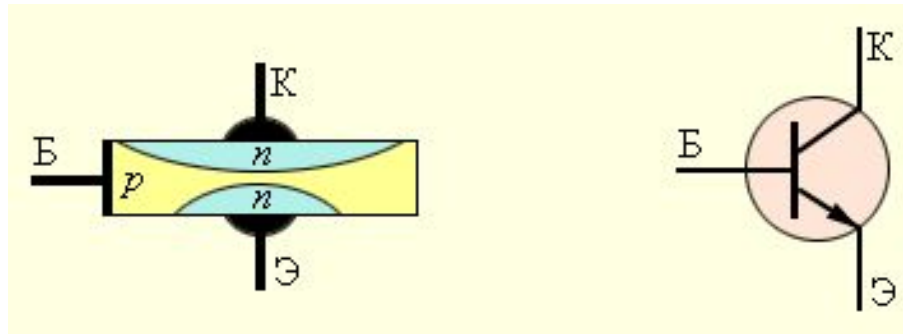


Схема образования электрического поля E на границе раздела p- и n-полупроводников

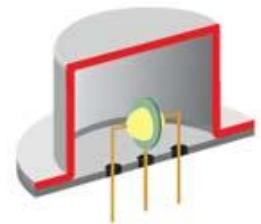


20. ТРАНЗИСТОР

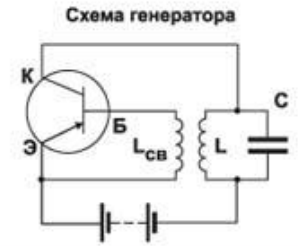
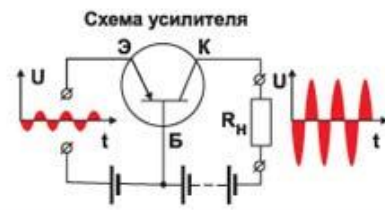
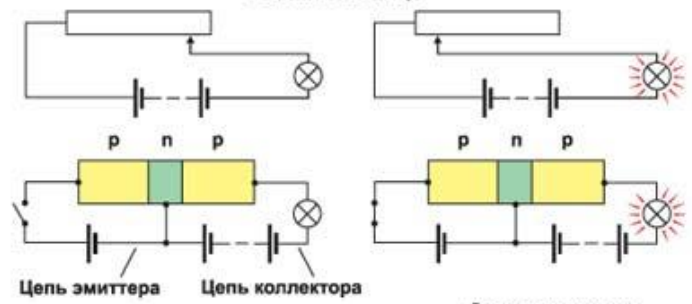


4 ТРАНЗИСТОР

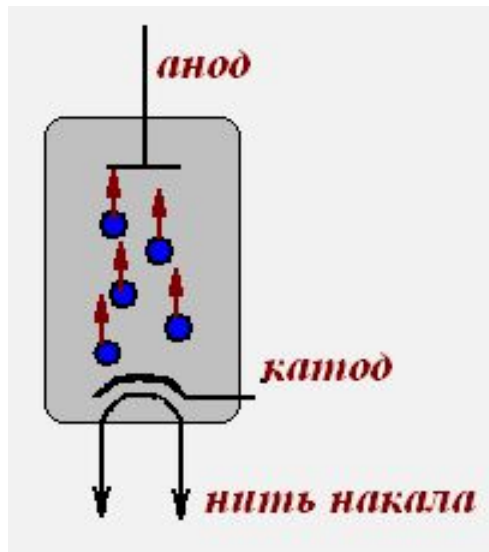
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ



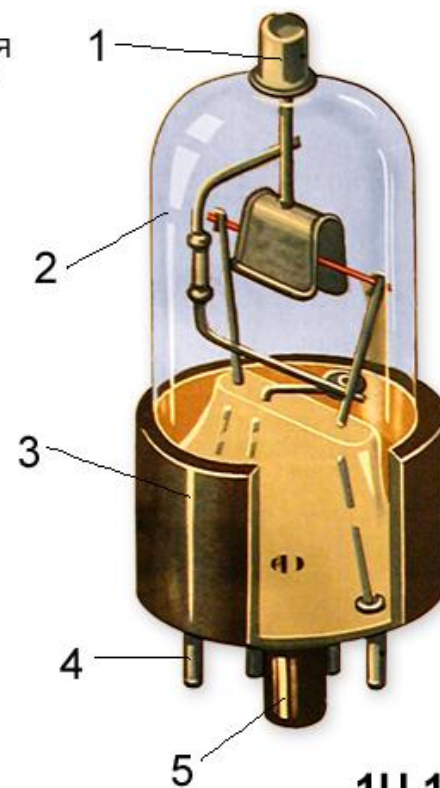
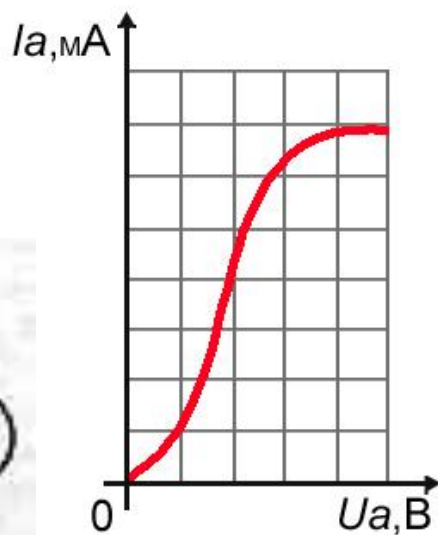
Схема, иллюстрирующая перераспределение напряжения в цепи коллектора



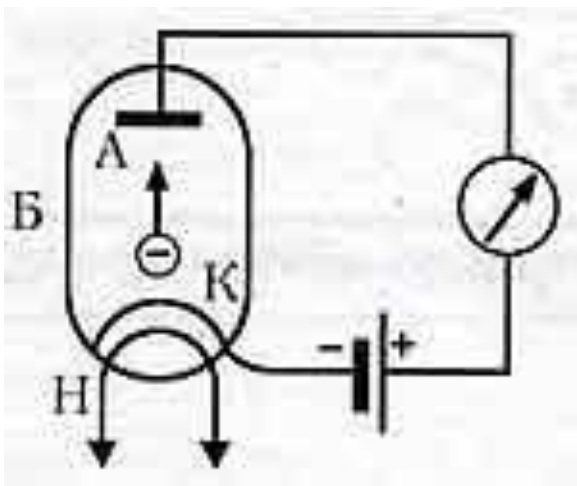
21. ВАКУУМНЫЙ ДИОД



ВАКУУМНЫЙ ДИОД



1Ц 1С

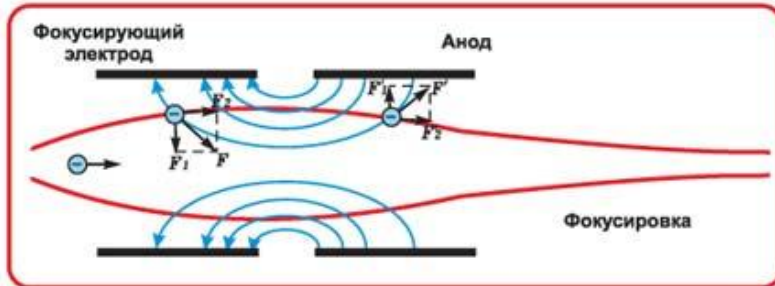
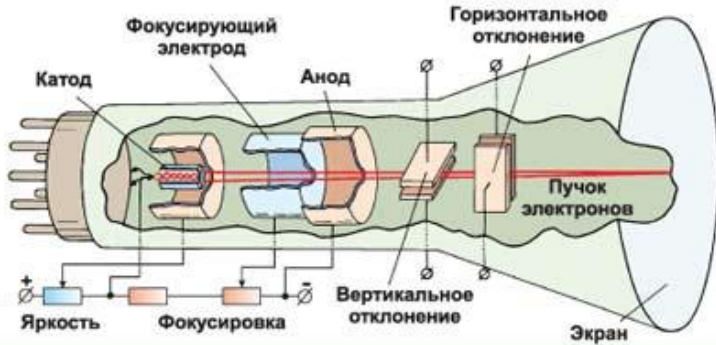


22. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

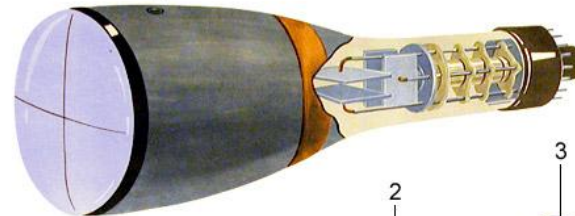
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА



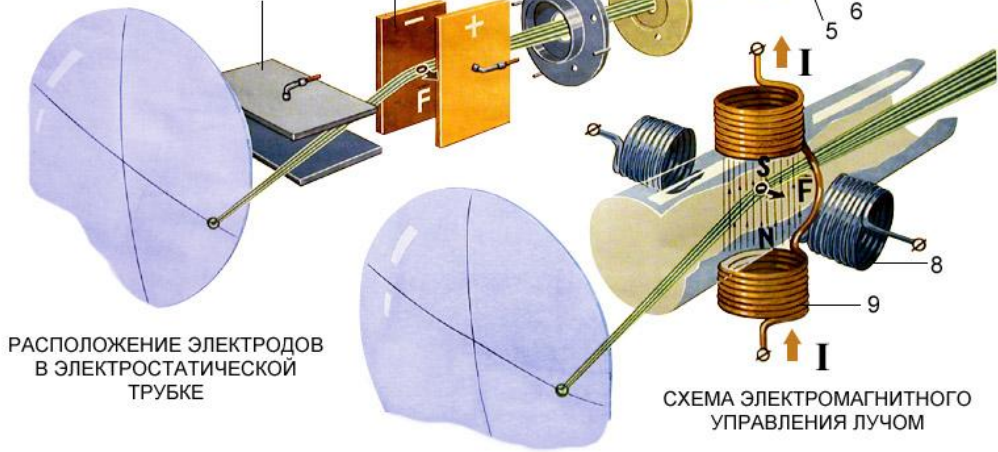
Трубка с магнитным управлением



ВНЕШНИЙ ВИД ТРУБКИ



ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА



РАСПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ТРУБКЕ

СХЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛУЧОМ