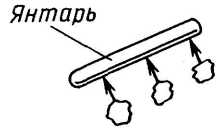


Электродинамика

Наука о свойствах и закономерностях поведения электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между зарядами, называется электродинамикой.

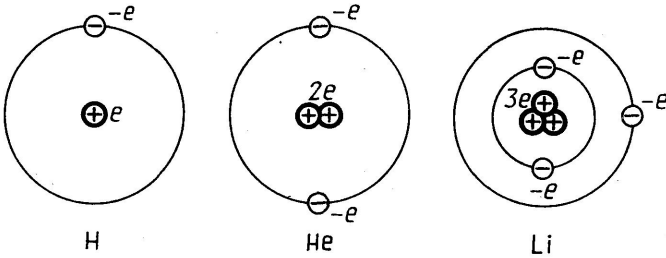
Электричество

В V в. до н. э. люди заметили, что пылинки притягиваются к натертому янтарю (от греческого «электрон» — электричество).



Строение атома

Атом — нейтральная частица. Он состоит из ядра и электронов. Число электронов равно числу протонов в ядре.



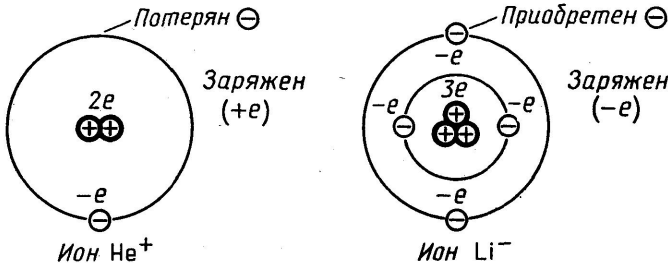
Электрон e — элементарная неделимая частица с отрицательным зарядом.

Заряд протона равен заряду электрона, но с противоположным знаком.

Тело всегда обладает массой, но заряд тела может быть равен 0.

Заряд тела «+»: не хватает e .

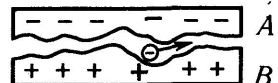
Заряд тела «-»: избыток e .

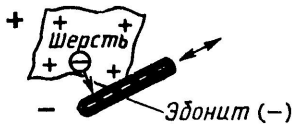
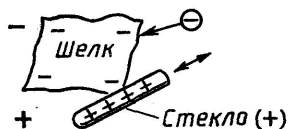


Электризация

Электризация трением

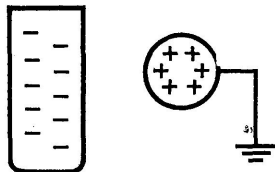
Электроны переходят от тела B к телу A.





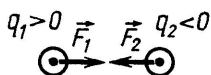
Электризация через влияние

Появляется индуцированный заряд на теле, соединенном с землей

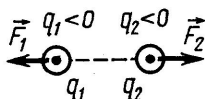


Взаимодействие зарядов

1. Электрометр заряжен отрицательно (листочки разошлись).
2. Поднесли стеклянную палочку — электрометр разрядился. Следовательно, палочка была заряжена положительно.



Разноименные

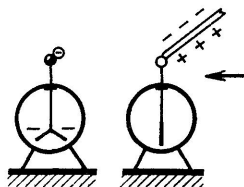


Одноименные

Физическая величина, определяющая электромагнитное взаимодействие, называется электрическим зарядом.

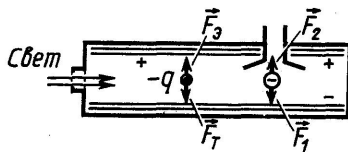
1. Электрометр зарядили отрицательно: листочки разошлись.

2. Поднесли стеклянную палочку: электрометр разрядился, следовательно, палочка была заряжена положительно.



Опыт Иоффе — Милликена

Определили, что $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.



Масса электрона

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

Любой заряд, больший элементарного, состоит из целого числа элементарных зарядов.

Закон сохранения электрического заряда

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

Выводы. 1. Электрические заряды существуют в двух видах.

2. Все электрические заряды кратны заряду e .

3. Алгебраическая сумма зарядов в изолированной системе постоянна.

4. Величина заряда не зависит от скорости движения частиц.

Применение электризации

Копировальные установки; очистка газа, сточных вод; учет при пайке микросхем и т. д.

ОК-17

Закон Кулона

1785 г. Установлен закон взаимодействия точечных зарядов.

Опыты Кулона

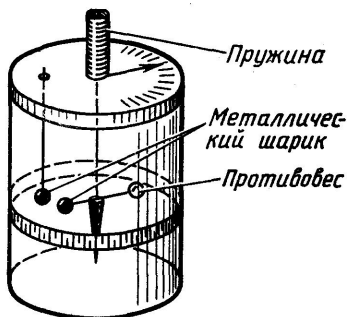
Проведя большое количество опытов, Кулон установил:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &\sim \frac{1}{R^2} \\ \vec{F} &\sim q_1 q_2 \end{aligned} \right\}$$

$$\vec{F} \sim \frac{|q_1| |q_2|}{R^2},$$

$$\vec{F} = k \frac{|q_1| |q_2|}{R^2},$$

$$k = \frac{FR^2}{q_1 q_2}.$$

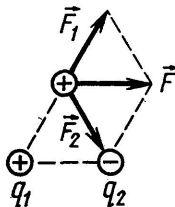
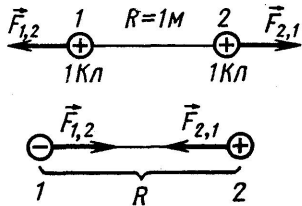


Выражается k в $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$,

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Кулоновская сила подчиняется III закону Ньютона: силы взаимодействия между зарядами равны по модулю и направлены противоположно друг другу вдоль прямой, соединяющей эти заряды.



Единица заряда — кулон (1 Кл). Это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока в 1 А.

Минимальный заряд, существующий в природе, — заряд электрона:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Электрическая постоянная (ϵ_0)

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2),$$

$$F = \frac{|q_1| |q_2|}{4\pi\epsilon_0 R^2}.$$

Эта запись закона Кулона в СИ для вакуума.

Диэлектрическая постоянная среды (ϵ)

Диэлектрическая постоянная ϵ характеризует электрические свойства среды. Для любой среды $\epsilon > 1$ и зависит от самой среды; показывает, во сколько раз сила взаимодействия точечных заряженных тел в вакууме больше их сил взаимодействия в среде:

$$\epsilon = \frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{сп}}}.$$

Закон Кулона для среды в СИ:

$$F = \frac{|q_1| |q_2|}{4\pi\epsilon_0 \epsilon R^2}.$$

ОК-18

Напряженность электрического поля

1. Теория близкого действия (М. Фарадей).
2. Теория дальнего действия (мгновенное действие на расстоянии).
3. Идею М. Фарадея подтвердил Дж. Максвелл:

$$t = \frac{AB}{c}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$



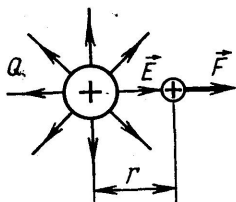
Электрическое поле

Особый вид материи, существующий независимо от нас, от наших знаний о нем, называется электрическим полем.

Свойства электрического поля

1. Действует на заряд с силой \vec{F} .
2. Порождается зарядами.
3. Способно совершать работу по перемещению заряда.

Напряженность \vec{E} — силовая характеристика электрического поля:



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

$$E = \frac{Qqk}{r^2q} = \frac{Q}{r^2} k,$$

где Q — заряд, создающий электрическое поле;

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

где $\epsilon = \frac{E_n}{E_{cp}}$ — диэлектрическая проницаемость вещества;

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{2\vec{F}}{2q} = \text{const},$$

где q — пробный заряд.

Единицы напряженности

Выражается E в Н/Кл.

Принцип суперпозиции полей

Заряд q пробный. Внесен в поле, созданное зарядами q_1 и q_2 .

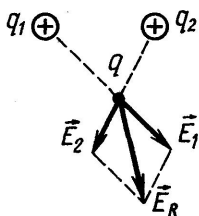
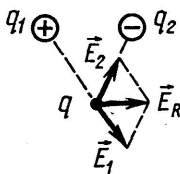
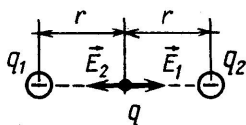
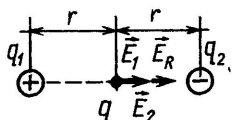
$$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

$$\vec{E}_R = 0, \quad q_1 = q_2,$$

$$r_1 = r_2,$$

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots,$$

$$\frac{\vec{F}_R}{q} = \frac{\vec{F}_1}{q} + \frac{\vec{F}_2}{q} + \dots,$$



$$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

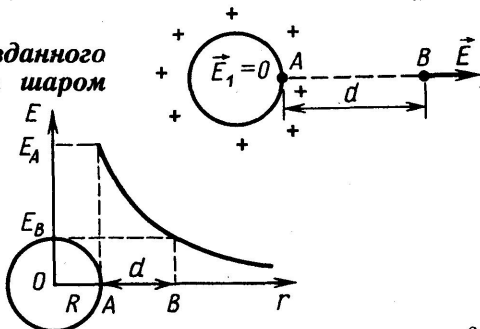
Напряженность поля, созданного заряженным металлическим шаром

1. $E_1 = 0$

2. $E_A = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 R^2}$

3. $E_B = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 (R+d)^2}$

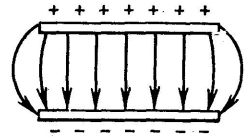
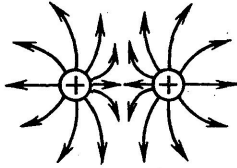
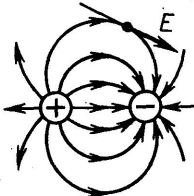
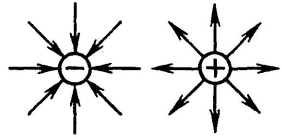
Зависимость E от r .



Графическое изображение электрических полей

Линии напряженности уединенного отрицательно заряженного шарика.

Линии напряженности уединенного положительно заряженного шарика.



Неоднородное поле

Однородное поле

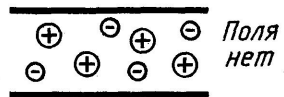
Линии напряженности электрического поля начинаются на «+» зарядах и заканчиваются на «-» зарядах.

Линией напряженности называется линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряженности \vec{E} .

Проводники в электростатическом поле

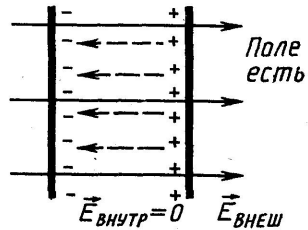
1. Свободные электроны совершают тепловые движения.

2. Электростатическое поле внутри проводника равно 0, так как $\vec{E}_{внутр}$ и $\vec{E}_{внешн}$ равны по модулю, но противоположно направлены.



Электростатическая защита (М. Фарадей, 1937)

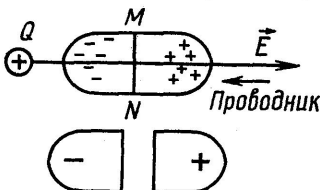
Радиоприемники в автомашинах находятся в металлических корпусах; металлические колпачки на электровакуумных лампах...



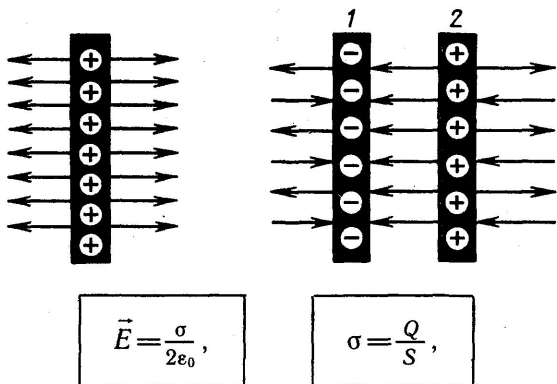
Электростатическая индукция

Если разделить пластину пополам вдоль линии MN, то обе половины окажутся заряженными разноименными зарядами:

$$|q_1| = |q_2|.$$



Электростатическое поле бесконечной проводящей плоскости



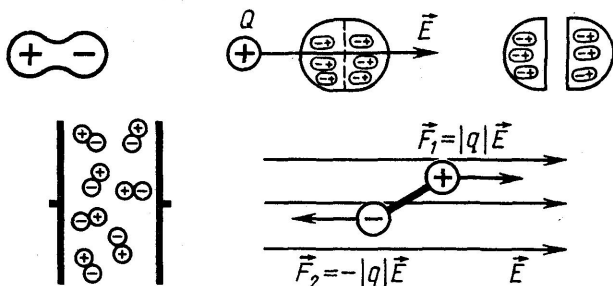
где σ — поверхностная плотность зарядов;

$$E_{1,2} = 2E = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 + \vec{E}_2 &= 0 \\ \vec{E}_1 - \vec{E}_2 &= 2\vec{E} \\ \vec{E}_1 + \vec{E}_2 &= 0 \end{aligned}$$

Диэлектрики в электростатическом поле

Диэлектрики: нет свободных зарядов, есть диполи.



Обозначим \vec{E} вакуума через \vec{E}_0 , тогда

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 + \vec{E}_p \\ E &= E_0 - E_p \end{aligned}$$

Диэлектрики бывают полярные (спирт, вода), неполярные (инертные газы, кислород).

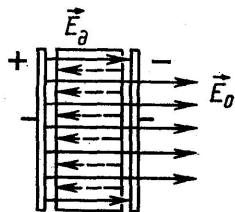
Диэлектрическая проницаемость среды (ϵ)

Парафин: $\epsilon = 2$.

Эбонит: $\epsilon = 4$.

Вода: $\epsilon = 81$.

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$



ОК-20

Работа электростатического поля

$$A = Fd = qEd, \quad A_1 = Fd_1 \cos \alpha,$$

но $d_1 \cos \alpha = d$.

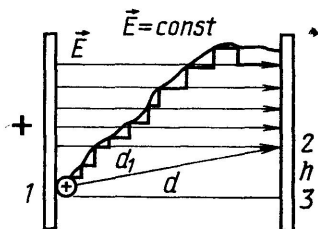
Следовательно,

$$A_{1,2,3,1} = A_{1,2} + A_{2,3} + A_{3,1},$$

$$A_{1,2,3,1} = \underbrace{Eqd_1 \cos \alpha}_A + \underbrace{Eqh \cos 90^\circ}_0 + \underbrace{Eqd \cos 180^\circ}_{-A}$$

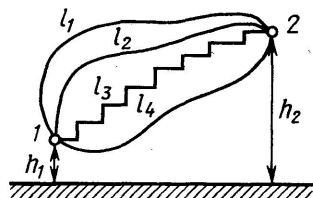
$$A_{1,2,3,1} = 0,$$

$$A = \Sigma \Delta A_i = -(W_2 - W_1) = -\Delta W,$$



т. е. работа при перемещении заряда между двумя точками в электростатическом поле не зависит от формы траектории, а зависит от положения этих точек.

Работа по замкнутой траектории равна нулю.



Электростатическое поле, как и гравитационное, потенциальное:

$$A = -mg(h_2 - h_1) = -\Delta W.$$

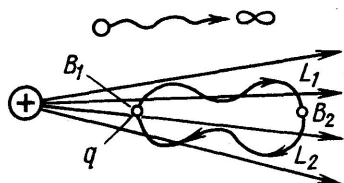
Потенциал

Потенциал электростатического поля — отношение потенциальной энергии заряда в поле к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W}{q} = \frac{2W}{2q} = \text{const},$$

$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ — следствие принципа суперпозиции полей.

Потенциал φ не зависит от q ; является энергетической характеристикой поля.



Работа поля по перемещению (+1) заряда из данной точки электрического поля в бесконечность характеризует потенциал в данной точке.

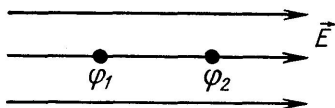
Выражается потенциал в вольтах:

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

Разность потенциалов

$$A = -(W_2 - W_1) = -(\varphi_2 - \varphi_1)q = -\Delta\varphi q,$$

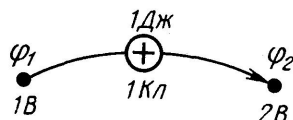
$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi = \frac{A}{q}.$$



Единица разности потенциалов

$$U = \frac{A}{q} = \frac{1\text{ Дж}}{1\text{ Кл}} = 1\text{ В.}$$

Связь между E и $\Delta\varphi$ 1В



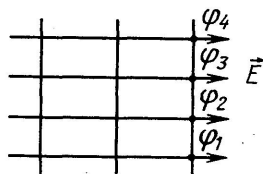
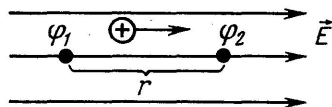
Напряжение — разность значений потенциала в начальной и конечной точках траектории.

Однородное поле

$$A = Eqr, \quad \left| \begin{array}{l} Eqr = Uq, \\ E = \frac{U}{r}, \end{array} \right.$$

$$A = Uq, \quad \left| \begin{array}{l} E = \frac{U}{r}, \\ E = -\frac{\Delta\varphi}{r} = \frac{U}{r}. \end{array} \right.$$

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{r} = \frac{U}{r}.$$



Эквипотенциальные поверхности

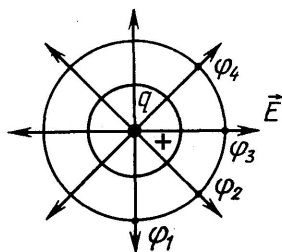
Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называют эквипотенциальной.

$$A = FS \cos \alpha,$$

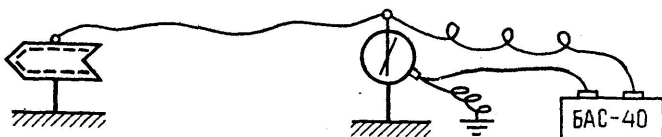
если $\alpha = 90^\circ$, то $A = 0$,

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4.$$

Силовые линии такой поверхности перпендикулярны.



Измерение электрического напряжения (разности потенциалов)

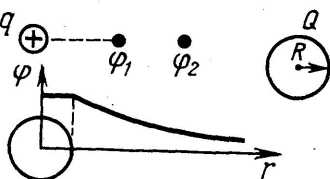


Между стержнем и корпусом — электрическое поле.
Измерение потенциала кондуктора
Измерение напряжения на гальваническом элементе
Электрометр дает бóльшую точность, чем вольтметр.

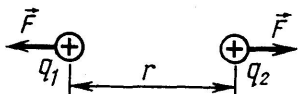
Потенциал заряженного шара

$$\Phi_{\text{ш}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$

Φ внутри шара = Φ на поверхности шара.



Потенциальная энергия взаимодействия зарядов



$$\Delta W = F \Delta r,$$

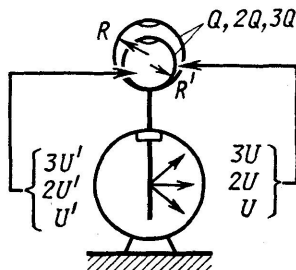
$$W = \frac{|q_1| |q_2|}{4\pi\epsilon_0 r}$$

OK-21

Емкость

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2Q}{2U} = \frac{3Q}{3U} = \text{const},$$

$$C' = \frac{Q}{U'} = \frac{2Q}{2U'} = \frac{3Q}{3U'} = \text{const}.$$



Емкость C не зависит от Q , U , вида материала; зависит от размеров проводника и среды.

Выражается C в фарадах: $1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$.

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф},$$

$$1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф},$$

$$1 \text{ пкФ} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Емкость шара

Известно:

$$U_{\text{ш}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R},$$

$$C = \frac{Q}{U_{\text{ш}}} = \frac{Q}{Q/4\pi\epsilon_0 R} = 4\pi\epsilon_0 R = \frac{R}{k}, \quad C \sim R.$$

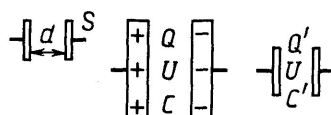
Емкость Земли = $\frac{6,4 \cdot 10^6 \text{ м}}{9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2} \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ Ф} = 700 \text{ мкФ}.$

Конденсатор

Простейший конденсатор состоит из двух проводников, разделенных диэлектриком.

Condensare — сгущение.

$$\sigma = \frac{Q}{S},$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon} = \frac{Q}{S \epsilon_0 \epsilon},$$


$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{Ed} = \frac{Q}{dQ/S\epsilon_0\epsilon},$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

$$S > S', \quad C > C', \quad Q > Q'.$$

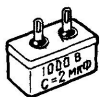
Виды конденсаторов



Воздушный



Бумажный



(высоковольтный)

(U велико)



Слюдяной



Электролитический

В электролитическом:

1. S небольшая, но d маленькое (слой окиси на ленте из алюминиевой фольги).

2. d состоит из 10—100 слоев молекул (d — расстояние между пластинами).

3. Следствие пп. 1 и 2: C большая.

Назначение конденсаторов

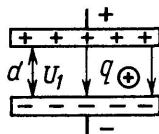
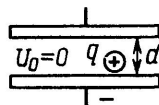
1. Накапливать на короткое время заряд или энергию для быстрого изменения потенциала.
2. Не пропускать постоянный ток.
3. В радиотехнике: колебательный контур, выпрямитель.
4. Фотовспышка.

Энергия электрического поля

Конденсатор накапливает электрическую энергию W .

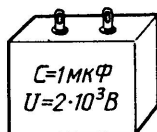
1. $A_1 = U_0 \Delta q = 0$.
2. $A_2 = U_1 \Delta q \neq 0$.
3. $A_k = \frac{A_2}{2}$, $A = W_k$,

$$W = \frac{Uq}{2}$$



4. Так как $C = \frac{q}{U}$, то $W = \frac{1}{2} qU = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{q^2}{2C}$,

$$W = \frac{q^2}{2C}$$



Пример. $W_k = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^{-6} \text{ Ф} (2 \cdot 10^3 \text{ В})^2 = 2 \text{ Дж}$.

Но мощность конденсатора при разрядке за 10^{-6} с равна:

$$N_{\text{э.п}} = \frac{A}{t} = \frac{2 \text{ Дж}}{10^{-6} \text{ с}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Вт,}$$

т. е. **заряженный конденсатор опасен для жизни!!!**

Плотность энергии (ω)

$$W_{\text{э.п}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{2d} (Ed)^2,$$

$$W_{\text{э.п}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2 Sd,$$

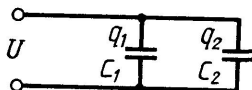
$$\omega = \frac{W_{\text{э.п}}}{V} = \frac{W_{\text{э.п}}}{Sd} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2 Sd}{Sd},$$

$$\omega = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$$

Соединение конденсаторов в батарею

Параллельное соединение

1. $q = q_1 + q_2$.
2. $U = U_1 = U_2$.
3. $\frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2}$, т. е. $\frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2}$.
4. $CU = C_1 U_1 + C_2 U_2$,

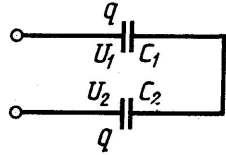


$$C = C_1 + C_2.$$

Если $C_1 = C_2 = \dots = C_n$, то $C = nC_1.$

Последовательное соединение

1. $U = U_1 + U_2.$
2. $q = q_1 = q_2.$
3. $C_1 U_1 = C_2 U_2$, т. е. $\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}.$
4. $\frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2},$



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

Если $C_1 = C_2 = \dots = C_n$, то $C = \frac{C_1}{n}.$

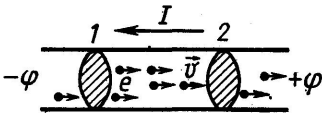
ОК-23

Электрический ток

Упорядоченное движение свободных электрических зарядов под действием электрического поля называется электрическим током.



Беспорядочное тепловое движение

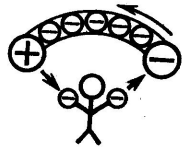


Упорядоченное движение электронов — электрический ток

Сторонние силы

Разделение зарядов связано с работой сторонних сил.

В источниках тока сторонние силы совершают работу по превращению какой-либо энергии в электрическую либо сторонних сил в энергию электрического поля.



Термопары преобразуют внутреннюю энергию в электрическую.

Гальванические элементы и аккумуляторы преобразуют химическую энергию в электрическую.

Фотоэлементы — световую в электрическую.

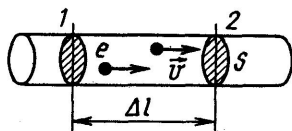
Природа работы сторонних сил — это любые виды энергии, кроме энергии электрического поля.

Действие тока

Наблюдают химическое, тепловое, магнитное действие тока.

Сила тока

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



Знаем:

$$\Delta Q = eN, \quad \Delta l = \bar{v}\Delta t, \quad N = nV, \quad V = S\Delta l,$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{eN}{\Delta t} = \frac{enV}{\Delta t} = \frac{enS\Delta l}{\Delta t} = \frac{enS\bar{v}\Delta t}{\Delta t} = enS\bar{v},$$

$$I = enS\bar{v},$$

$$\bar{v} = \frac{I}{enS},$$

$$\bar{v} \approx 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Плотность тока

$$\sigma = \frac{I}{S}$$

Условие существования электрического тока

1. Наличие свободных заряженных частиц.

2. Наличие электрического поля.

Таким образом,

1. Электрическое поле совершает работу по перемещению зарядов:

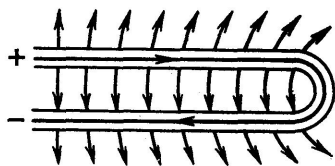
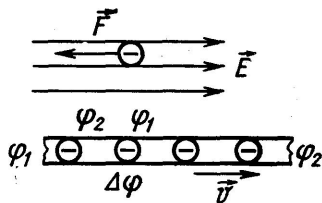
$$A = \Delta\varphi q.$$

2. Источник тока создает $\Delta\varphi$.

3. В замкнутой электрической цепи существует единое электромагнитное поле, созданное источником тока.

4. Стационарное электрическое поле существует и вокруг проводника, и внутри его.

Линии внешнего электрического поля направлены под углом к поверхности, а линии внутри проводника всегда параллельны его поверхности.

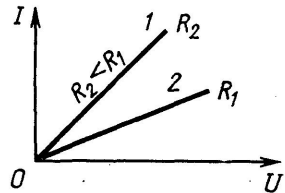
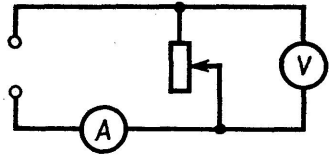


Закон Ома для участка цепи

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах проводника и обратно пропорциональна его сопротивлению (Г. Ом, 1787—1854).

$R = \text{const}$	$U = \text{const}$
$U - I$	$R - I$
$2U - 2I$	$2R - \frac{1}{2}I$
$3U - 3I$	$3R - \frac{1}{3}I$
$I \sim U$	$I \sim \frac{1}{R}$

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



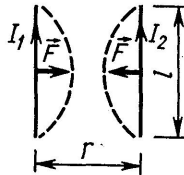
На графике видно, как зависит сила тока I от напряжения U при разных сопротивлениях R .

Единица силы тока

$$F = 2 \cdot 10^7 \text{ Н,}$$

$$l = 1 \text{ м,}$$

$$r = 1 \text{ м.}$$



За 1 А приняли силу тока, проходящего по двум параллельным бесконечно длинным проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии $r = 1$ м, если на каждый метр длины сила взаимодействия между проводниками равна $2 \cdot 10^7$ Н.

Электрическое сопротивление

Электроны тормозятся за счет взаимодействия с ионами кристаллической решетки, $I = \frac{U}{R}$,

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

но R не зависит от

U и I .

Единица электрического сопротивления

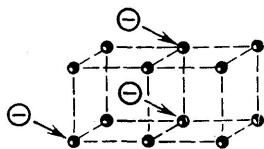
Электрическое сопротивление выражается в омах.

За сопротивление в 1 Ом приняли сопротивление проводника, на который подали разность потенциалов 1 В при силе тока 1 А:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}, \quad 1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}, \quad 1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом.}$$

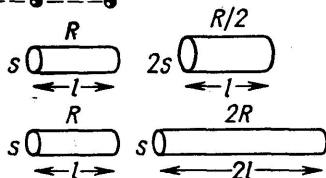
От чего же зависит R ?

$$\left. \begin{array}{l} R \sim l, \\ R \sim \frac{1}{S} \end{array} \right\} R = \frac{l}{S} \rho.$$



Удельное сопротивление

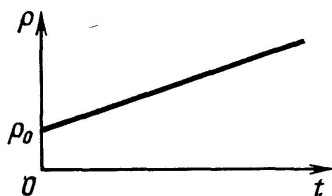
$$\rho = \frac{RS}{l}.$$



Выражается в $\frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Ом} \cdot \text{м}$. Если $\rho_{\text{меди}} = 0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, то значит: медный проводник длиной 1 м, площадью поперечного сечения 1 мм² имеет сопротивление 0,017 Ом.

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры

Интенсивность колебаний узлов кристаллической решетки увеличивается с ростом температуры. Следовательно, чем больше температура, тем больше сопротивление движению электронов: $R = R_0(1 + \alpha t)$. В металлах концентрация свободных электронов постоянная, поэтому



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

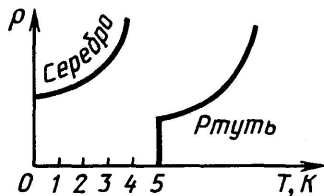
$$\alpha = \frac{\Delta \rho}{\rho_0 \Delta t},$$

где α выражается в К^{-1} .

Сверхпроводимость

Голландский физик Г. Камерлинг-Оннес (1911) открыл явление сверхпроводимости.

С понижением температуры сопротивление серебра убывает, но не бывает меньше определенного значения, даже при $T \approx 0 \text{ К}$. В то же время сопротивление ртути обращается в нуль при критической температуре: 4,1 К. Объяснение сверхпроводимости возможно только на основе квантовой теории. 1987 г. Высокотемпературные сверхпроводники (керамика) $\sim 100 \text{ К}$.



Соединения проводников-потребителей

1. Последовательное
2. Параллельное
3. Смешанное

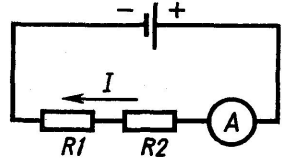
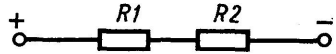
Последовательное соединение

1.

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

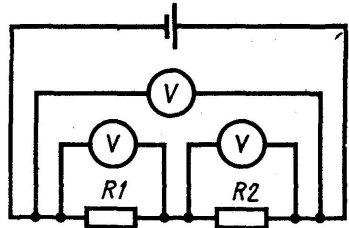
Через любое R пройдет за определенное время один и тот же заряд Q ,

$$I = I_1 = I_2.$$



$$\left. \begin{array}{l} 2. A = A_1 + A_2, \\ A = UQ \end{array} \right\} UQ = U_1Q + U_2Q,$$

$$U = U_1 + U_2.$$



$$3. I = \frac{U}{R}, U = IR.$$

Так как $U = U_1 + U_2$, то $IR = IR_1 + IR_2$,

$$R = R_1 + R_2.$$

Если $R_1 = R_2 = \dots = R_n$, то

$$R = Rn.$$

4. Так как $I_1 = I_2$, то из $I = \frac{U}{R}$ следует:

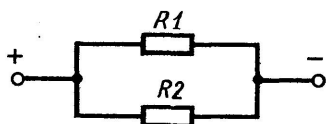
$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2},$$

или

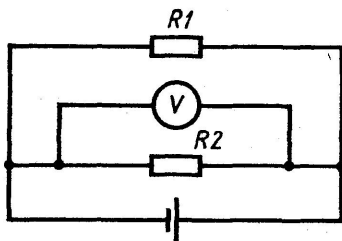
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Параллельное соединение

1. При параллельном соединении все потребители находятся под одним и тем же напряжением:

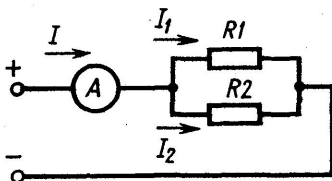


$$U_{06} = U_1 = U_2.$$



2. Так как $Q_{06} = Q_1 + Q_2$, то $I_{06}t = I_1t + I_2t$. Следовательно,

$$I_{06} = I_1 + I_2.$$



$$3. I = \frac{U}{R}, \quad \frac{U}{R_{06}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2},$$

$$\frac{1}{R_{06}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

$$R_{06} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Если $R_1 = R_2 = \dots = R_n$, то

$$R_{06} = \frac{R}{n}.$$

4. Так как $U_1 = U_2$, то из закона Ома следует:

$$U = IR,$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2,$$

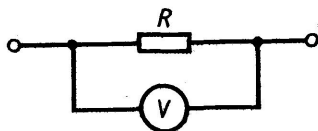
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

ОК-26

Средства измерения I и U

1. Напряжение измеряется вольтметром. Включается вольтметр параллельно резистору, на котором определяют напряжение.

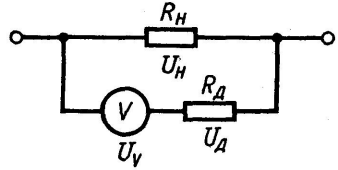
Чем $R_n > R$ измеряемого участка, тем точнее показания вольтметра.



Изменение цены деления вольтметра, или расширение его предела, проводят следующим образом:

$$U_H = U_B + U_D,$$

$$U_D = U_H - U_B.$$



Так как $I_B = I_D$, то $\frac{U_B}{R_B} = \frac{U_D}{R_D}$,

$$\frac{U_B}{R_B} = \frac{U_H - U_B}{R_D},$$

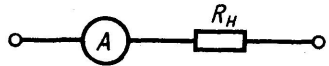
$$R_D = \frac{U_H - U_B}{U_B} R_B,$$

$$R_D = \left(\frac{U_H}{U_B} - 1 \right) R_B, \quad R_D = (n - 1) R_B.$$

Таким образом,

$$U_H = U_B \left(1 + \frac{R_D}{R_B} \right).$$

2. Сила тока измеряется амперметром. Включается амперметр последовательно с резистором, на котором определяют силу тока.



Чем $R_a < R$ измеряемого участка, тем точнее показания амперметра.

Всегда R_a должно быть $\ll R_n$.

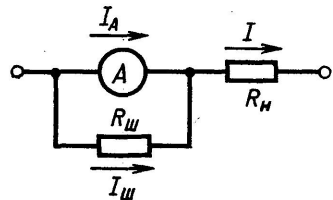
Изменение цены деления амперметра, или расширение его предела, проводят так: к амперметру параллельно присоединяют шунт и на основании законов параллельного соединения ведут расчеты:

$$I = I_a + I_{ш},$$

$$U_a = U_{ш},$$

$$I_a R_a = I_{ш} R_{ш}, \quad I_{ш} = I - I_a,$$

$$I_a R_a = (I - I_a) R_{ш},$$



$$R_{ш} = \frac{I_a}{I - I_a} R_a, \quad R_{ш} = \frac{R_a}{\frac{I}{I_a} - 1}, \quad I = I_a \left(\frac{R}{R_{ш}} + 1 \right).$$

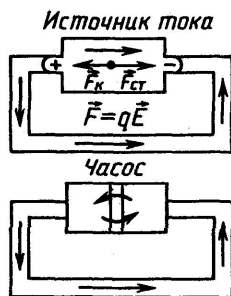
Таким образом,

$$R_{ш} = \frac{R_a}{n - 1}.$$

Электродвижущая сила

Любые силы, действующие на заряд, за исключением потенциальных сил электростатического происхождения (т. е. кулоновских) называют сторонними силами.

ЭДС — энергетическая характеристика источника. Это физическая величина, равная отношению работы, совершенной сторонними силами при перемещении электрического заряда по замкнутой цепи, к этому заряду:



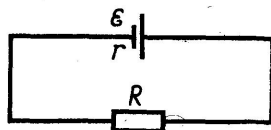
$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$$

Выражается в вольтах: $1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$

Закон Ома для полной цепи

$A_{ст} = I\mathcal{E}\Delta t$ — работа сторонних сил, так как $I = qt$,
 $A_{ст} = I^2Rt + I^2rt$ — полная работа сторонних сил,
 где IR — U внешнее;
 Ir — U внутреннее.

$$\left. \begin{aligned} I\mathcal{E}t &= I^2Rt + I^2rt, \\ \mathcal{E} &= IR + Ir \end{aligned} \right\}$$



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad \text{— закон Ома.}$$

Если $R \rightarrow \infty$, то $U \rightarrow \mathcal{E}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{высокоомный вольтметр} \\ \text{разомкнута внешняя цепь} \end{array} \right.$

Если R растет, то I уменьшается.

Измеряют \mathcal{E} высокоомным вольтметром при разомкнутой внешней цепи.

На внешнем участке цепи: $A_1 = U_1Q$

На внутреннем участке цепи: $A_2 = U_2Q$.

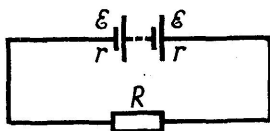
$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2, \\ \mathcal{E}Q &= U_1Q + U_2Q, \end{aligned}$$

$$\mathcal{E} = U_1 + U_2.$$

Соединение источников тока

Последовательное

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 2\mathcal{E}, \\ \mathcal{E}_1 &= \mathcal{E}_2, \\ I &= \frac{2\mathcal{E}}{R+2r}. \end{aligned}$$



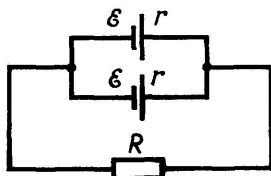
Если n — количество источников, то

$$I = \frac{\mathcal{E}n}{R+rn}.$$

Параллельное

$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$ при условии $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$,

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{2}},$$

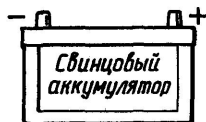


$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}, \quad I = \frac{\mathcal{E}n}{Rn+r}.$$

Короткое замыкание

$$I_k = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

r велико; КБС не боится короткого замыкания. Короткое замыкание опасно при малом r .



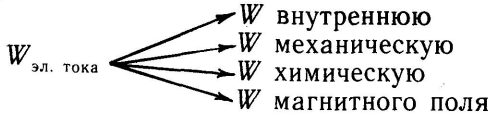
КПД электрической цепи

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_3} \cdot 100\% = \frac{IU}{I\mathcal{E}} \cdot 100\% = \frac{I^2 R \cdot 100\%}{I^2 (R+r)},$$

$$\eta = \frac{R \cdot 100\%}{R+r},$$

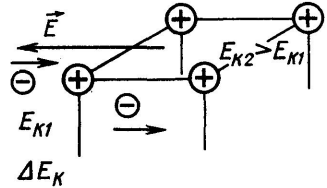
$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} \cdot 100\%.$$

Действие электрического тока



Нагревание проводников током. Закон Джоуля — Ленца

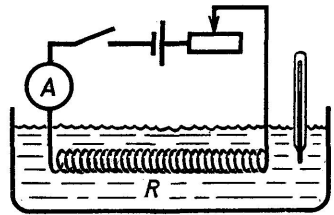
Так как $\Delta E_K \sim \Delta T$, проводник нагревается.



Дж. Джоуль (1841—1843) }
 Э. Х. Ленц (1842—1843) }

независимо друг от друга экспериментально установили:

$$Q = I^2 R t.$$



Работа электрического тока

$$A = \Delta \varphi q = Uq = IRq.$$

Так как $q = I \Delta t$, то

$$A = I^2 R \Delta t,$$

$$A = \frac{I^2 U}{I} \Delta t = IU \Delta t,$$

$$A = \left(\frac{U}{R}\right)^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

Мощность электрического тока (P)

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

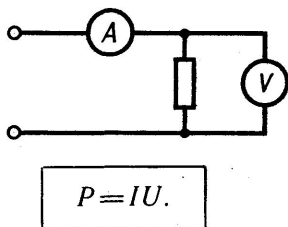
$$P = \frac{Uq}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R},$$

$$I = \frac{q}{t}, U = IR, I = \frac{U}{R}.$$

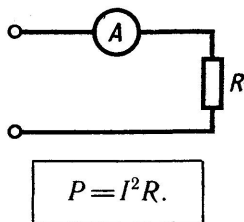
* Измерение мощности

1. Косвенный метод измерения

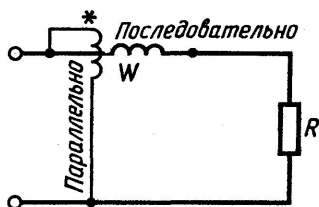
Использование амперметра и вольтметра:



Использование амперметра и известного сопротивления:



2. Измерение ваттметром (шкала проградуирована в ваттах)



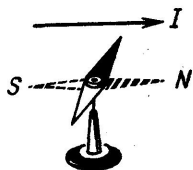
ОК-29

Магнитное действие электрического тока

1820 г. Х. Эрстед — датский физик, открыл магнитное действие тока.

1. Магнитное поле порождается током, т. е. движущимися электрическими зарядами.

2. Магнитное поле обнаруживается по действию на магнитную стрелку.

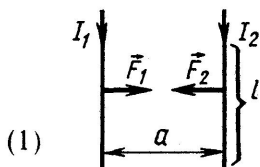
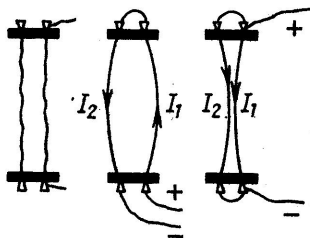


1820 г. А. Ампер — французский ученый, открыл механическое взаимодействие токов и установил закон этого взаимодействия.

Для двух параллельных бесконечно длинных проводников Ампер установил:

$$F \sim I_1, F \sim I_2, F \sim \frac{1}{a}, F \sim l,$$

$$F = k \frac{I_1 I_2}{a} l,$$



где k — коэффициент пропорциональности:

$$k = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2.$$

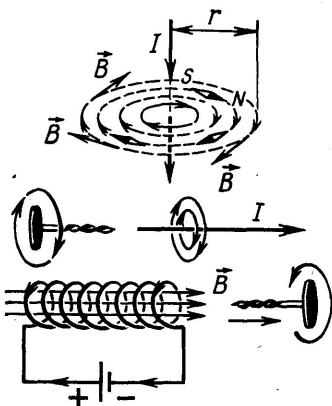
Вектор магнитной индукции (\vec{B})

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции.

Направление вектора \vec{B}

Оно совпадает с направлением магнитной стрелки от южного полюса S к северному N .

Направление этого вектора для поля прямого проводника с током и соленоида можно определить по правилу буравчика.



Модуль вектора \vec{B}

Магнитная индукция \vec{B} зависит от I и r , где r — расстояние от проводника с током до исследуемой точки, т. е.

$$B = \frac{I}{r} k,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Подставляя эту формулу в уравнение (1), получим

$$F = IBl.$$

Отсюда

$$B = \frac{F}{Il}.$$

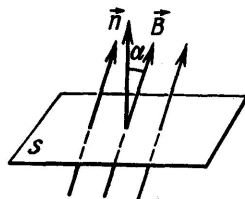
Таким образом, модуль вектора \vec{B} есть отношение максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на участок проводника с током, к произведению силы тока на длину этого участка.

Выражается магнитная индукция в теслах:

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}.$$

Магнитный поток

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$



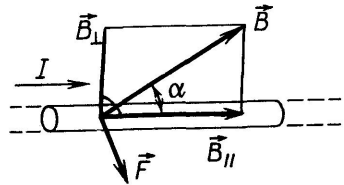
$B \cos \alpha$ представляет собой проекцию вектора \vec{B} на нормаль к плоскости контура.

Выражается магнитный поток в веберах.

Так как $\Phi = B_n S$, то $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

Действие магнитного поля на проводник с током

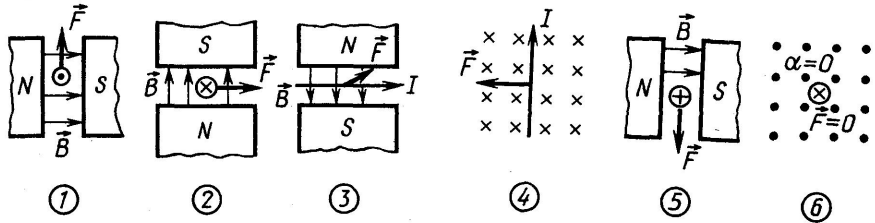
Сила действия однородного магнитного поля на проводник с током прямо пропорциональна силе тока, длине проводника, модулю вектора индукции магнитного поля, синусу угла между вектором индукции магнитного поля и проводником:



$$F = IBl \sin \alpha \quad \text{— закон Ампера.}$$

Направление силы Ампера (правило левой руки)

Если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная составляющая вектора \vec{B} входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление \vec{F} , действующей на проводник с током.



Действие магнитного поля на движущийся заряд

Сила, действующая на заряженную движущуюся частицу в магнитном поле, называется силой Лоренца:

$$F_{\text{Л}} = \frac{F_A}{N} = \frac{I \Delta l B \sin \alpha}{nV}$$

Так как $I = qnvS$, $V = \Delta l S$, то

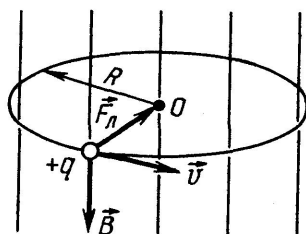
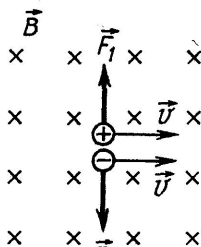
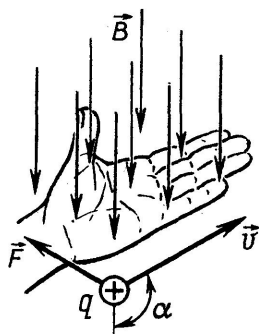
$$F_{\text{Л}} = \frac{qnvS \Delta l B \sin \alpha}{n \Delta l S}$$

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha.$$

Направление силы Лоренца (правило левой руки)

Направление $\vec{F}_{\text{Л}}$ определяется по правилу левой руки; $\vec{F}_{\text{Л}} \perp$ векторам \vec{B} и \vec{v} .

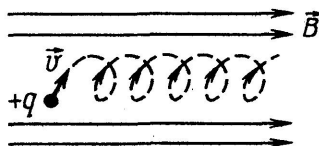
Если вектор \vec{v} частицы перпендикулярен вектору \vec{B} , то частица



описывает траекторию в виде окружности: $F = ma$, $F = F_L$,
 $qvB = \frac{mv^2}{R}$, $R = \frac{mv}{qB}$.

Период обращения частицы в магнитном поле:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$



Если вектор скорости \vec{v} частицы неперпендикулярен \vec{B} , то частица описывает траекторию в виде винтовой линии.

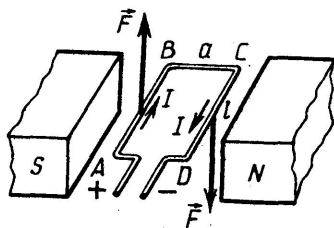
ОК-31

Действие магнитного поля на рамку с током

1. Направление \vec{F} — по правилу левой руки.

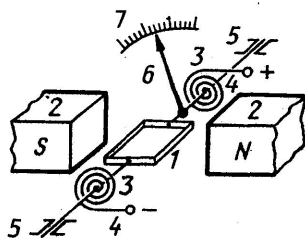
2. $F = BIl \sin \alpha$.

3. $M = Fa$.



Устройство электроизмерительных приборов

1. Магнитоэлектрическая система:
 1 — рамка с током; 2 — постоянный магнит; 3 — спиральные пружины; 4 — клеммы; 5 — подшипники и ось; 6 — стрелка; 7 — шкала (равномерная)

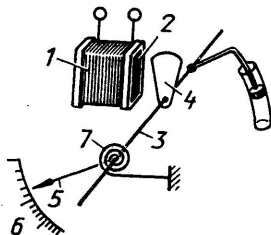


Принцип действия: взаимодействие рамки с током и поля магнита.

Угол поворота рамки и стрелки $\sim I$.

2. Электромагнитная система: 1 — неподвижная катушка; 2 — щель (магнитное поле); 3 — ось с подшипниками; 4 — сердечник; 5 — стрелка; 6 — шкала; 7 — спиральная пружина

Принцип действия: взаимодействие магнитного поля катушки со стальным сердечником, где $F_{\text{маг}} \sim I$.

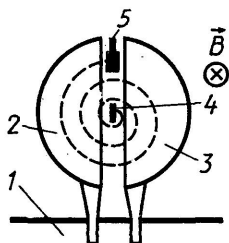


Использование силы Лоренца

В циклических ускорителях: 1 — вакуумная камера; 2—3 — дуанты; 4 — источник ионов; 5 — мишень.

В циклотроне магнитное поле управляет движением иона.

Период обращения частицы в циклотроне:



$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{Bq},$$

где T не зависит от R и v .

Схема действия масс-спектрографа

Для выделения частиц с одинаковой скоростью используют взаимно перпендикулярные магнитные и электрические поля:

$$F = ma,$$

$$F = F_{\text{л}},$$

$$\frac{mv^2}{R} = Bqv,$$

$$m = \frac{BqvR}{v^2},$$

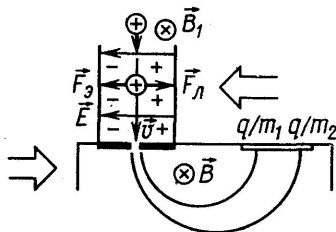
$$m = \frac{BqR}{v},$$

$$F_{\text{л}} = F_{\text{э}},$$

$$B_1 qv = E q,$$

$$v = \frac{E}{B_1},$$

$$m = \frac{BqR}{E} B_1.$$

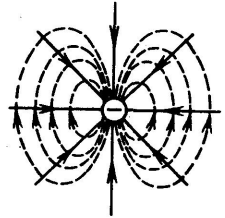


Магнитная проницаемость

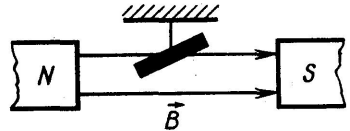
Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в одной среде $>$ или $<$ индукции магнитного поля в вакууме, называется магнитной проницаемостью:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

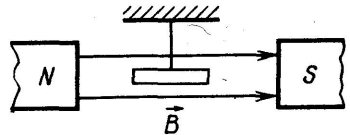
Электрон создает магнитное поле за счет орбитального движения вокруг атомного ядра, а также вследствие собственного вращения.

**Магнитные свойства вещества**

1. **Диамагнетики** — μ чуть < 1 :
 $\mu_{\text{висмута}} = 0,9998$ (свинец, цинк, азот и др.).



2. **Парамагнетики** — μ чуть > 1 :
 $\mu_{\text{алюминия}} = 1,000023$ (кислород, никель и др.).



3. **Ферромагнетики** — $\mu \gg 1$: $\mu_{\text{стали}} = 8 \cdot 10^3$ (железо, никель, кобальт и их сплавы). Сплав железа с никелем: $\mu = 2,5 \cdot 10^5$.

Свойства ферромагнетиков

1. Обладают остаточным магнетизмом.
2. μ зависит от индукции внешнего магнитного поля.
3. Температура, при которой исчезают ферромагнитные свойства, называется точкой Кюри.

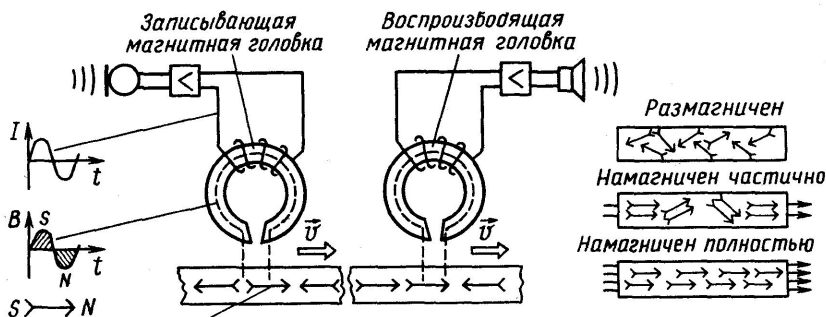
Применение ферромагнетиков в технике

Ротаторы генераторов и электродвигателей; сердечники трансформаторов, электромагнитных реле; в электронно-вычислительных машинах (ЭВМ), телефонах, магнитофонах, на магнитных лентах.

Магнитная запись и воспроизведение звука

Запись сигналов

Воспроизведение сигналов



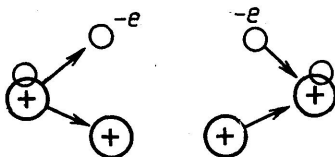
ОК-33

Электрическая проводимость различных сред

Газы

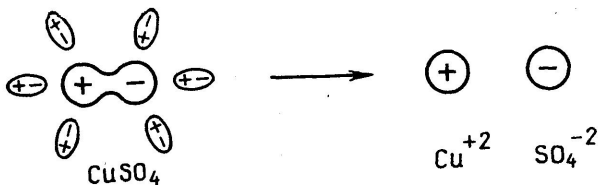
Электронно-ионная

Если $\frac{mv^2}{2} \geq W_{\text{связи}}$



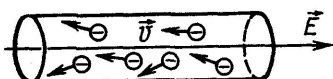
Электролиты

Ионная



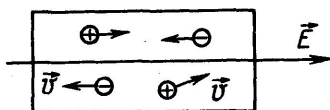
Металлы

Электронная



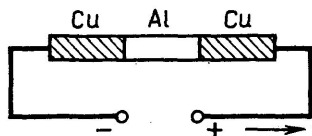
Полупроводники

Электронно-дырочная



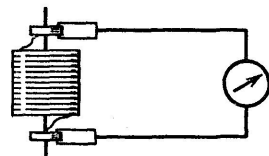
Природа электрического тока в металлах

Опыт К. Рикке: пропускал ток в сотни ампер в течение длительного времени. Ожидал: в алюминии появится медь. Результат: отрицательный, т. е. ток не является направленным движением ионов.



1913 г. — Мандельштам — Папалекси } Опыты
 1916 г. — Стюарт — Толмен

Длина $l_{\text{провода}} = 500$ м (в катушке). Катушка вращалась с $v = 500$ м/с; при резком торможении свободные частицы двигались по инерции. Следовательно,



$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} = \frac{Fl}{q}$$

Электронная теория металлов (П. Друзе)

1. Свободные электроны в металлах ведут себя как молекулы идеального газа, но $v_e \gg v_{\text{мол. газа}}$: $v_e = 10^5$ м/с.
2. Движение свободных электронов в металлах подчиняется законам Ньютона.
3. Свободные электроны в процессе хаотичного движения сталкиваются преимущественно с ионами кристаллической решетки.
4. Двигаясь до следующего столкновения с ионами, электроны ускоряются электрическим полем и приобретают кинетическую энергию E_k .

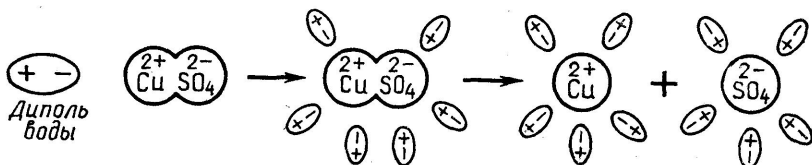
Построить удовлетворительную количественную теорию движения электронов в металле на основе законов классической механики невозможно.

ОК-34

Природа электрического тока в растворах и расплавах электролитов

Электролиты — жидкие проводники, в которых подвижными носителями зарядов являются ионы.

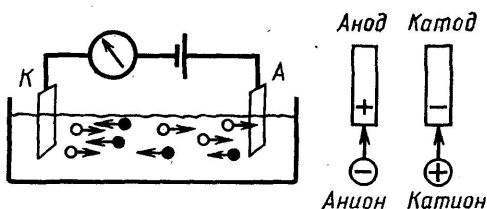
Электролитическая диссоциация



Явление электролиза

Интенсивность электролитической диссоциации зависит:

1. От температуры раствора.
2. От концентрации раствора.

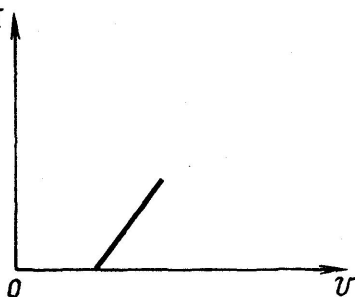


3. От рода раствора (его ди-электрической проницаемости).

Вольт-амперная характеристика для электролитов.

За счет явления поляризации график смещен.

Ионная проводимость: прохождение тока связано с переносом вещества.



Сопротивление растворов электролитов

$$I \sim \frac{1}{l}, I \sim S.$$

Уменьшается R с повышением температуры.

Справедлив закон Ома при неизменной концентрации раствора и температуры.

Закон электролиза Фарадея

При электролизе на электродах происходит выделение вещества:

$$m = m_{oi} N_i, \quad m_{oi} = \frac{M}{N_A}, \quad \text{где } M \text{ — молярная масса;}$$

n — валентность;

$$N_i = \frac{\Delta q}{q_{oi}} = \frac{I \Delta t}{q_{oi}}, \quad q_{oi} = ne, \quad \text{где } N_i \text{ — число ионов, достигших электрода.}$$

Таким образом,

$$m = \frac{M}{neN_A} I \Delta t, \quad \text{но } \frac{M}{neN_A} = \text{const} = k \quad \text{— электрохимический эквивалент}$$

и зависит от вещества.

Следовательно,

$$\boxed{m = k I \Delta t}, \quad \boxed{m = \frac{M}{n} \frac{1}{eN_A} I \Delta t},$$

где $eN_A = F$ — число Фарадея: $F = 9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль. Для выделения 1 моль одновалентного вещества необходимо $9,65 \cdot 10^4$ Кл.

$$\boxed{m = \frac{M}{n} \frac{1}{F} I \Delta t.}$$

Определение заряда электрона

$$m = \frac{M}{neN_A} I \Delta t,$$

$$e = \frac{M}{mnN_A} I \Delta t.$$

Применение электролиза

1. В гальваностегии (никелирование, серебрение).
2. В гальванопластике (изготовление копий); 1838 г., Б. С. Якоби.
3. Электронатирание.
4. Промышленный способ получения кислорода и водорода.
5. Очистка металлов, полученных при выплавке из руды, от посторонних примесей.
6. Электрополировка поверхностей.

ОК-35

Электрический ток в газах

1. Газы в обычных условиях — диэлектрики. Воздух используют в технике как изолятор:

- а) в линиях электропередач;
- б) между обкладками воздушных конденсаторов;
- в) в контактах выключателей.

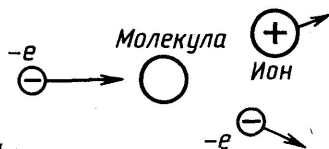
2. При определенных условиях газы — проводники: молния, электрическая искра, дуга при сварке.

Процесс протекания тока через газ называется газовым разрядом.

Ионизация газов

Ионизацию вызывают:

1. Высокая температура.
2. Ультрафиолетовые лучи.
3. Рентгеновские лучи, α -лучи и т. д.



Ионизация осуществляется при условии: $eE\lambda > W$ связи, где λ — длина свободного пробега заряженных частиц.

Рекомбинация



При постоянной температуре наступает динамическое равновесие:

$$N_i = N_p$$

Несамостоятельный и самостоятельный разряды

1. Первичная ионизация идет за счет внешних воздействий (несамостоятельный разряд).

2. Вторичная ионизация идет за счет неупругого соударения электрона с атомом (самостоятельный разряд).

График:

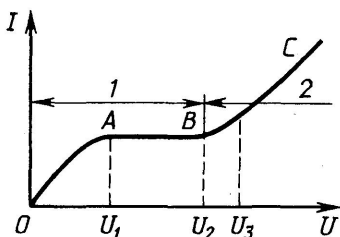
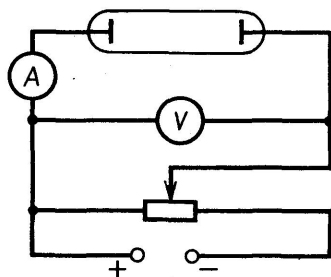
OA — только часть заряженных частиц доходит до электродов, часть рекомбинирует;

AB — ток почти не увеличивается (ток насыщения);

$$N_{\text{тока}} = N_{\text{иона}} \text{ за } t,$$

$I_n = qN_i V$, где q — заряд иона; N_i — число пар ионизованных ионов за единицу времени в единице объема V ;

BC — самостоятельный разряд.



Типы самостоятельного разряда. Техническое применение

Глеющий разряд

Применяется в газосветных трубках, неоновых лампах, цифровых индикаторах, лампах дневного света, ртутных лампах низкого давления.



Коронный разряд

$$(E = 3\,000\,000 \text{ В/м})$$

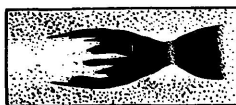
Используют в электрофильтрах для очистки газов от примесей твердых частиц. Отрицательное явление: вызывает утечку энергии на высоковольтных линиях.

$$Ee\lambda \geq A_n$$

где A_n — работа по ионизации газа.

Дуговой разряд

Применяется в ртутных лампах высокого давления, источниках света, при сварке металлов, в электроплавильных печах, при электролизе расплавов, в электропечах.



Искровой разряд

Этот разряд длится тысячные доли секунды при высоком напряжении.

Применяется при обработке металлов.

Плазма

Частично или полностью ионизованный газ ($N^+ = N^-$) называется плазмой.

Наиболее распространенное состояние вещества в природе:

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

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

3. При T порядка $20 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^3$ К любое вещество представляет собой полностью ионизованную плазму.

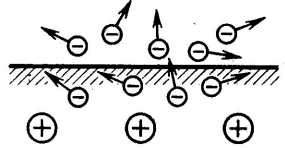
ОК-36

Электрический ток в вакууме

Для существования электрического тока в вакууме нужно искусственно ввести в это пространство свободные электроны (с помощью эмиссионных явлений).

Термоэлектронная эмиссия

Процесс испускания электронов нагретыми металлами называется термоэлектронной эмиссией.



Интенсивность термоэлектронной эмиссии зависит от площади S катода, температуры нагрева металла и свойств вещества.

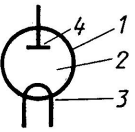
Если $\frac{mv^2}{2} \geq$ энергии связи, то происходит термоэлектронная эмиссия.

Диод

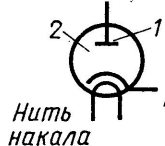
Двухэлектродная лампа:

1. Баллон — стекло или керамика.
2. Вакуум: $10^{-6} - 10^{-7}$ мм рт. ст.
3. Катод — нить накала.
4. Анод — круглый или овальный цилиндр.

Катод: в виде вертикального металлического цилиндра, покрытого слоем оксидов щелочноземельных металлов.

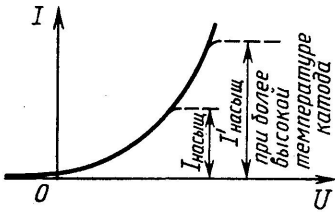


Катод прямого накала

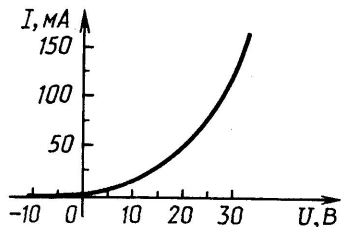


Катод косвенного накала

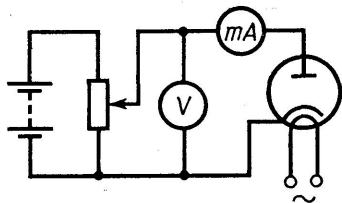
Для катода прямого накала



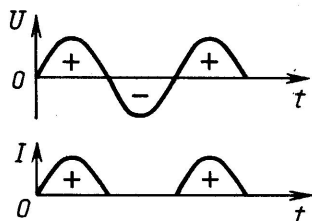
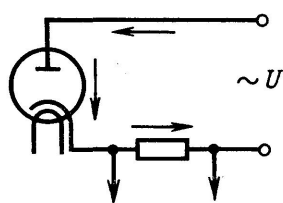
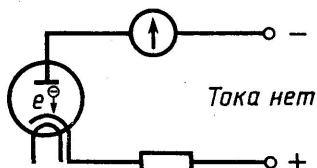
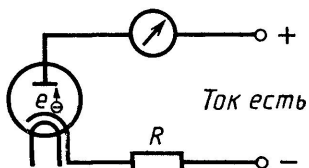
Для катода косвенного накала



Вольт-амперные
характеристики
диода



Свойство диода



Основное свойство диода: пропускает ток в одном направлении.

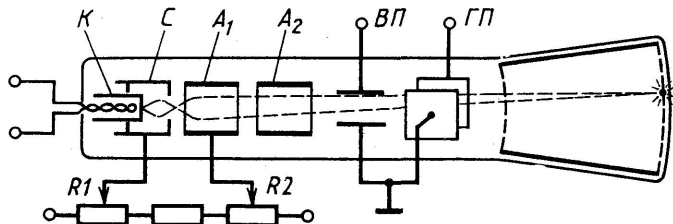
Это свойство используется для выпрямления переменного тока.

Ток существует, если на аноде — положительный потенциал (+φ); отсутствует, если на аноде — отрицательный потенциал (-φ).

Свойства электронных пучков

1. Отклоняются в электрическом и магнитном полях.
2. Обладают кинетической энергией.
3. Вызывают свечение веществ, нагрев металла, рентгеновское излучение.

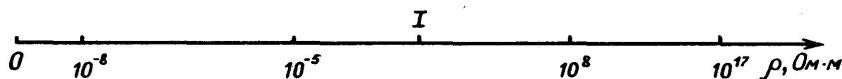
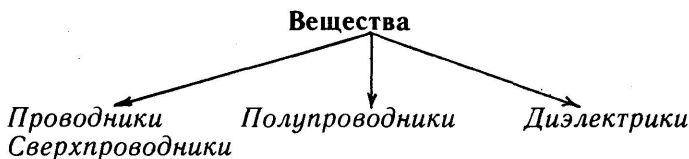
Электронно-лучевая трубка



Основной частью осциллографа и телевизора является электронно-лучевая трубка:

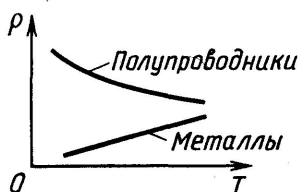
- $R1$ — регулирует интенсивность электронного пучка (яркость);
- $R2$ — фокусирует луч на экране;
- K — катод;
- C — сетка или модулятор;
- A_1, A_2 — аноды;
- $ВП, ГП$ — управляющие пластины

ОК-37 Электрический ток в полупроводниках



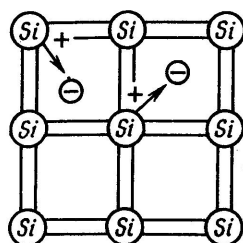
Вещества, удельное сопротивление которых убывает с повышением температуры, называются полупроводниками.

Имеют кристаллическую решетку: Ge, Si, Те и т. д.



Чистые полупроводники

Каждый атом имеет четыре соседа, с которыми связан ковалентными связями. При низкой температуре электроны связаны с атомами; свободных носителей заряда нет. При увеличении температуры энергия электронов увеличивается и они рвут связи, а на их месте образуется положительная дырка.



Собственная проводимость называется электронно-дырочной:

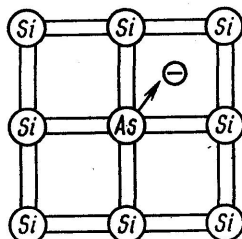
$$N_- = N_+$$

Примесная проводимость

Донорная (электронная) n -типа ($Si + As$)

As имеет 5 электронов. Один не участвует в образовании ковалентной связи. Один атом дает один свободный электрон:

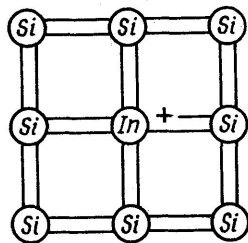
$$N_- \gg N_+$$



Акцепторная (дырочная) p -типа ($\text{Si} + \text{In}$)

In имеет 3 электрона. На месте одной из ковалентных связей образуется положительная дырка. Один атом дает одну дырку:

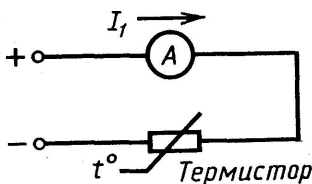
$$N_+ \gg N_-.$$



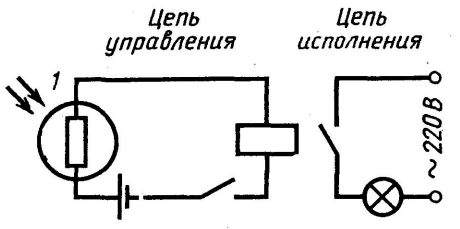
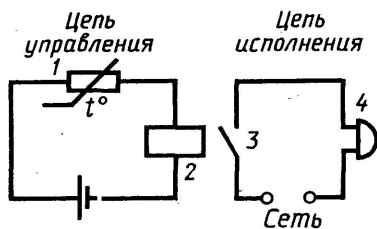
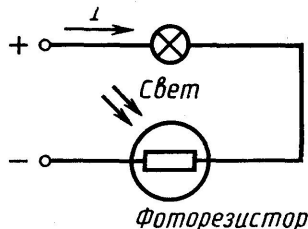
Терморезисторы, фоторезисторы

Освещение, повышение температуры приводят к интенсивности разрыва ковалентных связей и появлению большого числа носителей заряда; R уменьшается. На этом основано устройство термо- и фоторезисторов.

Зная показания амперметра и зависимость сопротивления термистора от t , можно найти температуру.



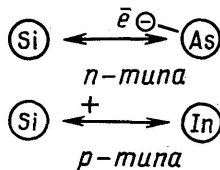
Фоторезисторы используются в фотореле, аварийных выключателях и т. д.



ОК-38

Примесные полупроводники

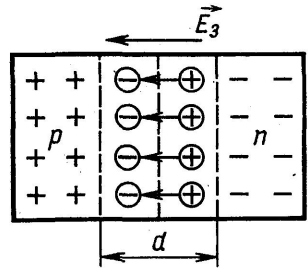
Основные носители заряда — свободные электроны (донорная примесь).



Примесь — акцепторная. Основные носители заряда — дырки.

Свойства $p-n$ -перехода

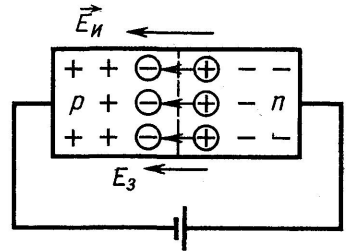
1. Образуется зап. слой:
 $d = 10^{-7}$ м, $\Delta\phi = 0,4 - 0,8$ В.



2. Тока нет!

Благодаря тепловому движению электроны будут диффундировать из электронной области в дырочную:

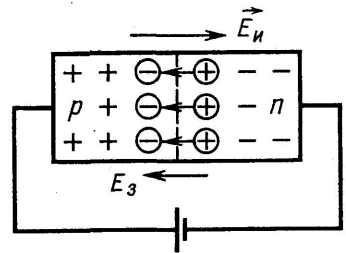
$$E_3 = \frac{\Delta\phi}{d} = \frac{0,4 \text{ В}}{10^{-7} \text{ м}} = 4 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$



Ток есть!

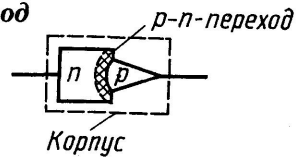
$$E_n > E_3.$$

$p-n$ -Переход пропускает электрический ток только в одном направлении.

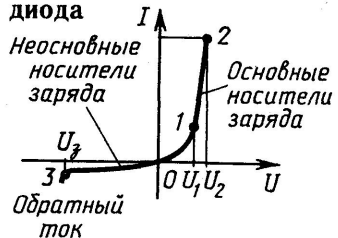
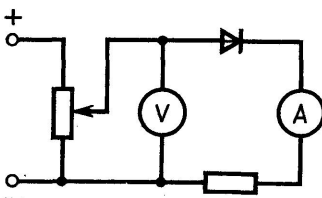


Полупроводниковый диод

Германий — катод
 Индий — анод



Вольт-амперная характеристика диода

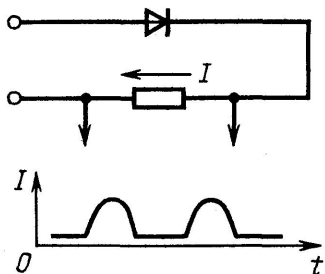


1, 2 — участок приближения прямолинейен — экспонента;
 3 — пробой диода; 0,3 — обратный ток; 0,1 — ΔI нелинейно...
 Обратный ток обусловлен наличием неосновных носителей заряда.

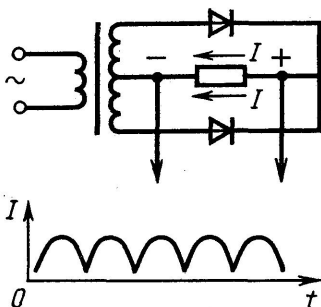
Условное обозначение

Применение полупроводникового диода

Выпрямитель тока

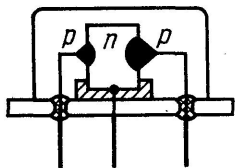


Однополупериодный пульсирующий ток

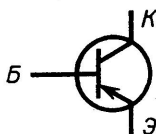


Двухполупериодный пульсирующий ток

Транзистор-усилитель



Эмиттер База Коллектор



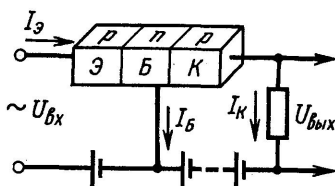
База очень тонкая

Принцип действия транзистора

$I_э \approx I_к$, так как до 95% дырок, попадающих из эмиттера в базу, переходит в коллектор:

$$I_э = I_к + I_б$$

$$k = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

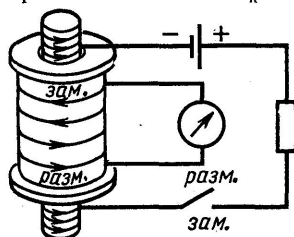


При изменении $I_э$ с помощью источника переменного напряжения одновременно почти во столько же раз изменяется $I_к$.

ОК-39

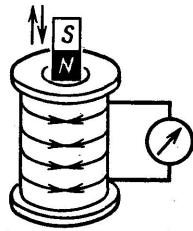
Электромагнитная индукция

1831 г. — Фарадей обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного поля возникает индукционный ток.



Индукционный ток в катушке возникает при замыкании и размыкании цепи. При замыкании: $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$; при размыкании: $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$.

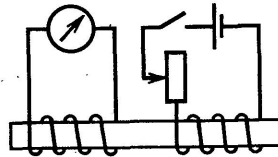
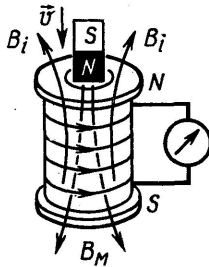
Индукционный ток в катушке возникает при введении магнита в полость катушки и его выведении из нее.



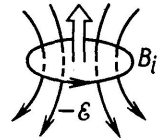
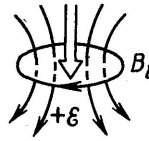
Явление возникновения ЭДС в замкнутом проводящем контуре при изменениях магнитного поля, пронизывающего контур, называется электромагнитной индукцией.

Появление тока в замкнутом контуре при изменении магнитного поля, пронизывающего контур, свидетельствует о действии в контуре сторонних сил неэлектрической природы или о возникновении ЭДС индукции.

Правило Ленца

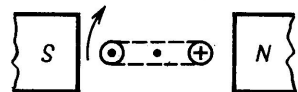
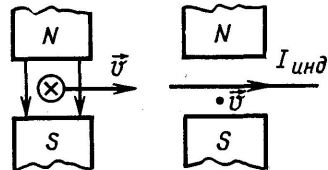


$$\begin{aligned} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0, \\ \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0, \\ \mathcal{E}_i > 0, \mathcal{E}_i < 0. \end{aligned}$$



Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им поток магнитной индукции через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать то изменение потока магнитной индукции, которое вызывает данный ток (правило Ленца).

Правило правой руки. Если правую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции (\vec{B}) входили в ладонь, а отогнутый большой палец показывал направление движения проводника, то четыре вытянутых пальца укажут направление индукционного тока в проводнике.

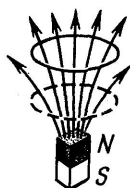


Закон электромагнитной индукции

При всяком изменении магнитного потока через проводящий контур в этом контуре возникает электрический ток.

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}: I \text{ зависит от свойств контура};$$

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}: \mathcal{E} \text{ не зависит от свойств контура.}$$



В СИ: } а) $\Phi = \mathcal{E}t$, $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}$;
 б) $\Phi = BS$, $B = \frac{\Phi}{S}$, $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ м}^2$.

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную этим контуром:

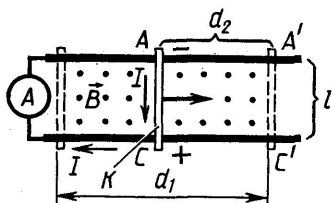
$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad \mathcal{E}_i = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}.$$

Ток в контуре имеет положительное направление, если \vec{B}_i совпадает с \vec{B}_m , т. е. I_i — против часовой стрелки.

ОК-40

ЭДС при движении проводника в магнитном поле

При движении перемычки K на электроны действует сила Лоренца, совершающая работу. Электроны перемещаются от C к A . Перемычка — источник ЭДС. Следовательно,



$$A = F_n l = qvBl,$$

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = Bvl.$$

Эта формула используется в любом проводнике, движущемся в магнитном поле, если $\vec{v} \perp \vec{B}$.

Если между векторами \vec{v} и \vec{B} есть угол α , то используется формула

$$\mathcal{E} = Bvl \sin \alpha.$$

Так как $v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$, а $\Delta dl = \Delta S$, то

$$\mathcal{E} = -\frac{B(S_2 - S_1)}{\Delta t} = -\frac{B(S_1 - S_2)}{\Delta t} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

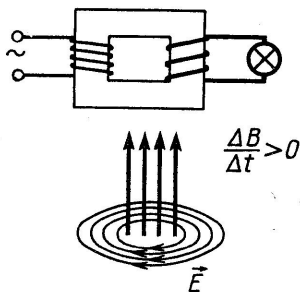
Причина возникновения ЭДС — сила Лоренца.
Знак \mathcal{E} можно определить по правилу правой руки.

Вихревое электрическое поле

Электроны в проводниках вторичной обмотки приводятся в движение электрическим полем (ЭП), которое порождается переменным магнитным полем (МП).

Фундаментальное свойство поля

Изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое (Дж. Максвелл — английский физик).



ЭП, порождаемое переменным МП, не связано с зарядом; силовые линии нигде не начинаются и не кончаются, т. е. линии замкнутые. Такое поле — вихревое электрическое.

Токи Фуко

Индукционный ток в массивных проводниках называют токами Фуко.

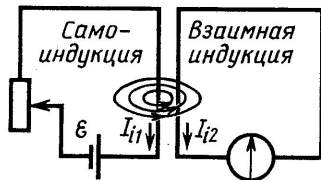
Используют: плавка металлов в вакууме.

Вредное действие: бесполезная потеря энергии в сердечниках трансформаторов и в генераторах.

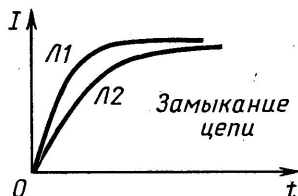
ОК-41

Явление самоиндукции

1. Изменяющееся магнитное поле (МП) индуцирует ЭДС \mathcal{E} в том самом проводнике, по которому течет ток, создающий это поле.



2. Вихревое поле направлено против тока, препятствует его нарастанию.





3. В момент уменьшения тока вихревое поле поддерживает его.

Цепь разомкнули. В момент размыкания через гальванометр течет ток против начального тока: \mathcal{E}_i может быть $\gg \mathcal{E}_b$. Следовательно, ток после размыкания увеличивается.

Учет ЭДС самоиндукции в технике. Масляные выключатели; при размыкании цепи с большой индуктивностью параллельно включают конденсатор с большой электроемкостью и высоким напряжением.

Индуктивность

Если через катушку пропускать ток, то $\Phi \sim I$. Следовательно, $\Phi = LI$, где L — индуктивность катушки, характеризующая ее магнитные свойства.

Согласно закону электромагнитной индукции

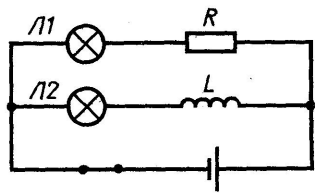
$$\mathcal{E} = \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}, \quad \Delta\Phi = \mathcal{E} \Delta t.$$

Но $\Delta\Phi = L\Delta I$. Следовательно, $\mathcal{E} \Delta t = L\Delta I$. Отсюда

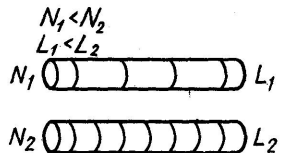
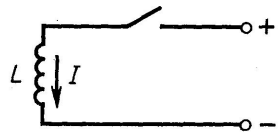
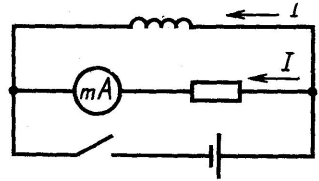
$$L = \frac{\mathcal{E} \Delta t}{\Delta I}.$$

Выражается индуктивность в генри:

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}}.$$



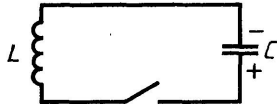
В момент замыкания ключа \mathcal{E}_c в катушке препятствует нарастанию I ; Л2 загорается позже Л1.



L зависит от $\left\{ \begin{array}{l} \text{количества витков} \\ \text{магнитной проницаемости среды} \\ \text{размеров и формы катушки} \end{array} \right.$

Энергия магнитного поля

$$W_M = \frac{LI^2}{2}$$



При замыкании $W_{ЭП} \rightarrow W_{МП} \rightarrow W_{ЭП}$