

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по УМР

А.С. БОРЗОВА
« _____ » _____ 2016 г.



**Методическое пособие
для учителей, работающих в инженерных классах
по дополнительной профессиональной программе
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И УСТРОЙСТВ**

Часть 2. Электромагнетизм

Москва – 2016

ВВЕДЕНИЕ

Пособие предназначено для учителей физики, работающих или собирающихся работать в инженерных классах средней школы, и составлено в рамках реализации дополнительной профессиональной программы «Физические основы технических систем и устройств». Состоит из двух частей. В первой части были рассмотрены основные главы Механики, в этой, второй части – главы Электромагнетизма.

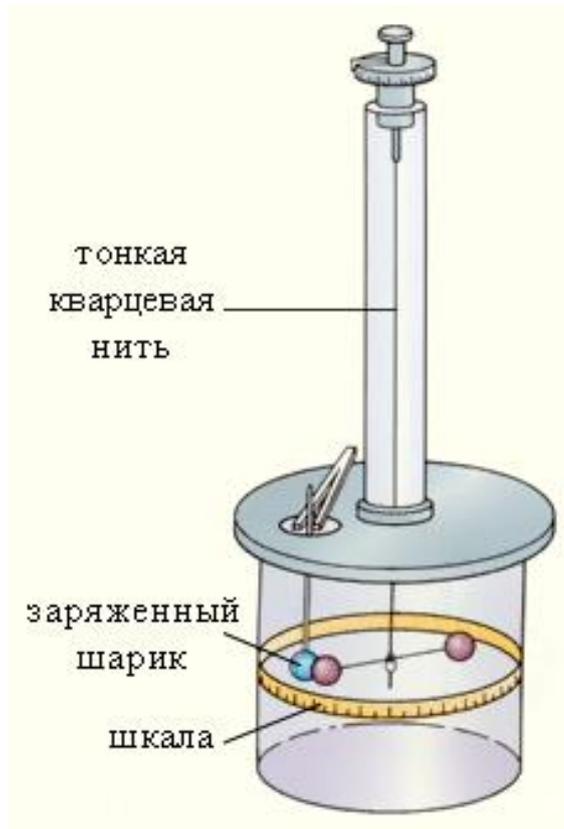
Представленное в среде PowerPoint *IT*-приложение в виде мультимедиа-конспекта может быть использовано учителем при изложении теоретической части урока. Текст пособия фактически является комментарием к этому приложению.

Каждая тема содержит примеры инженерной реализации изучаемых явлений и законов, их описывающих, а также примерные темы исследовательских проектов.

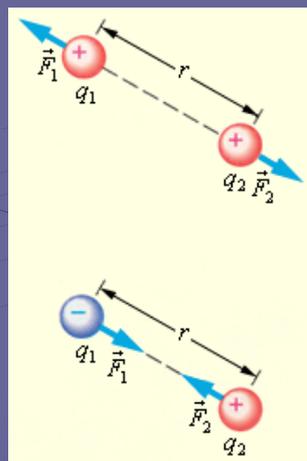
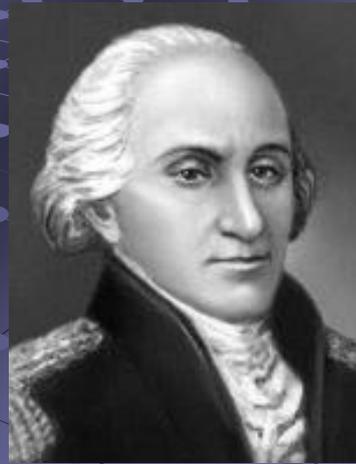
Файлы *IT*-приложения записаны в формате «Демонстрация PowerPoint» и презентации открываются сразу в режиме показа слайдов. При демонстрации слайдов необходимо следовать инструкции, приведённой в конце пособия.

Тема 1. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

1.1. Электрическое поле и его характеристики



Прибор Кулона
(1785 г.)



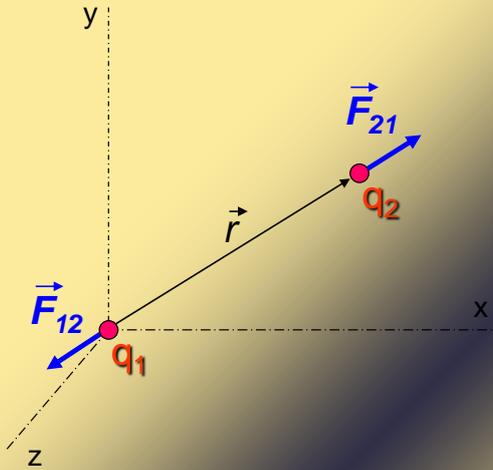
Силы взаимодействия
одноименных и
разноименных зарядов.

Закон Кулона
(1785 г.)

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

В векторной форме:

$$\vec{F}_{21}(r) = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

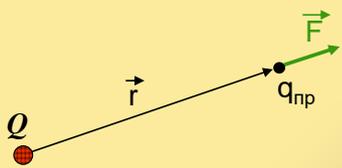


$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{H} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \quad \left(\text{или } \frac{\text{м}}{\Phi} \right)$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

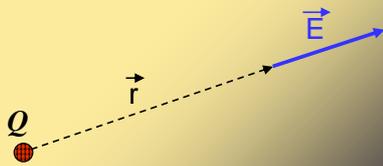
Напряженность электрического поля



$$\vec{F} = k \frac{Q \cdot q_{np}}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}; \quad \vec{e}_r = \frac{\vec{r}}{r} \quad \boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{np}}}$$

$$[E] = \text{H/Кл} = \text{В/м}$$

Поле точечного заряда



$$\vec{E}_{точ} = k \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad \boxed{|\vec{E}_{точ}| = k \frac{Q}{r^2}}$$



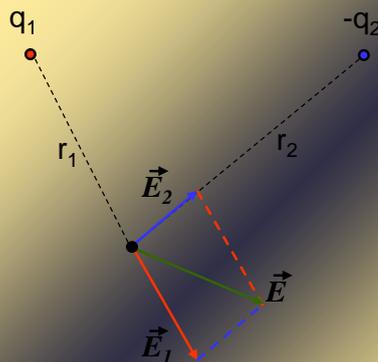
$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E}}$$

сила, действующая на заряд q в поле E

Принцип суперпозиции
электрических полей:

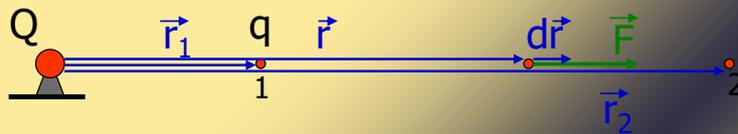
$$\vec{E}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i$$

Напряженность электрического поля
двух разноименных точечных зарядов:



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

Потенциальная энергия заряда q
в поле заряда Q



Работа силы F по
перемещению заряда q
из точки 1 в точку 2:

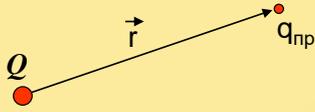
$$A = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{r}, \quad F = k \frac{Qq}{r^2},$$

$$A = kQq \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = - \left(k \frac{Qq}{r_2} - k \frac{Qq}{r_1} \right);$$

$$W_n = k \frac{Qq}{r}$$

$$A = - \Delta W_n$$

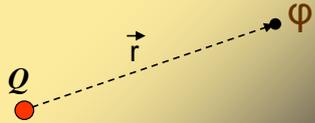
Потенциал электрического поля φ



$$W_n = k \frac{Q \cdot q_{пр}}{r}$$

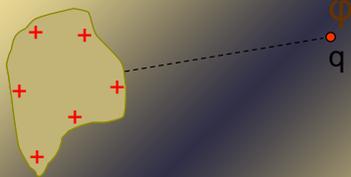
$$\varphi = \frac{W_n}{q_{пр}}$$

$$[\varphi] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$$



Потенциал поля
точечного заряда Q :

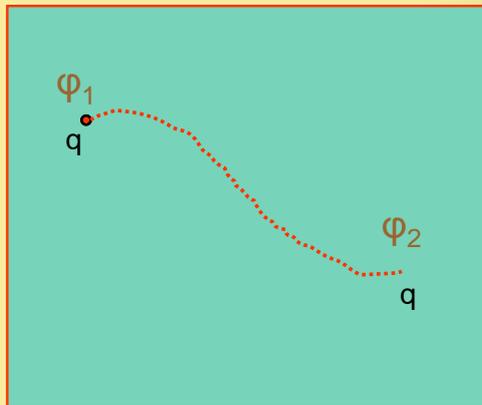
$$\varphi_{точ} = k \frac{Q}{r}$$



Потенциальная энергия заряда q
в электрическом поле:

$$W_n = q \cdot \varphi$$

Напряжение. Работа электрического поля



$$A = -\Delta W_n$$

$$W_n = q \cdot \varphi$$

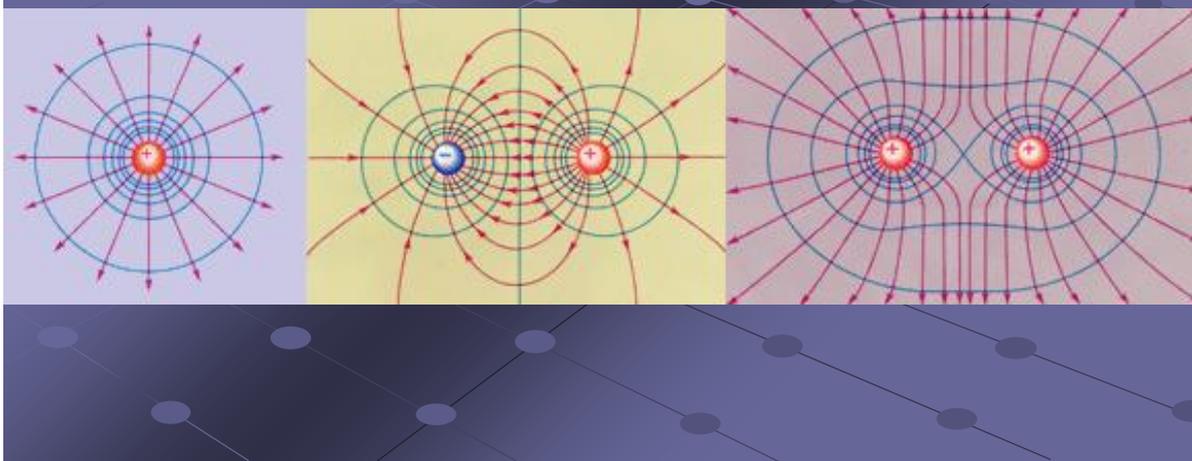
$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 \equiv U$$

напряжение

$$A = qU$$

Эквипотенциальные поверхности (синего цвета) и силовые линии (красного цвета) простых электрических полей

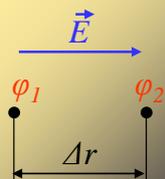


Связь напряженности с потенциалом

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad \vec{F} = q\vec{E}$$

Для однородного поля: $A = F\Delta r$

$$qE\Delta r = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$



$$E = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta r} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta r}$$

$$E = \frac{U}{\Delta r}$$

(отсюда: $[E] = \text{В/м}$)

1.2. Проводник в электрическом поле. Электростатическая индукция. Электрическое поле заряженного проводника

Электростатическая индукция

внешнее поле

$\vec{E}_0 = 0$

В проводнике:

$\vec{E} = 0$

$\Delta\varphi = -\int_{r_1}^{r_2} \vec{E} d\vec{r}$

$\Delta\varphi = 0$

$\varphi = const$

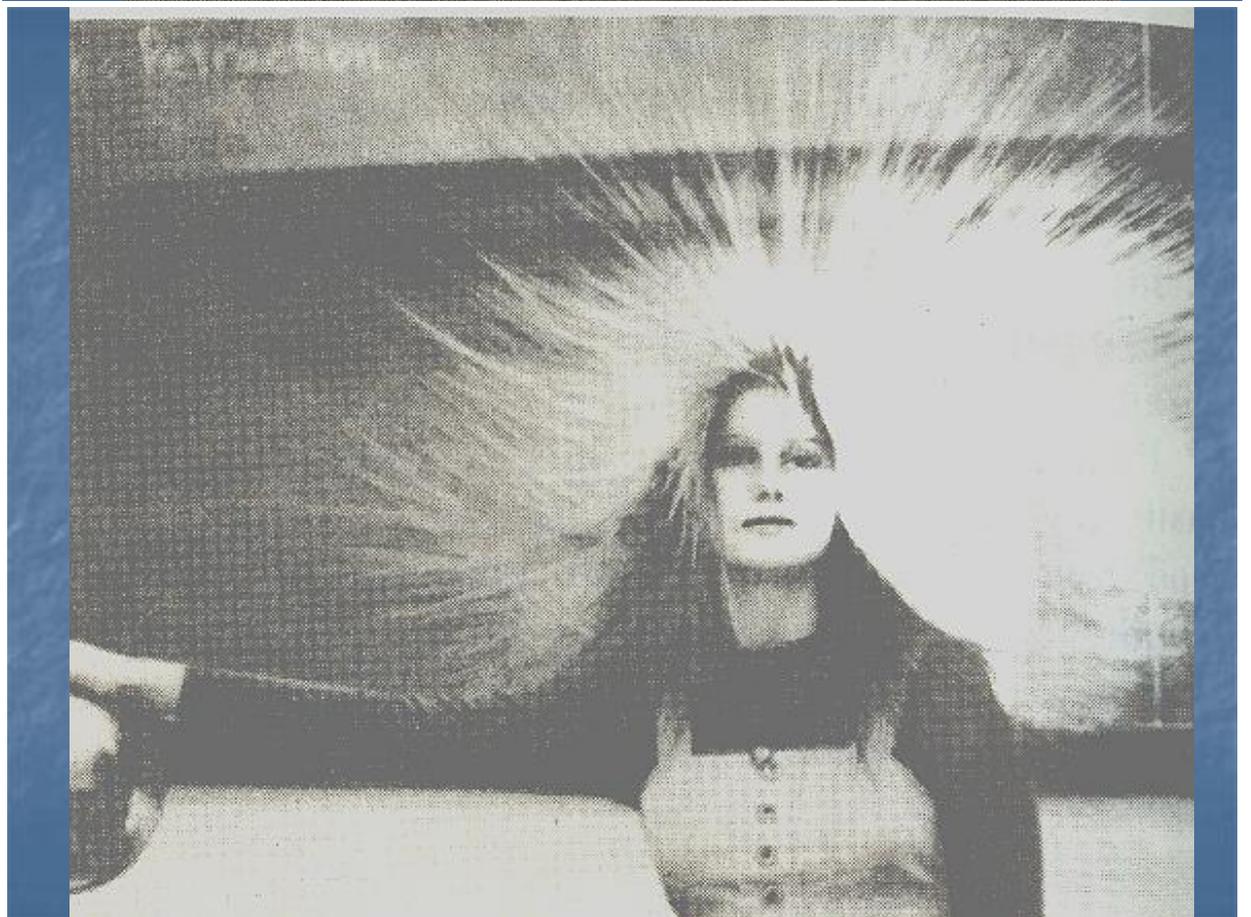
Поле в заряженном проводнике

$$\Delta\varphi = -\int_{r_1}^{r_2} \vec{E} d\vec{r};$$

Внутри проводника:

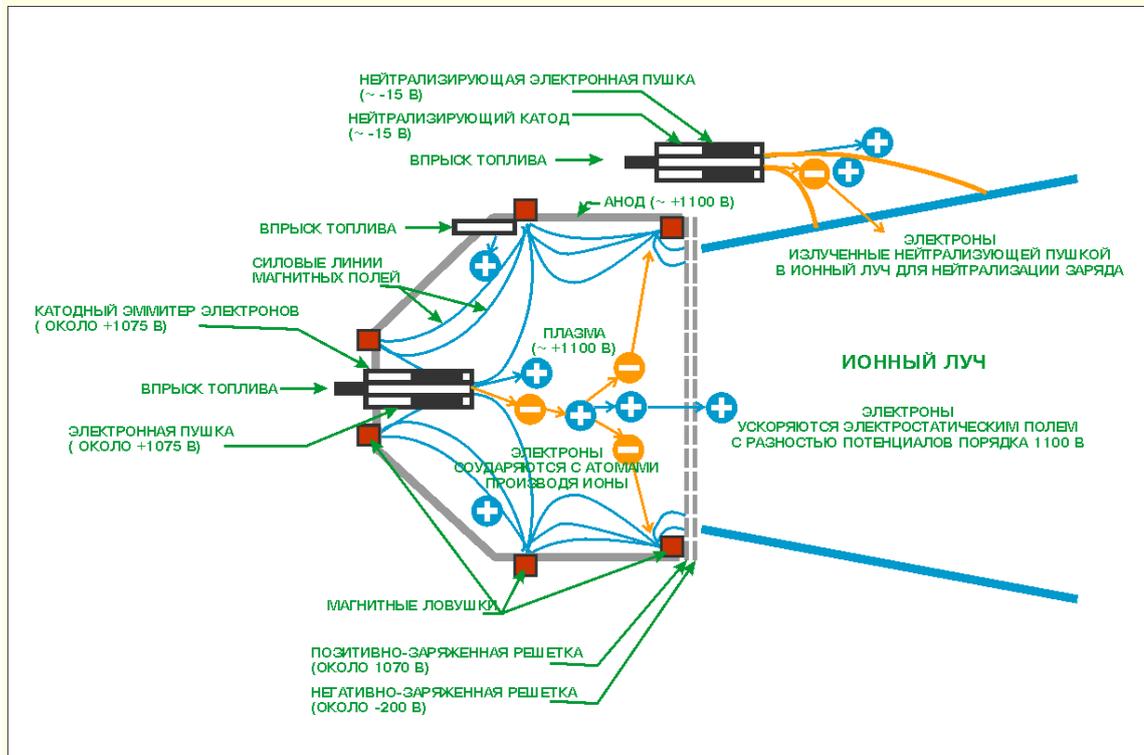
$$E = 0;$$

$$\varphi = const$$



1.3. Воздействие электрического поля на заряды. Инженерная реализация: ионный двигатель

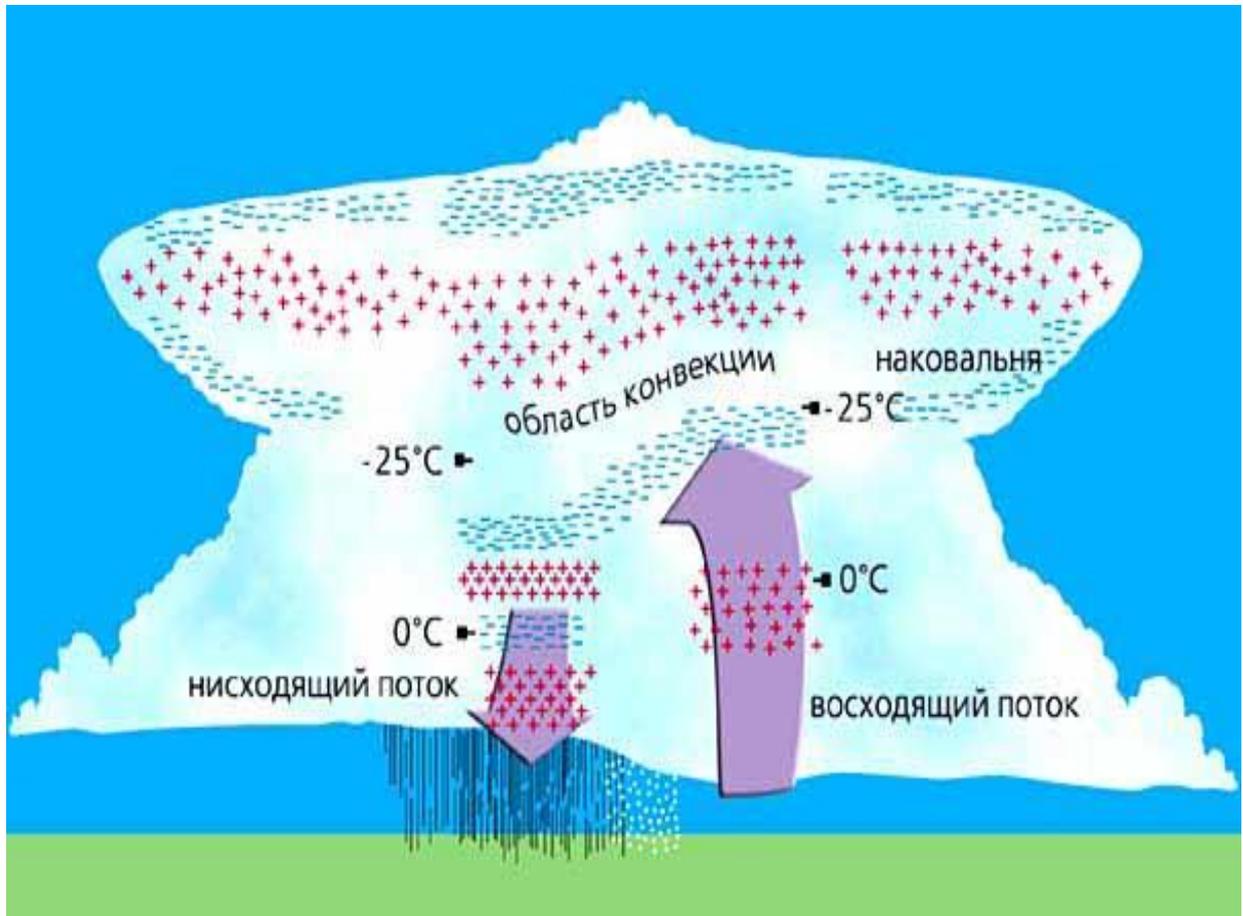
Ионный двигатель



Ионный двигатель



1.4. Возникновение облачных зарядов. Механизмы образования статического электричества на воздушных судах



На рисунке представлено распределение электрического заряда в грозном облаке. Сочетание многообразных механизмов электризации жидких и твёрдых частиц облака приводит к столь сложному чередованию положительно и отрицательно заряженных его частей. Рассмотрим лишь некоторые из этих механизмов.

1. *Захват ионов каплями и ледяными частицами.* В воздухе всегда присутствуют ионы обоих знаков, причем, ионообразование происходит непрерывно под действием космического излучения. Ионы захватываются частицами, составляющими облако, в первую очередь, каплями. Капли находятся в электрическом поле Земли, которое образуется между положительно заряженной ионосферой и отрицательно заряженной земной поверхностью. Следовательно, напряженность поля ($E \sim 100 \text{ В/м}$) направлена вниз. Капли, даже будучи электрически нейтральными, поляризуются.

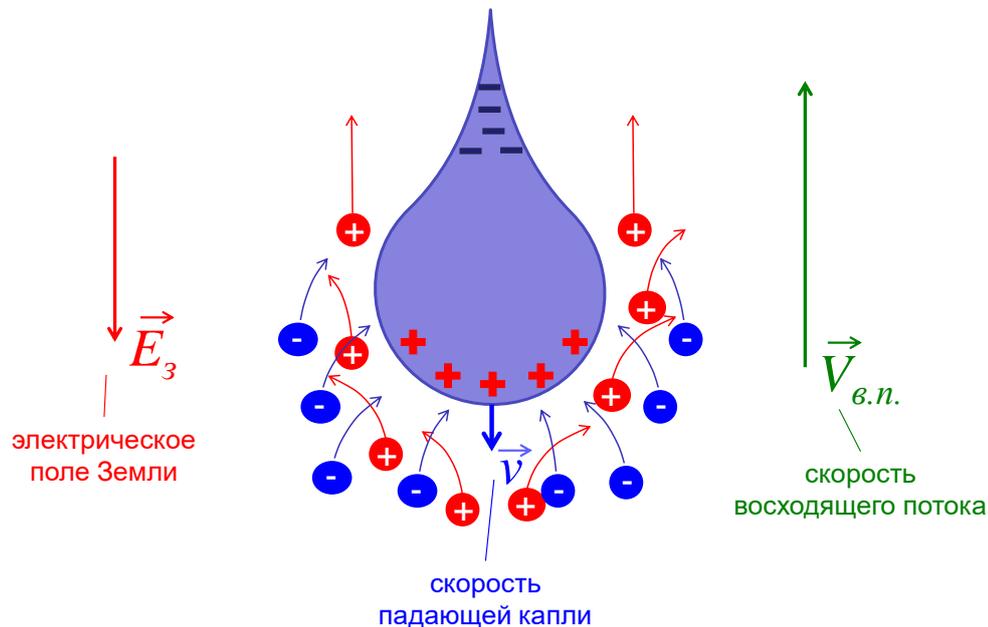
Молекулы воды, представляющие собой диполи, обращаются положительным полюсом в направлении поля (вниз) и отрицательным в противоположном направлении.



Капли, постепенно укрупняясь, перестают увлекаться восходящим потоком воздуха и приобретают собственную скорость, направленную вниз. Для мелких облачных капель, характерный диаметр которых не превышает десятки микрон, эта скорость составляет порядка 10^{-2} - 10^{-1} м/с. (Для осадков она в несколько раз выше.) Ионы представляют собой частицы гораздо меньшего размера (обычно, это - отдельные молекулы или кластеры из нескольких молекул), и потому несутся вместе с восходящим потоком навстречу падающим каплям.

Нижняя часть капель заряжена положительно, поэтому она охотнее захватывает из встречного потока отрицательные ионы, чем положительные. Верхняя же часть, по законам электростатики, стремится захватывать ионы противоположного знака. Но здесь вступает в силу аэродинамика. Выхватить ионы из потока, обтекающего падающую каплю сверху, уже гораздо труднее, чем из встречного потока. В результате крупные капли заряжаются отрицательно и постепенно оседают вниз, а оставшиеся по закону

сохранения заряда положительные ионы движутся с восходящим потоком в вершину облака. Так образуется двухполюсная структура с положительным зарядом вверху.



2. *Обмен зарядом при столкновении частиц.* Здесь картина гораздо более сложная. Количество и знак заряда, перераспределяемого между сталкивающимися частицами, зависит от огромного количества факторов (исходные заряды частиц, величина и направление внешнего электрического поля, которое их поляризует, температура частиц и окружающего воздуха, форма и размеры частиц, их фазовый состав, наличие примесей других веществ, кроме воды и др.). Аналитически учесть все эти факторы пока не представляется возможным.

Эксперимент показывает, что в нижней части облака при столкновении мелкой облачной и крупной дождевой каплей первая отскакивает от нижней части последней и уносит часть ее положительного заряда. Таким образом, мелкие капельки, гонимые восходящим потоком, получая положительный заряд, уносят его вверх. Крупные же капли с отрицательным зарядом под действием силы тяжести стремятся вниз. В результате такого разделения зарядов значение напряженности электрического поля может достичь пробойного.

Кроме того, этот механизм, по мнению многих ученых, объясняет еще и возникновение положительного заряда в нижней части облака (уже на стадии дождя), поскольку там вертикальная составляющая электрического поля

меняет знак! Это связано с большим отрицательным зарядом, скапливающимся между низом и центром облака. В этой зоне знак заряда, разделяемого при столкновении капель, сразу меняется на противоположный. Легкие капли заряжаются уже отрицательно и поднимаются в среднюю часть облака, усиливая и без того отрицательный заряд. А положительно заряженные осадки как раз и образуют нижний «плюс», довершая формирование классического трехполюсника.

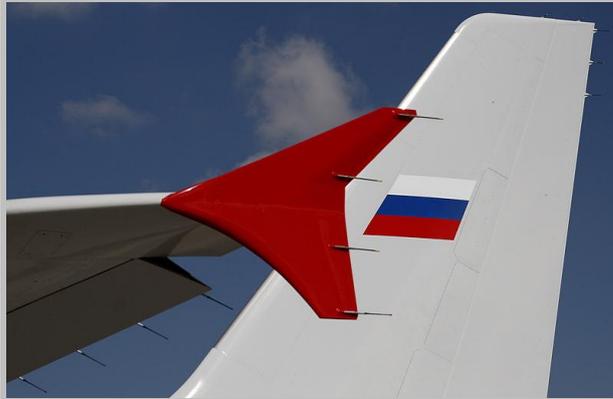
Существуют и другие механизмы разделения зарядов. Наиболее проработаны описания таких механизмов, как суммирование зарядов капель и (или) ледяных частиц при их слиянии, а также перераспределение заряда при дроблении капель (ледяных частиц).

Фактически здесь был описан процесс образования грозового облака. Но для летательных аппаратов такие облака опасны даже на более ранних стадиях своего развития из-за электризации корпуса. Во-первых, на поверхности заряженного корпуса могут возникать разрядные явления, способные даже спровоцировать молниевый разряд в самолет. Во-вторых, эти явления существенно нарушают радиосвязь и влияют на качество работы авионики.



Поэтому летательные аппараты оборудуются специальными электроразрядниками разнообразной конструкции.

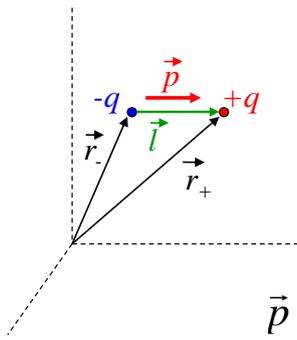
Разрядники для снятия статического электричества



В качестве **исследовательских проектов** здесь у учащихся широкое поле деятельности. Это, во-первых, исследование процессов электризации летательных аппаратов (здесь и разделение зарядов на корпусе в поле заряженных частей облака за счет электростатической индукции, и получение заряда при контакте с заряженными частицами, и получение трибоэлектричества за счет трения о частицы облака...) Во-вторых, исследование существующих видов разрядников (в частности, их делят на пассивные и активные), а также разработка новых типов разрядников.

1.5. Атомы и молекулы в электрическом поле

Электрический диполь



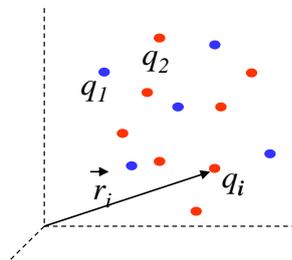
\vec{p} - электрический момент диполя:

$$\vec{p} = |q|\vec{l}$$

\vec{l} - плечо диполя: $\vec{l} = \vec{r}_+ - \vec{r}_-$

$$\vec{p} = q\vec{r}_+ - q\vec{r}_- = q_+\vec{r}_+ + q_-\vec{r}_- \quad (q_- < 0)$$

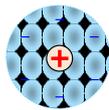
Электрический момент системы из N зарядов:



$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N q_i \vec{r}_i$$

Атом в электрическом поле

1. Внешнее поле $E = 0$

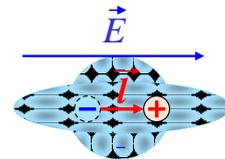


$$l = 0; p_{am} = 0$$

$$\vec{p} = |q|\vec{l}$$

$$\vec{p} \uparrow \uparrow \vec{E}$$

2. Внешнее поле:



$$\vec{p} = \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

β - поляризуемость атома

$$[\beta] - ?$$

$$[p] = [\beta] [\epsilon_0] [E]$$

$$\text{Кл м} = [\beta] \Phi/\text{м В/м}$$

$$\text{Кл} = \Phi \cdot \text{В} \quad (q = C \varphi)$$

$$[\beta] = \text{м}^3$$

Молекула в электрическом поле

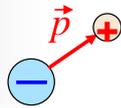
1. неполярные молекулы (H_2, N_2, O_2, \dots)



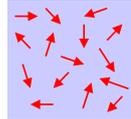
$$\vec{p} = \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

β – поляризуемость молекулы

2. Полярные молекулы (HCl, NaCl, CO...)



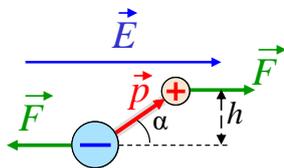
$$E = 0$$



Средний
электрический
момент молекул -

$$\langle \vec{p} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i$$

$$E = 0, \quad \langle \vec{p}_0 \rangle = 0$$



Вращающий момент:

$$M = F h = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha$$

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$$

$$E \neq 0, \quad \langle \vec{p} \rangle = \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{T}$$

температура

1.6. Поле внутри диэлектрика. Электрическая индукция (электрическое смещение)

Электрический (дипольный)
момент молекулы:

$$\langle \vec{p} \rangle = \beta \epsilon_0 \vec{E}$$

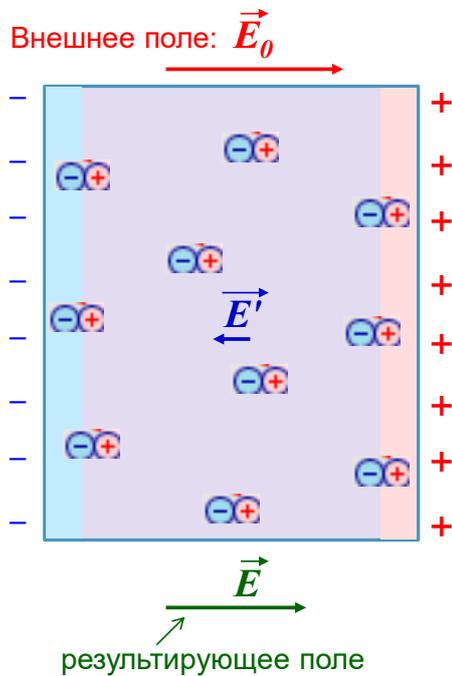
Вектор поляризации (поляризованность) диэлектрика:

$$\vec{P} = n \langle \vec{p} \rangle$$

n — концентрация молекул

$$\vec{P} = n \beta \epsilon_0 \vec{E}; \quad n \beta = \kappa \text{ — диэлектрическая восприимчивость вещества}$$

$$\vec{P} = \kappa \epsilon_0 \vec{E} \text{ — вектор поляризации диэлектрика}$$



\vec{E}' — суммарное поле

поляризованных молекул диэлектрика

Результирующее поле в диэлектрике: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

Поле \vec{E}' связано с вектором поляризации:

$$\vec{E}' = -\frac{1}{\epsilon_0} \vec{P}; \quad \vec{P} = \kappa \epsilon_0 \vec{E} \text{ (см. выше)}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \kappa \vec{E}; \quad \vec{E}(1 + \kappa) = \vec{E}_0$$

$$1 + \kappa = \epsilon \text{ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика}$$

$$\epsilon > 1 (!) \quad \vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon}$$

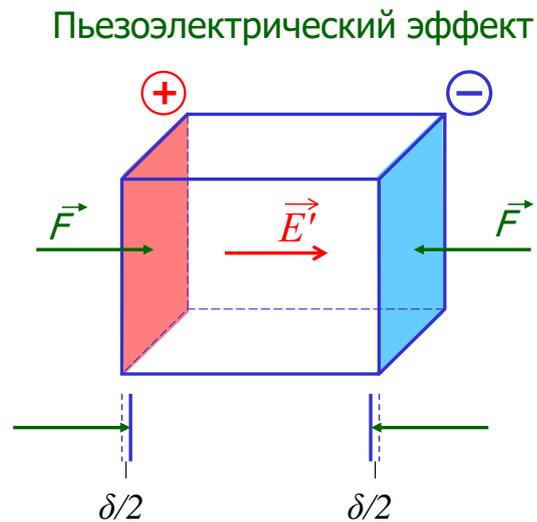
Поле в диэлектрике ослабляется !

Электрическое смещение (электрическая индукция):

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$$

1.7. Пьезоэлектрический эффект. Обратный пьезоэлектрический эффект. Примеры инженерной реализации



В результате деформации:

$$E' \sim \delta$$

$$E' \sim F$$

Обратный пьезоэлектрический эффект.
Деформация пьезоэлектрика в поле E :

$$\delta \sim E$$

Пьезоэлектрический эффект не просто нашел широкое применение в нашей жизни, он просто произвёл и продолжает делать революцию в науке и технике. Перечень устройств с его применением практически бесконечен: начиная от зажигалки для газовых горелок и устройств для звукозаписи и звукоснимателей до современных элементов автоматики, управления и вычислительной техники.

Взять современный автомобиль – на базе пьезоэлектрической керамики активно используются:

- актюаторы-клапаны впрыска топлива и газораспределительной системы двигателя (актюаторы строятся на принципе обратного пьезоэффекта и поэтому предназначены для преобразования электрического напряжения в механическое перемещение);
- датчики поворота – для определения угла положения элементов управления;
- датчики детонации;
- датчики уровня заправочных жидкостей;
- датчики давления – для измерения давления в топливном баке с целью определения утечки топлива;
- пьезопроводы зеркал и регулировки сидений;

- передние и боковые ультразвуковые дистанционные датчики (датчики предотвращения столкновений);
 - задние (парковочные) ультразвуковые дистанционные датчики;
 - скоростные и ударные сенсоры подушек безопасности;
 - пьезоп приводы регулировки фар;
 - пьезоакустические системы адаптивного регулирования скорости автомобиля;
- и т.п.

Изготавливая втулки подшипника из пьезоэлектрического материала, можно существенно снизить трение с помощью вибрации: переменное электрическое поле заставляет пьезоэлектрик сжиматься и расширяться, создавая вибрацию, уничтожающую трение.

Установка в самолетах пьезопреобразователей позволит превращать колебания и вибрацию фюзеляжа и крыльев непосредственно в электроэнергию. Предполагается за счет этого экономить до трети топлива, которое шло бы на выработку электроэнергии, и, следовательно, увеличить дальность полета.

Создан светофор, батареи которого заряжаются от шума автомобилей на перекрестке. Половая плитка с использованием пьезокерамики даёт возможность без внешних источников электроэнергии освещать коридор в том месте, где идёт человек. Инженеры работают над созданием звукоизолирующих перегородок в многоквартирных домах с использованием пьезоэлектриков. Здесь достигается двойной эффект: и поглощение шума, и выработка электроэнергии, например, для обогрева квартир.

И это лишь малая часть примеров применения пьезоэлементов.

Столь широкие возможности применения пьезоэлектрического эффекта даёт необозримый простор для **тематики исследовательских проектов** учащихся инженерных классов.

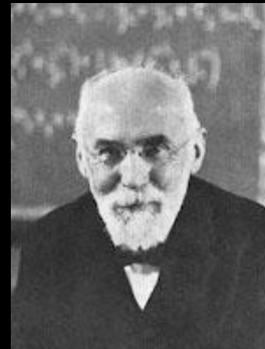
Тема 2. Электрический ток

2.1. Классическая теория электропроводности. Закон Ома. Проводимость. Сопротивление

Классическая теория электропроводности

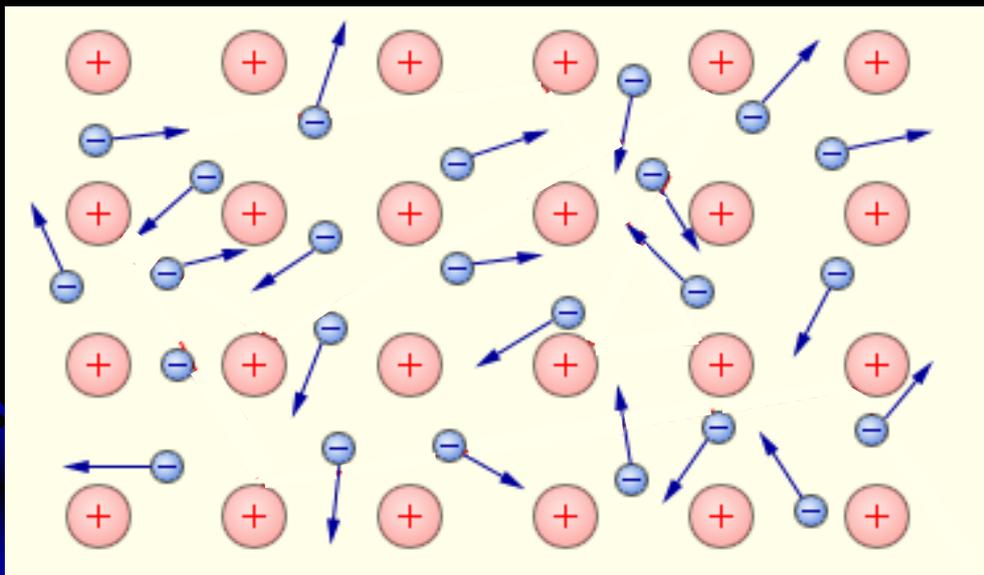


Друде
Пауль
(1863 – 1906)



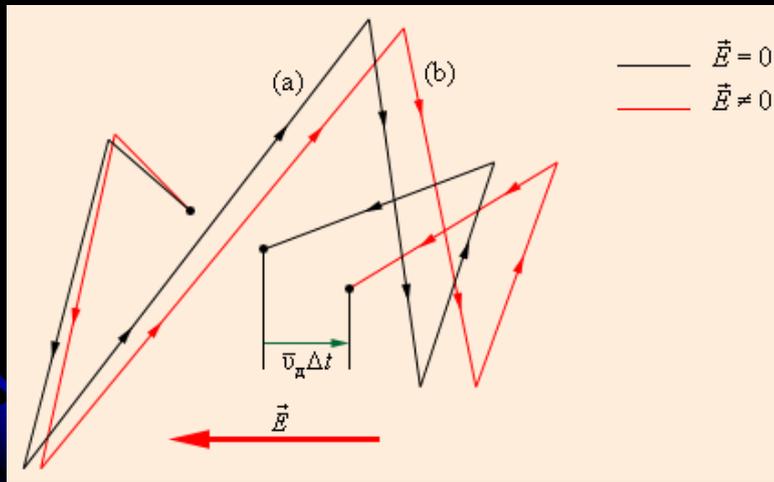
Лоренц (Lorentz)
Хендрик
(1853 – 1928)

Газ свободных электронов в металле



Красная штриховая линия - траектория одного из электронов

Дрейф газа электронов в электрическом поле



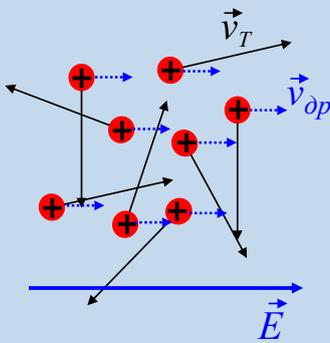
При $T \sim 300 \text{ K}$

$$v_T \sim 10^5 \text{ м/с}$$

$$v_{др} \sim 10^{-7} v_T$$

а – хаотическое движение электрона;
 б – хаотическое движение с дрейфом

Дрейф заряженных частиц вдоль поля



v_T – скорость теплового движения

$v_{др}$ – скорость дрейфа зарядов в поле E

$$\vec{v}_{др} = \mu \vec{E}$$

$$F = qE; \quad a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m}$$

$$v_{\max} = a\tau, \quad \text{где } \tau = \frac{\lambda}{v_T}$$

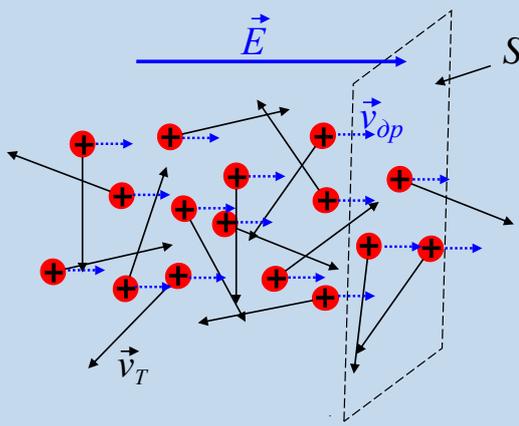
λ - длина свободного пробега

$$v_{\max} = \frac{q\lambda}{mv_T} E$$

$$v_{др} = v_{cp} = \frac{1}{2} v_{\max} = \frac{q\lambda}{2mv_T} E$$

$$\mu = \frac{q\lambda}{2mv_T} \quad \text{- подвижность зарядов}$$

$$q > 0, \mu > 0; \quad q < 0, \mu < 0$$



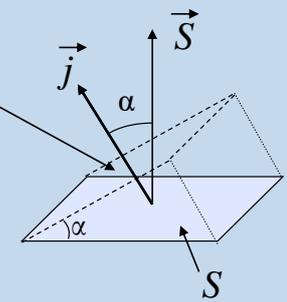
Электрический ток через площадку S :

$$I = \frac{Q}{\Delta t} \text{ - сила тока (A = Кл/с)} \quad I = \frac{dQ}{dt}$$

Плотность тока:

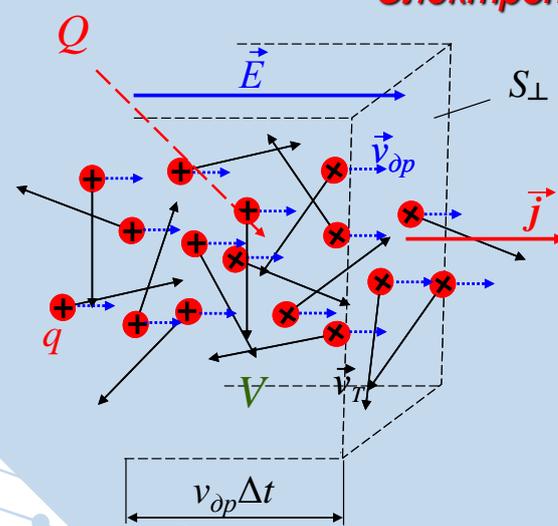
$$j = \frac{I}{S_{\perp}} \quad I = \vec{j} \vec{S} = jS \cos \alpha$$

$S \cos \alpha = S_{\perp}$




Ампер (Ampere)
 Андре-Мари
 (1775 – 1836)

Электропроводность



$$j = \frac{Q}{\Delta t S_{\perp}}$$

$$Q = qnV; \quad V = v_{dp} \Delta t S_{\perp}$$

↑
концентрация зарядов

$$\vec{j} = qn\vec{v}_{dp} \quad \vec{v}_{dp} = \mu \vec{E} \quad \mu = \frac{q\lambda}{2mv_T}$$

$$\vec{j} = \frac{nq^2\lambda}{2mv_T} \vec{E} \quad \sigma = \frac{nq^2\lambda}{2mv_T}$$

σ – электропроводность (проводимость)
 $\sigma > 0$ (всегда!)

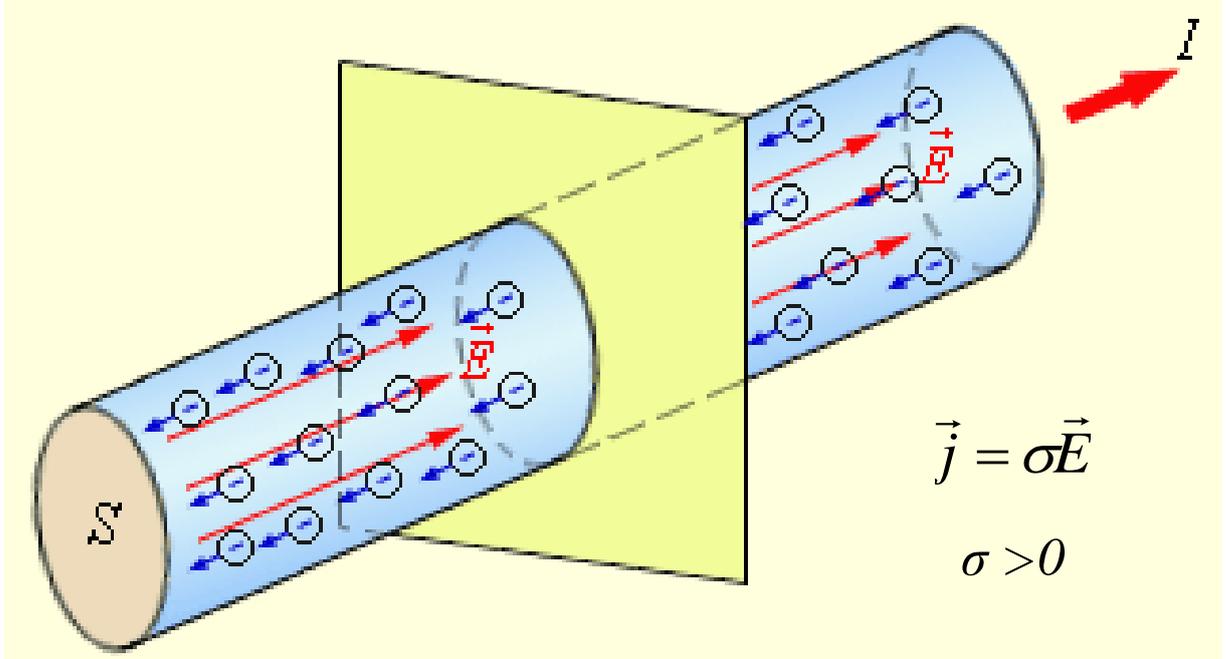
$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

закон Ома
 в дифференциальной
 (локальной) форме



Ом Георг Симон
 (1787 – 1854)

Закон Ома для однородного проводника. Сопротивление



$\varphi_1 - \varphi_2 = U$
 $q = -|e|$
 \vec{v}_{dr}
 \vec{E}
 \vec{I}
 S
 l

Покажем, что $I \sim U$

$\vec{v}_{dr} \sim -\vec{E}$
 $\vec{I} = \vec{j}S = \sigma \vec{E}S$
 $\sigma = \frac{1}{\rho}; \quad E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l}$
 удельное сопротивление

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

$R = \rho \frac{l}{S}$ - сопротивление проводника,
 $[R] = \text{Ом} = \text{В/А}$

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

$U = IR$ -закон Ома
 для однородного проводника

$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}; \quad [\sigma] = (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1} = \text{См/м}$ (См – сименс, См = Ом⁻¹)

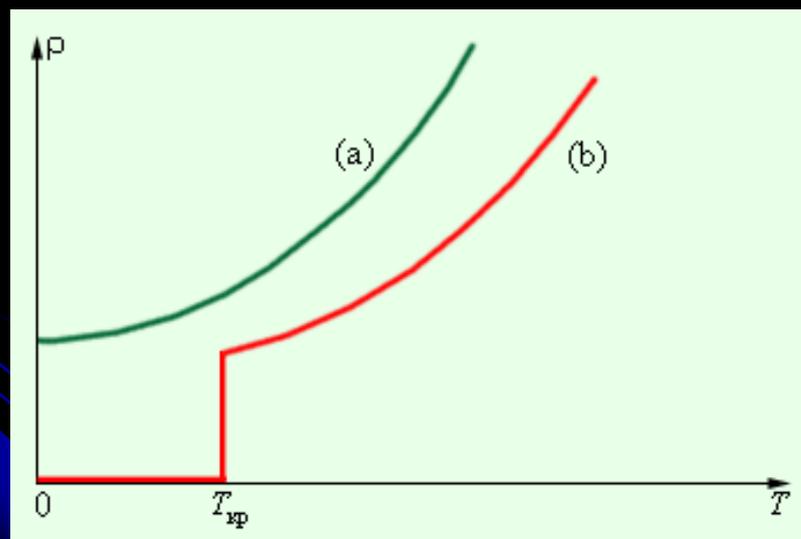
Зависимость удельного сопротивления проводников от температуры

$$\rho = \frac{1}{\sigma}; \quad \sigma = \frac{nq^2\lambda}{2mv_T}; \quad v_T = f(T); \quad \rho = f(T)$$

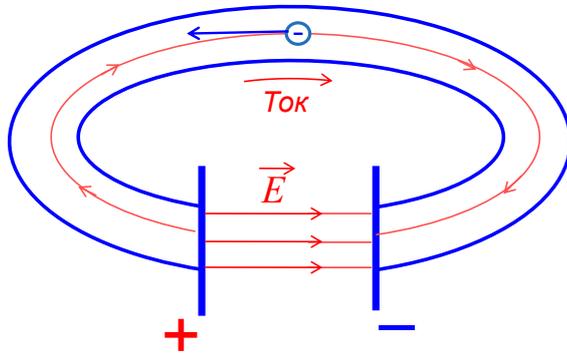
$$\rho \approx \rho_0(1 + \alpha t) \quad ([t] = ^\circ\text{C})$$



Зависимость удельного сопротивления ρ от абсолютной температуры T в области низких температур

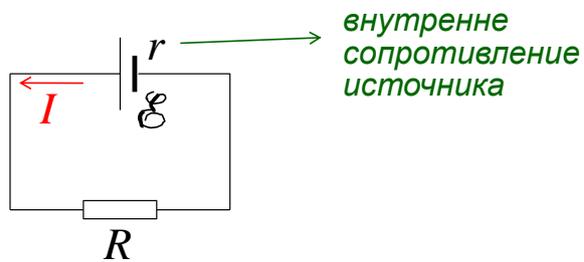
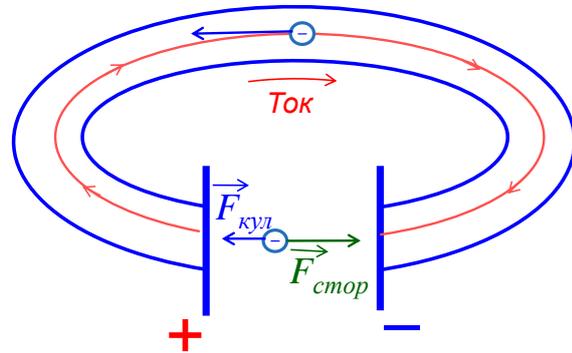


2.2. Закон Ома для полной цепи



ЭДС:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$$

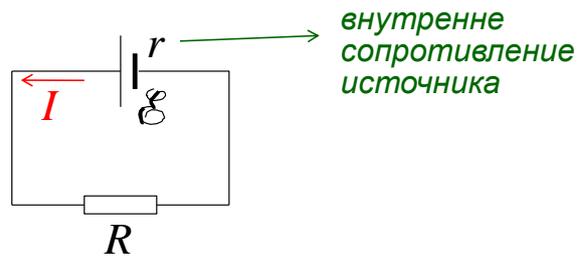


Работа сторонних сил: $A_{\text{стор}} = \mathcal{E} I \Delta t$

По закону Джоуля - Ленца: $Q = I^2 R \Delta t + r^2 R \Delta t$

Согласно закону сохранения энергии: $A_{\text{стор}} = Q$

Следовательно: $\mathcal{E} = IR + r^2 R$



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

Закон Ома для полной цепи:

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

2.3. Закон Джоуля-Ленца. Работа и мощность тока. Инженерная реализация

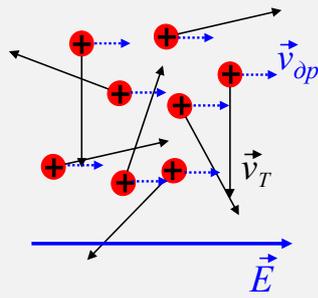
1. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме



Джоуль (Joule)
Джеймс Прескотт
(1818 – 1889)



Ленц
Эмилий Христианович
(1804 – 1865)



Максимальная скорость электрона перед столкновением:

$$v_{\max} = \frac{q\lambda}{mv_T} E;$$

$$\varepsilon_{\kappa} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{q^2 \lambda^2}{2mv_T^2} E^2$$

Объемная плотность тепловыделения:

$$w = n \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \varepsilon_{\kappa} = n \cdot \frac{v_T}{\lambda} \cdot \frac{q^2 \lambda^2}{2mv_T^2} E^2$$

$$\sigma = \frac{nq^2 \lambda}{2mv_T}$$

$w = \sigma E^2$ - закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме

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

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$w = \rho j^2$$

2. Закон Джоуля-Ленца для однородного проводника

$\varphi_1 - \varphi_2 = U$

$W_{\text{Джэ}} = wVt$

$V = S \cdot l$

$w = \sigma E^2; \quad E = \frac{U}{l}$

$W_{\text{Джэ}} = \sigma \frac{U^2}{l^2} S l t$

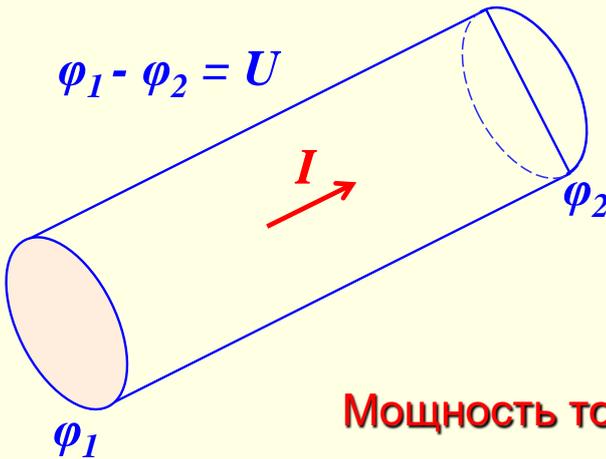
$\sigma = \frac{1}{\rho}; \quad W_{\text{Джэ}} = \frac{U^2}{\rho \frac{l}{S}} t$

$W_{\text{Джэ}} = \frac{U^2}{R} t \quad U = IR$

$W_{\text{Джэ}} = IUt$

$W_{\text{Джэ}} = I^2 R t$

закон Джоуля - Ленца



$\varphi_1 - \varphi_2 = U$

φ_1

φ_2

I

Работа тока

$A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$

$Q = I t$

$A = I U t$

$A = W_{Дж}$

Мощность тока

$P = \frac{dA}{dt}$

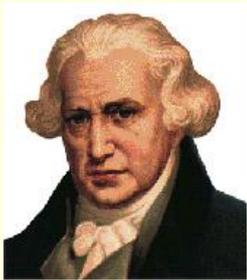
$P = I U$

$U = I R$

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

$P = I^2 R$

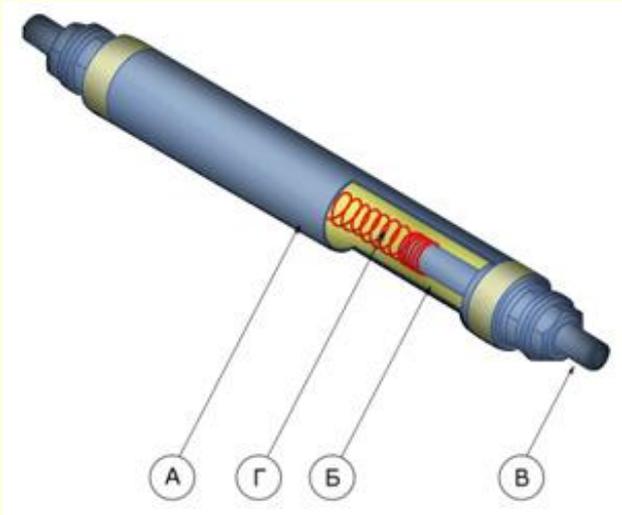
$[P] = A \cdot B = Вт$



Ватт (Watt)
Джеймс
(1736 – 1819)

Закон Джоуля-Ленца является основой для расчета всякого рода омических (термоэлектрических) нагревателей – ТЭНов.

Термоэлектрический нагреватель - ТЕН



А - оболочка

Б - наполнитель

В – контактная часть

Г - спираль

На этом принципе устроена практически вся бытовая электронагревательная техника – чайники, кипятильники, утюги и т.п. Здесь

– широкое поле деятельности будущих инженеров по расчету параметров, выбору материалов для нагревательного элемента, конструкции устройства и т.д.

Получившая широчайшее распространение электросварка связана с джоулевым тепловыделением, как в канале электродугового разряда, так и в свариваемом металле, по которому протекает тот же ток разряда.

Рассмотренные выше законы электрического тока описывают и такое грозное явление природы, как молния. Одним из механизмов повреждения металлических конструкций (например, корпуса воздушного судна) молнией связаны с её электротермическим (джоулевым) воздействием.

Сама молния возникает в результате электризации облаков (см. п.1.3). Причем эти облака могут иметь не только водную структуру. Это могут быть облака вулканической пыли и пепла. (Конечно, к действующим вулканам пилотам залетать категорически запрещено, но исследователи могут и рискнуть...)





При попадании молнии в самолёт на его обшивке или каком-либо другом элементе конструкции возникают те же электротермические процессы, что и во время электросварки. И описываются эти процессы одинаково.



От сквозного прожога обшивку чаще всего спасает тот факт, что из-за движения самолёта относительно воздуха молния проскальзывает по его корпусу, оставляя на обшивке строчку из ожоговых кратеров. Если же такого соскальзывания не происходит, то повреждение может быть серьёзным.

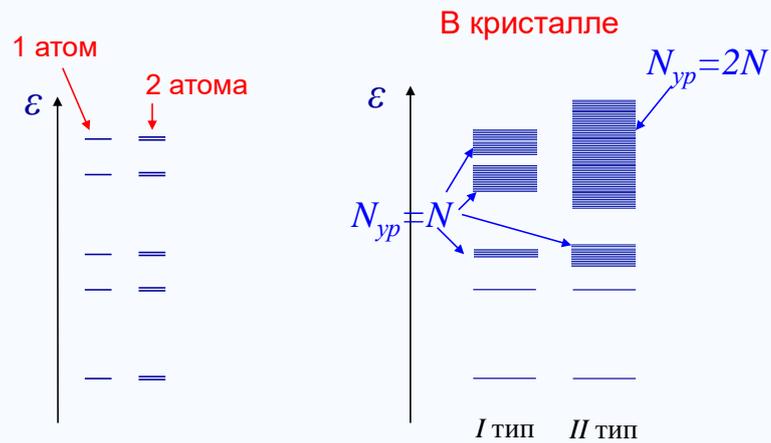


Здесь просматривается очень интересная **тематика исследований** школьников по механизму и характеру повреждений воздушных судов в результате электротермического воздействия молнии, а также защиты от таких воздействий. Подобные исследования проводились на кафедре электрофизики и техники высоких напряжений МЭИ, в ГосНИИ ГА, на кафедре физики МГТУ ГА и в других исследовательских центрах. Ниже, в четвёртой теме будут рассмотрены другие типы повреждений, в частности, в результате электромеханического воздействия тока молнии.

Тема 3. Полупроводники

3.1. Энергетические уровни в атоме и энергетические зоны в кристалле

Образование энергетических зон

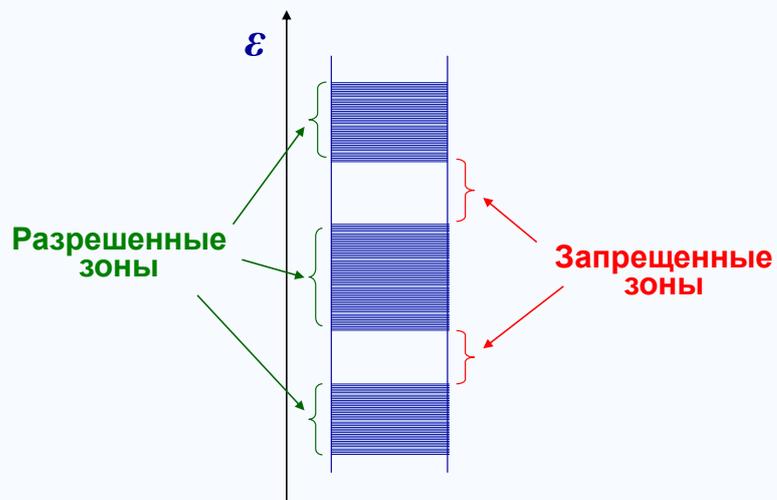


N – число атомов в кристалле

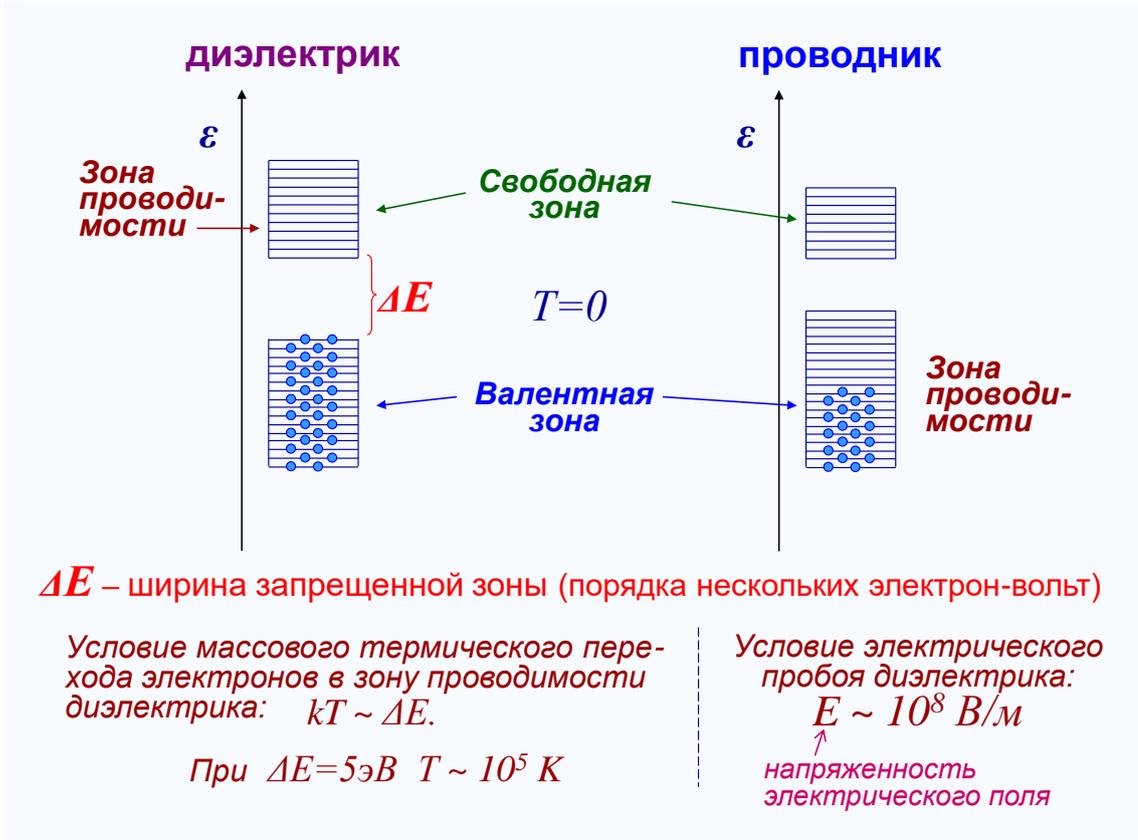
«Расстояние» между уровнями внутри зон $\sim 10^{-23}$ эВ

«Расстояние» между уровнями в атоме \sim единиц эВ

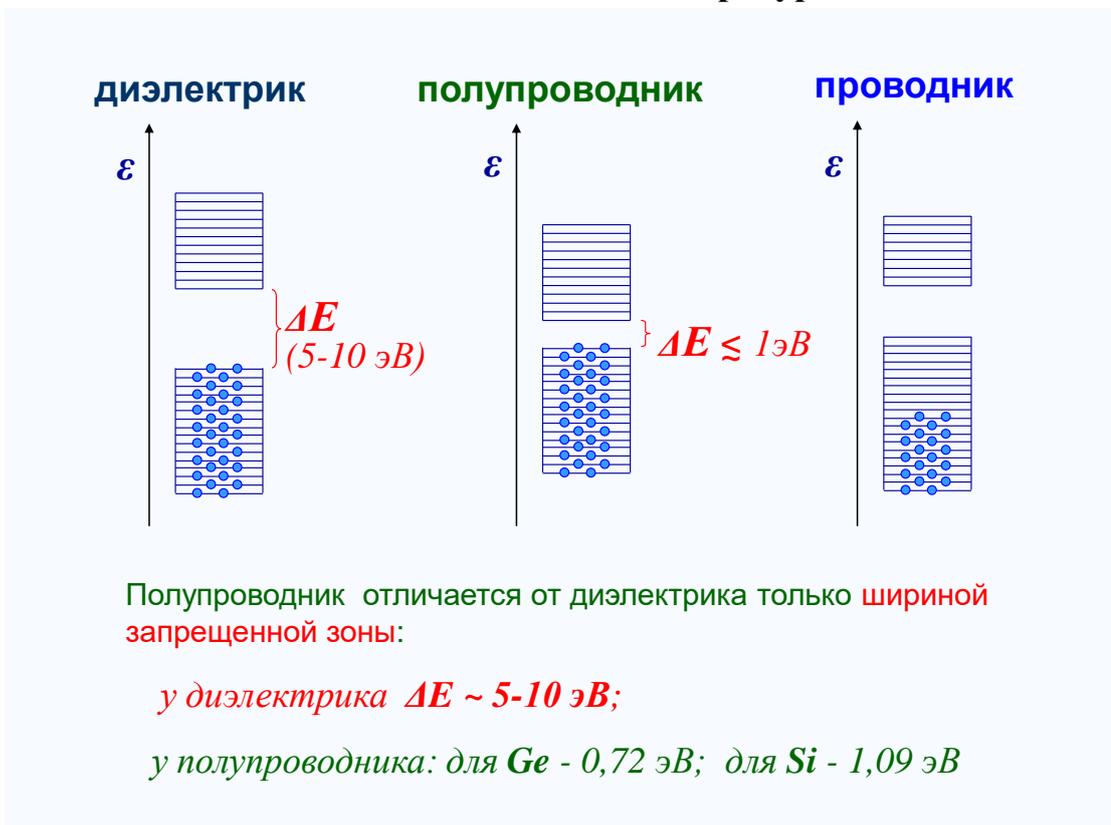
Разрешенные и запрещенные зоны



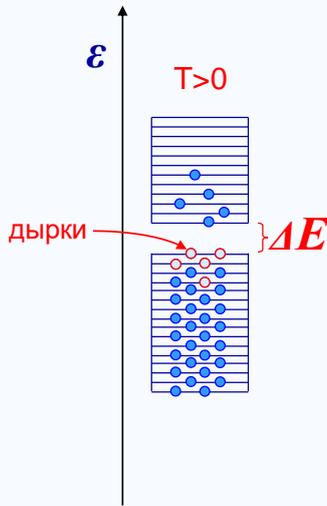
3.2. Проводники и диэлектрики



3.3. Полупроводники. Электроны и дырки в полупроводниках. Собственная проводимость полупроводника и её зависимость от температуры

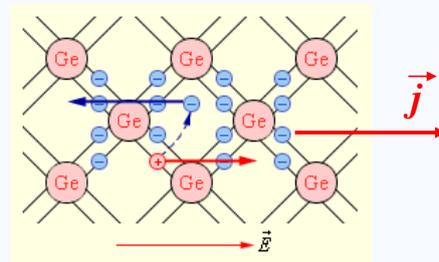
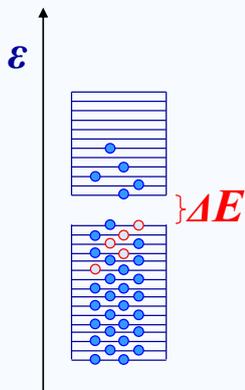
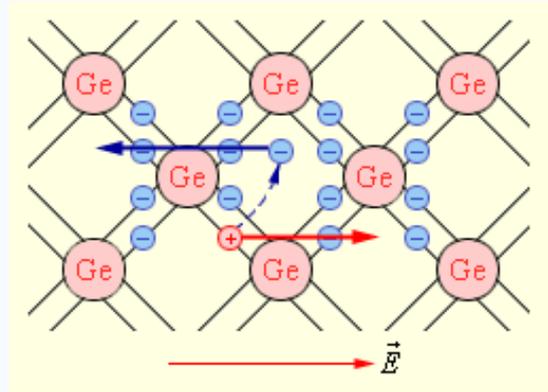


Полупроводники



При $T = 300\text{ K}$ концентрация электронов в зоне проводимости $n \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ 1/м}^3$
 (у металлов $n \sim 10^{28} - 10^{29} \text{ 1/м}^3$)

Парно-электронные связи в кристалле германия и образование электронно-дырочной пары.



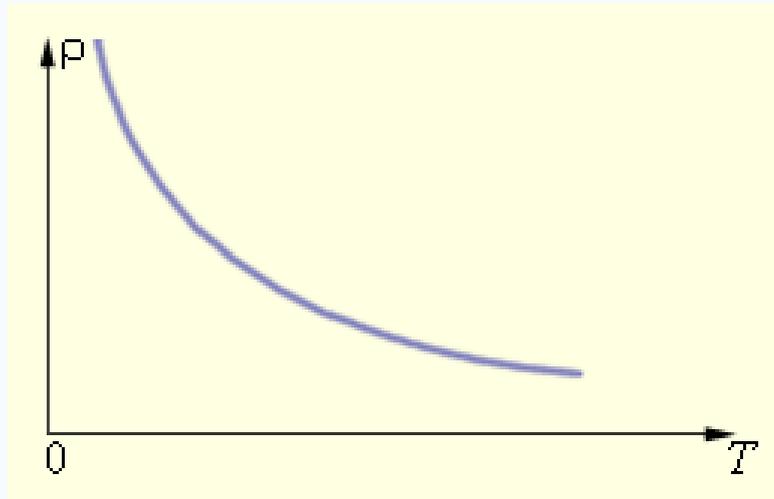
Плотность тока: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

Проводимость σ зависит от ширины запрещённой зоны и температуры:

$$\sigma(T) \sim e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

Удельное сопротивление полупроводника:

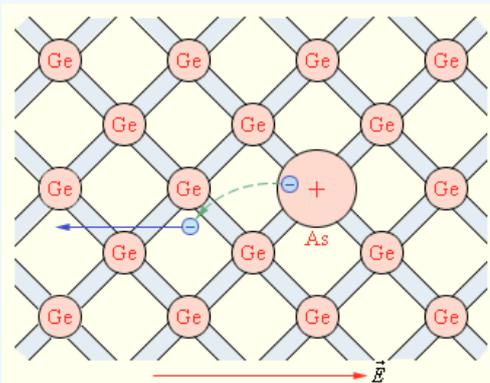
$$\rho = \frac{1}{\sigma}; \quad \rho(T) \sim e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$



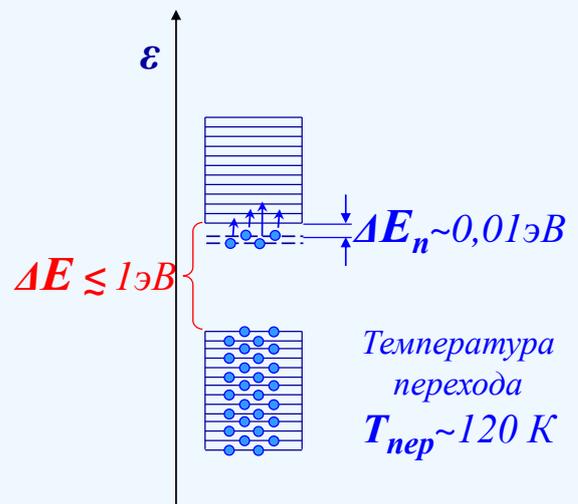
Зависимость удельного сопротивления ρ чистого полупроводника от абсолютной температуры T .

3.4. Примесная проводимость полупроводника. Электронная и дырочная проводимость

Полупроводники n -типа: доноры (5-вал.) P, As, Sb



Атом мышьяка (донорная примесь) в решетке германия.

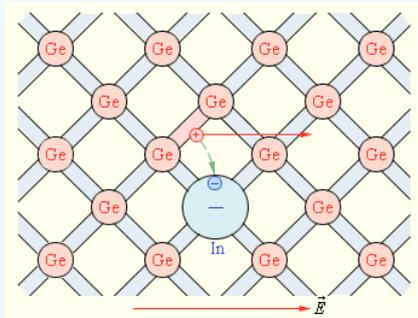


Концентрация основных носителей тока практически не зависит от температуры: $n_{осн} \sim 10^{22} - 10^{23} \text{ 1/м}^3$

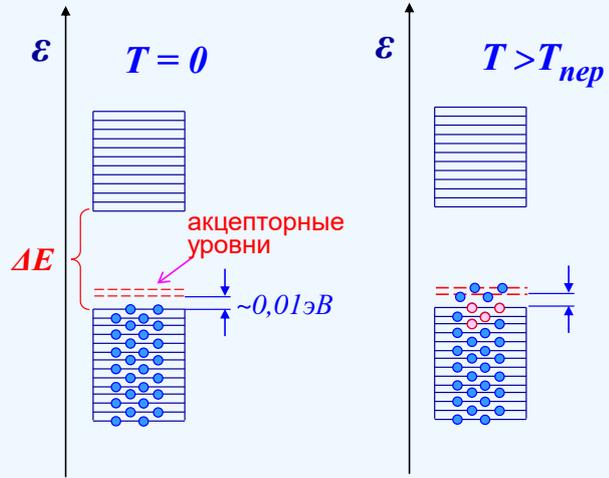
$$(n_{неосн} \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ 1/м}^3)$$

Полупроводники *p*-типа

Акцепторы (3-вал.): **B, Al, Ga, In**



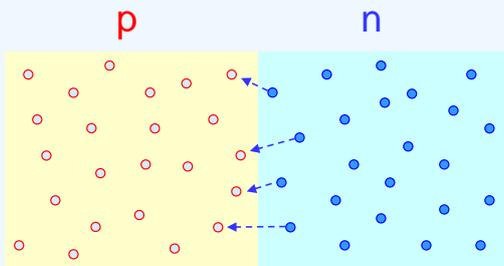
Атом индия
(акцепторная примесь)
в решетке германия.



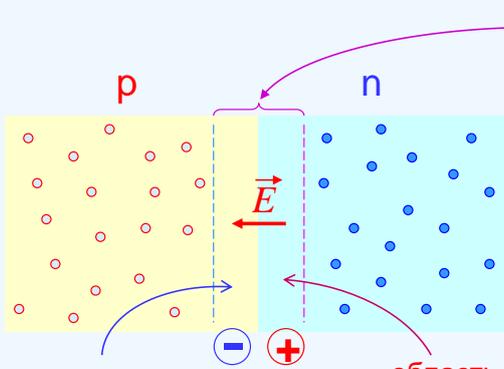
$T_{пер} \sim 120 K$

3.5. *p-n*-переход. Выпрямление переменного тока

Образование запирающего слоя
при контакте полупроводников *p*- и *n*-типов



Электроны и дырки диффундируют
навстречу друг другу и
рекомбинируют.

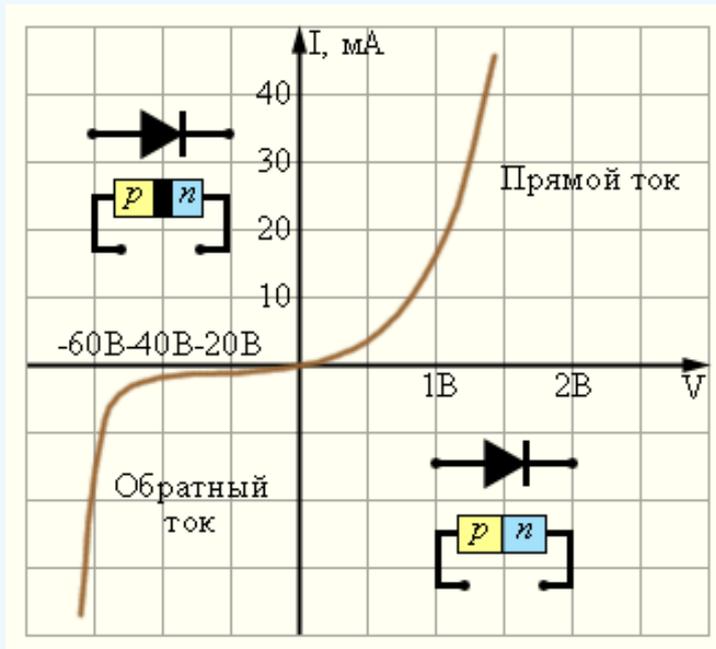
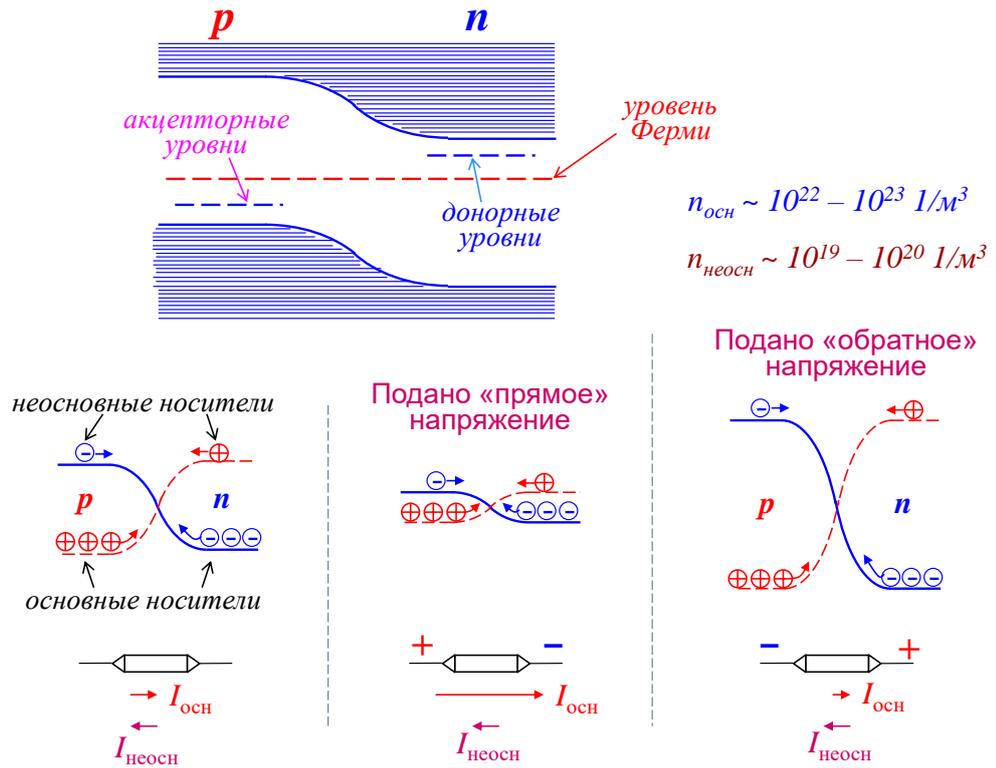


Область контакта обеднена
носителями заряда и обладает
высоким сопротивлением.

Возникает контактная разность
потенциалов, которая препятствует
дальнейшей диффузии. Образуется
потенциальный барьер.

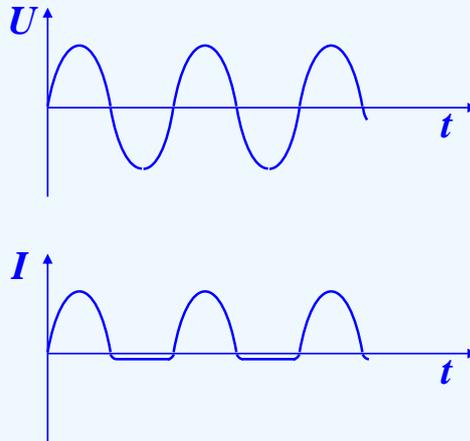
область с избытком
электронов

область с недостатком
электронов



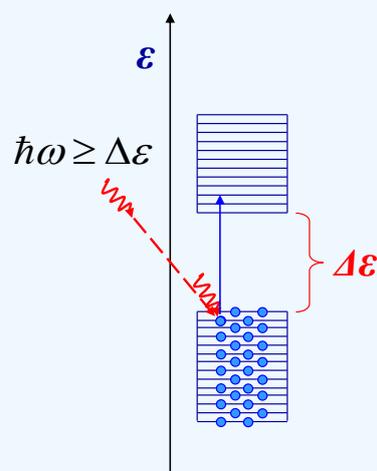
Вольт-амперная характеристика кремниевого диода. На графике использованы различные шкалы для положительных и отрицательных напряжений.

Выпрямление тока на полупроводниковом диоде



3.6. Внутренний фотоэффект. Вентильный фотоэффект. Солнечные батареи

Внутренний фотоэффект



Фоторезисторы

1. Видимая часть спектра ($\lambda \sim 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$):

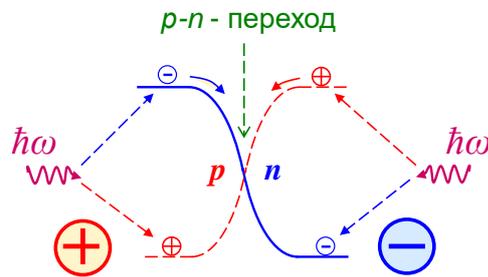
$$\Delta \varepsilon \approx \frac{hc}{\lambda} \approx 2,5 \text{ эВ} \quad - \text{CdS}$$

2. Инфракрасная часть спектра ($\lambda \sim 10^{-6} \text{ м}$):

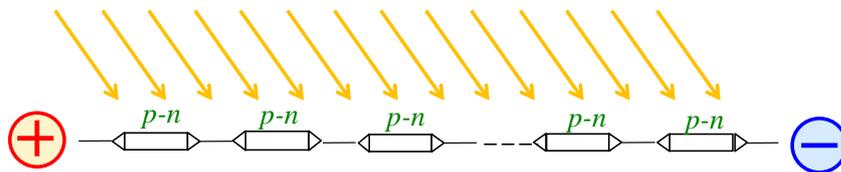
$$\Delta \varepsilon \approx 1,2 \div 2,5 \text{ эВ}$$

PbS, PdSe, PbTe, InSb

Вентильный фотоэффект (возникновение фото-ЭДС)



Солнечная батарея



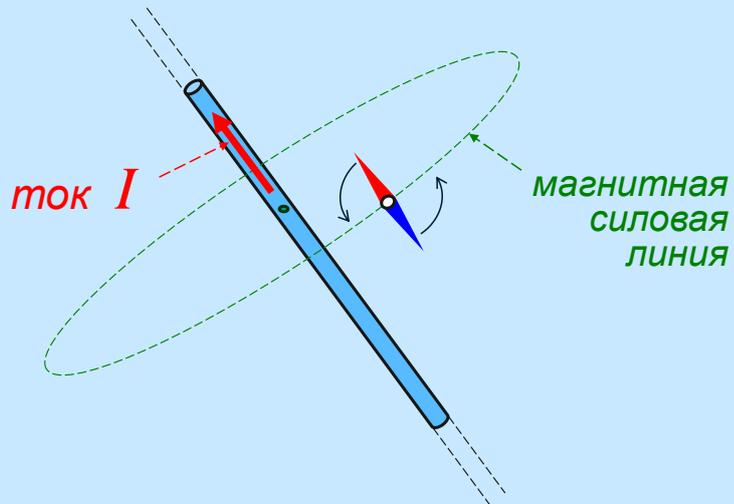
Солнечные батареи, в основе действия которых лежит вентильный фотоэффект, получили в наше время широчайшее распространение. В космосе – это основной источник питания кораблей и станций. На земле солнечные электростанции становятся серьёзными альтернативными источниками электроэнергии по отношению к ТЭС, ГЭС и АЭС. Становятся реальными проекты применения солнечных батарей для длительных беспосадочных полётов воздушных судов.



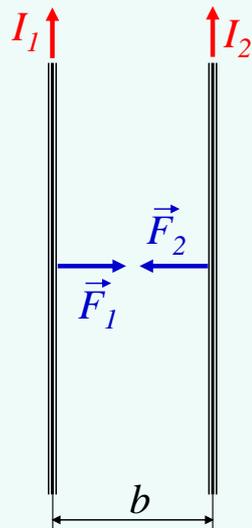
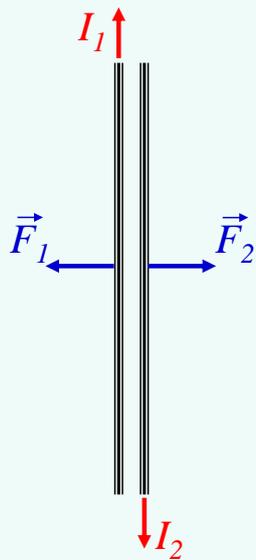
Тема 4. Магнитное поле. Сила Лоренца. Эффект Холла. Закон Ампера

4.1. Магнитные взаимодействия. Магнитное взаимодействие токов

Открытие Эрстеда (1820 г.)



Магнитное взаимодействие токов



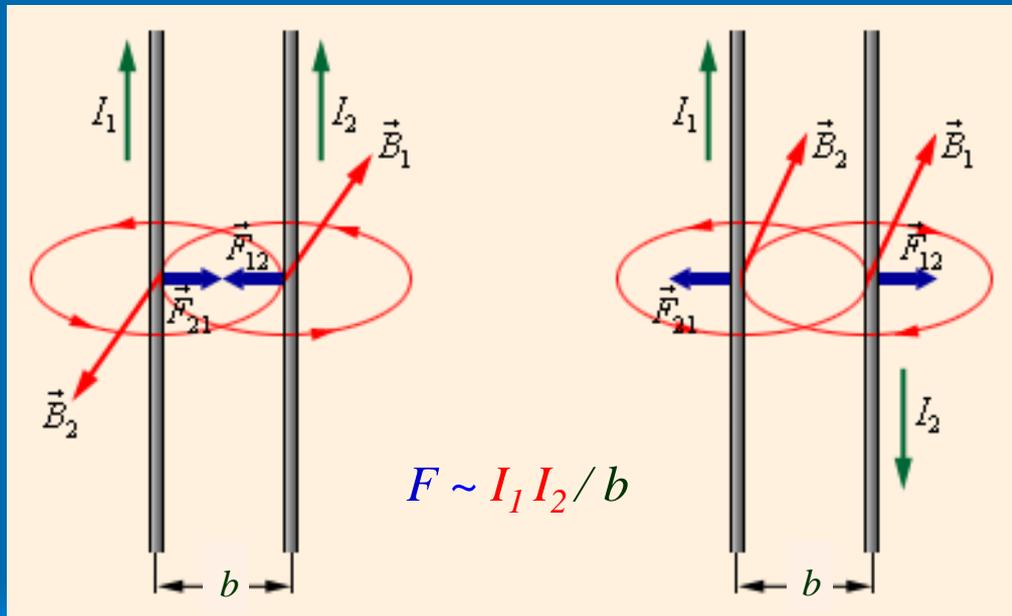
$$F_1 = F_2 = F$$

$$F \sim I_1 I_2 / b$$



Ампер Андре-Мари
(1775 – 1836) –
великий французский
физик и математик

Посредник взаимодействующих токов - магнитное поле



4.2. Сила Лоренца. Магнитная индукция. Движение заряженных частиц в магнитном поле

Сила Лоренца. Взаимное расположение векторов \vec{v} , \vec{B} , \vec{F}_L

Магнитное поле действует на движущиеся заряды:

$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B} \quad \mathbf{B} - \text{магнитная индукция}$$

$$[B] = \frac{[F]}{[q][v]} = \frac{H}{\text{Кл} \cdot \text{м} / \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2} \equiv \text{Тл (тесла)}$$

В электромагнитном поле:

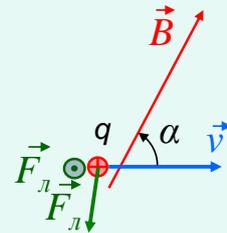
$$\vec{F}_L = q \vec{E} + q \vec{v} \times \vec{B}$$

Сила Лоренца. Взаимное расположение векторов \vec{v} , \vec{B} , \vec{F}_L

$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$$

B – магнитная индукция

Направление силы Лоренца – по правилу правого винта:



По модулю:

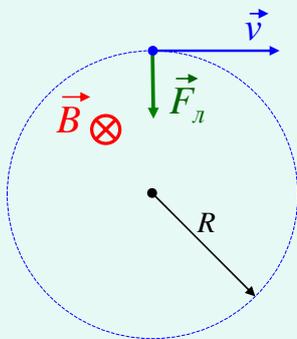
$$F_L = q v B \sin \alpha$$

Движение заряженной частицы в магнитном поле

$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$$

По модулю: $F_L = q v B \sin \alpha$

Пусть скорость перпендикулярна вектору магнитной индукции.



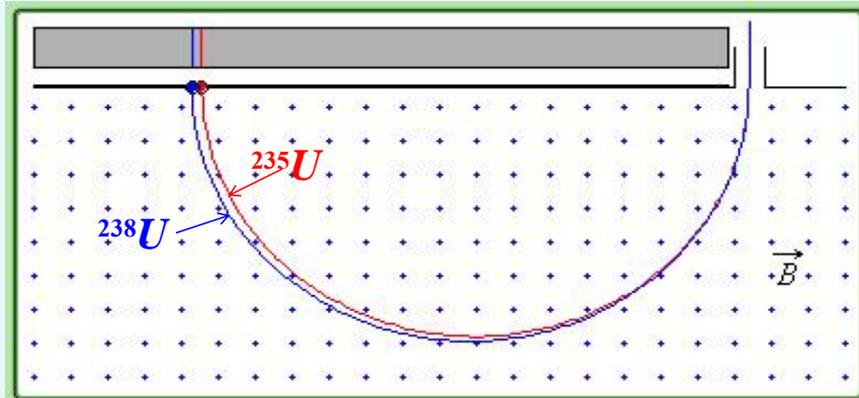
По 2-му закону Ньютона: $m \vec{a} = \vec{F}_L$

$$m \frac{v^2}{R} = q v B$$

В этом случае заряженная частица движется по окружности радиусом

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Масс-спектрометр

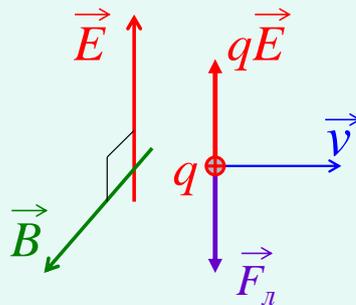


Пример: разделение изотопов урана

$$R = \frac{m v}{q B};$$

← массовое число →
 ^{235}U ,
 ^{238}U

Движение заряженной частицы в скрещенных под прямым углом электрическом и магнитном полях

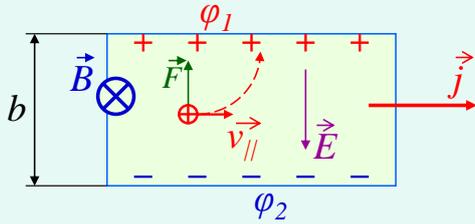


Условие неизменности скорости движения заряженной частицы:

$$qE = F_L; \quad qE = qvB; \quad \boxed{v = \frac{E}{B}}$$

4.3. Эффект Холла

Эффект Холла (гальваномагнитное явление), 1879 г.



$$\phi_1 - \phi_2 \equiv U_H = R j B b$$

R – константа Холла

Теоретическое обоснование:

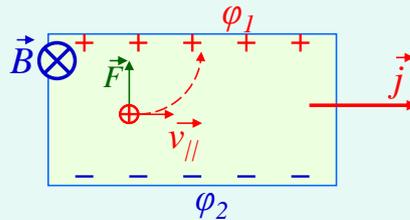
$$F_{\Lambda} = qv_{\parallel}B; \quad qE = qv_{\parallel}B; \quad E = v_{\parallel}B; \quad U_H = Eb = v_{\parallel}Bb$$

$$j = qv_{\parallel}n; \quad v_{\parallel} = \frac{j}{qn}; \quad U_H = \frac{1}{qn} j B b; \quad R = \frac{1}{qn} \quad U_H \sim \frac{1}{n} (!)$$

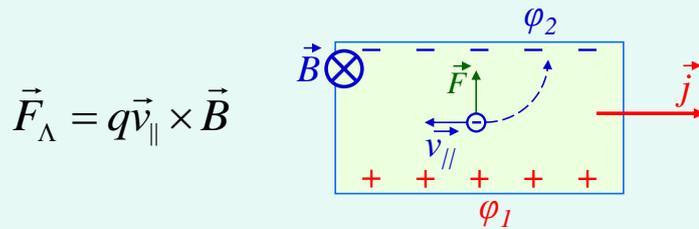
n – концентрация зарядов (у металлов $n \sim 10^{28} - 10^{29} \text{ 1/м}^3$,
у полупроводников $n \sim 10^{22} - 10^{23} \text{ 1/м}^3$)

Применение эффекта Холла для определения знака носителей заряда

Положительные носители заряда

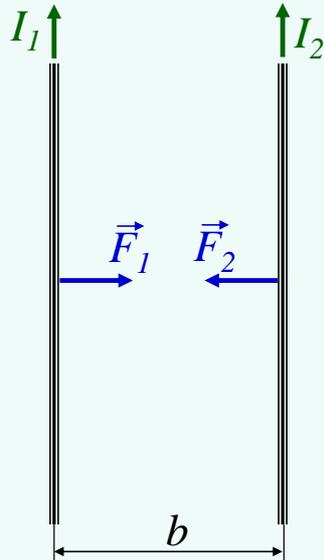


Отрицательные носители заряда



4.4. Сила Ампера. Силы электромагнитного давления молнии на обшивку воздушного судна

Закон Ампера (1820)

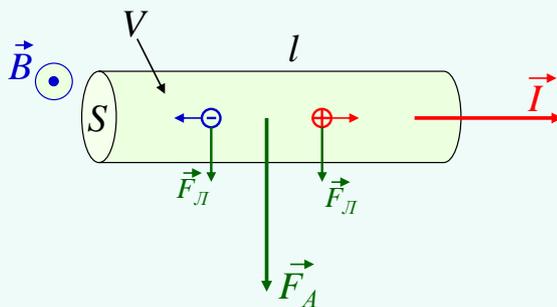


Сила на единицу длины проводника:

$$F_{ed} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 \cdot I_2}{b}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

Сила Ампера



$$F_A = F_L n V = F_L n S l$$

n – концентрация зарядов

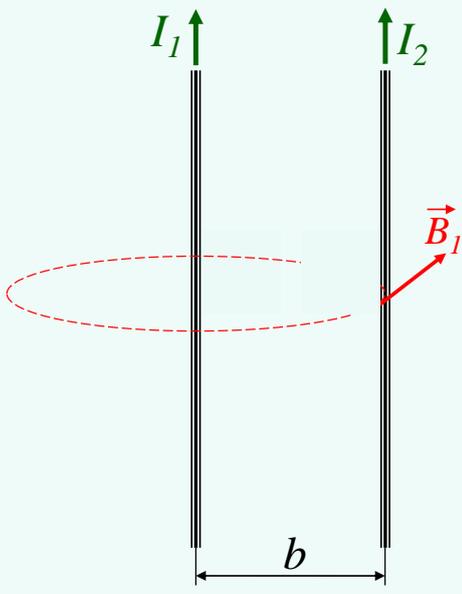
$$F_L = q v B$$

$$F_A = q v n S B l; \quad j = q v n; \quad F_A = j S B l = I B l$$

В общем случае:

$$\vec{F}_A = \vec{I} \times \vec{B} \cdot l$$

$$F_A = I B l \sin \alpha$$



Сила, действующая на единицу длины проводника при взаимодействии двух токов:

$$F_{ed} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 \cdot I_2}{b}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

Сила, действующая на 2-й проводник длиной l со стороны 1-го тока:

$$F_2 = F_{ed} l = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1}{b} I_2 l$$

$$F_2 = F_A = I_2 B_1 l$$

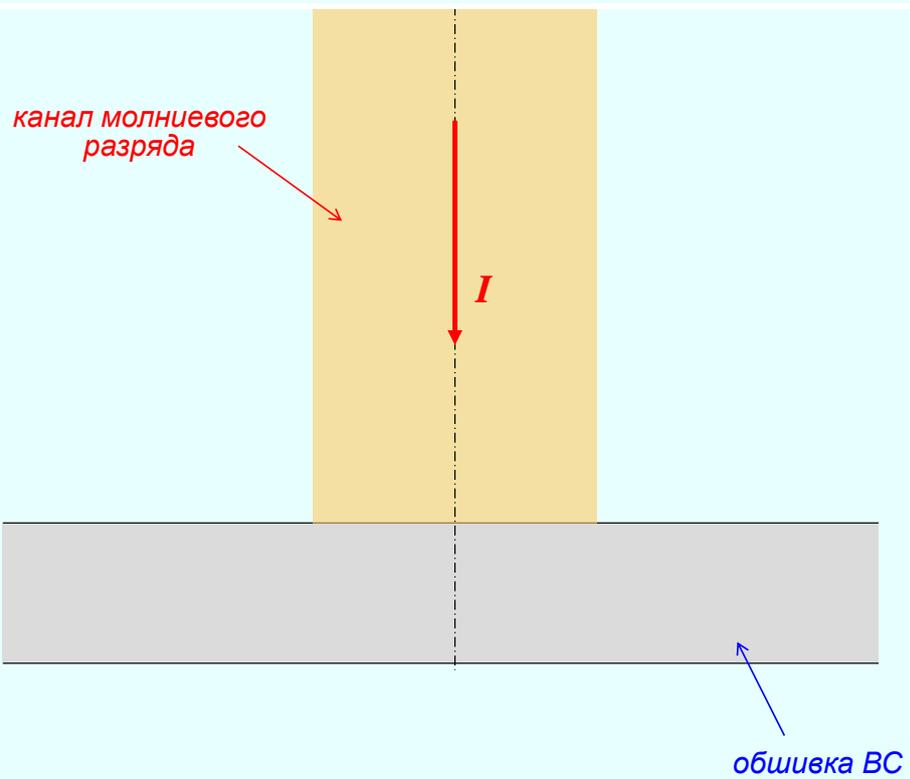
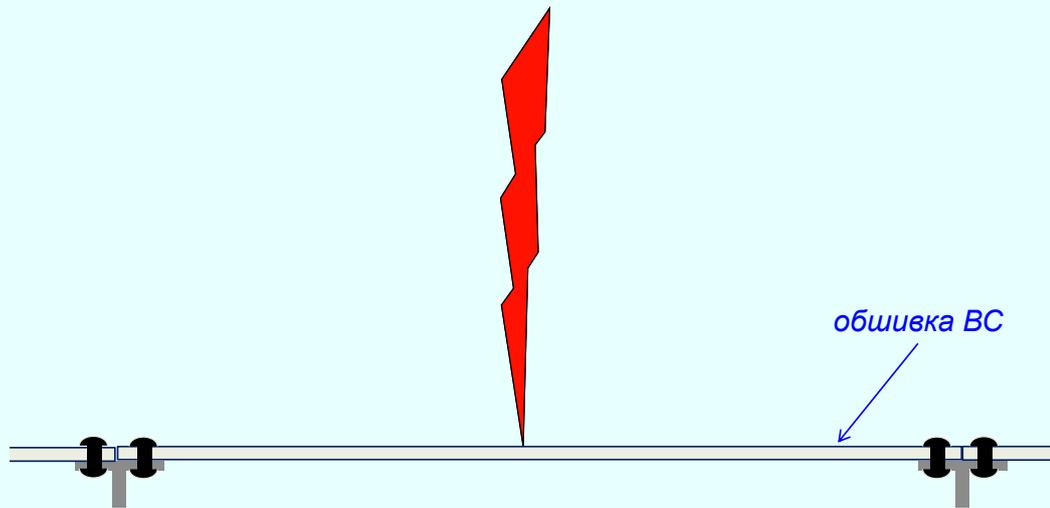
т.е. величина магнитной индукции поля, создаваемого прямым током :

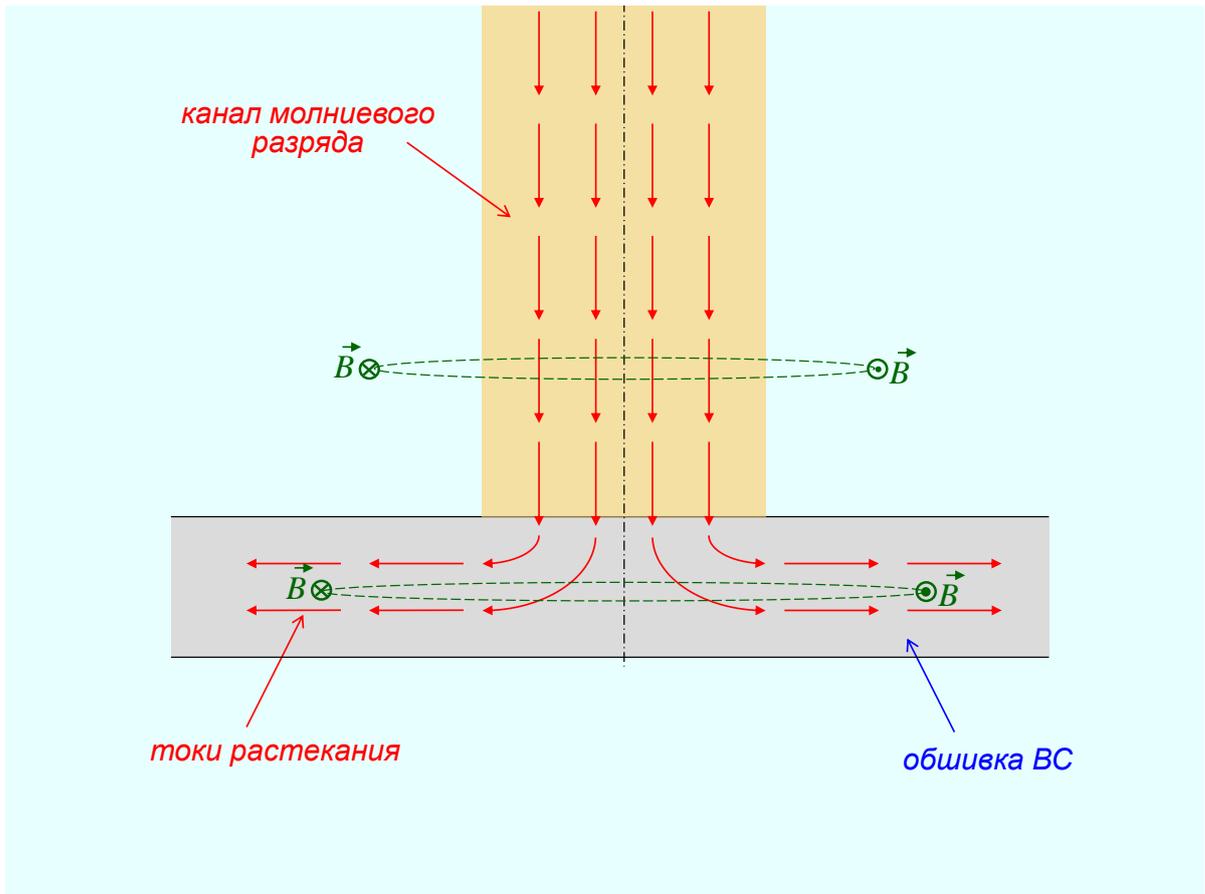
$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1}{b}$$

Рассмотрим теперь механизм электромеханического воздействия молнии на металлические конструкции, например, воздушных судов при поражении их молнией.



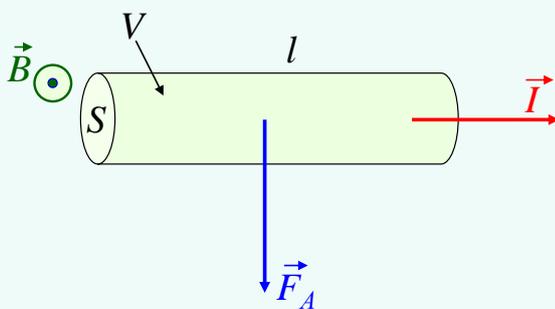
Воздействие молнии на элемент обшивки воздушного судна





(из §4.2)

Сила Ампера



$$\vec{F}_A = \vec{I} \times \vec{B} \cdot l$$

Далее:

$$\vec{I} = \vec{j} S;$$

↑
плотность тока

$$\vec{F}_A = \vec{j} \times \vec{B} l S = \vec{j} \times \vec{B} V$$

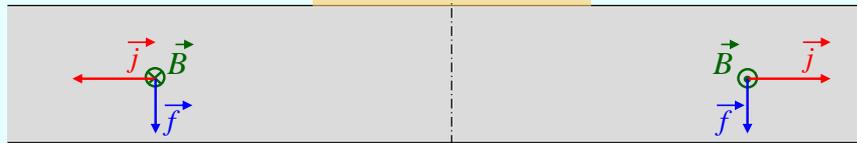
Новое определение. **Объёмная плотность пондеромоторной силы:**

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}_A}{V};$$

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$$

Объемная плотность
пандеромоторной силы:

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$$



Пандеромоторная сила оказывает на обшивку воздушного судна давление, направленное внутрь, вне зависимости от направления разрядного тока!

Объемная плотность
пандеромоторной силы:

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$$



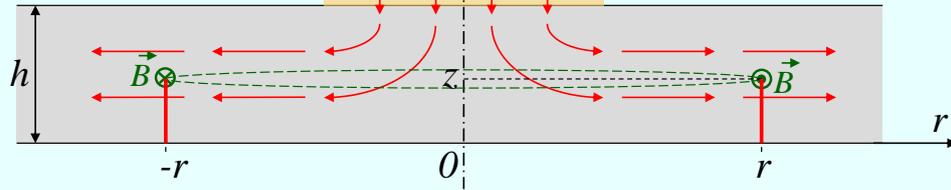
Пандеромоторная сила оказывает на обшивку воздушного судна давление, направленное внутрь, вне зависимости от направления разрядного тока.

Для определения пондеромоторного давления (фактически – силы Ампера в расчете на единицу площади обшивки) необходимо знать объемную плотность пондеромоторной силы в любой точке с координатами r и z :

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}.$$

Магнитную индукцию определяем с помощью теоремы о циркуляции магнитного поля:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S}$$



Если выбрать контур L в виде окружности с центром на оси симметрии, то он будет совпадать с магнитной силовой линией, на которой в силу симметрии магнитная индукция будет одинаковой в любой точке контура.

Тогда интеграл слева принимает простой вид:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = B \cdot 2\pi r$$

Интеграл справа сложен, если его брать по площади внутри выбранного контура.

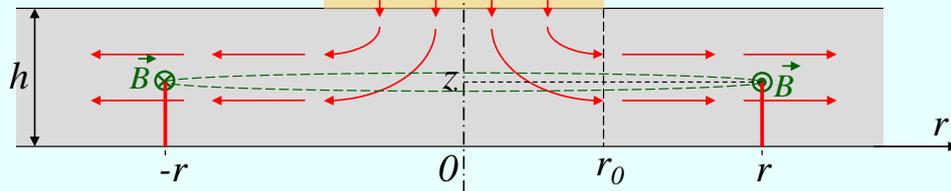
Однако этот интеграл есть суммарный ток, пронизывающий контур, и он же протекает через цилиндрическую поверхность под контуром:

$$\int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_0^z j 2\pi r dz'$$

$$\begin{aligned} \oint_L \vec{B} d\vec{l} &= \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S}; \\ \oint_L \vec{B} d\vec{l} &= B \cdot 2\pi r; \\ \int_S \vec{j} d\vec{S} &= \int_0^z j 2\pi r dz'. \end{aligned}$$

Если считать плотность тока одинаковой по толщине обшивки, то для области $r \geq r_0$:

$$\int_S \vec{j} d\vec{S} = j 2\pi r z.$$



А поскольку в этом случае

$$j = \frac{I}{2\pi r h},$$

то
$$\int_S \vec{j} d\vec{S} = \frac{I z}{h}.$$

Таким образом,

$$B = \frac{\mu_0 I z}{2\pi h r}.$$

Обратим внимание на интересный промежуточный результат: на нижней поверхности обшивки ($z=0$) магнитная индукция равна нулю. Т.е. магнитное поле сверхсильного тока молнии не проходит через проводящую поверхность внутрь воздушного судна.

Объемная плотность пондеромоторной силы:

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$$

$$j = \frac{I}{2\pi r h},$$

$$B = \frac{\mu_0 I z}{2\pi h r}.$$

Пондеромоторное (электромагнитное) «давление» на обшивку:

$$p(r) = \int_0^h f dz$$

$$p(r) = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 r^2}$$

Важно отметить, что результат полученный в условиях допущения однородности плотности тока растекания по всей толщине обшивки, справедлив для любого распределения плотности тока.

Интересной темой исследования, которую также можно предложить очень продвинутым в математике учащимся, является учет пинч-эффекта в канале разряда. Этот эффект обусловлен теми же пондеромоторными силами, но в канале разряда. Можно убедиться, что вне зависимости от направления тока разряда эти силы сжимают канал, создавая в нём дополнительное давление, которое в соответствии с законом Паскаля передаётся и на обшивку воздушного судна при его поражении молнией.

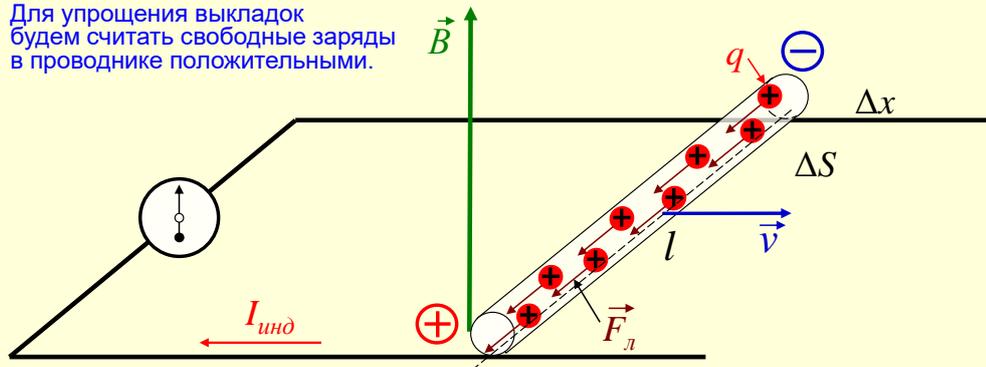
Кроме того, пинч-эффект вызывает перераспределение плотности тока в канале разряда, делая её неоднородной по радиусу канала разряда, что создаёт особенности в расчете пондеромоторного давления на обшивку непосредственно под пятном канала. Т.е. обнаруживается целый круг вопросов, которые могут составить целый ряд тем для исследования.

Тема 5. Электромагнитная индукция

5.1. ЭДС индукции, закон Фарадея-Ленца

Возникновение ЭДС индукции в движущемся проводнике

Для упрощения выкладок будем считать свободные заряды в проводнике положительными.



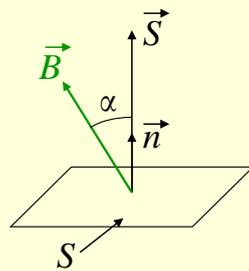
Сила Лоренца $\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$; её работа $A = F_L \cdot l$; F_L – сторонняя сила

ЭДС индукции: $|\mathcal{E}| = \frac{A_{cm}}{q} = vBl$. При равномерном движении проводника: $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

$$|\mathcal{E}| = Bl \frac{\Delta x}{\Delta t} = B \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta(BS)}{\Delta t} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Φ – магнитный поток

Поток магнитного поля (магнитный поток)



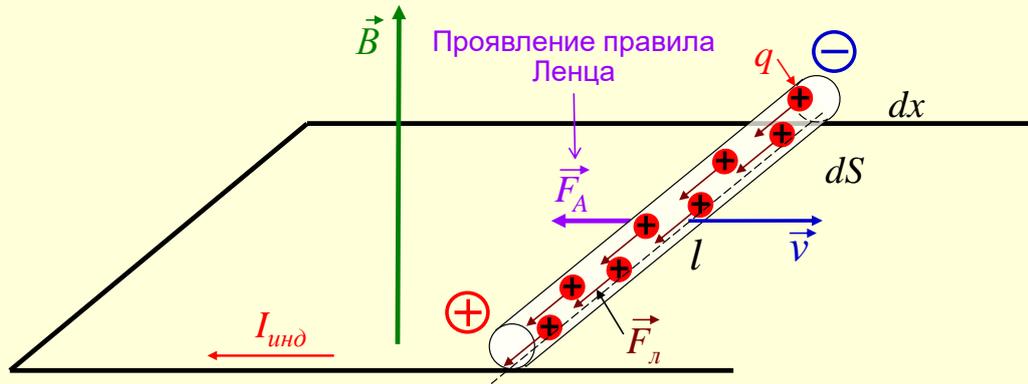
Для однородного поля

$$\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

Вектор площадки: $\vec{S} = S \vec{n}$; $|\vec{n}| = 1$
единичный вектор, нормальный площадке

По модулю: $\Phi_m = BS \cos \alpha$

Возникновение ЭДС индукции в движущемся проводнике



ЭДС индукции: $|\mathcal{E}| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

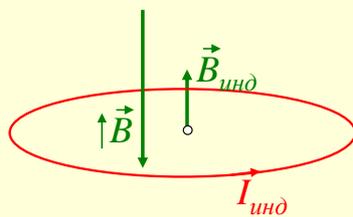
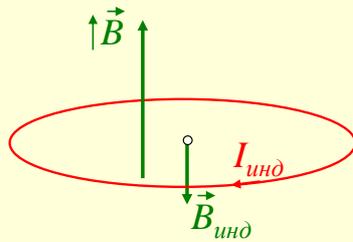
При переменной скорости необходимо $\Delta t \rightarrow 0$, тогда $v = \frac{dx}{dt}$, т.е. $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \rightarrow \frac{d\Phi}{dt}$

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{- закон Фарадея}$$

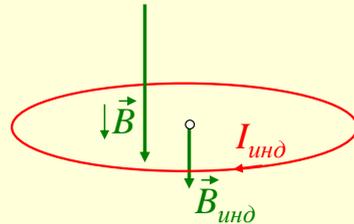
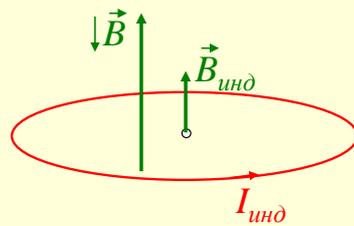
Знак минус – по правилу Ленца

Иллюстрация правила Ленца

1) \mathbf{B} нарастает $\left(\frac{dB}{dt} > 0\right)$



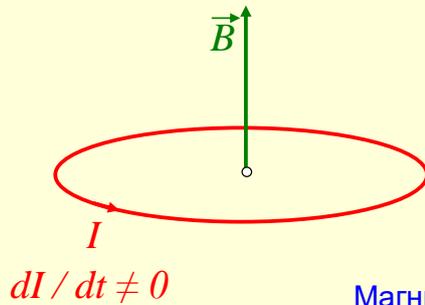
2) \mathbf{B} убывает $\left(\frac{dB}{dt} < 0\right)$



5.2. Явление самоиндукции. Индуктивность

ЭДС индукции возникает в контуре с током, когда поток магнитного поля, создаваемого этим током, изменяется во времени.

$B \sim I$ (по Био и Савару)



Магнитный поток
собственного поля $\Phi = LI$

L – индуктивность витка

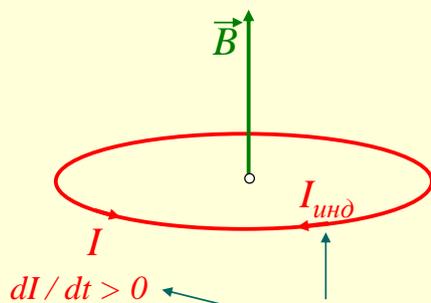
Магнитный поток через контур изменяется при переменном токе в контуре.

По закону индукции Фарадея:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt};$$

т.е. ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}$$



L – индуктивность витка

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}$$

по правилу Ленца

Действие правила Ленца: если ток в контуре нарастает, то рождаемый ЭДС самоиндукции индукционный ток в контуре направлен противоположно первичному току.

И наоборот.

$$[L] = B \cdot c / A \equiv \text{Гн (генри)}$$



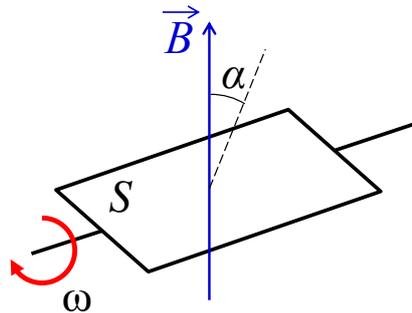
Генри (Henry) Джозеф
(1797 – 1878)

5.3. Инженерная реализация. Электрогенераторы

Явление электромагнитной индукции лежит в основе принципа работы устройств по преобразованию механической энергии в электрическую – **электрогенераторов**.

Изменение магнитного потока через проводящую рамку, где в результате рождается ЭДС индукции, достигается двумя основными способами.

1. Рамка вращается в магнитном поле.



ЭДС в одном витке:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad \Phi = BS \cos \alpha$$

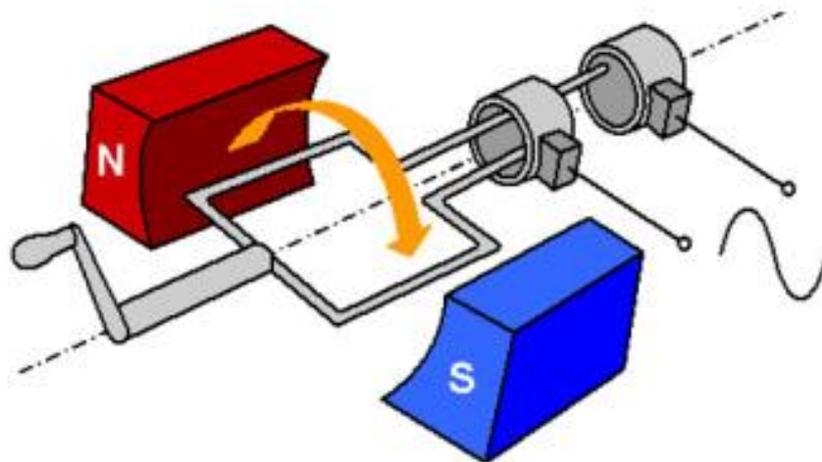
$$\alpha = \omega t$$

$$\mathcal{E} = BS\omega \sin \omega t$$

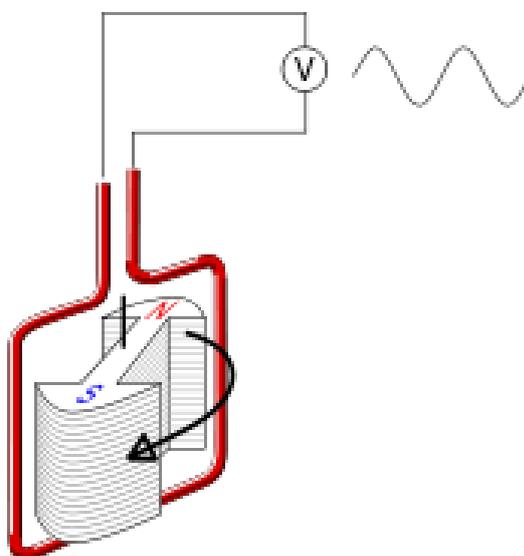
Если в рамке N витков:

$$\mathcal{E} = NBS\omega \sin \omega t$$

1. Рамка вращается в магнитном поле.



1. Рамка неподвижна, вращается магнит.



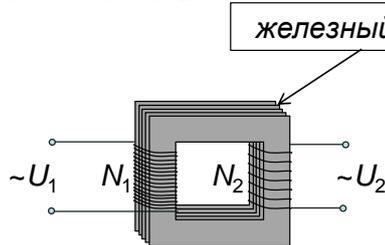
В этой части открывается широкая **тематика исследовательских проектов** школьников. В первую очередь, интерес представляет сравнение преимуществ и недостатков того и другого принципов (и те и другие генераторы относят к классу электромеханических) устройства генераторов, их конструктивные особенности. Далее – изучение различных видов генераторов в соответствии с принятой их классификацией:

1. По типу двигателя, вращающего ротор генератора:
 - паровая или газовая турбина,
 - гидротурбина,
 - двигатель внутреннего сгорания,
 - ветряной двигатель.
2. По виду выходного электрического тока – трёхфазный генератор.
3. По способу возбуждения:
 - с возбуждением постоянными магнитами,
 - с внешним возбуждением,
 - с самовозбуждением.

Кроме того, открывается широкий круг исследования других принципов работы электрогенераторов (магнетогидродинамические, термоэлектрические, фотоэлектрические, химические и др.)

5.4. Трансформаторы и индукторы

Трансформатор – устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.



ЭДС в каждом витке
первичной и вторичной обмоток: $e = -\frac{d\Phi}{dt}$

Напряжения в первичной и вторичной
обмотках (при их малых сопротивлениях):

$$U_1 = N_1 e; \quad U_2 = N_2 e$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \text{ - коэффициент трансформации}$$

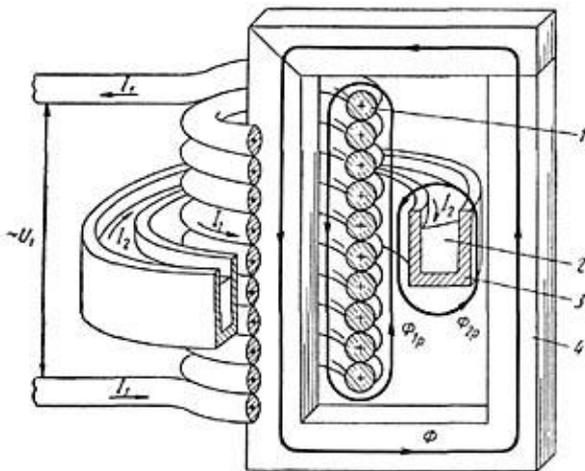
$K > 1$ – понижающий трансформатор,

$K < 1$ – повышающий трансформатор,

Мощности при малых потерях в обмотках: $P_1 = P_2; \quad I_1 U_1 = I_2 U_2$

Следовательно, отношение токов в обмотках: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{K}$

Индукционные печи предназначены для плавки металлов.



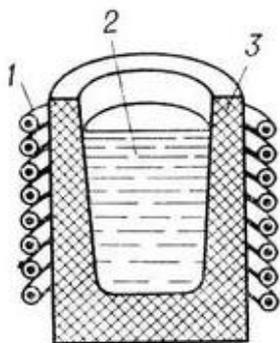
Канальная индукционная печь
конструктивно похожа
на трансформатор.

1. Первичная обмотка, питаемая током промышленной (50/60 Гц) или повышенной (400 Гц) частоты, выполнена из медной, охлаждаемой изнутри жидким теплоносителем, трубки.
2. Вторичная короткозамкнутая обмотка – расплав;

3. Кольцеобразный тигель из жаростойкого диэлектрика, в котором помещается расплав;

4. Наборный из пластин трансформаторной стали магнитопровод.

Тигельная индукционная печь использует вихревые токи (токи Фуко).



1. Обмотка индуктора.
2. Расплавленный металл.
3. Тигель из тугоплавкого диэлектрика.

Из-за отсутствия магнитопровода требует высокой частоты.



Проявление отрицательной роли явления электромагнитной индукции имеет место, например, при воздействии молнии на летательные аппараты. Очень сильный ток в разряде (до сотен килоампер) развивается в течение весьма короткого времени (десятки микросекунд), что приводит к сверхвысокой скорости изменения магнитной индукции. А это, в свою очередь, может вызвать очень сильные наводки перенапряжения в электросетях, а также в приборном оборудовании на борту воздушного судна. Особо страдают бортовые вычислительные устройства, цепи которых рассчитаны на вольты и даже милливольты, в случае, если эти устройства не защищены. Защитой оборудования является цельнометаллический корпус летательного аппарата. Но у самолёта есть диэлектрические «окна» для мощной электромагнитной волны, рождаемой молниевым разрядом (например, иллюминаторы). Кроме того, в самолетостроении в качестве материалов для обшивки корпуса все большую часть занимают композиционные материалы, в большинстве своем – диэлектрики. Так что одной из серьезных проблем, стоящих перед конструкторами, является проблема защиты оборудования от наводок паразитного напряжения, рождаемого молнией.

Здесь фактически обозначена **тематика исследований** по вопросам полезного использования явления электромагнитной индукции, а также защиты от неблагоприятного его воздействия на объекты, жизненно важные для человека.

Литература

1. Физика: Механика. Учебник для углубленного изучения физики под ред. Мякишева. 10-11 кл. М.: Дрофа, 2008.
2. Касьянов В.А. Физика. 10 класс. Учебник для общеобразовательных учреждений. М.: Дрофа, 2008.
3. Касьянов В.А. Физика. 11 класс. Учебник для общеобразовательных учреждений. М.: Дрофа, 2008.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИНСТРУКЦИЯ

по навигации при показе слайдов

Поскольку презентация открываются сразу в режиме показа слайдов, то для перехода к следующему слайду, а также к следующему шагу анимации внутри данного слайда необходимо нажать на любую из клавиш: **N**, **Enter**, **Page Down**, пробел, со стрелкой «вправо», стрелкой «вниз» (или щелкнуть мышью).

Для показа клипа лекционной демонстрации внутри презентации необходимо щелкнуть мышью по заглавному кадру. По окончании клипа для перехода к следующему слайду необходимо щелкнуть мышью к область слайда вне кадра клипа.

Возврат к предыдущему слайду или предыдущей анимации производится нажатием одной из клавиш: **P**, **Page Up**, со стрелкой «вверх» или со стрелкой «влево».

Завершение показа слайдов: клавиша **Esc**.

*Примечание: 1. При перемещении мыши во время показа в левом нижнем углу слайда появляются значки навигации, позволяющие сделать шаг вперёд или шаг назад, вызвать контекстное меню или инструмент **Стрелка**.*

2. Вызвав контекстное меню, можно перейти к любому слайду презентации.

*3. Нажатие на клавишу **F1** во время показа слайдов открывает список всех команд навигации.*

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
Тема 1. Проводники и диэлектрики в электрическом поле	3
1.1. Электрическое поле и его характеристики	3
1.2. Проводник в электрическом поле. Электростатическая индукция. Электрическое поле заряженного проводника	8
1.3. Воздействие электрического поля на заряды. Инженерная реализация: ионный двигатель	10
1.4. Возникновение облачных зарядов. Механизмы образования статического электричества на воздушных судах	11
1.4. Атомы и молекулы в электрическом поле.....	16
1.5. Поле внутри диэлектрика. Электрическая индукция (электрическое смещение).....	18
1.6. Пьезоэлектрический эффект. Обратный пьезоэлектрический эффект. Примеры инженерной реализации.....	19
Тема 2. Электрический ток.....	21
2.1. Классическая теория электропроводности. Закон Ома. Проводимость. Сопротивление	21
2.2. Закон Ома для полной цепи	26
2.3. Закон Джоуля-Ленца. Работа и мощность тока Инженерная реализация. Тематика исследований	27
Тема 3. Полупроводники	33
3.1. Энергетические уровни в атоме и энергетические зоны в кристалле.....	33
3.2. Проводники и диэлектрики.....	34
3.3. Полупроводники. Электроны и дырки в полупроводниках. Собственная проводимость полупроводника и её зависимость от температуры	34
3.4. Примесная проводимость полупроводника. Электронная и дырочная проводимость	36
3.5. <i>p-n</i> -переход. Выпрямление переменного тока.....	37
3.6. Внутренний фотоэффект. Вентильный фотоэффект. Солнечные батареи.....	39
Тема 4. Магнитное поле. Сила Лоренца. Эффект Холла. Закон Ампера	41

4.1. Магнитные взаимодействия. Магнитное взаимодействие токов	41
4.2. Сила Лоренца. Магнитная индукция. Движение заряженных частиц в магнитном поле	42
4.3. Эффект Холла	45
4.4. Сила Ампера. Силы электромагнитного давления молнии на обшивку воздушного судна	46
Тема 5. Электромагнитная индукция	53
5.1. ЭДС индукции, закон Фарадея-Ленца	53
5.2. Явление самоиндукции. Индуктивность	55
5.3. Инженерная реализация. Электрогенераторы	56
5.4. Трансформаторы и индукторы	58
Литература	60
ПРИЛОЖЕНИЕ. Инструкция по навигации при показе слайдов	60