

# Полярные диэлектрики

Полярные

диэлектрики

- дипольная

(ориентационная)

поляризация, м.б.

кристаллическими,

жидкими и

газообразными.

Значения  $\epsilon$  до

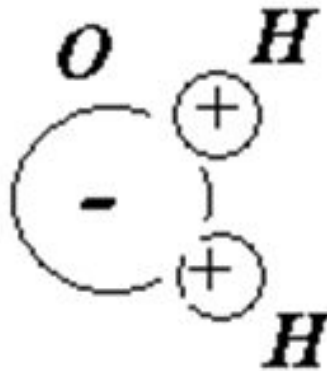
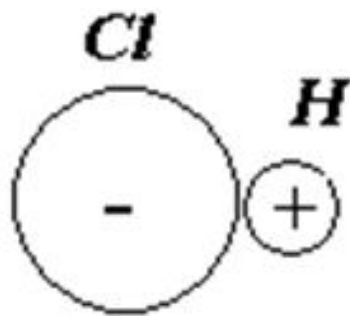
неск. десятков (в

жидкостях и кристаллах при комн. температуре).

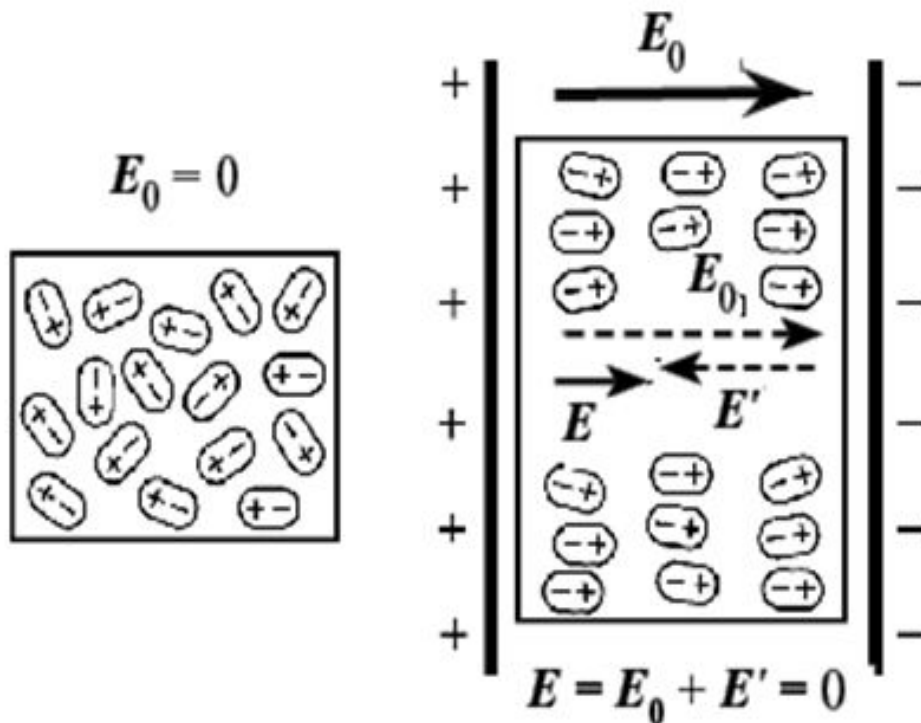
Молекулы полярных диэлектриков имеют собственный (не наведенный) ДМ.

ЭП поворачивает диполи  $p_0$  вдоль линий поля, их ДМ складываются и создают поляризацию

вещества.



# Полярные диэлектрики (2)



$$\kappa = \frac{np_0^2}{3kT} \Rightarrow$$

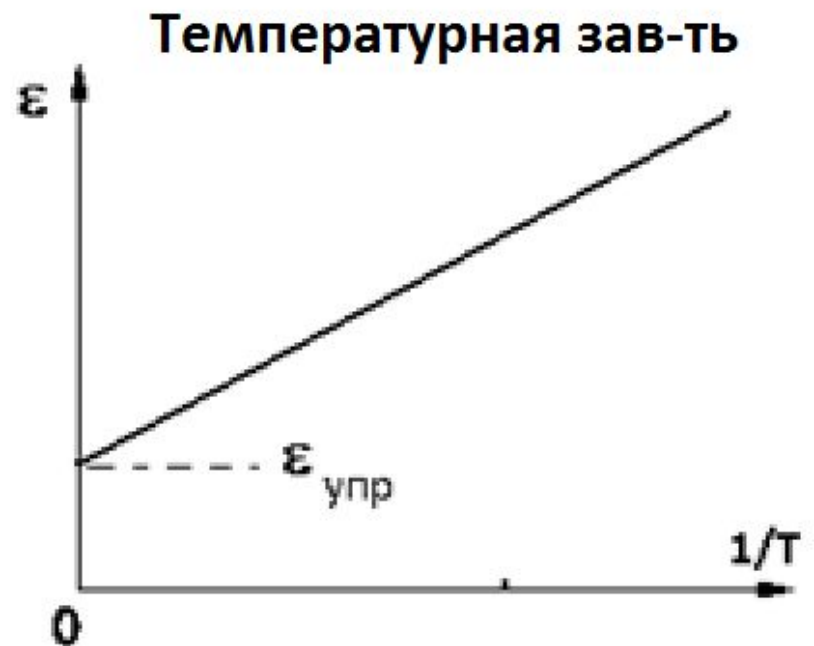
$$\varepsilon = 1 + \frac{np_0^2}{3kT}$$

кТ в знаменателе  $\leftarrow$   
 тепловое движение  
 нарушает ориентацию  
 диполей вдоль ЭП.

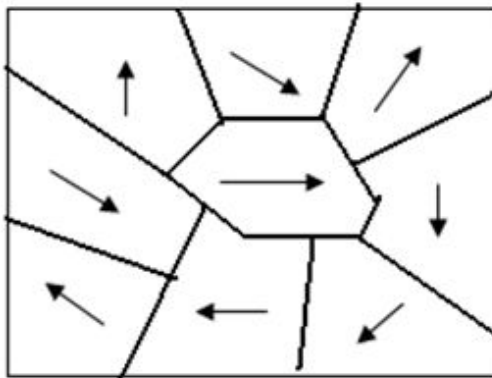
Признаки:

- 1)  $\kappa > 1$  ( $\varepsilon = 81$  для воды при комнатной температуре);
- 2)  $\varepsilon$  зависит от частоты -  $\downarrow$  с  $\uparrow f$ , т.к. молекулы не успевают развернуться
- 3) зависит от температуры -  $\downarrow$  с  $\uparrow t^\circ$

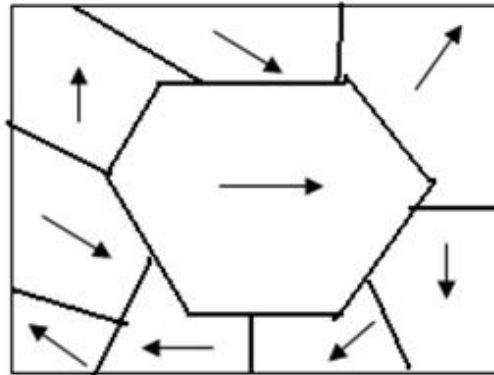
# Полярные диэлектрики (3)



# Сегнетоэлектрики



$$E = 0 \quad P = 0$$



$$\longrightarrow \\ E \neq 0 \quad P \neq 0$$

*Сегнетоэлектрики*  
(сегнетова соль  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) – это крист. диэлектрики, в которых есть области (домены) спонтанной поляризации, которая создается силами хим. связи в кристалле. Домен – часть

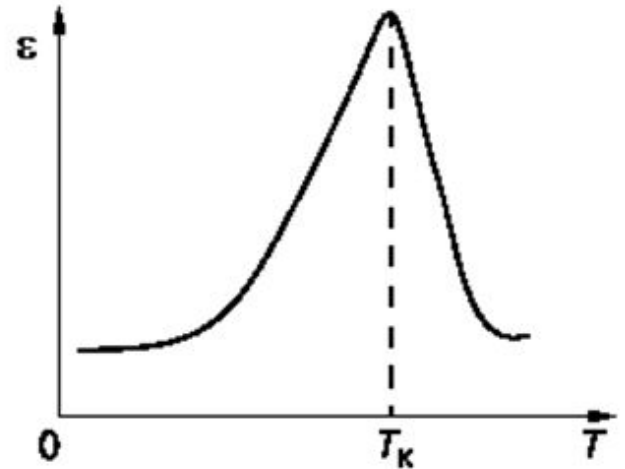
кристалла (кристаллита в поликристаллах), типичные размеры порядка микрона, а направления ДМ жестко связаны с выделенными направлениями в кристаллической решетке.

В равновесном состоянии без внешнего ЭП кристалл (кристаллит) самопроизвольно разбивается на несколько доменов так, чтобы их ДМ компенсировали друг друга и не создавали своего ЭП снаружи.

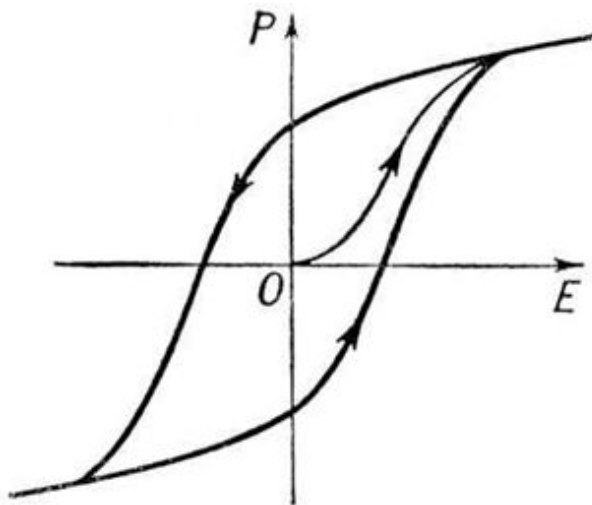
При включении внешнего ЭП происходит поляризация, но не за счет поворота доменов, а за счет перемещения границ между доменами (доменных стенок). В результате объем ориентированных вдоль поля доменов растет и появляется суммарный ДМ.

# Сегнетоэлектрики (2)

Особенности: 1) только кристаллы с определенной симметрией;  
2)  $\epsilon \gg 1$ , до  $10^4$ ;  
3)  $\epsilon \downarrow$  с  $\uparrow$  частоты изменения ЭП, т.к. доменные стенки не успевают передвигаться;  
4)  $\epsilon$  зависит от температуры: max при температуре Кюри  $T_K$ , при которой происходит ФП 2 рода и сегнетоэлектрик превращается в полярный диэлектрик;

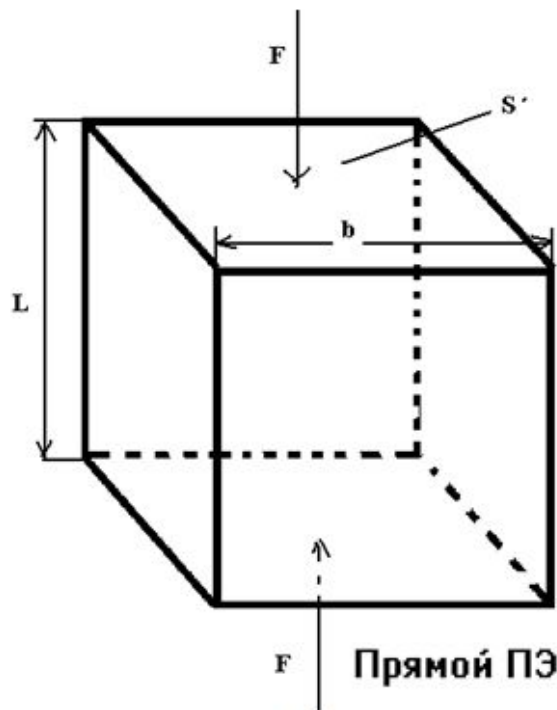


5) поляризованность нелинейно зависит от ЭП и наблюдается гистерезис:



# Пьезоэлектрики

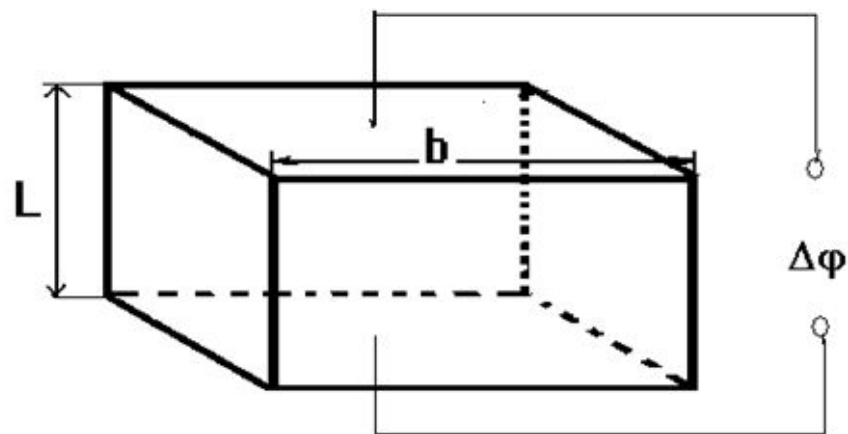
*Пьезоэлектрики*— кристаллические диэлектрики, в которых наблюдается *пьезоэффект*.



Под действием деформации возникает эл. заряд на поверхности и разность потенциалов

$$\Delta\phi = \alpha (F/S) L$$

$\alpha$  - пьезомодуль (типичное значение  $\alpha \sim 10 \text{ м}^2/\text{Кл}$ , что при  $(F/S) \sim 10^7 \text{ Па}$  и  $L \sim 1 \text{ мм} \Rightarrow \Delta\phi = 10^5 \text{ В}$ ).

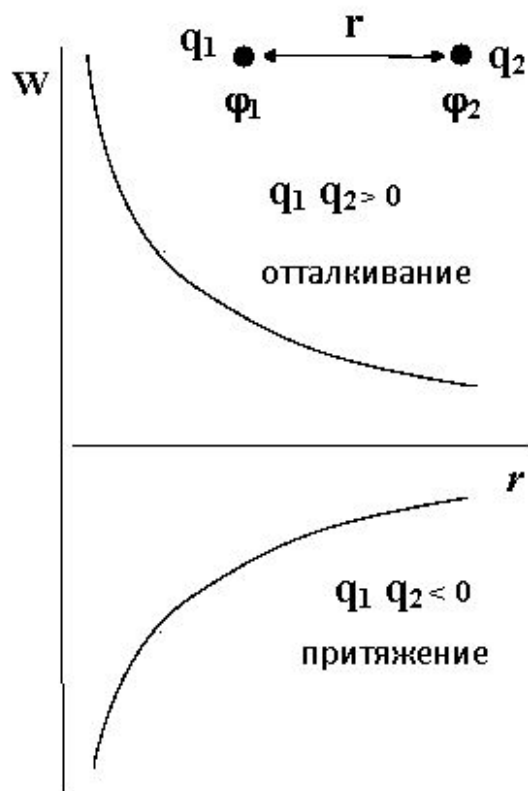


Обратный ПЭ

Приложенное напряжение меняет размеры (как L так и b):

$$\Delta L/L = \beta E - \text{где } \beta - \text{ пьезомодуль 2 рода.}$$

# ПЭ системы электрических зарядов



Энергия взаимодействия 2 точ. зарядов:

$$W = q_1 \varphi_1 = q_1 (k q_2 / r) = q_2 \varphi_2 = q_2 (k q_1 / r) \\ = (1/2) (q_1 \varphi_1 + q_2 \varphi_2)$$

Если зарядов больше, то формула обобщается:

$$W = 1/2 \sum q_i \varphi_i$$

Коэф-нт  $1/2$  учитывает, что в сумме каждая пара зарядов входит дважды,  $q_i$  - один из зарядов,  $\varphi_i$  - потенциал ЭП в месте размещения  $q_i$  от всех **других** зарядов.

Если заряды не точечные, а находятся на проводниках, то формула та же:

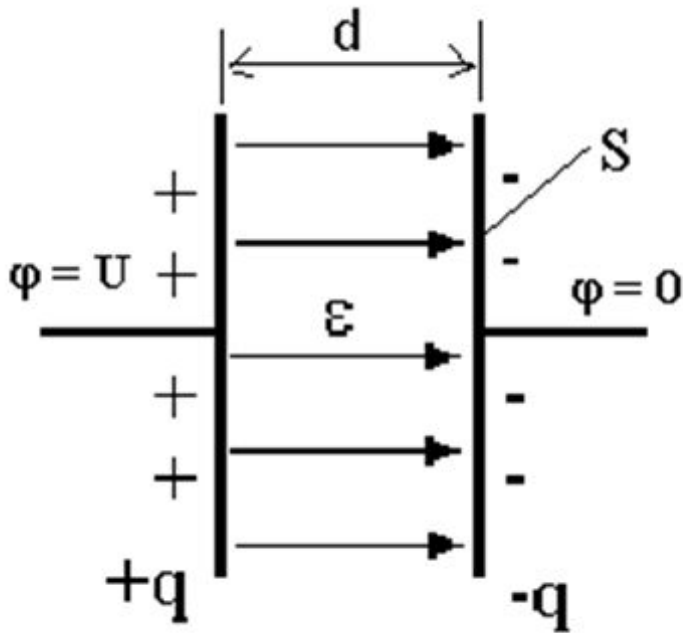
$$W = 1/2 \sum q_i \varphi_i$$

но  $\varphi_i$  - потенциал ЭП тела с зарядом  $q_i$  от всех зарядов, **включая**  $q_i$ .

Полную энергию системы зарядов можно разделить на 2 части:

$$W = \sum W_{\text{собст}} + \sum W_{\text{взаимод}}$$

# Энергия электрического поля



Для простоты ЭП плоского конденсатора.

$$W = \frac{1}{2} q U = \frac{1}{2} C U^2$$

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / d$$

$$W = \frac{1}{2} (\varepsilon \varepsilon_0 S / d) U^2 = \frac{1}{2} (\varepsilon \varepsilon_0 S d) \cdot (U^2 / d^2) =$$

$$= \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 V$$

$W \sim V$  и зависит от свойств диэлектрика.

Поэтому энергию кон-ра относят к диэлектрику с *объемной плотностью энергии ЭП w*:

$$W = w V$$

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} D E = \frac{1}{2} D^2 / \varepsilon \varepsilon_0$$

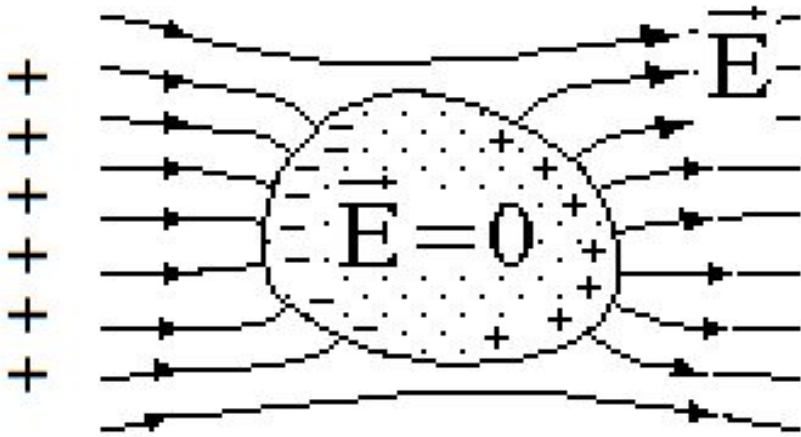
Это выражение для  $w$  справедливо для любых электрических полей.

ЭП  $\Rightarrow$  энергия  $\Rightarrow$  масса  $m = W/c^2 \Rightarrow \mu = w/c^2$

У ЭП имеются признаки материи, типичные для вещества – энергия и масса.

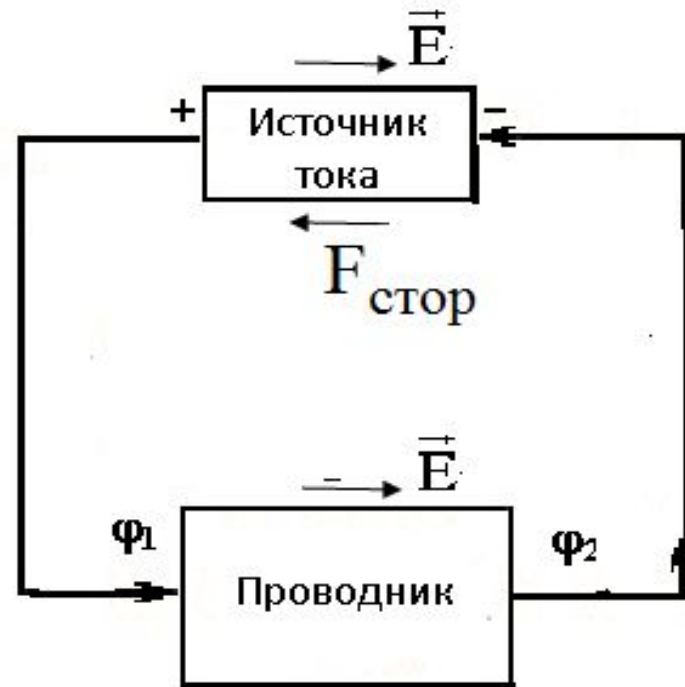


# Электростатическое и стационарное ЭП



Электростатическое:

Только статические заряды и проводник.  
ЭП внутри проводника нулевое.  
Ток нулевой.



Стационарное:

Движущиеся заряды, проводник и источник тока.  
ЭП внутри проводника ненулевое.  
Ток ненулевой.

# Электрический ток

Электрический ток – направленное движение эл. зарядов.

Сила тока – скалярная ФВ, равная заряду, переносимому через поперечное сечение проводника в единицу времени.

$$I = Q/t$$

Ед. силы тока – ампер (А) основная в СИ, такая, что Кл = А·с

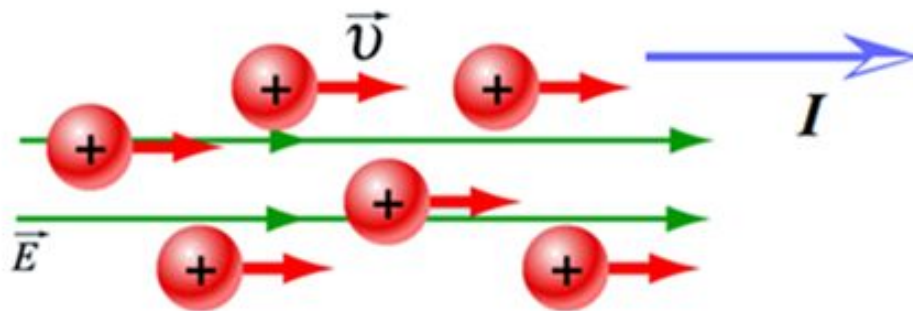
Направление тока – след. Слайд

Виды токов:

- 1 – проводимости
- 2 – конвенционный
- 3 – диффузионный
- 4 – смещения

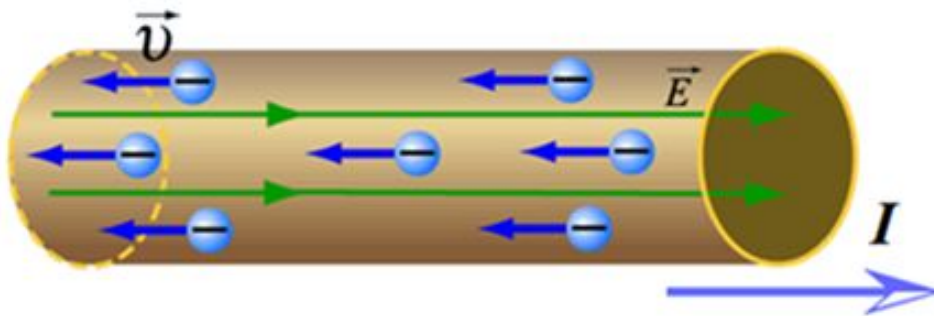
# Направление тока

Направленное движение носителей заряда под действием ЭП (дрейф) накладывается на хаотическое тепловое движение.

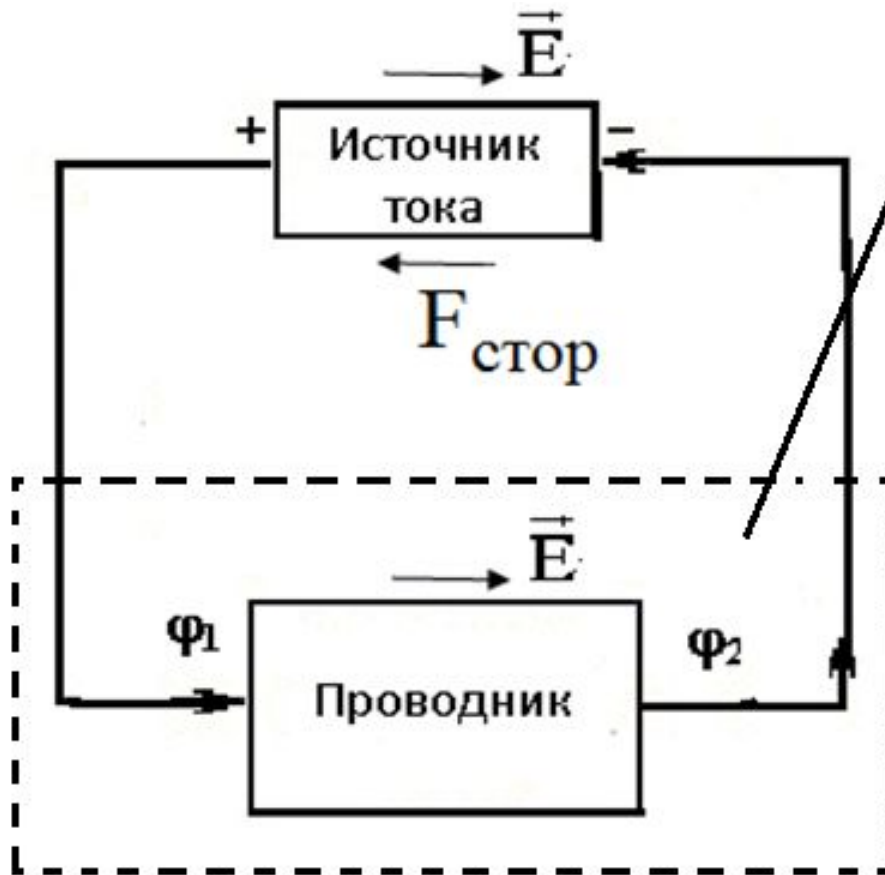


(+) заряды дрейфуют в направлении ЭП и создают ток в том же направлении.

(-) заряды дрейфуют против ЭП и создают ток в направлении ЭП.



# Закон Ома для участка цепи



однородный  
участок цепи

Разность потенциалов  
(напряжение):

$$U = \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

Закон Ома (1826):

$$I = U/R$$

$R$  - эл. сопротивление

Ед. изм.  $[R] = \text{Ом} = \text{В/А}$

$$R = \rho l / S \quad \rho - \text{удельное сопротивление} \quad [\rho] = \text{Ом м}$$

Закон Ома - эмпирический

# Удельное сопротивление (при КТ)

Удельное сопротивление некоторых веществ, Ом·мм<sup>2</sup>/м

Серебро	0,016	Никелин (сплав)	0,40	Графит	13
Медь	0,017	Манганин (сплав)	0,43	Фарфор	10 <sup>19</sup>
Золото	0,024	Константан (сплав)	0,50		
Алюминий	0,028	Ртуть	0,96	Эбонит	10 <sup>20</sup>
Вольфрам	0,058	Нихром (сплав)	1,1		
Железо	0,10	Фехраль (сплав)	1,3	Фторопласт	10 <sup>23</sup>
Свинец	0,21			Парафин	10 <sup>24</sup>

$$1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м} = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

(напр., для меди  $\rho = 0,017 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )

# Закон Ома в дифференциальной форме

$$I = U/R - \text{закон Ома}$$

Электрическое сопротивление R:

$$R = \rho (l/S)$$
$$I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{U S}{\rho l} = \frac{U}{l} \cdot \frac{S}{\rho}$$

$(I/S) = j$  - плотность тока  $\Rightarrow$  вектор **J**

$$U/l = E \Rightarrow \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{E} / \rho = \sigma \mathbf{E}$$

- закон Ома в векторной и дифференциальной форме.

$\sigma = 1/\rho$  - удельная электропроводность,  $[\sigma] = \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ .

# Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

$$Q = I^2 R \Delta t = j^2 S^2 \rho (l / S) \Delta t = \rho j^2 V \Delta t$$

Поделить на объем и время:

$(Q/V)/\Delta t \Rightarrow dq/dt$  - удельная мощность тока

$$dq/dt = \rho j^2 = \sigma E^2 = (\mathbf{J}, \mathbf{E}) -$$

закон Джоуля-Ленца в векторной и дифференциальной форме.

## Классификация веществ по удельным сопротивлениям



	$\rho$ , Ом·м
Сверхпроводники	0
Металлы	$10^{-8} - 10^{-6}$
Полупроводники и электролиты	$10^{-6} - 10^8$
Изоляторы (диэлектрики)	$>10^8$





# Магнетизм (история)

Название от минерала магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – камень из Магнесии, магнитные явления – явления, происходящие с магнетитом и похожими веществами;

Открытие магнитного поля (МП) Земли (Вильям Гильберт, 16 век);

Взаимодействие магнитов, магнитный закон Кулона (1785);

Действие токов на магниты (Эрстед 1820);

Действие магнитов на токи и взаимодействие токов (Ампер);

Электрические токи как источник МП – закон Био-Савара;

Представление о МП и МСЛ – Фарадей;

Электромагнитная индукция – Фарадей;

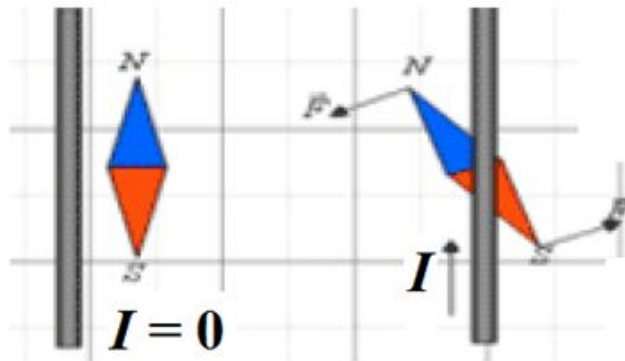
Уравнения электромагнитного поля – Максвелл;

Действие МП на движ. заряды и МП движ. зарядов – Лоренц;

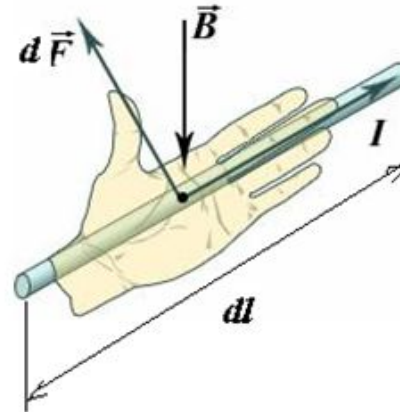
Спин и собственное МП элементарных частиц.

МП – форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие движущихся электрических зарядов.

# Сила Ампера



Эрстед



Ампер

$dF \sim I dl \sin\alpha$  - угол с направлением, в кот.  $dF = 0$   
 К-нт пропорциональности – магнитная индукция  $B$ .

$$dF = B I dl \sin\alpha$$

Векторы:  $\vec{dF}$  -  $\perp$  напр. тока и напр., в кот.  $dF = 0$

$I d\vec{l}$  - элемент тока, модуль =  $I dl$ , направлен по току

$\vec{B}$  - вектор магнитной индукции, модуль =  $B$  и напр.,  
 в кот.  $dF = 0$ , так чтобы работало ПЛР