

Виды диэлектриков и их поляризация

В зависимости от концентрации свободных зарядов тела делятся на:

☐ **проводники**

(много свободных зарядов)

☐ **диэлектрики**

(свободных зарядов практически нет)

☐ **полупроводники**

(свободные заряды есть, но их меньше, чем в проводниках)

Виды диэлектриков

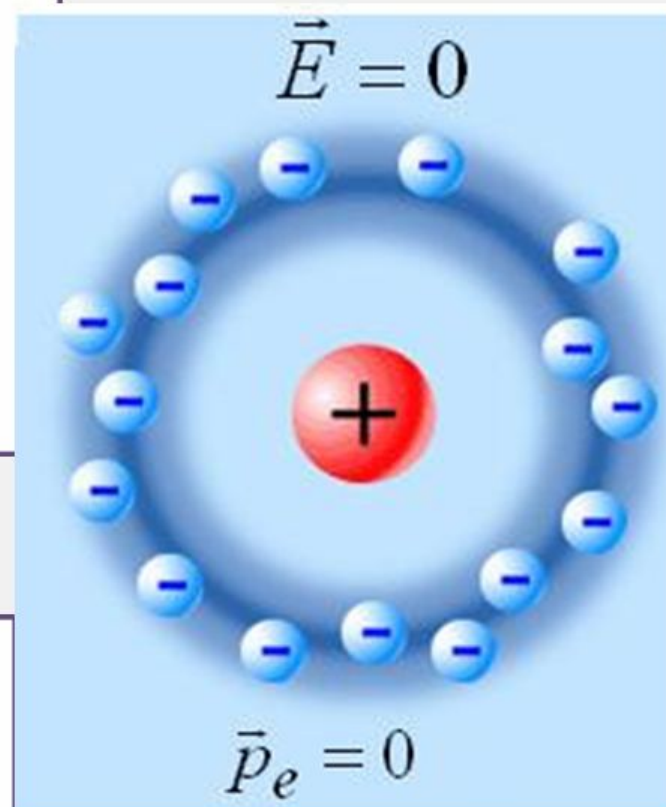
- **Диэлектрики с неполярными молекулами**
Электронная поляризация
- **Диэлектрики с полярными молекулами**
Ориентационная поляризация
- **Ионные диэлектрики**
Ионная поляризация
- **Сегнетоэлектрики**

Диэлектрики с неполярными молекулами

Электронная поляризация

Молекулы не имеют дипольного момента, так как центр тяжести отрицательных зарядов электронов совпадает с центром тяжести положительных ядер: $\vec{p}_e = 0$

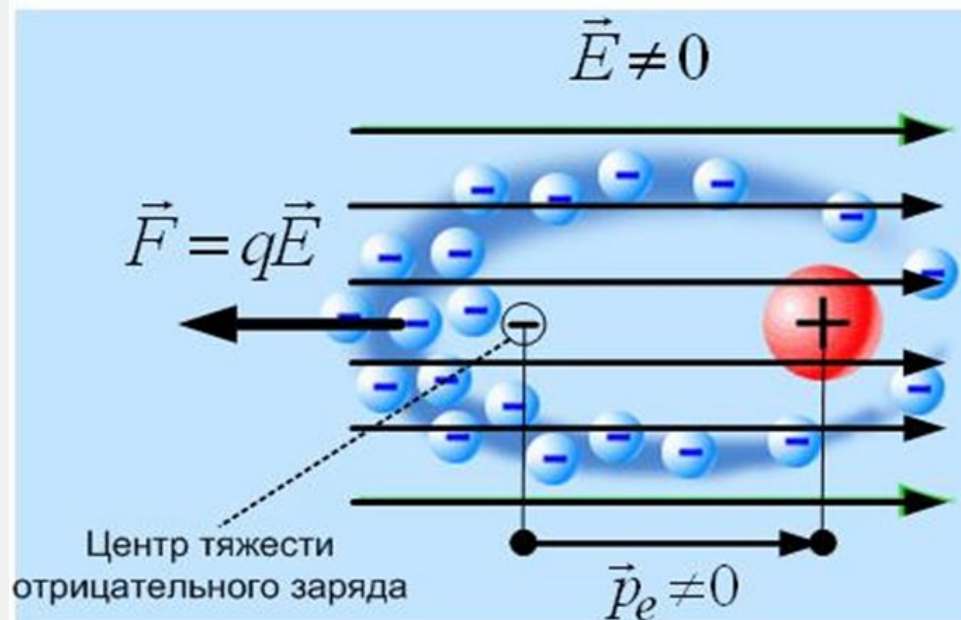
Вещества с симметричными молекулами, например, N_2 , O_2 , CO_2 .



Диэлектрики с неполярными молекулами

Электронная поляризация

Во внешнем электрическом поле отрицательное электронное облако молекулы смещается против поля, центры тяжести положительных и отрицательных зарядов расходятся, и молекула приобретает дипольный момент, направленный по полю:

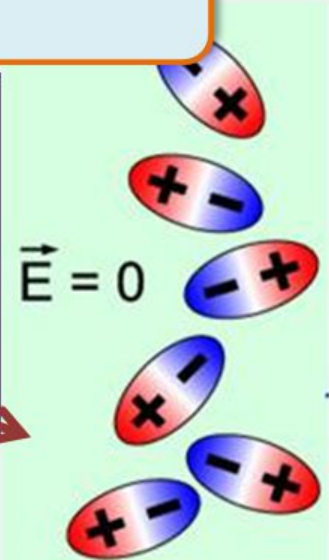


Диэлектрики с полярными молекулами

Ориентационная поляризация

Молекула обладает дипольным моментом в отсутствие внешнего поля (H_2O , HCl , SO_2): $\vec{p}_e \neq 0$

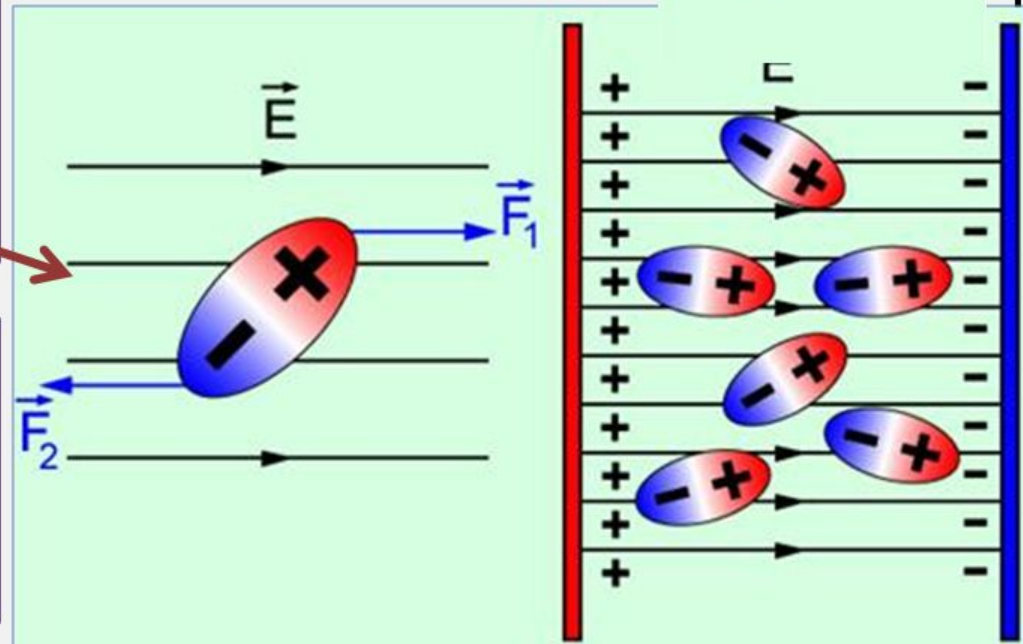
Молекулы-диполи ориентированы хаотично $\rightarrow$ в целом вещество не обладает дипольным моментом (не поляризовано)



Во внешнем поле на молекулы-диполи действует вращающий момент силы, поворачивающий молекулы по полю

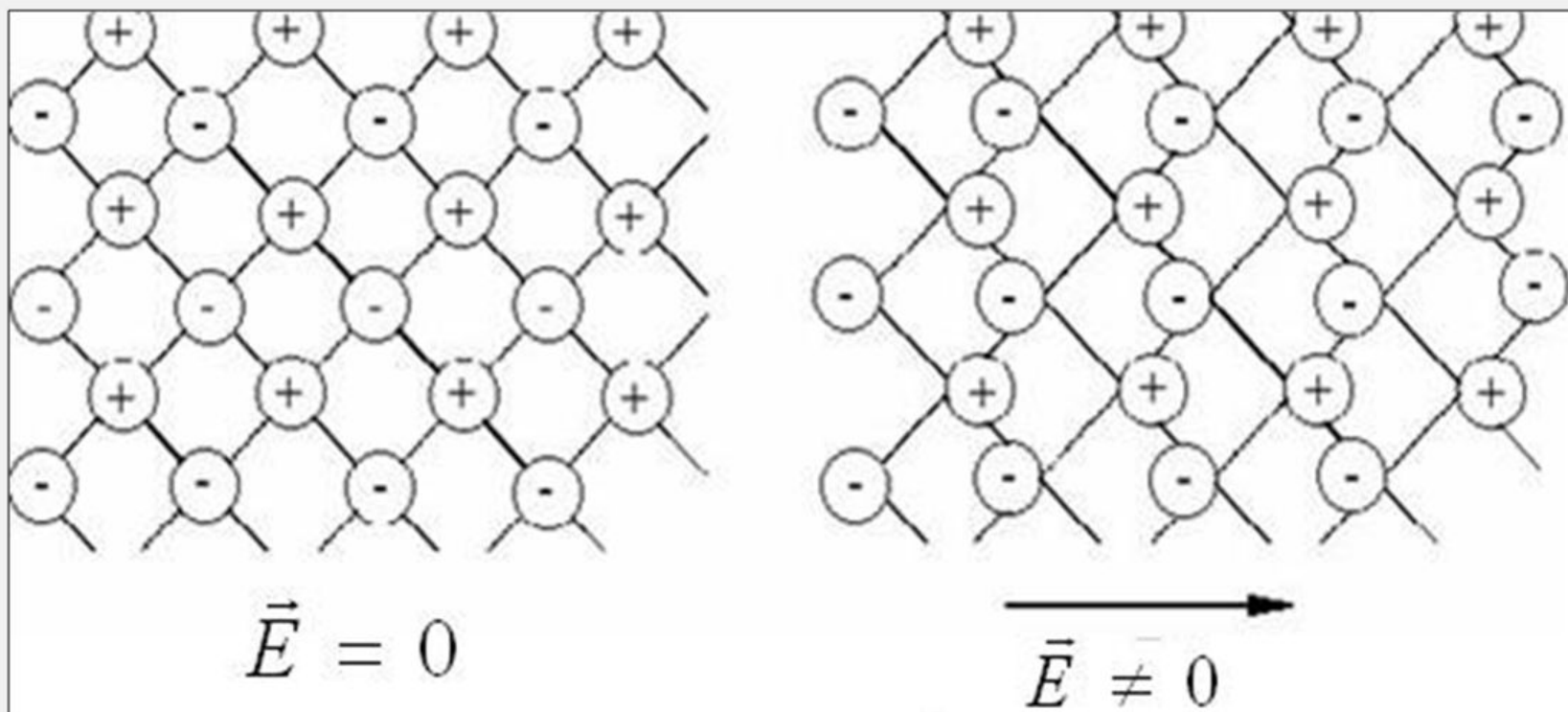
$$\vec{M} = [\vec{p}_e \times \vec{E}]$$

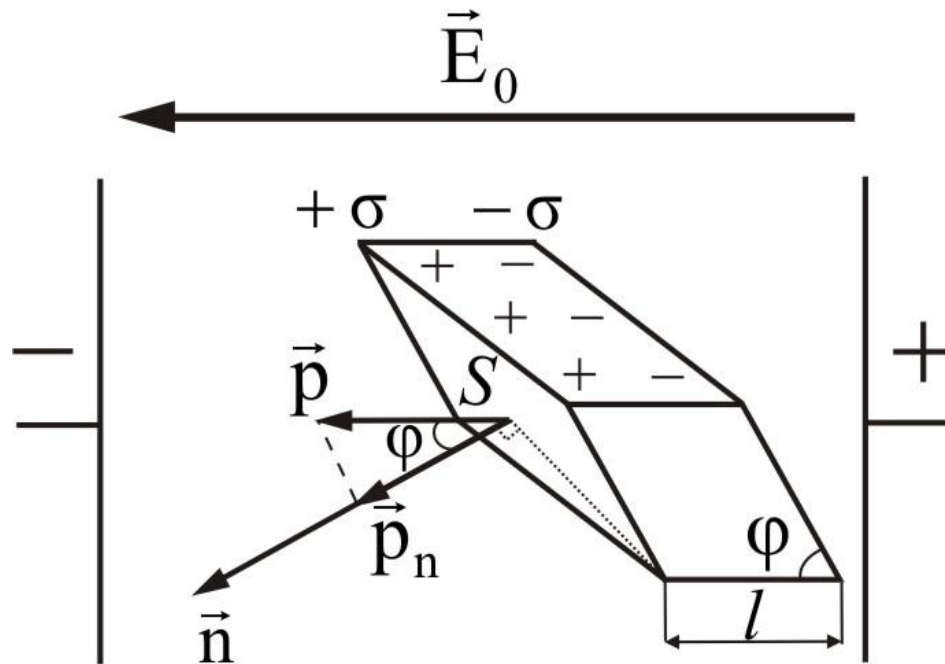
Из-за теплового движения полной ориентации молекул-диполей по полю нет



Ионные диэлектрики и ионная поляризация

В твёрдых диэлектриках с ионной кристаллической решёткой (например, $NaCl$) ионы во внешнем поле слегка смещаются в противоположные стороны: положительные – по полю, отрицательные – против поля





- Поместим диэлектрик в виде параллелепипеда в электростатическое поле E_0
- Электрический дипольный момент тела: $p = ql = \sigma' Sl$
- Нормальная составляющая p_n $p_n = \sigma' Sl \cos \varphi$
- σ' – поверхностная плотность связанных зарядов.

- Введем новое понятие – **вектор поляризации – электрический момент единичного объема.**

- $$\vec{P} = \frac{\sum_k \vec{p}_{1k}}{\Delta V} = n \vec{p}_1,$$

- где n – концентрация молекул в единице объема,
- $\vec{p}_1$ – электрический момент одной молекулы.

- С учетом этого обстоятельства,

$$p = P V = P S l \cos \varphi \quad V = S l \cos \varphi$$

объем параллелепипеда).

- Сравним с полученным ранее

$$p_n = \sigma' S l \cos \varphi$$

и учтем, что $P \cos \varphi = P_n$ – проекция P на направление $\vec{n}$ – вектора нормали,

- тогда

$$\sigma' = P_n$$

$$\sigma' = P_n$$

- **Поверхностная плотность** поляризационных зарядов равна нормальной составляющей **вектора поляризации** в данной точке поверхности.
- Отсюда следует, что **индуцированное в диэлектрике электростатическое поле E'** будет влиять только на нормальную составляющую вектора напряженности электростатического поля $\vec{E}$.

Электростатическое поле в диэлектрике

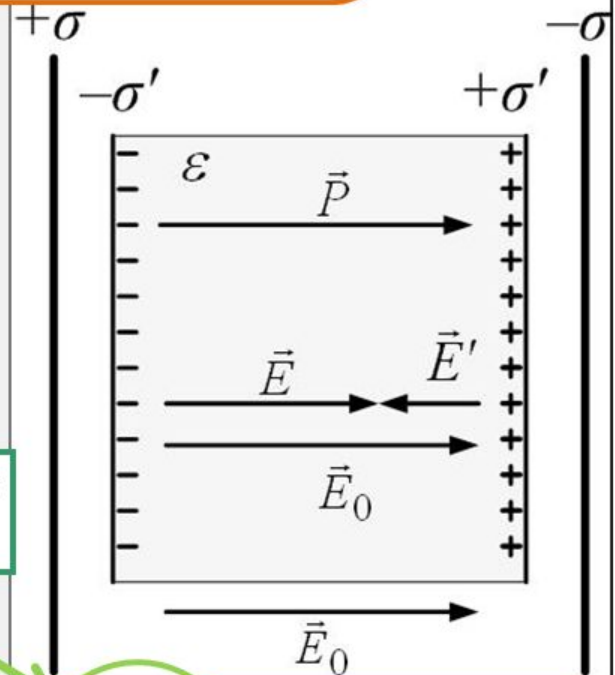
Полное поле в диэлектрике:

$$E = E_0 - E'$$

$$P = \sigma'$$

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \cdot \vec{E}$$



$$E = E_0 - E' = E_0 - \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0} = E_0 - \frac{\chi \varepsilon_0 E}{\varepsilon_0} = E_0 - \chi E$$

$$E = E_0 - \chi E$$

$\Rightarrow$

$$E(1 + \chi) = E_0$$

Различные виды диэлектриков

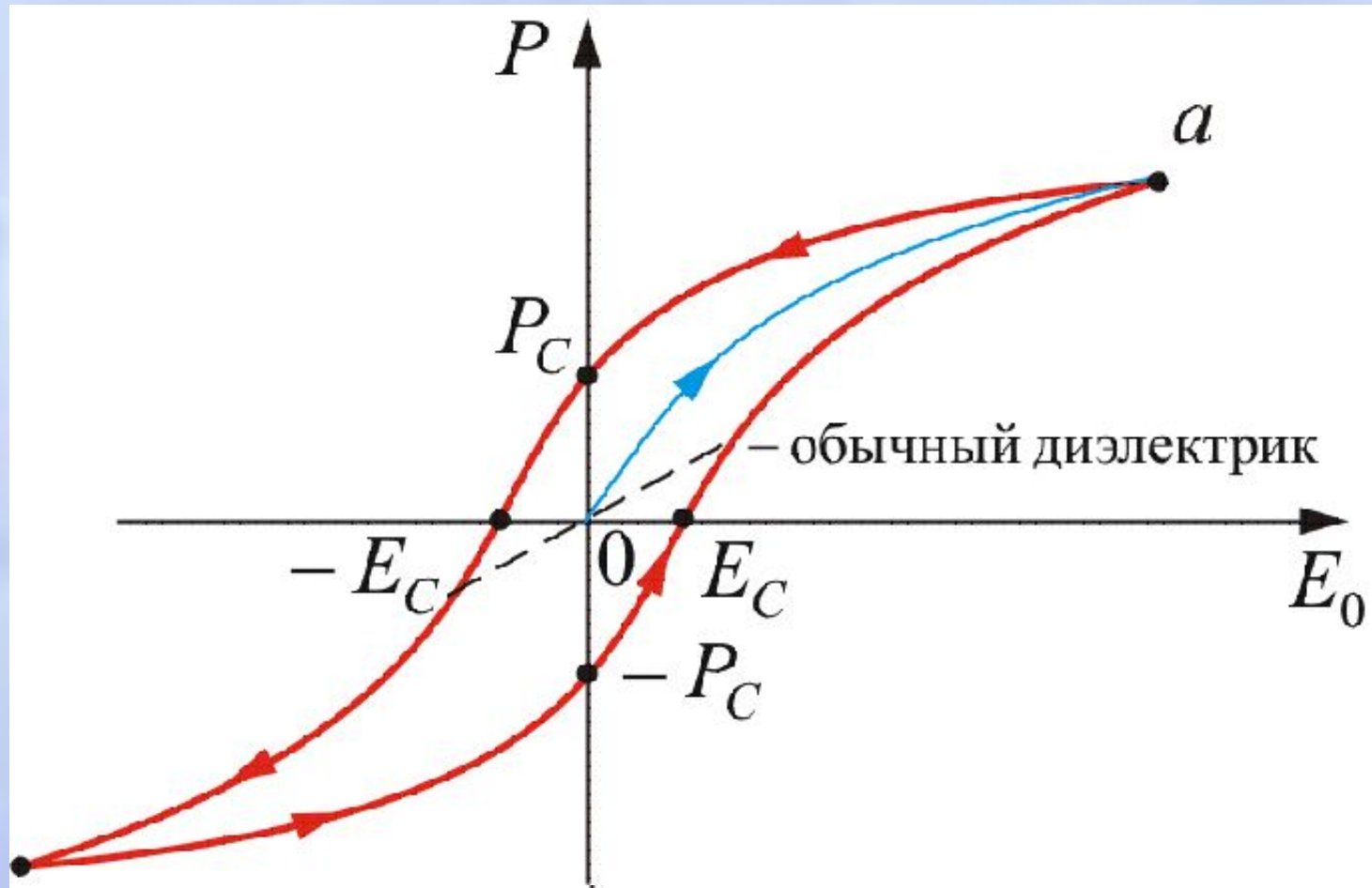
- В 1920 г. была открыта **спонтанная** (самопроизвольная) **поляризация**.
- Всю группу веществ, называли **сегнетоэлектрики** (или *ферроэлектрики*).
- Все сегнетоэлектрики обнаруживают резкую анизотропию свойств (сегнетоэлектрические свойства могут наблюдаться только вдоль одной из осей кристалла). У изотропных диэлектриков поляризация всех молекул одинакова, у анизотропных – поляризация, и следовательно, вектор поляризации в разных направлениях разные.

- **Основные свойства сегнетоэлектриков:**

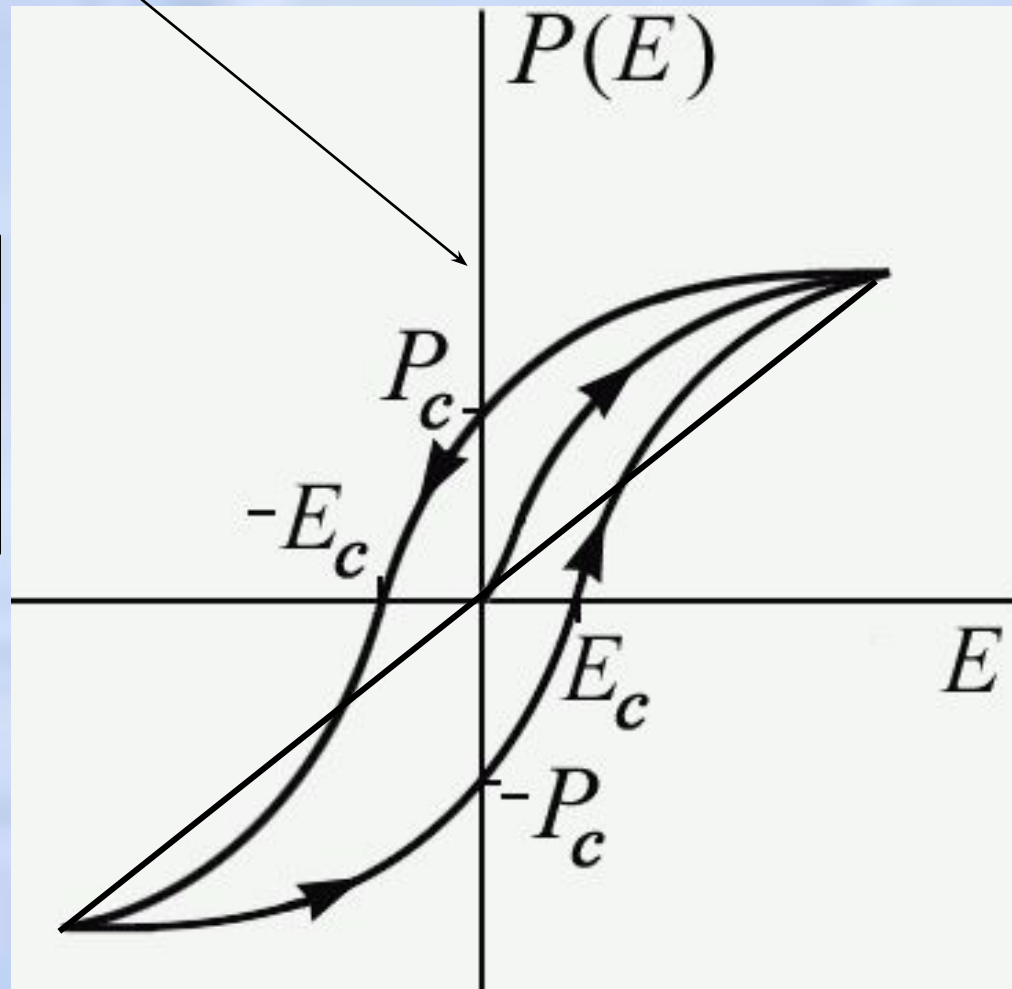
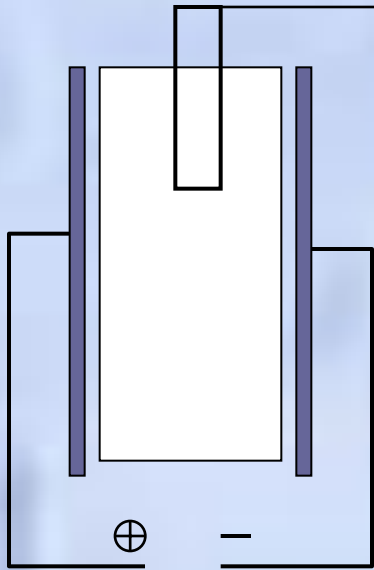
- 1. Диэлектрическая проницаемость ε в некотором температурном интервале велика ($\varepsilon \sim 10^3 - 10^4$)
- 2. Значение ε зависит не только от внешнего поля E_0 , но и от предыстории образца.
- 3. Диэлектрическая проницаемость ε (а следовательно, и P) – нелинейно зависит от напряженности внешнего электростатического поля (*нелинейные диэлектрики*).

- 4. Наличие точки Кюри – температуры, при которой (и выше) сегнетоэлектрические свойства пропадают. При этой температуре происходит фазовый переход 2-го рода. Например,
 - титанат бария: 133°C ;
 - сегнетова соль: $-18 + 24^{\circ}\text{C}$;
 - ниобат лития 1210°C .

- Нелинейная поляризация диэлектриков называется *диэлектрическим гистерезисом*
- Здесь точка a – состояние насыщения.

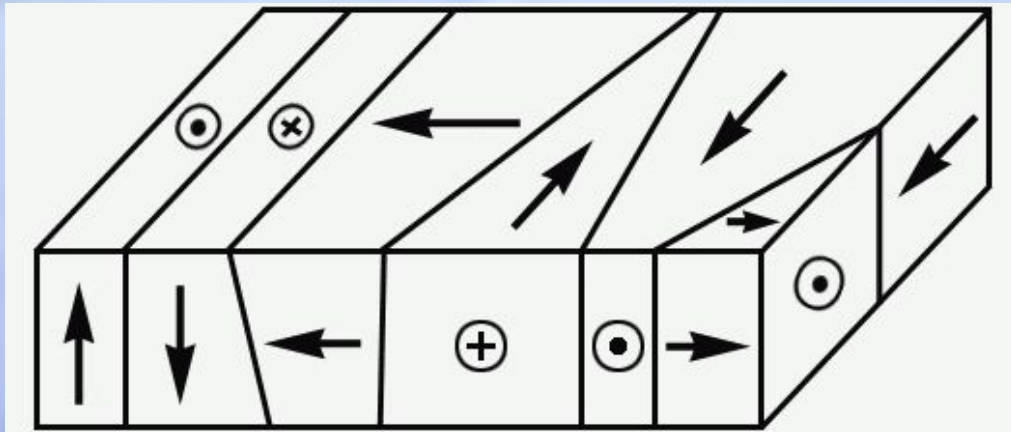


E_c – коэрцитивная сила, P_c – остаточная поляризация



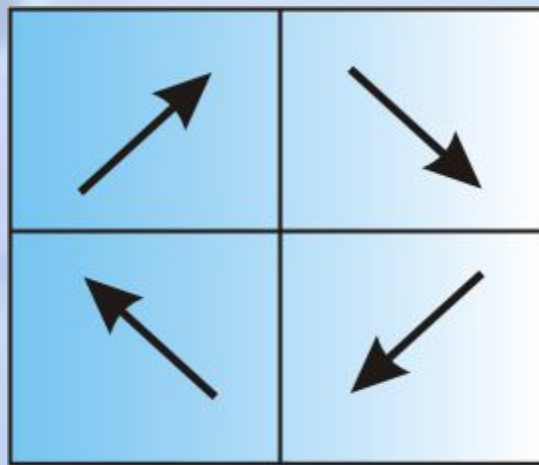
Кривая поляризации сегнетоэлектрика – петля гистерезиса. E_c – коэрцитивная сила, P_c – остаточная поляризация сегнетоэлектрика.

Сегнетоэлектрики состоят из доменов – областей с различными направлениями поляризации. В отсутствии поля суммарный дипольный момент практически отсутствует. Под действием электрического поля E доменные границы смещаются так, что объем доменов, поляризованных по полю, увеличивается за счет доменов, поляризованных против поля.

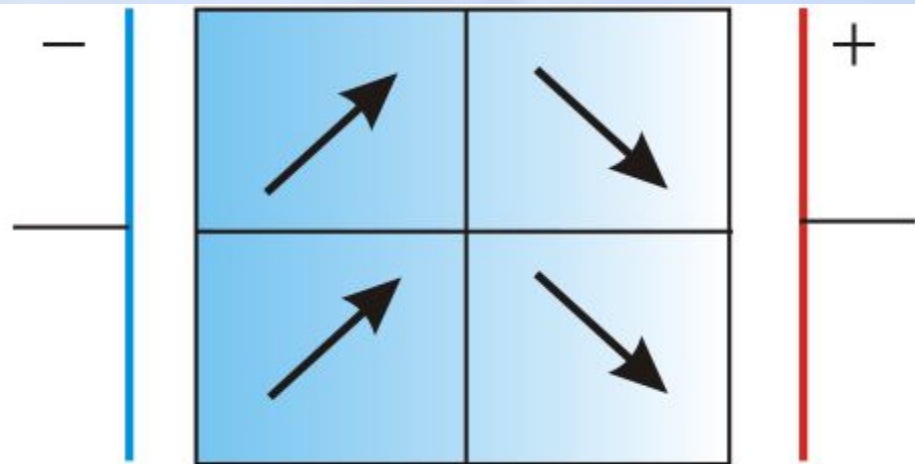


Изображение доменов тетрагональной модификации BaTiO_3 . Стрелки указывают направление вектора поляризации

- Стремление к минимальной потенциальной энергии и наличие дефектов структуры приводит к тому, что сегнетоэлектрик разбит на **домены**



$$P = 0$$



$$P \sim E$$

В сильном электрическом поле кристалл становится однодоменным. После выключения электрического поля образец остается поляризованным. P_c – остаточная поляризация.

Чтобы суммарные объемы доменов противоположного знака сравнялись, необходимо приложить поле противоположного направления E_c – коэрцитивное поле.

- Среди диэлектриков есть вещества, называемые **электреты** – диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего электростатического поля (аналоги постоянных магнитов).

Пьезоэлектрики

Некоторые диэлектрики поляризуются не только под действием электрического поля, но и под действием механической деформации. Это явление называется ***пьезоэлектрическим эффектом***.

- Явление открыто братьями Пьером и Жаком Кюри в 1880 году.

Пьезоэлектрики

Некоторые диэлектрики поляризуются не только под действием электрического поля, но и под действием механической деформации. Это явление называется ***пьезоэлектрическим эффектом***.

- Явление открыто братьями Пьером и Жаком Кюри в 1880 году.



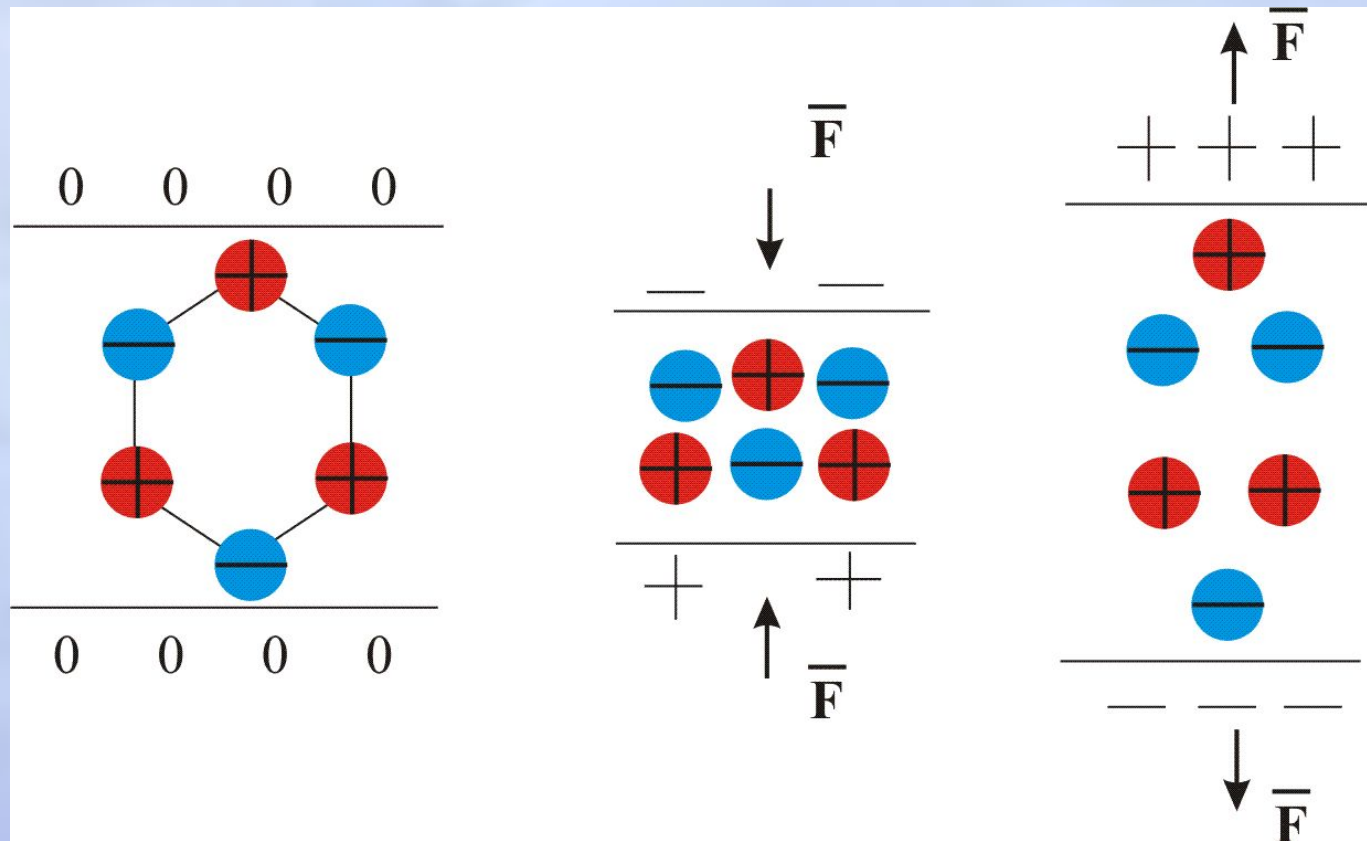
Кюри, Пьер

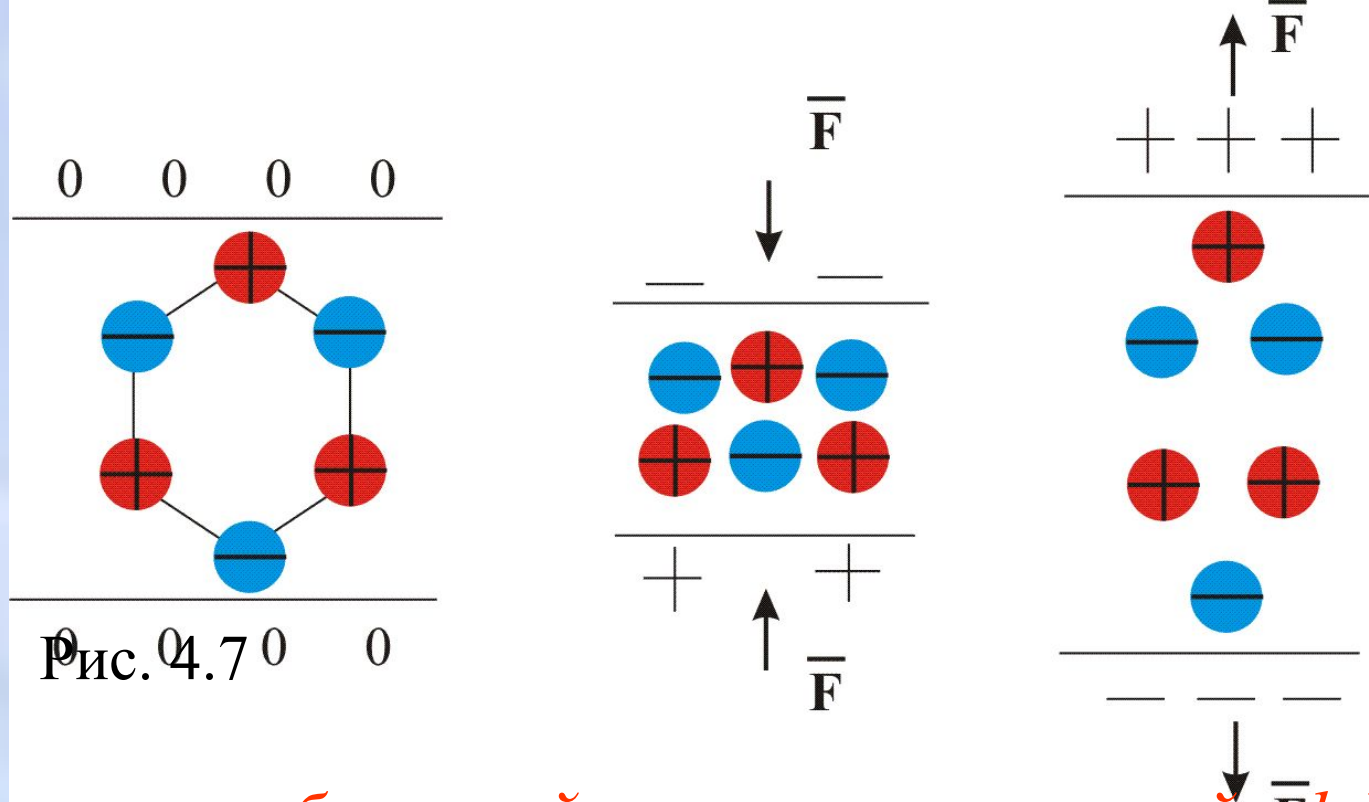
(15.V.1859 г. – 19.IV.1906)

Помимо Нобелевской премии, Кюри был удостоен еще нескольких наград и почетных званий, в том числе медали Дэви Лондонского королевского общества (1903) и золотой медали Matteucci Национальной Академии наук Италии (1904). Он был избран во Французскую академию наук (1905). В честь Пьера и Марии Кюри назван искусственный химический элемент — кюрий.

Если на грани кристалла наложить металлические электроды (обкладки) то при деформации кристалла на обкладках возникнет разность потенциалов.

Если замкнуть обкладки, то потечет ток.





Возможен и обратный пьезоэлектрический эффект:

- Возникновение поляризации сопровождается механическими деформациями.
- Если на пьезоэлектрический кристалл подать напряжение, то возникнут механические деформации кристалла, причем, деформации будут пропорциональны приложенному электрическому полю E .

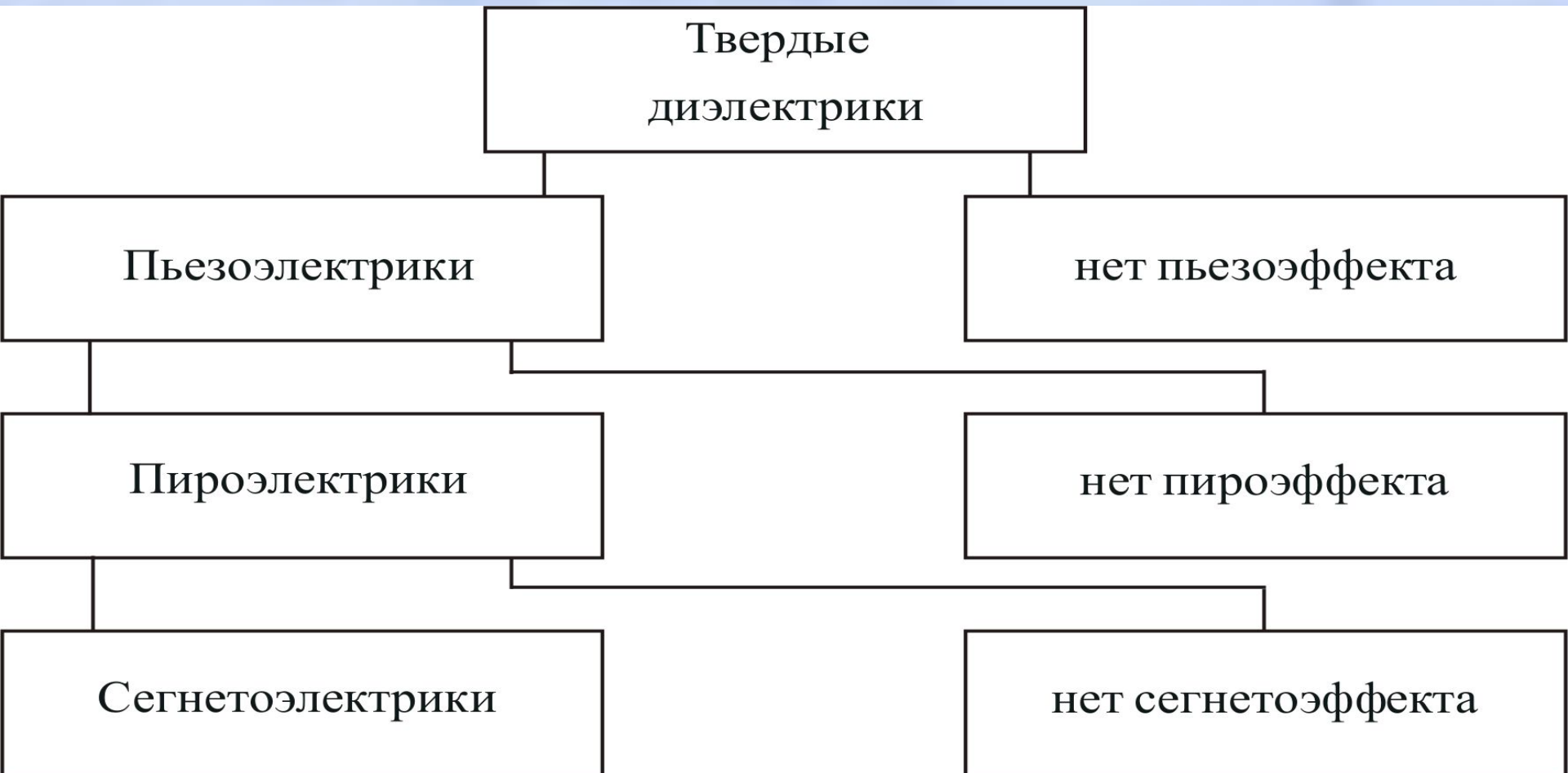
- Сейчас известно более 1800 пьезокристаллов.
- Все сегнетоэлектрики обладают пьезоэлектрическими свойствами
- Используются в пьезоэлектрических адаптерах и других устройствах).

4.2.3. Пироэлектрики

Пироэлектричество – появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов при их нагревании или охлаждении.

- При нагревании один конец диэлектрика заряжается положительно, а при охлаждении он же – отрицательно.
- Появление зарядов связано с изменением существующей поляризации при изменении

Все пирозэлектрики являются пьезоэлектриками, но не наоборот. Некоторые пирозэлектрики обладают сегнетоэлектрическими свойствами.



В качестве **примеров** использования различных диэлектриков можно привести: **сегнетоэлектрики** – электрические конденсаторы, ограничители предельно допустимого тока, позисторы, запоминающие устройства;

пьезоэлектрики – генераторы ВЧ и пошаговые моторы, микрофоны, наушники, датчики давления, частотные фильтры, пьезоэлектрические адаптеры;

пироэлектрики – позисторы, детекторы ИК-излучения, болометры (датчики инфракрасного излучения), электрооптические модуляторы.

Практическое применение пьезоэффекта.

Пьезоэлектрические преобразователи (например, пьезоэлектрический манометр), двигатели, пьезоэлектрические стабилизаторы и фильтры, пьезоэлектрические датчики, звукоосниматели, микрофоны, кварцевые излучатели ультразвука и пр.

В течение последних 5-7 лет сформировалась и интенсивно развивается новая отрасль медицины, основанная на использовании близкодействующих статических электрических полей для стимулирования позитивных биологических процессов в организме человека.

Попадая вместе с имплантатом в организм человека, электретьная пленка своим полем оказывает дозированное локальное воздействие на поврежденный орган, способствуя его лечению в оптимальных биофизических условиях.

В основе этого процесса лежит природный эффект, состоящий в том, что внешнее близкодействующее электрическое поле определенной величины и знака, действуя на клеточном уровне, является катализатором появления здоровых новообразований в живых тканях.



Характерные фотографии срезов костной ткани, полученные в результате серии экспериментов. Электретное покрытие существенно ускоряет процессы заживления.

К концу третьего месяца после операции вокруг имплантатов с электретным покрытием практически полностью завершается процесс формирования костной ткани, отсутствуют признаки воспалительной реакции.



Речевой ненаправленный электретный микрофон МК-Boost является фирменным продуктом компании «Гран При».

Тонкая плёнка из гомоэлектрета Тонкая плёнка из гомоэлектрета помещается в зазор конденсаторного микрофона Тонкая плёнка из гомоэлектрета помещается в зазор конденсаторного микрофона (т.е. конденсатора, у которого одна из обкладок (мембрана) имеет возможность перемещаться под действием внешнего а

При изменении ёмкости, вследствие смещения мембраны, на конденсаторе проявляется изменение напряжения, соответствующее акустическому сигналу.





Блоки пьезоэлектрических преобразователей предназначены для совместной работы с электронным блоком дефектоскопа УДС2-РДМ-2. Используются в схемах проверки нитей железнодорожного пути.

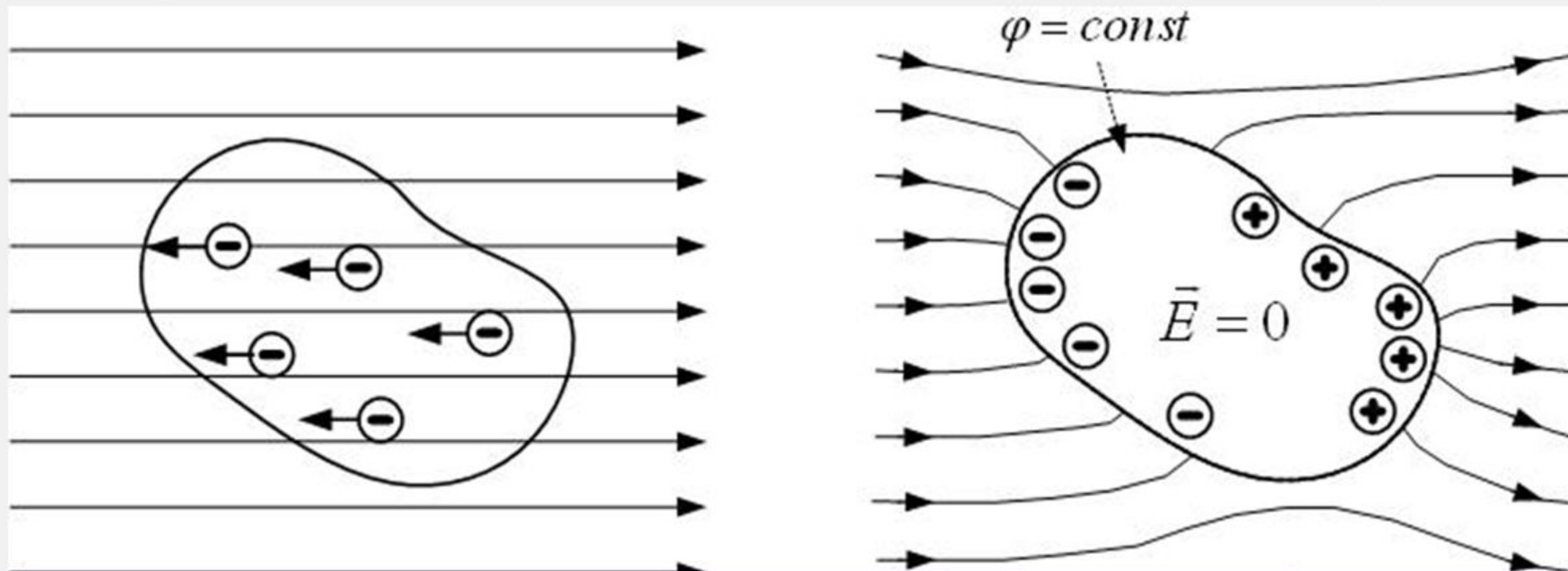
Блоки преобразователей являются составной частью системы ультразвукового контроля и конструктивно состоят из резонаторов, установленных в специальном корпусе, закрепленных на износоустойчивом основании. Блоки оснащены системой подачи контактной жидкости.



Пьезоэлектрические преобразователи ПЭП 3
предназначены для
создания в
жидкостях
ультразвуковых
колебаний, их
приема с
последующим
преобразованием в
электрический
сигнал в составе
ультразвуковых
счетчиков
жидкостей и тепла.

Проводники в электростатическом поле

Поместим проводник в электростатическое поле



На свободные заряды проводника со стороны поля действует сила: $\vec{F} = q\vec{E}$.
Электроны в металле движутся против поля, разность потенциалов выравнивается.
Равновесное распределение зарядов в проводнике при помещении его в электростатическое поле устанавливается очень быстро
Поле индуцированных зарядов полностью компенсирует внешнее поле;
 $\vec{E} = 0$; сила тоже $\vec{F} = 0$.
Разность потенциалов любых двух точек проводника равна нулю.
Потенциал проводника всюду (внутри и на поверхности проводника) одинаков

Проводники в электростатическом поле

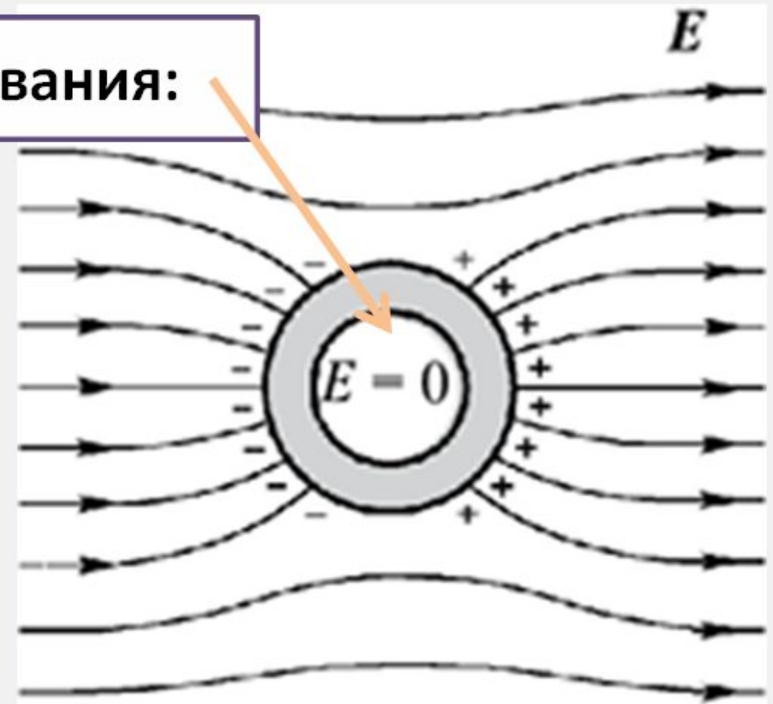
$$\varphi_{\text{проводника}} = \text{const} \quad \Rightarrow \quad \vec{E} = -\text{grad} \varphi = -\text{grad}(\text{const}) = 0$$

Внутри проводника поля нет:

$$\vec{E} = 0$$

На этом основан принцип экранирования:

Внутри проводника нет объёмных нескомпенсированных зарядов; заряды могут быть только на поверхности проводника

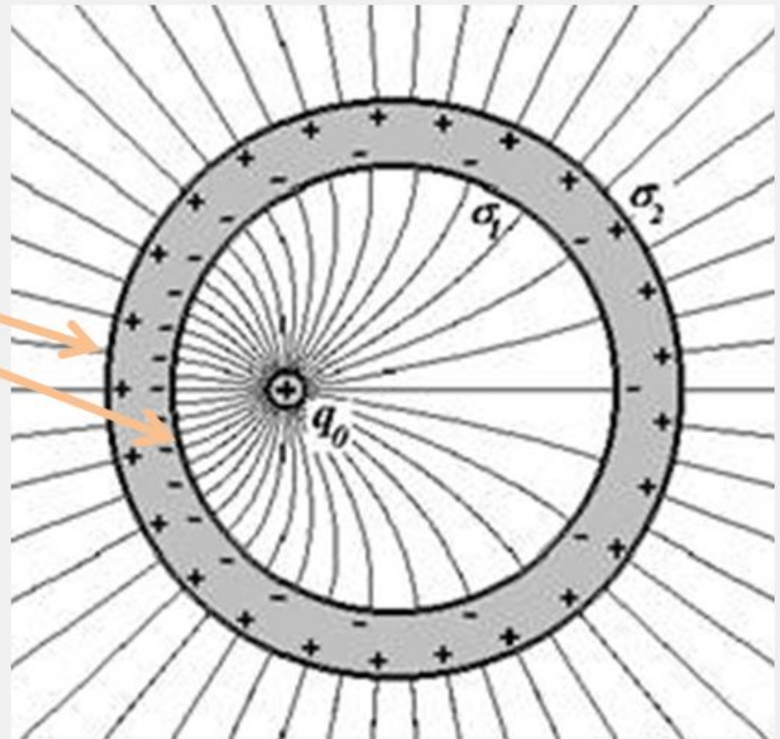
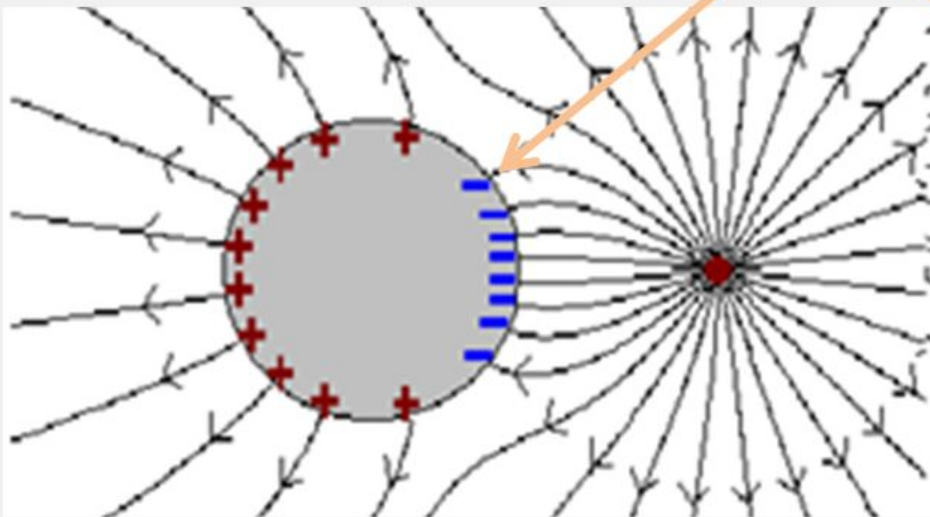


Проводники в электростатическом поле

$$\varphi_{\text{проводника}} = \text{const}$$

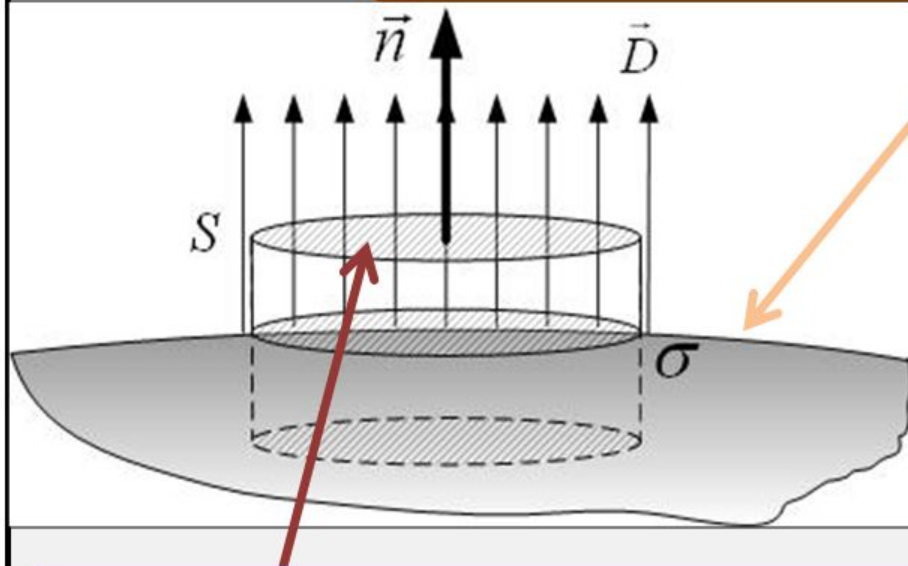
$$\vec{E} = 0$$

Заряды могут быть только на поверхности проводника



Поверхность проводника – эквипотенциальная, поэтому линии напряжённости к ней перпендикулярны, а индуцированные на поверхности проводника свободные заряды разрывают линии напряжённости, так что внутри проводника поля нет

Поле вблизи поверхности проводника



Пусть σ – поверхностная плотность заряда
По теореме Гаусса для вектора электрического смещения:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_i q_i^{\text{свободн.}}$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = D \cdot S$$

$$\sum_i q_i^{\text{свободн.}} = \sigma \cdot S$$

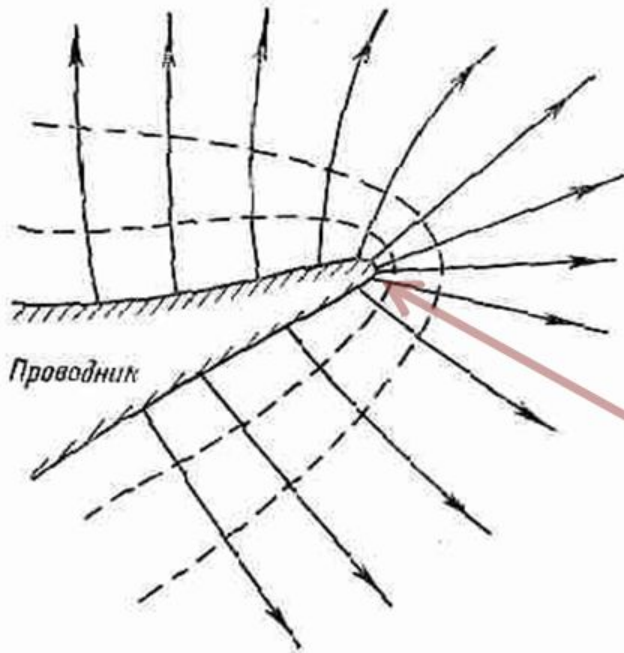
$$\Rightarrow D \cdot S = \sigma \cdot S \Rightarrow$$

$$D = \sigma$$

Вблизи поверхности проводника величина вектора D равна поверхностной плотности заряда

$$E = \frac{D}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$$

Поле вблизи поверхности проводника



Вблизи поверхности проводника величина вектора D равна поверхностной плотности заряда

Электрические заряды по поверхности проводника распределяются неравномерно

Поверхностная плотность заряда больше на выпуклостях и меньше на впадинах

Линии напряжённости всегда перпендикулярны эквипотенциальной поверхности проводника и сгущаются на острие, где зарядов больше

Електроёмкость проводника

Определение:

Електроёмкость уединенного проводника – это заряд, который нужно сообщить проводнику, чтобы его потенциал изменился на 1 вольт

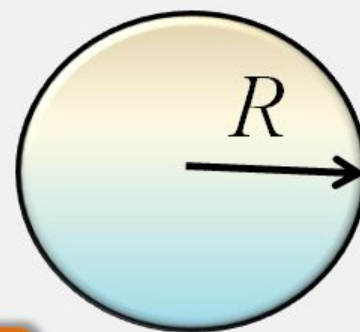
$$C = \frac{q}{\varphi}$$

$$[C] = \frac{[q]}{[\varphi]} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \Phi$$

Для поля сферы: $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$

На поверхности: $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$

Ёмкость сферы: $C = \frac{q}{\varphi} = \frac{q}{\frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$

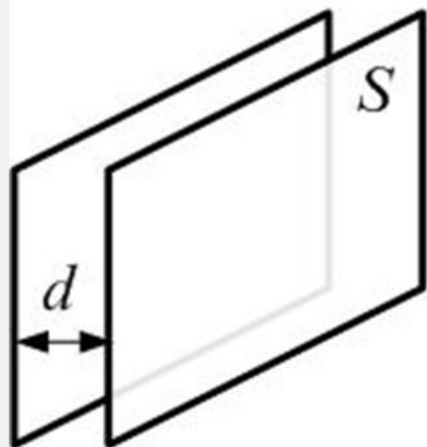


Електроёмкость проводника зависит от его размеров, формы, наличия по соседству других проводников и от диэлектрической проницаемости среды

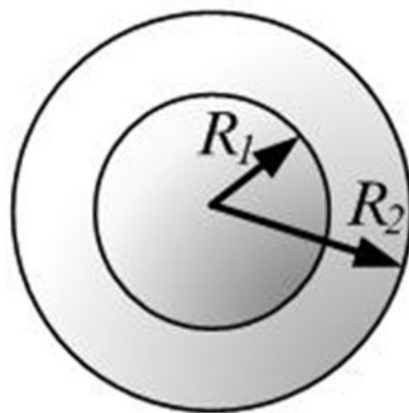
Конденсаторы

Емкость проводника зависит от его размеров, формы, наличия по соседству других проводников и от диэлектрической проницаемости среды. Если недалеко от заряженного проводника находится другой проводник, то из-за явления электростатической индукции ёмкость проводника меняется (возрастает).

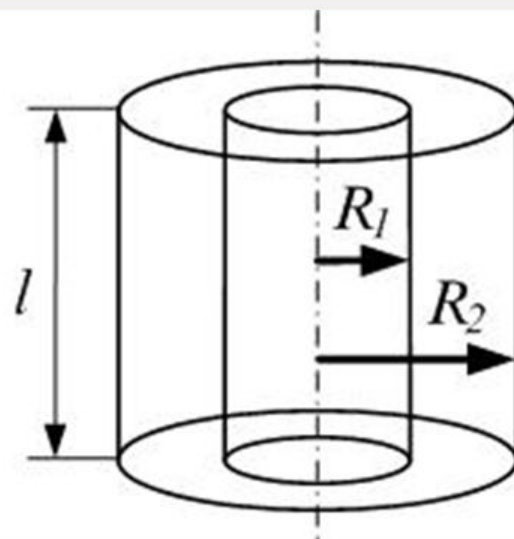
Конденсатор – это два проводника (две обкладки), находящихся вблизи друг друга



Плоский



Сферический



Цилиндрический

Конденсаторы. Ёмкость конденсатора

Определение:

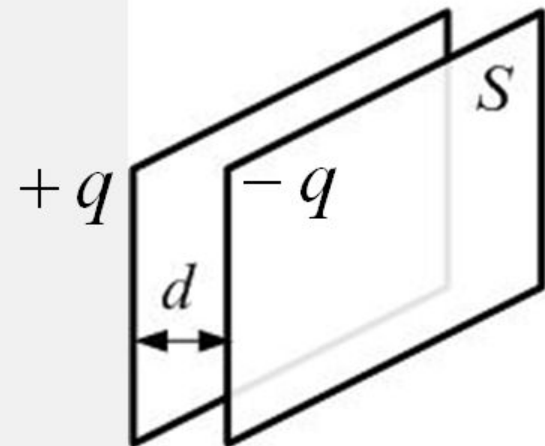
Ёмкость конденсатора численно равна заряду, который нужно ему сообщить, чтобы разность потенциалов обкладок (напряжение на конденсаторе) было равно 1 вольту

$$C = \frac{q}{U}$$

Ёмкость зависит от формы, размеров обкладок, их взаимного расположения и диэлектрической проницаемости среды

Ёмкость плоского конденсатора:

$$C_{\text{пл.}} = \frac{q}{U} = \frac{q}{E \cdot d} = \frac{\sigma \cdot S}{\frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} \cdot d} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \cdot S}{d}$$



Ёмкость сферического конденсатора

$$C = \frac{q}{U}$$

Напряжение на сферическом конденсаторе:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_{12} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{r}$$

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

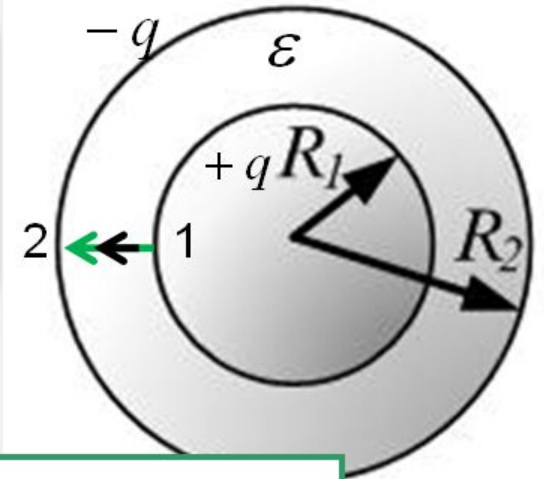


$$U = \int_{R_1}^{R_2} \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_{R_1}^{R_2} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{\frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)}$$



$$C_{\text{сфер.}} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0}{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)}$$



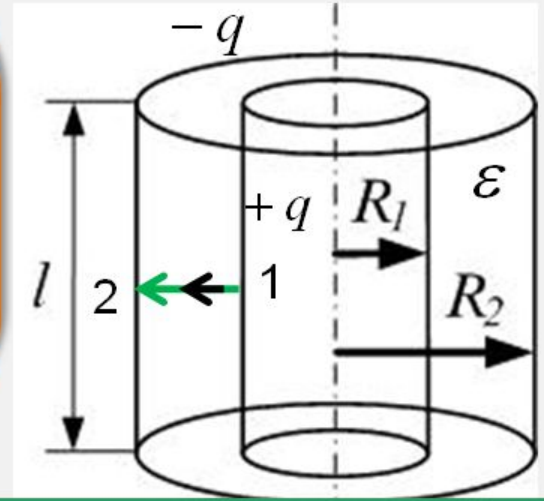
Ёмкость цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{q}{U}$$

Напряжение на цилиндрическом конденсаторе:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_{12} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{r}$$

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r l}$$



$$U = \int_{R_1}^{R_2} \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r l} dr = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot (\ln r) \Big|_{R_1}^{R_2} = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} (\ln R_2 - \ln R_1) = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{\frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{R_2}{R_1}}$$



$$C_{\text{цил.}} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Ёмкость при параллельном соединении

$$U_1 = U_2 = U$$

$$q = q_1 + q_2$$

$$q = C_{\text{общ.}} U$$

$$q_1 = C_1 U$$

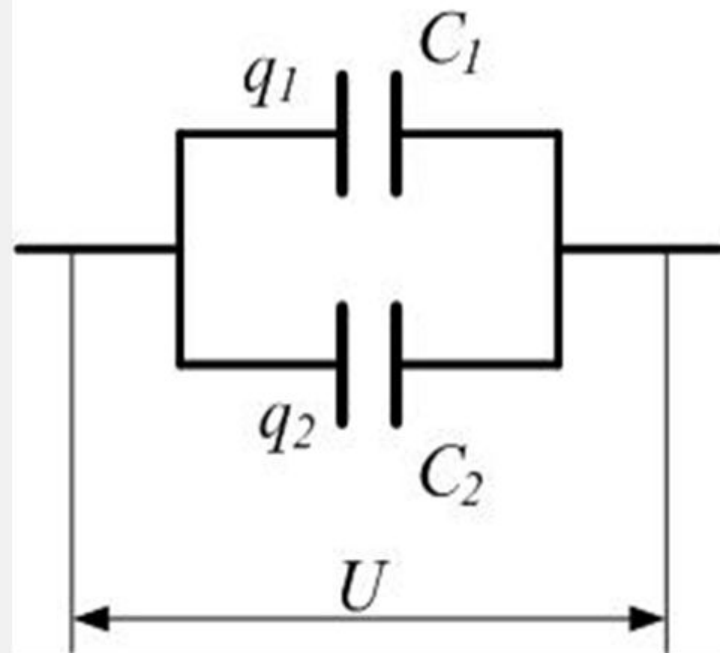
$$q_2 = C_2 U$$

$$C = \frac{q}{U}$$

$$C_{\text{общ.}} U = C_1 U + C_2 U$$

$$C_{\text{общ.}} = C_1 + C_2$$

$$C_{\text{общ.}} = \sum_i C_i$$



Ёмкость при последовательном соединении

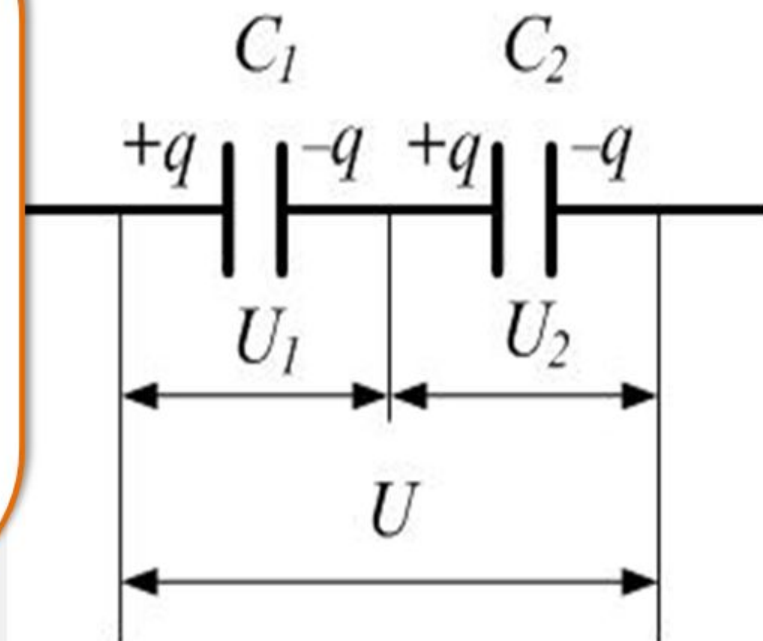
$$C = \frac{q}{U}$$

$$q_1 = q_2 = q$$
$$U = U_1 + U_2$$

$$U = \frac{q}{C_{\text{общ.}}}$$

$$U_1 = \frac{q}{C_1}$$

$$U_2 = \frac{q}{C_2}$$



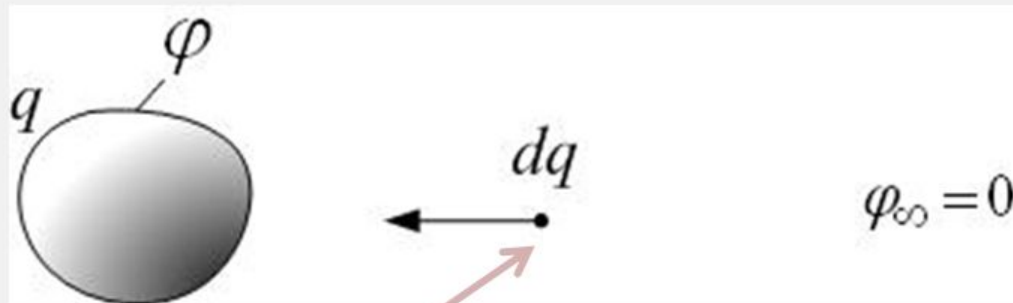
$$\frac{q}{C_{\text{общ.}}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$$

$$\frac{1}{C_{\text{общ.}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C_{\text{общ.}}} = \sum_i \frac{1}{C_i}$$

Энергия заряженного проводника

Заряжаем проводник:



Работа внешних сил по переносу заряда dq идёт на увеличение энергии проводника:

$$dA = dq \cdot \Delta\varphi$$

$$dA = dW$$

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{\infty} = \varphi \longrightarrow dW = \varphi \cdot dq$$

$$dW = \varphi \cdot C d\varphi$$

$$\varphi = \frac{q}{C}$$

$$q = C\varphi$$

$$dq = C \cdot d\varphi$$

$$\frac{dW}{d\varphi} = C \cdot \varphi$$

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

Энергия заряженного проводника

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

$$\varphi = \frac{q}{C}$$

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{C\left(\frac{q}{C}\right)^2}{2} = \frac{Cq^2}{2C^2}$$

$$q = C\varphi$$

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{(C\varphi)\varphi}{2} = \frac{q\varphi}{2}$$

$$W = \frac{q\varphi}{2}$$

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

Энергия заряженного конденсатора:

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

Объёмная плотность энергии электростатического поля

Энергия электростатического поля проводника или конденсатора **локализована в той области пространства, где создано электростатическое поле**

Определение: объёмной плотностью энергии называется энергия единицы объёма пространства:

$$w = \frac{dW}{dV}$$

На примере плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

$$V = S \cdot d$$

$$U = E \cdot d$$

$$\Rightarrow W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} U^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S (Ed)^2}{2d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot Sd \cdot E^2}{2}$$

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot Sd \cdot E^2}{2V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$

Объёмная плотность энергии электростатического поля

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

$$w = \frac{dW}{dV}$$

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E$$

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

$$w = \frac{ED}{2}$$