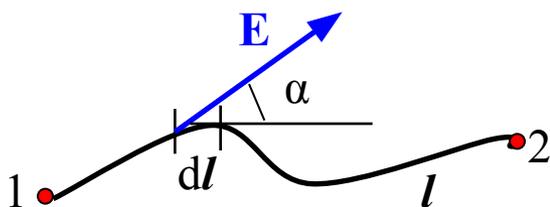


# Электричество и магнетизм

## Лекция 3. Потенциал.

Работа электрического поля.  
Электрическое поле в веществе.  
Емкость.

## Работа перемещения заряда в электрическом поле



Работа перемещения на участке  $dl$ , совершаемая силой  $\mathbf{F} = q_0 \cdot \mathbf{E}$ , действующей на переносимый заряд  $q_0$  равна:

$$\mathbf{F} = q_0 \cdot \mathbf{E} \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

Полная работа переноса заряда  $q_0$  из **1** в **2** равна:

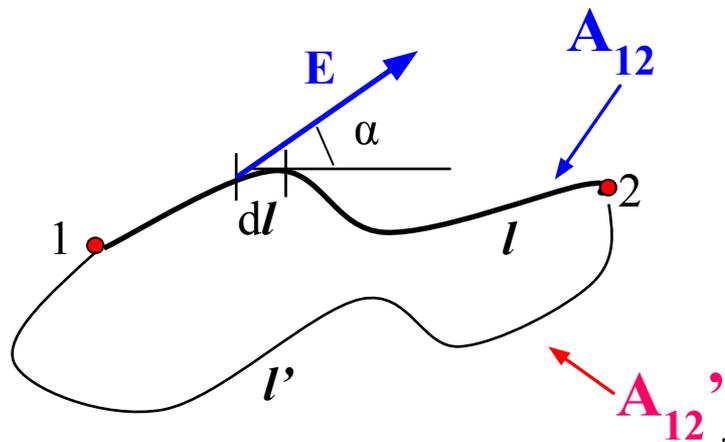
$$A_{12} = q_0 \int_1^2 E dl \cos \alpha$$

Эта работа может быть как положительной, так и отрицательной

**положительная работа** - совершается силами поля

**отрицательная работа** - совершается внешними силами

Выясним, может ли работа зависеть от формы и размеров пути переноса заряда



$A_{12}'$  – работа по перемещению заряда вдоль пути  $l'$

Пусть  $A_{12} > A_{12}'$ , тогда будет выигрыш в работе  $A_{12} - A_{12}'$

Такие источники энергии в природе не обнаружены (по закону сохранения энергии)

Значит  $A_{12} = A_{12}'$ , тогда

$$q_0 \int_1^2 E dl \cos \alpha$$

Не зависит ни от величины переносимого заряда, ни от формы и размеров пути переноса, а определяется только положением точек в данном электрическом поле.

Работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории равна нулю.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0} = \int_1^2 E \cos \alpha dl$$

**разность потенциалов**

Если одна из точек расположена в пространстве, где поля нет, тогда  $\varphi_2=0$

$$\varphi_1 = \int_1^{\infty} E \cos \alpha dl$$

Потенциал данной точки электрического поля равен отношению работы переноса пробного заряда из данной точки поля в другую точку, где электрическое поле отсутствует (например, в бесконечность), к величине переносимого заряда

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

$$\varphi = \frac{A_0}{q_0}$$

$$\varphi = \frac{A_0}{q_0}$$

Потенциал – скалярная величина, зависит от знака работы переноса  $A_0$

Потенциалы всех точек поля вокруг положительных зарядов - **положительные**  
отрицательных зарядов - **отрицательные**

Разность потенциалов между двумя точками равна 1 В (вольту), если работа переноса одного кулона электричества из одной точки в другую равна одному джоулю:

$$1 \text{ Вольт} = \frac{1 \text{ Джоуль}}{1 \text{ Кулон}} \qquad \mathbf{1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}}$$

В атомной физике работа перемещения элементарных зарядов в электрическом поле измеряется в электрон-вольтах (эВ)

1эВ равен работе перемещения электрона, если разность потенциалов начальной и конечной точек перемещения равна **1В**

$$\mathbf{1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}$$

Потенциал  $\varphi_\infty$  поля точечного заряда  $q_0$  на расстоянии  $r$  от него относительно бесконечно удаленной точки вычисляется следующим образом:

$$\varphi = \varphi_\infty = \frac{1}{q} \int_r^\infty E dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

Как следует из теоремы Гаусса, эта же формула выражает потенциал поля однородно заряженного шара (или сферы) при  $r \geq R$ , где  $R$  – радиус шара.

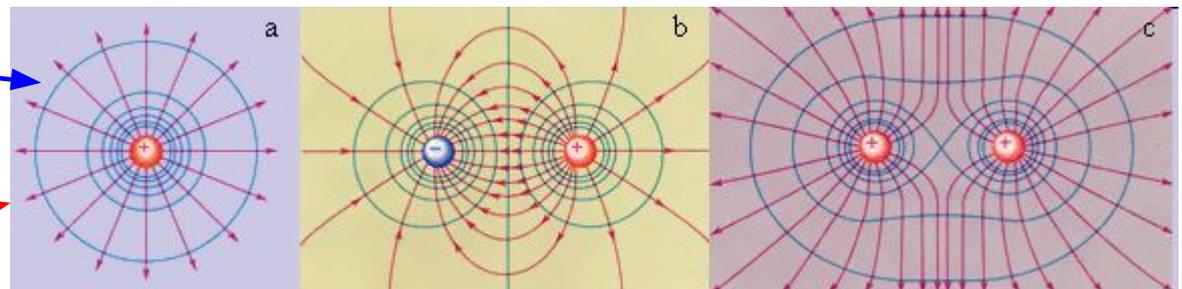
Для наглядного представления электростатического поля наряду с силовыми линиями используют эквипотенциальные поверхности.

Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется **эквипотенциальной поверхностью** или **поверхностью равного потенциала**.

Силовые линии электростатического поля всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Эквипотенциальные поверхности кулоновского поля точечного заряда – концентрические сферы.

**Эквипотенциальные поверхности**

**Силовые линии**



Работа перемещения некоторого заряда из одной точки поля в другую равна произведению этого заряда на разность потенциалов начальной и конечной точек перемещения:

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

Если пробный заряд  $q$  совершил малое перемещение  $\Delta l$  вдоль силовой линии из точки (1) в точку (2), то можно записать:

$$\Delta A_{12} = q \cdot E \cdot \Delta l = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = -q \cdot \Delta \varphi$$

Отсюда следует

$$E = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta l} (\Delta l \rightarrow 0); \quad E = -\frac{d\varphi}{dl}$$

Это соотношение в скалярной форме выражает связь между напряженностью поля и потенциалом.  $l$  – координата, отсчитываемая вдоль силовой линии.

Напряженность в данной точке поля равна изменению потенциала на единицу длины вдоль нормали к эквипотенциальной поверхности, проходящей через эту точку («минус» показывает направление в сторону убывания потенциала)

Потенциал  $\varphi_\infty$  поля точечного заряда  $q_0$  на расстоянии  $r$  от него относительно бесконечно удаленной точки вычисляется следующим образом:

$$\varphi_1 = \int_1^\infty E \cos \alpha dl$$

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

$$\cos \alpha = +1; \quad dl = dr$$

$$\varphi = \int_r^\infty E \cos \alpha dl = \int_r^\infty E dr = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

потенциал точечного заряда по абсолютной величине убывает обратно пропорционально расстоянию.

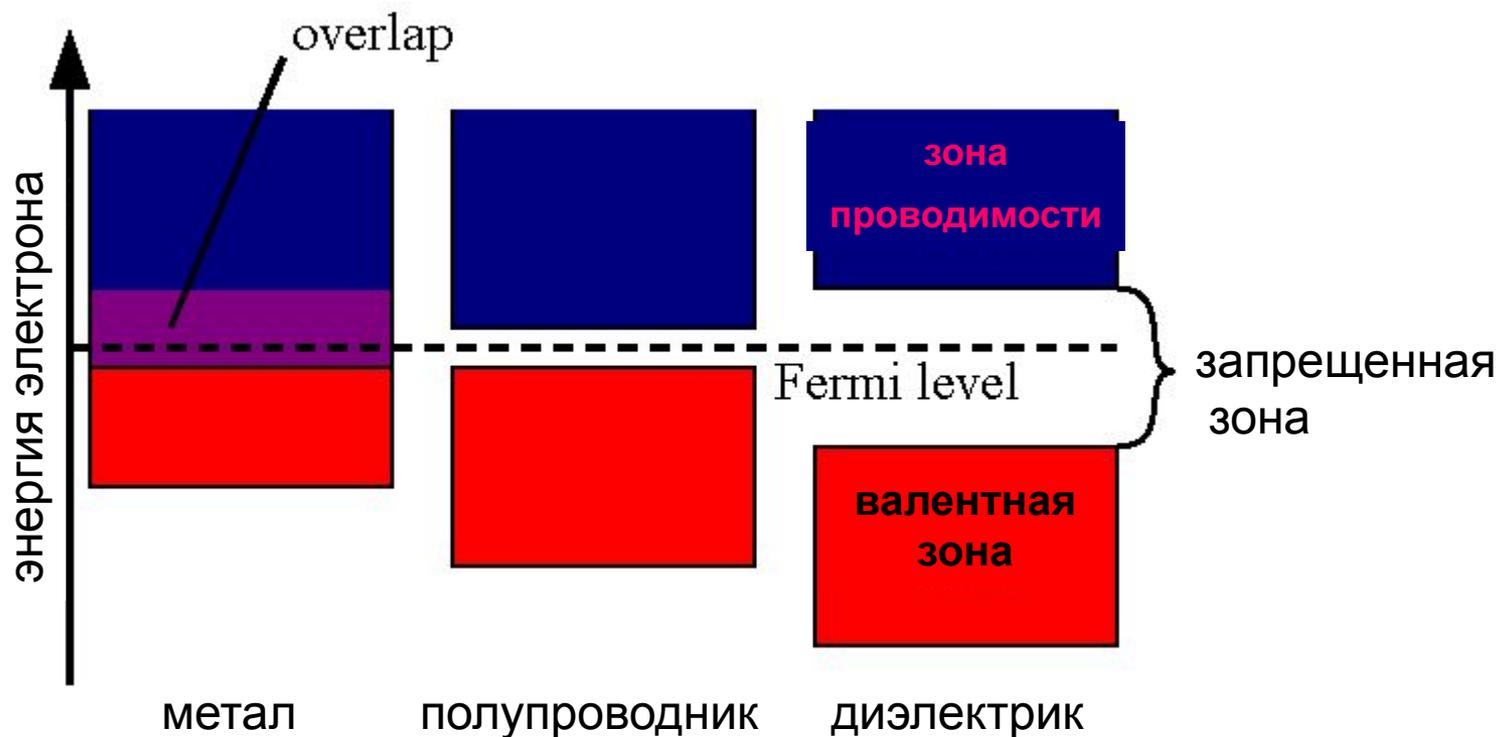
$$\varphi = \frac{W_p}{q_0}$$

потенциал данной точки поля точечного заряда численно равен потенциальной энергии системы, состоящей из заряда  $q$  и единичного заряда  $q_0$ , помещенного в эту точку поля

# **Электрическое поле в веществе**

# Зонная структура различных материалов

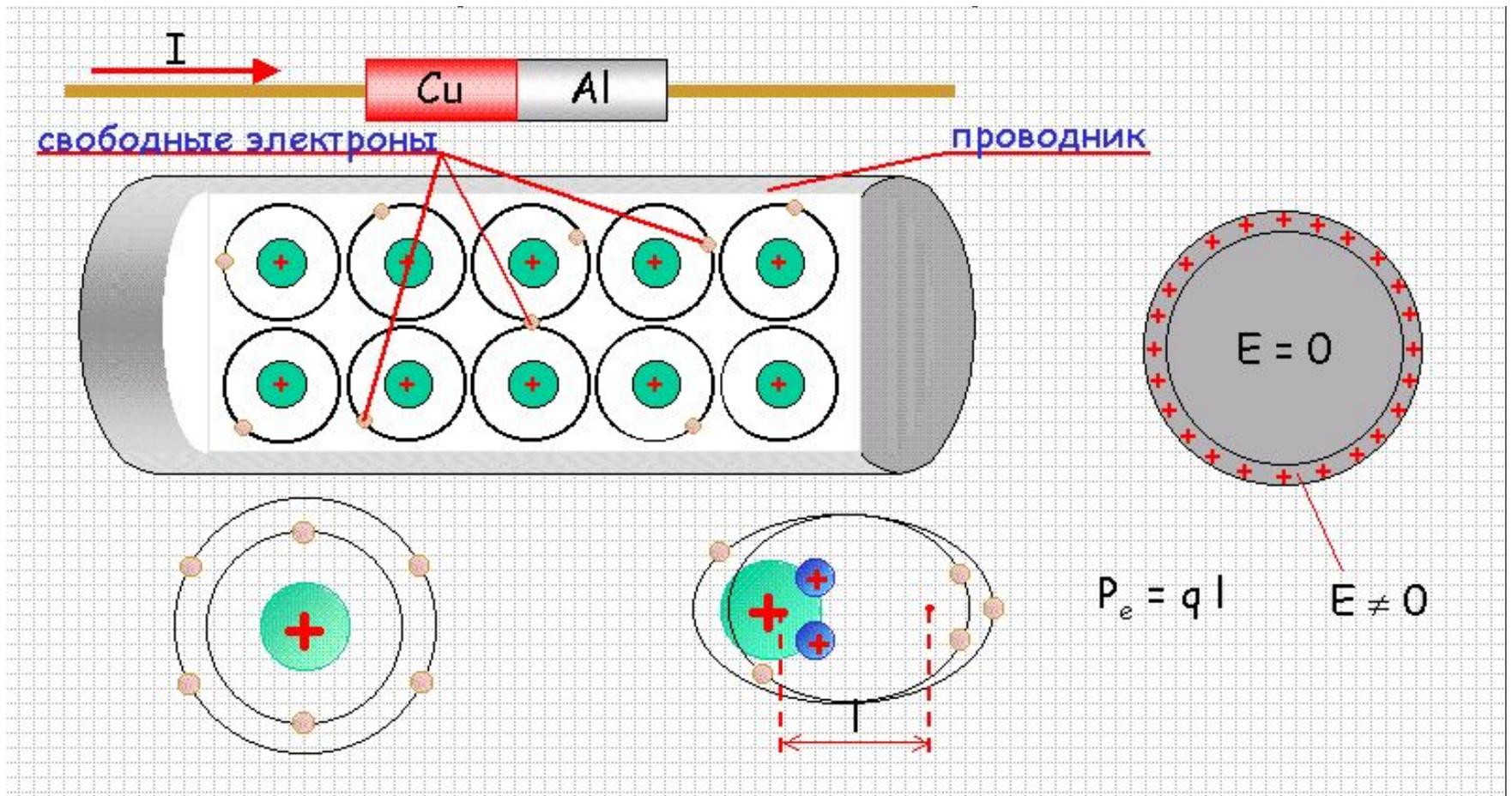
В различных веществах, а также в различных формах одного и того же вещества, энергетические зоны располагаются по-разному. По взаимному расположению этих зон вещества делят на три большие группы



# Проводники в электрическом поле

Проводники – вещества, содержащие свободные электроны.

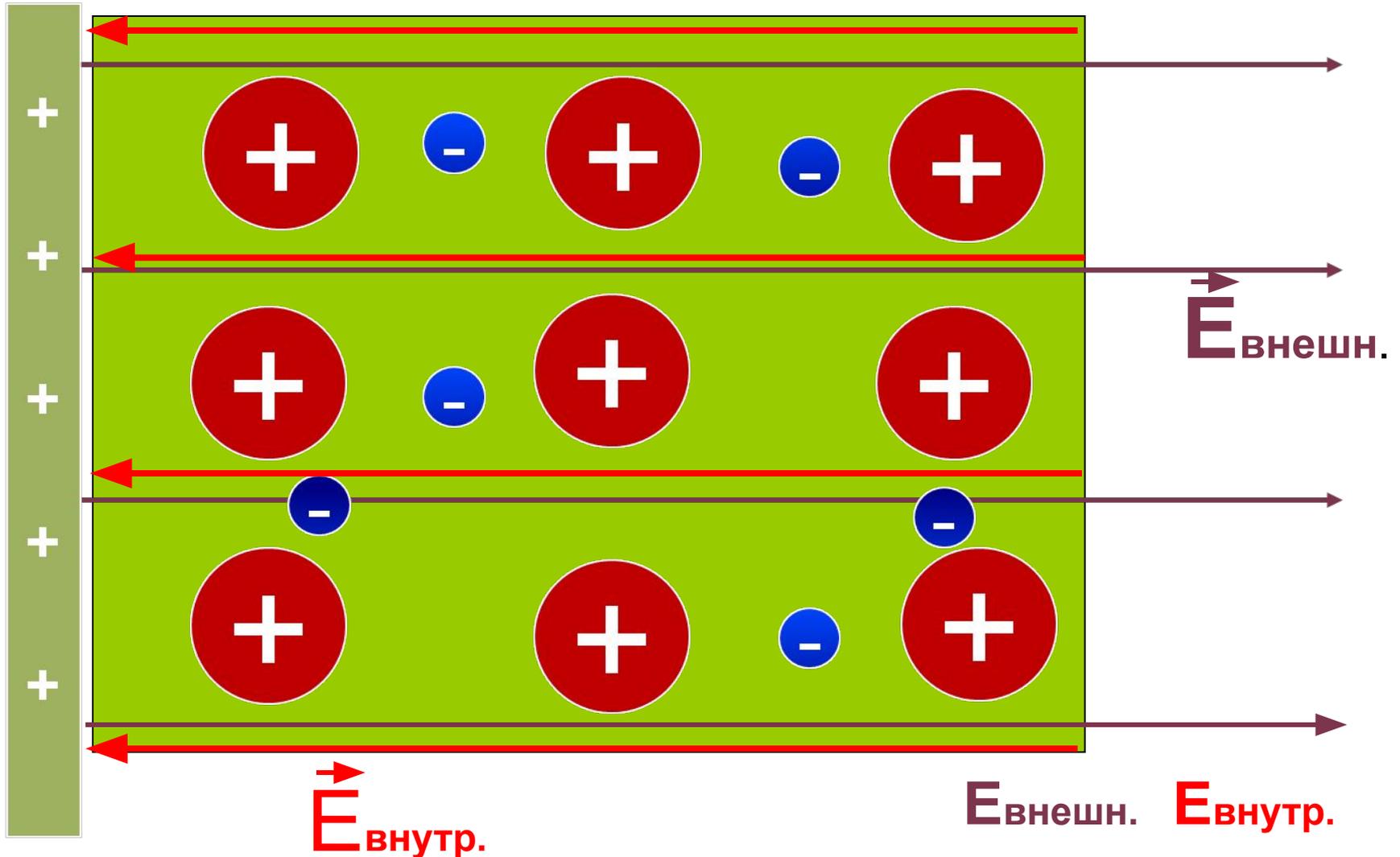
1. Электростатическое поле внутри однородного заряженного проводника отсутствует.



# Внутри заряженных проводников поле равно нулю

- Если проводник заряжен, то есть на нем находится избыточный заряд какого - либо знака, то из-за того, что одноименные заряды отталкиваются, они будут стремиться занять как можно больший объем и окажутся все на поверхности проводника.
- Наличие поля внутри привело бы к непрерывному движению зарядов до тех пор, пока поле не исчезло бы. Таким образом, *внутри заряженного проводника электростатическое поле отсутствует.* Потенциал внутри проводника

# Металлический проводник в электростатическом поле

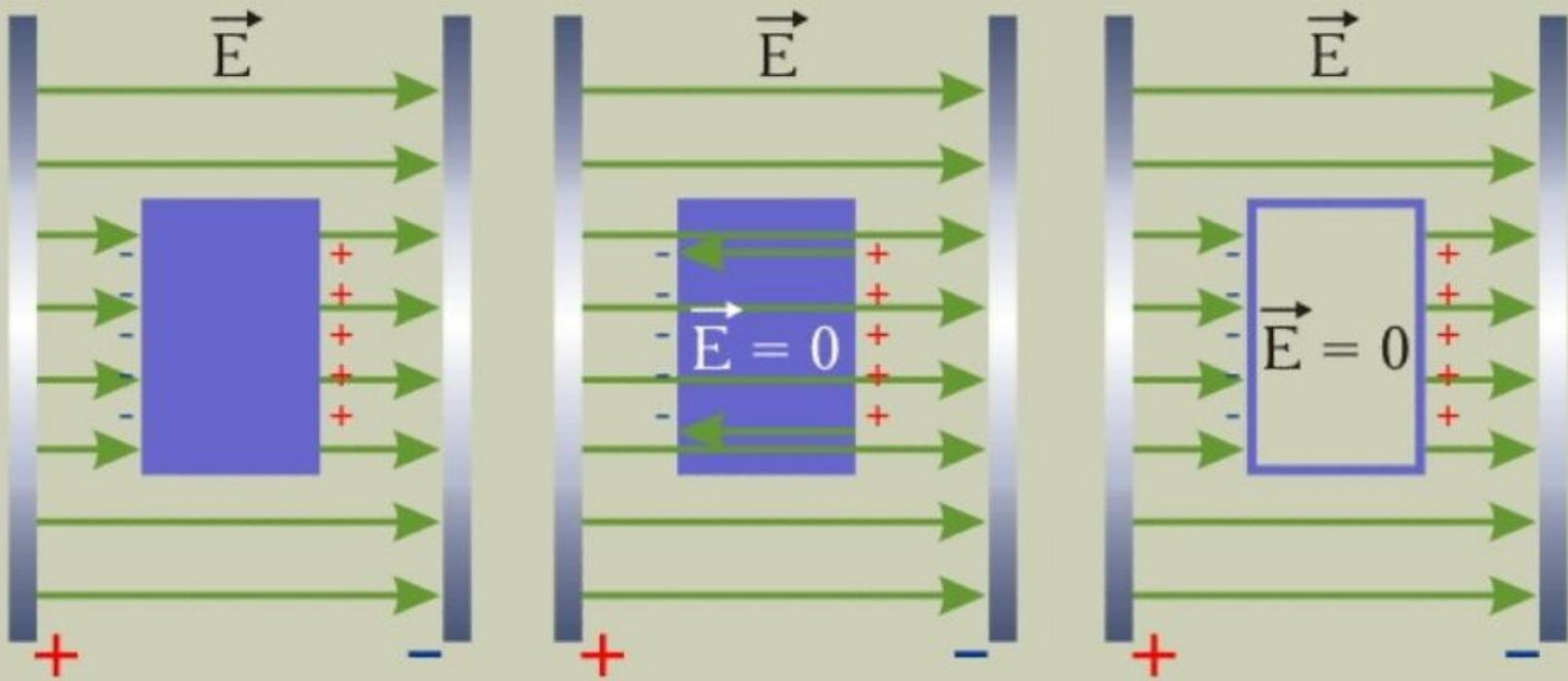


# 2. Явление электростатической

## ИНДУКЦИИ

- Если проводник поместить во внешнее электрическое поле, то начнется перемещение свободных зарядов таким образом, что положительные заряды скапливаются на одной стороне, а отрицательные - на противоположной.
- Перераспределение зарядов будет происходить до тех пор, пока поле, созданное этими зарядами, не компенсирует внешнее поле. Если в этот момент разделить проводник плоскостью, перпендикулярной внешнему полю, то разделенные части проводника окажутся заряженными разноименно.
- В разделении зарядов и заключается явление электростатической индукции. Благодаря этому явлению осуществляется электростатическая защита. Если какой-либо прибор необходимо защитить от внешних электрических полей, то его

# Явление электростатической индукции



## Проводники в электрическом поле

**3.** Внутри проводника электрический заряд отсутствует; весь заряд проводника, полученный им при электризации, может располагаться только на его поверхности.

**4.** Если внутри проводника имеется полость, то в каждой точке этой полости электростатическое поле равно нулю:  $E=0$

#### **4. Напряженность электростатического поля на внешней поверхности проводника направлена перпендикулярно к этой поверхности.**

- Если напряженность электрического поля будет направлена под углом к поверхности проводника, то под действием составляющей этого поля, параллельной поверхности, заряды двигались бы непрерывно, что противоречит закону сохранения энергии.
- Отсюда следует вывод - **напряженность электростатического поля перпендикулярна поверхности проводника.** Также известно, что эквипотенциальные поверхности перпендикулярны силовым линиям, поэтому поверхность проводника является эквипотенциальной.

**5. Если внутри проводника имеется полость, то в каждой точке этой полости электростатическое поле равно нулю:  $E=0$**

**6. Во всех точках внутри проводника потенциал электростатического поля имеет одно и то же значение.**

**7. Электрические заряды распределяются по поверхности проводника так, что электростатическое поле оказывается сильнее на выступах проводника и слабее на его впадинах.**

**8.** Если заряженный проводник имеет форму шара или сферы радиусом  $R$ , то напряженность и потенциал создаваемого им поля определяются выражениями:

$$E = \begin{cases} 0, & \text{если } r < R \\ k \frac{q}{r^2}, & \text{если } r \geq R \end{cases} \quad \varphi = \begin{cases} k \frac{q}{R}, & \text{если } r \leq R \\ k \frac{q}{r}, & \text{если } r > R \end{cases}$$

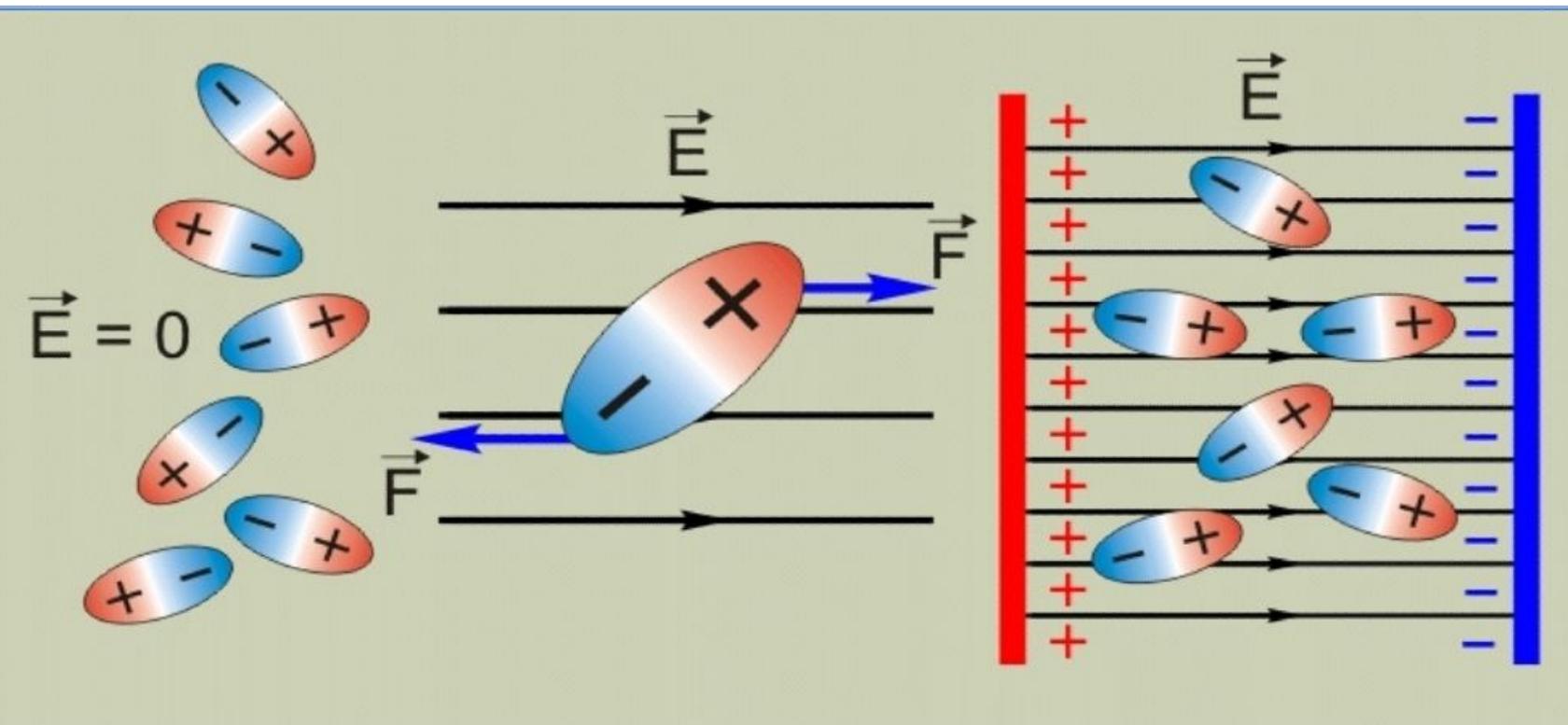
# Диэлектрики

- Диэлектрики - это вещества, не содержащие свободных заряженных частиц, т.е. таких заряженных частиц, которые способны свободно перемещаться по всему объему тела. Поэтому *диэлектрики **не могут проводить электрический ток.***
- Диэлектриками являются многие твердые тела (фарфор, янтарь, эбонит, стекло, кварц, мрамор и др.), некоторые жидкости (например, дистиллированная вода) и все газы.
- По внутреннему строению диэлектрики разделяются на полярные и неполярные.

# Полярные диэлектрики

- В полярных диэлектриках молекулы являются диполями, в которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают.
- К таким диэлектрикам относятся спирт, вода, аммиак и др.

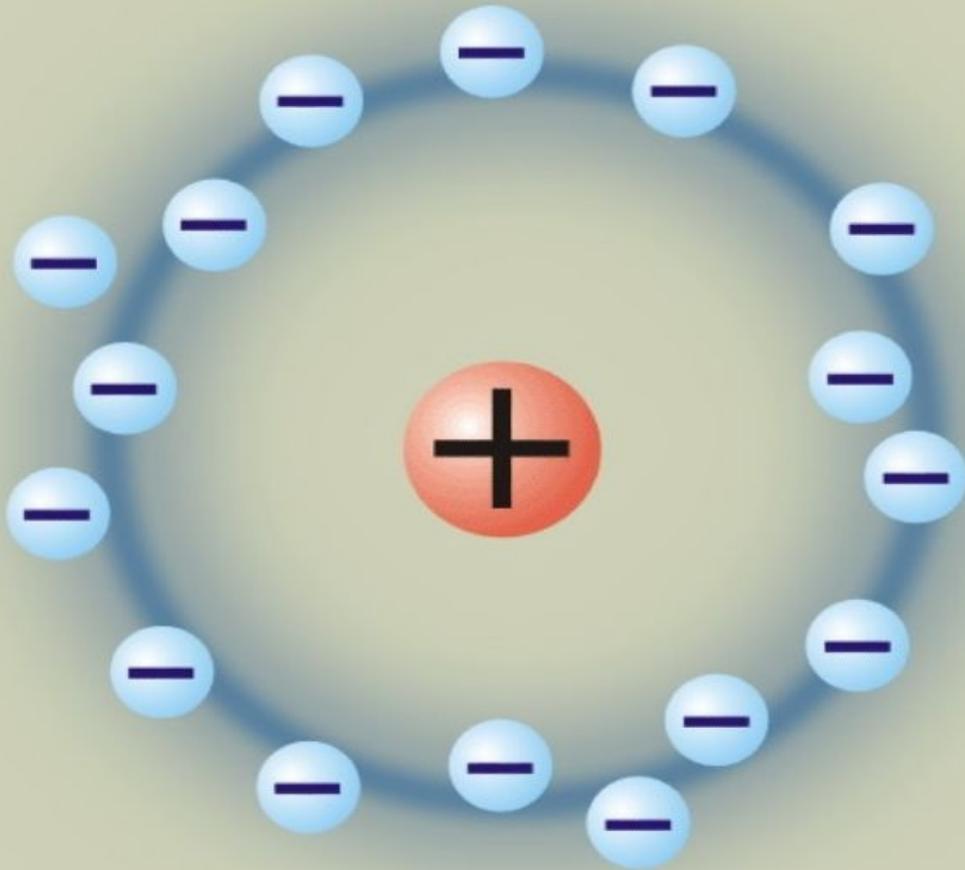
# Полярные диэлектрики



# Неполярные диэлектрики

- Неполярные диэлектрики состоят из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают.
- К таким веществам относятся инертные газы, водород, кислород, полиэтилен и др.

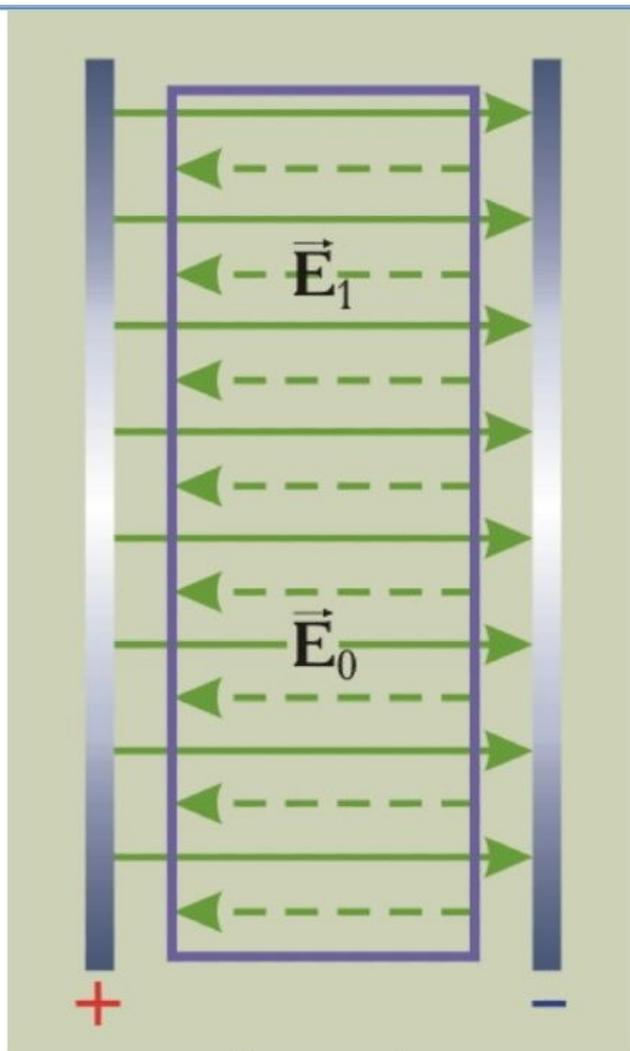
# Неполярные диэлектрики



# Поляризация диэлектриков

- Если диэлектрик поместить во внешнее электрическое поле, то происходит **поляризация диэлектрика**. При этом процессе *молекулы диэлектрика ориентируются по внешнему электрическому полю*. На противоположных поверхностях диполя появляются связанные заряды.
- Это приводит к тому, что в диэлектриках возникает свое электрическое поле, направленное против внешнего, и в сумме поле внутри диэлектрика будет меньше внешнего.
- Диэлектрическая проницаемость, о которой мы говорили раньше, характеризует способность диэлектрика к ослаблению внешнего поля.

# Поляризация диэлектриков

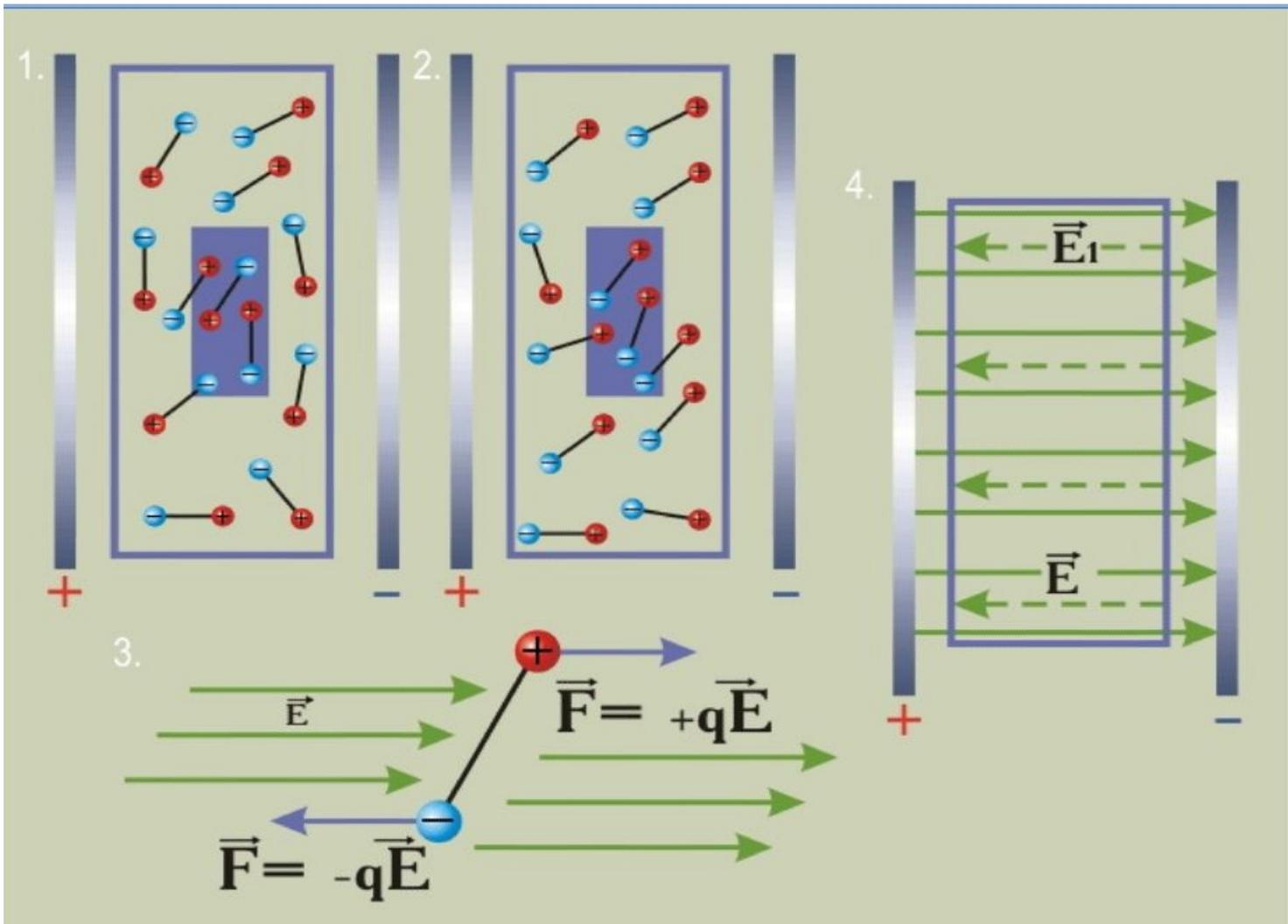


Сложение полей.

# Поляризация полярных диэлектриков

- В полярных диэлектриках **поляризация происходит в результате переориентации диполей.**
- Когда нет внешнего поля, диполи сориентированы хаотично и суммарное поле внутри вещества равно нулю. Во внешнем поле под действием кулоновских сил происходит поворот диполей. Воздействие внешнего электрического поля испытывают все молекулы диэлектрика. Это приводит к тому, что в диэлектрике возникает собственное электрическое поле. Электрическое поле внутри диэлектриков будет ослаблено по сравнению с внешним полем  **$E$** . **Наряду с ориентирующим действием кулоновских сил, дипольные молекулы находятся под влиянием теплового движения.** Тепловое движение стремится нарушить ориентацию диполей.

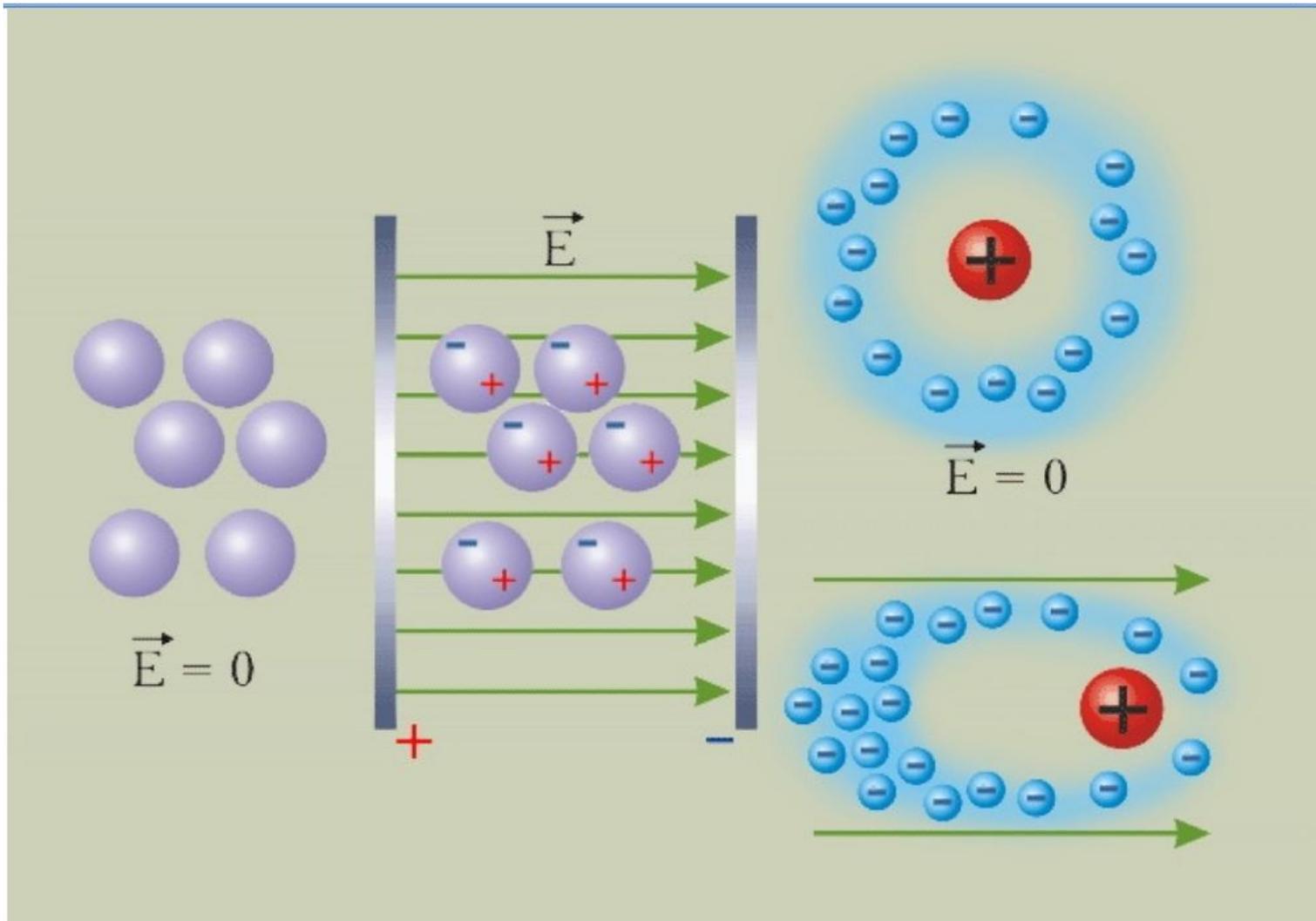
# Поляризация полярных диэлектриков



# Поляризация неполярных диэлектриков

- Когда неполярный диэлектрик помещают во внешнее электрическое поле, происходит перераспределение зарядов внутри молекул таким образом, что в целом в диэлектрике появляется собственное поле.
- В отличие от полярных диэлектриков, здесь нет влияния теплового движения на процесс поляризации.

# Поляризация неполярных диэлектриков



# Виды поляризации

## 1. Упругая поляризация

**электронного смещения** –

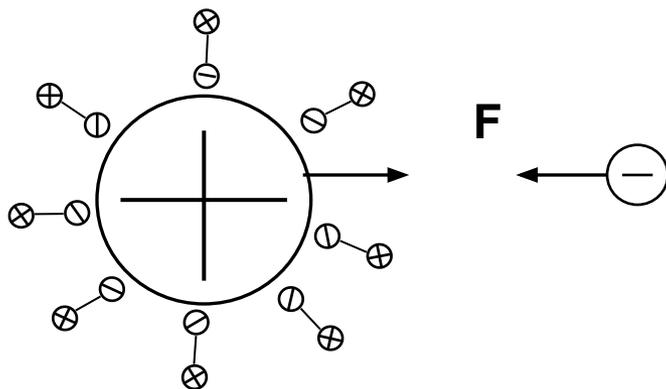
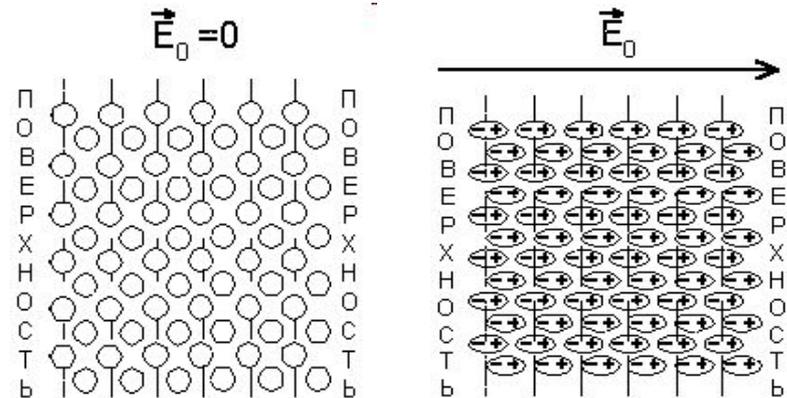
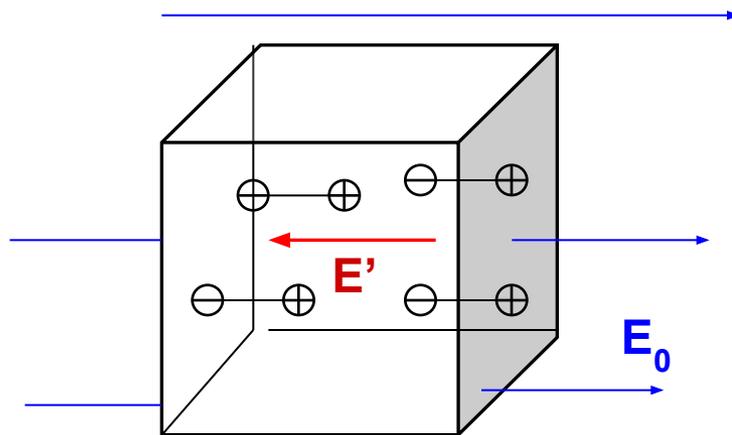
внешнее поле смещает электронную оболочку атомов относительно ядра

**ионного смещения** – смещение в кристаллической решетке разноименно заряженных ионов в противоположных направлениях

**2. Ориентационная или дипольная поляризация** – если молекулы имеют собственный электрический момент, то внешнее поле ориентирует их.

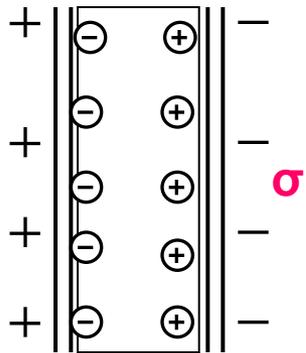
**3. Спонтанная (самопроизвольная) поляризация** – у диэлектриков, имеющих в объеме большие поляризованные области (домены). Под действием поля разупорядоченные электрические моменты доменов ориентируются определенным образом

Поляризация диэлектрика сопровождается появлением поверхностных зарядов на его границах, а также внутреннего поля  $\mathbf{E}'$ , образованного этими зарядами.



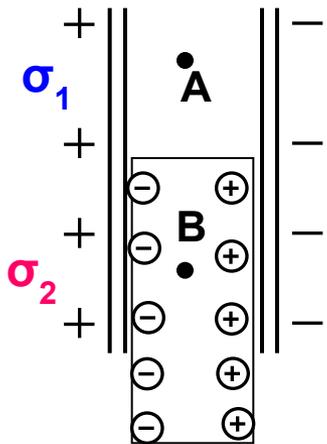
При поляризации однородного диэлектрика (см. рис. 5.1) смещения зарядов внутри любого выбранного слоя внутри диэлектрика происходят таким образом, что количество связанного заряда, покидающего

Ориентировка диполей диэлектрика вокруг слоя равен заряду, входящему в него. Таким образом объемный заряд диэлектрических средах по сравнению с зарядом внутри диэлектрика не образуется. В поверхностных же



В отсутствие диэлектрика или когда занимает все пространство между обкладками, заряды на обкладках распределяются равномерно, напряженность поля будет везде одинакова

$$E = \sigma / \epsilon \epsilon_0$$



Если диэлектрик частично занимает пространство между обкладками, заряды на обкладках взаимодействуют с зарядами на поверхности диэлектрика, вследствие чего равномерное распределение зарядов вдоль обкладок нарушится. напряженность поля будет

$$E_A = \sigma_1 / \epsilon_0$$

$$E_B = \sigma_2 / \epsilon \epsilon_0$$

$$\sigma_2 = \epsilon \cdot \sigma_1$$

Заряды на поверхности диэлектрика создают поле  $E' = \sigma' / \epsilon_0$  противоположное полю  $E_0 = \sigma_2 / \epsilon_0$  зарядов на обкладках (внешнее поле), тогда

$$E_B = E_0 - E' = \sigma_2 / \epsilon_0 - \sigma' / \epsilon_0$$

$$\sigma' = \sigma_2 - \epsilon_0 \cdot E_B$$

Поверхностная плотность зарядов на поверхности диэлектрика

$$\sigma' = \sigma_2 (1 - 1/\epsilon) = \sigma_1 (\epsilon - 1)$$

При наличии диэлектрика индукция избыточных зарядов не изменяется, но напряженность  $E$  поля уменьшается в  $\epsilon$  раз

$$E_B = E_0 - E' = E_0 / \epsilon$$

$\chi$

$$E' = (1 - 1/\epsilon) E_0 = (\epsilon - 1) E_0 / \epsilon = (\epsilon - 1) E$$

$$P_3 = \epsilon_0 \cdot E' = \epsilon_0 \cdot (\epsilon - 1) E = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot E$$

$\chi$  - диэлектрическая восприимчивость

$$D = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E = \epsilon_0 \cdot E + P_3$$

$$P_3 = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot E$$

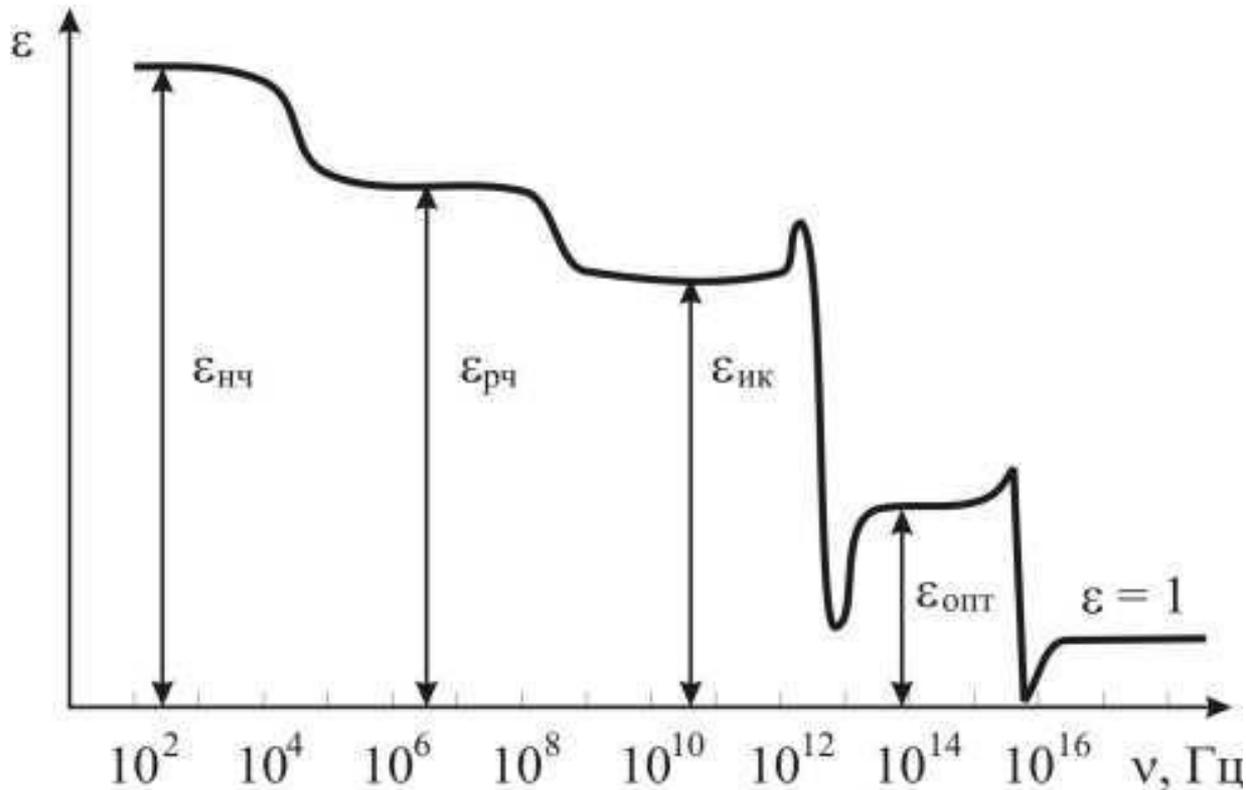
Вектор поляризации прямо пропорционален напряженности суммарного электрического поля в диэлектрике

# Диэлектрическая проницаемость среды

- $E_0$  - напряжённость электрического поля в вакууме
- $E$  - напряжённость электрического поля в диэлектрике
- $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды

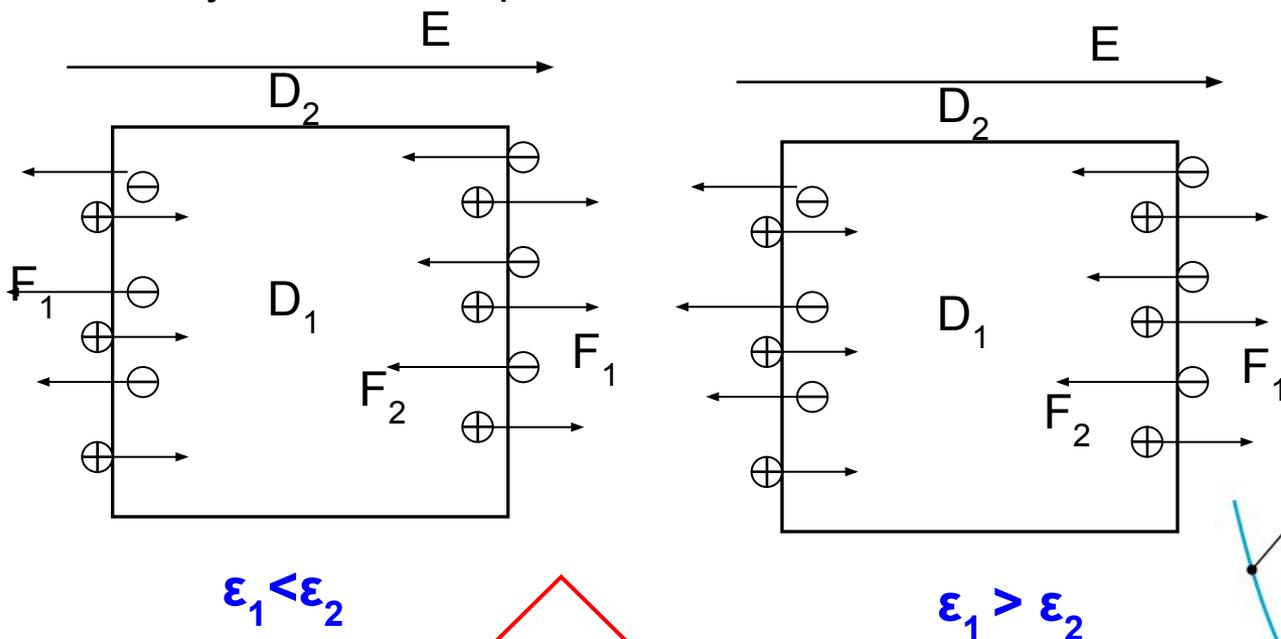
$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

# Зависимость $\epsilon$ от частоты



- В постоянном электрическом поле все виды поляризации, присущие данному веществу, успевают установиться. В переменном электрическом поле с ростом частоты  $\nu$  начинают запаздывать наиболее медленные виды поляризации, а затем и другие виды. Это приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости с ростом частоты, вплоть до  $\epsilon = 1$  в полях с частотой  $\nu = 10^{17} \div 10^{18}$  Гц.

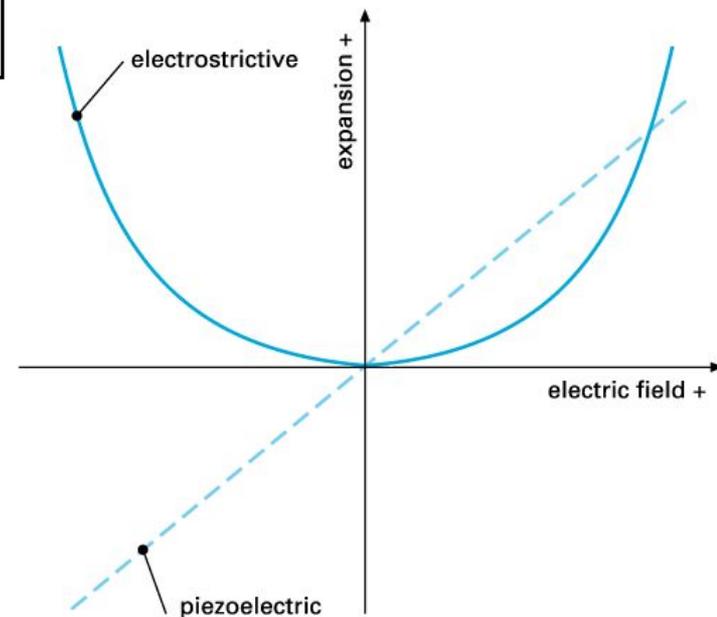
**Электрострикция** – деформация (сжатие или растяжение) диэлектрика и появление внутренних механических напряжений, в результате воздействия внешнего электрического поля на заряды в молекулах диэлектрика.



Диэлектрик  $D_1$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  находится в среде  $D_2$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$

$\epsilon_1 > \epsilon_2$       тело растягивается

$\epsilon_1 < \epsilon_2$       тело сжимается



# Пьезоэлектрический эффект

прямой

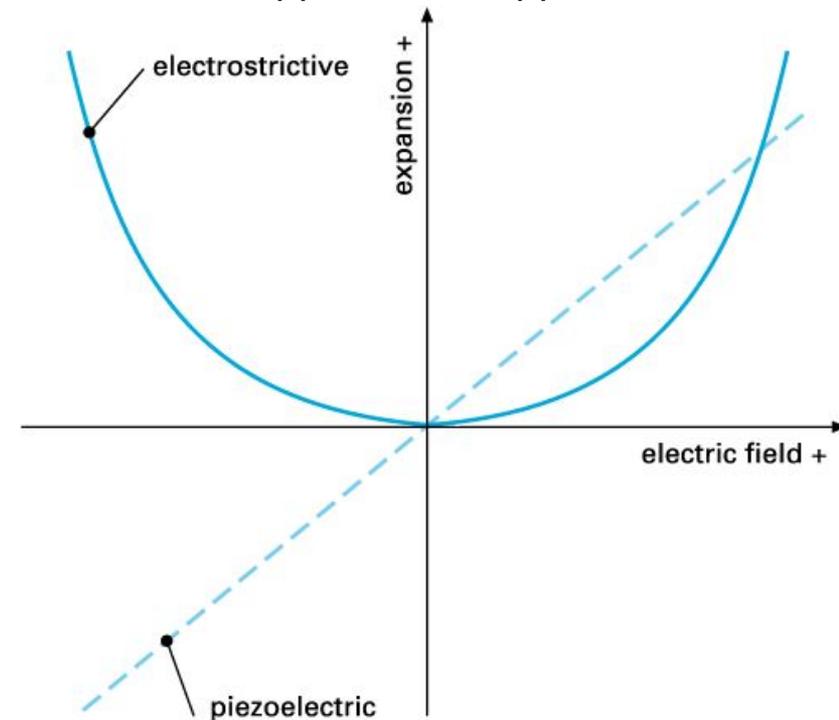
эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений

Прямой и обратный пьезоэлектрический эффекты наблюдаются в одних и тех же кристаллах — пьезоэлектриках.

Пьезоэффект нельзя путать с электрострикцией. В отличие от электрострикции, прямой пьезоэффект наблюдается только в кристаллах без центра симметрии.

обратный

возникновение механических деформаций под действием электрического поля.



**Прямой пьезоэффект** используется:

- в пьезозажигалках, для получения высокого напряжения на разряднике до искрового пробоя воздуха;
- в датчиках в качестве чувствительного к силе элемента (чем больше сила, тем выше напряжение на контактах), например, в силоизмерительных датчиках и датчиках давления жидкостей и газов;
- в качестве чувствительного элемента в микрофонах, гидрофонах, приемных элементах сонаров;
- в контактном пьезоэлектрическом взрывателе (например к выстрелам РПГ-7).

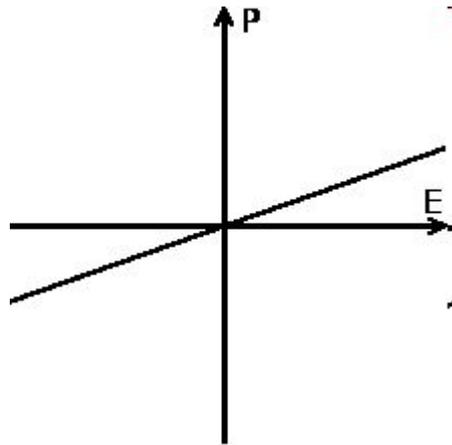
**Обратный пьезоэлектрический эффект** используется:

- в пьезоизлучателях звука в воздух (эффективны на высоких частотах и имеют небольшие габариты, такие например устанавливаются в музыкальные открытки, различные оповещатели, применяемые в массе бытовых устройств, от наручных часов, до разной кухонной технике), ультразвуковых излучателях;
- в излучателях гидролокаторов (сонарах);
- в системах сверхточного позиционирования, например в системе позиционирования иглы в сканирующем туннельном микроскопе или позиционер перемещения головки жёсткого диска;
- для подачи чернил в струйных принтерах, печатающих на сольвентных чернилах и чернилах с ультрафиолетовым отверждением;
- в пьезоэлектрических двигателях;
- в адаптивной оптике, для изгиба отражающей поверхности деформируемого зеркала.

**Прямой и обратный эффект** одновременно используются:

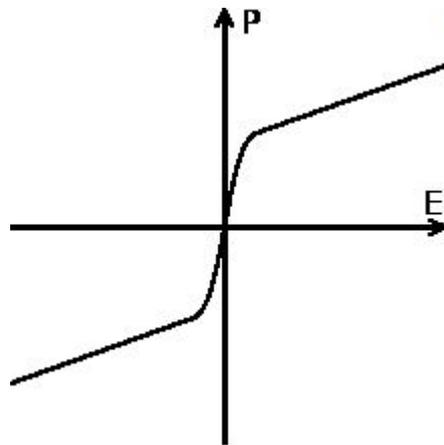
- ✓ в кварцевых резонаторах, используемых как эталон частоты;
- ✓ в пьезотрансформаторах для изменения напряжения высокой частоты.

# Зависимость поляризации $P$ от напряжённости электрического поля $E$



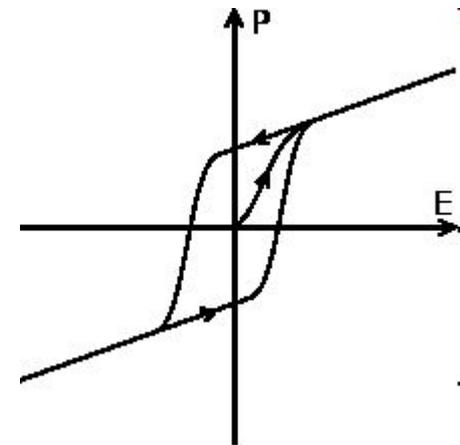
а) линейного диэлектрика  
( $\chi$  не зависит от  $E$ )

Во многих телах вектор поляризации  $P$  прямо пропорционален напряжённости поляризующего поля  $E$ , однако в некоторых кристаллах на характер зависимости  $P$  от  $E$  сильно влияет температура



б) параэлектрика  
(нелинейного диэлектрика)

$$P_{\varepsilon} = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E$$



в) сегнетоэлектрика

# Электреты

**Электреты** – диэлектрики, длительное время сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, вызвавшего поляризацию. Они являются источниками электрического поля (аналоги постоянных магнитов).

Электреты могут быть получены практически из любых полярных диэлектриков: органических полимерных (политетрафторэтилен, он же фторопласт-4, фторлон-4, тефлон  $[-CF_2-CF_2-]_n$ , полипропилен  $[-CH_2CH(CH_3)-]_n$ , поликарбонаты  $[-ORO-C(O)-]_n$ , где R – ароматический или алифатический остаток; полиметилметакрилат, он же плексиглас  $[-CH_2-CH_2(COOCCH_3)-]_n$  и др.); неорганических монокристаллических (кварц, корунд и др.), поликристаллических (керамики, ситаллы и др.), стекол. Наиболее стабильны электреты из пленочных фторсодержащих полимеров.

# Получение и применение электретов

- Стабильные электреты получают:
  - нагревая, а затем охлаждая диэлектрик в сильном электрическом поле (**термоэлектреты**);
  - освещая в сильном электрическом поле (**фотоэлектреты**);
  - подвергая радиоактивному облучению (**радиоэлектреты**);
  - поляризацией в сильном электрическом поле без нагревания (**электроэлектреты**);
  - поляризацией в магнитном поле (**магнитэлектреты**);
  - при застывании органических растворов в электрическом поле (**криоэлектреты**);
  - механической деформацией полимеров (**механоэлектреты**);
  - трением (**трибоэлектреты**);
  - действием поля коронного разряда (**короноэлектреты**).
- Со временем у электретов наблюдается уменьшение заряда. Например, у электрета из политетрафторэтилена время жизни  $\sim 10^2 \div 10^4$  лет.
- Применение: источники электрического поля (электретные телефоны и микрофоны, вибродатчики, генераторы слабых переменных сигналов, электрометры, электростатические

*Электроёмкость*

*Конденсаторы*

Если уединенному проводнику, находящемуся далеко от других тел сообщить заряды  $q_1, q_2, \dots$  то после их перераспределения по объему проводника он приобретает потенциалы  $\varphi_1, \varphi_2 \dots$

Отношение  $q_1 / \varphi_1$  для данного проводника постоянно и зависит только от его формы и размеров. Это отношение, которое сохраняется и при бесконечно малых изменениях заряда и потенциала, называется его **электроемкостью**.

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

$$C = \frac{dq}{d\varphi}$$

Понятие электроемкости применимо только к проводникам, т.к. там существует равновесное распределение зарядов по объему, при котором все точки имеют один и тот же потенциал. Если заряд сообщить изолятору, то он по нему не растекается, и потенциал в разных местах изолятора различен.

При наличии вблизи проводника других тел электроемкость будет зависеть также от формы, размеров и относительного расположения соседних тел. То есть, при наличии соседних тел проводник приобретает иной потенциал, чем при их отсутствии.

Емкость уединенного шара радиуса  $r$ , находящегося в диэлектрике с проницаемостью  $\varepsilon$  рассчитывается:

потенциал шара на поверхности и в любой точке объема

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$$



$$C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot r$$

Понятие емкости применяется и к системе проводников, простейшей из которых является система из двух близкорасположенных проводников, которым сообщаются равные противоположные по знаку заряды  $+q$  и  $-q$ .

Емкостью плоского конденсатора (состоящего из двух близкорасположенных металлических пластинок-обкладок) называют отношение заряда  $q$  на одной обкладке к разности потенциалов между обкладками.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

Пусть  $d$  – расстояние между обкладками мало, и поле однородно. Напряженность поля определяется выражением:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot S}$$

**Електроємністю системи** из двух проводников называется физическая величина, определяемая как отношение заряда  $q$  одного из проводников к разности потенциалов  $\Delta\varphi$  между ними:

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

В системе СИ единица емкости называется **фарад** (Ф):

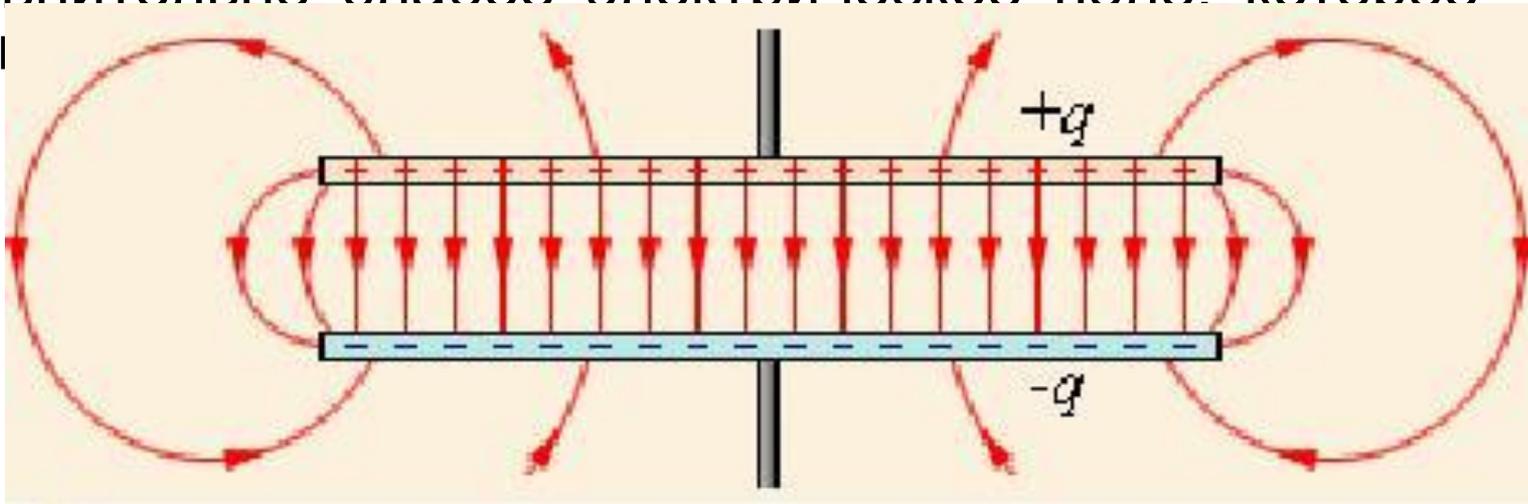
$$1\text{Ф} = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}$$

Величина емкости зависит от формы и размеров проводников и от свойств диэлектрика, разделяющего проводники.

Существуют такие конфигурации проводников, при которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства. Такие системы называются *конденсаторами*, а проводники, составляющие конденсатор, называются *обкладками*.

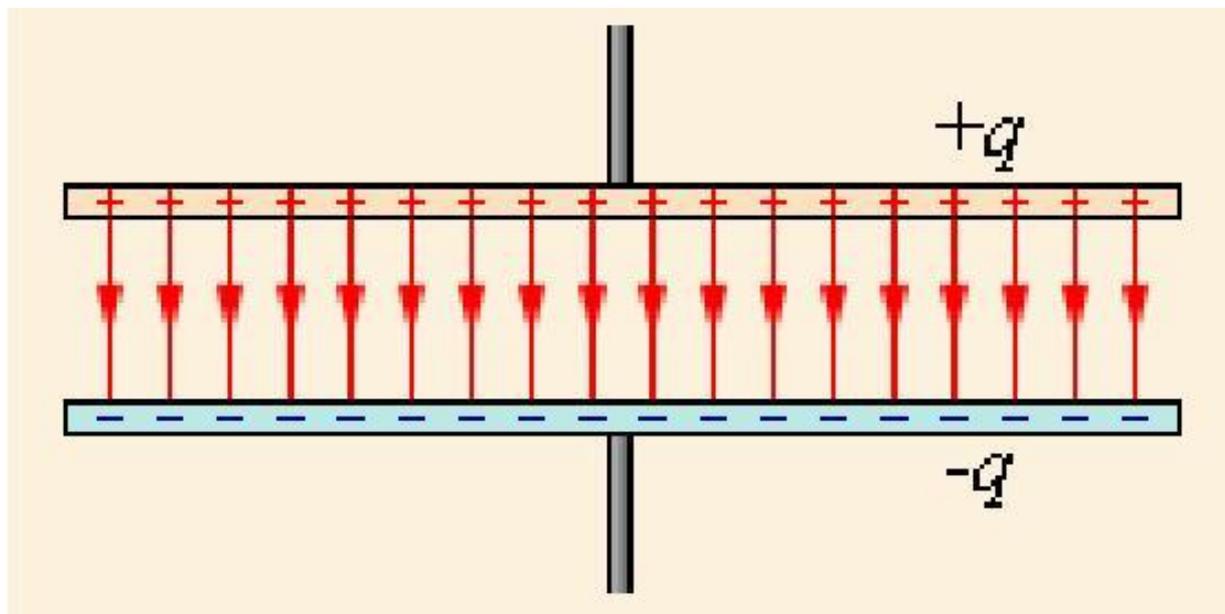
# Плоский конденсатор

Простейший конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется **ПЛОСКИМ**. Электрическое поле плоского конденсатора в основном локализовано между пластинами; однако, вблизи краев пластин и в окружающем пространстве также возникает сравнительно слабое электрическое поле, которое наз



Поле плоского конденсатора.

В целом ряде задач можно приближенно пренебрегать полем рассеяния и полагать, что электрическое поле плоского конденсатора целиком сосредоточено между его обкладками. Но в других задачах пренебрежение полем рассеяния может привести к грубым ошибкам, так как при этом нарушается потенциальный характер электрического поля



Идеализированное представление поля плоского конденсатора. Такое поле не обладает свойством потенциальности.

Каждая из заряженных пластин  
плоского конденсатора создает вблизи  
поверхности электрическое поле,  
модуль напряженности которого  
выражается соотношением

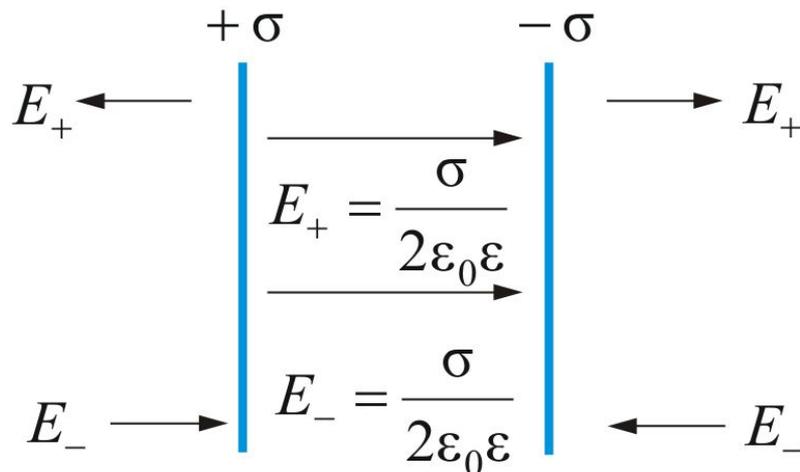
$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

Согласно принципу суперпозиции, напряженность  $\overset{\nabla}{E}$  поля, создаваемого обеими пластинами, равна сумме напряженностей  $\overset{\nabla}{E}^+$  и  $\overset{\nabla}{E}^-$  полей каждой из пластин:

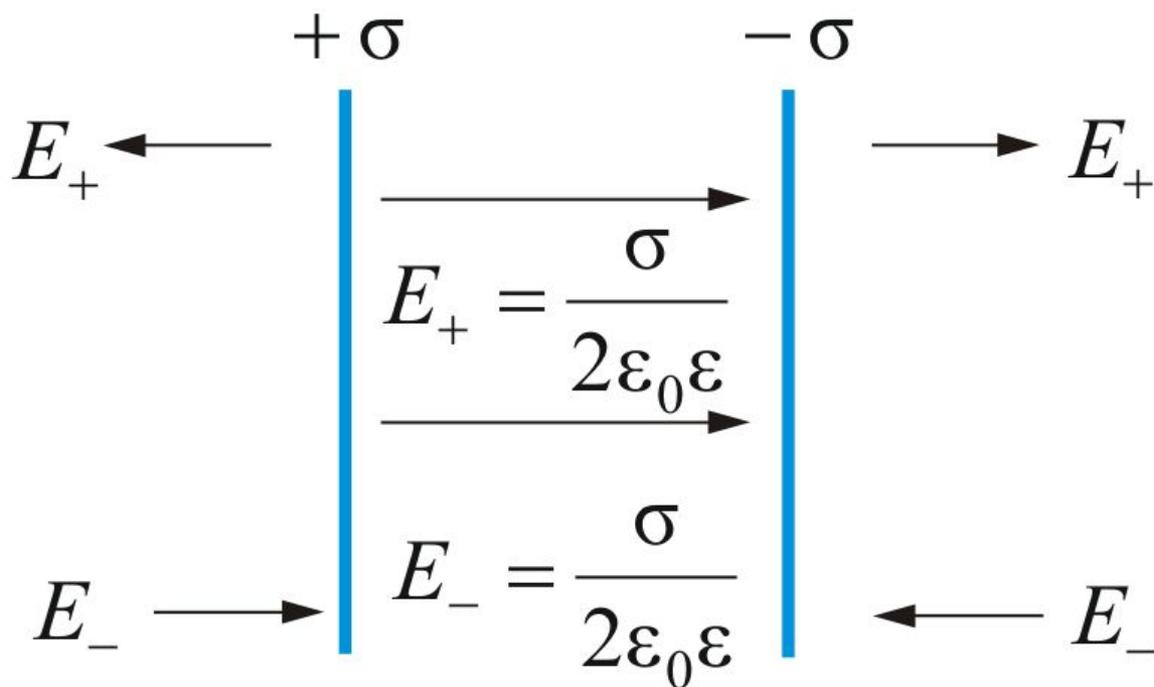
$$\overset{\nabla}{E} = \overset{\nabla}{E}^+ + \overset{\nabla}{E}^-$$

Внутри конденсатора вектора  $\vec{E}^-$  и  $\vec{E}^+$  параллельны; поэтому модуль напряженности суммарного поля равен

$$E = 2E_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$



Вне пластин вектора  $\vec{E}^-$  и  $\vec{E}^+$  направлены в разные стороны, и поэтому  $\vec{E} = 0$



Поверхностная плотность  $\sigma$  заряда пластин равна  
где  $q$  – заряд, а  $S$  – площадь каждой пластины.

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

Разность потенциалов  $\Delta\varphi$  между пластинами в  
однородном электрическом поле равна,  
где  $d$  – расстояние между пластинами.

$$\Delta\varphi = E \cdot d$$

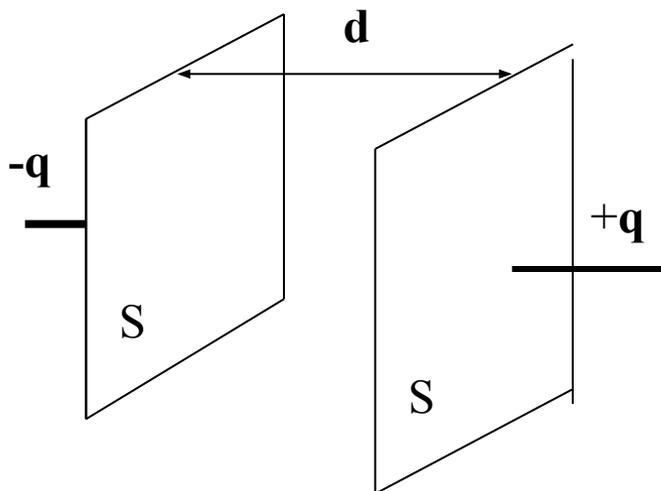
Из этих соотношений можно получить формулу для  
емкости плоского конденсатора,  
где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

Таким образом, емкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластин (обкладок) и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Если пространство между обкладками заполнено диэлектриком, емкость конденсатора увеличивается в  $\epsilon$  раз:

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

Большой емкостью обладают системы из двух проводников, называемые *конденсаторами*



Плоский  
конденсатор

**Конденсатор** представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика. Проводники в этом случае называются *обкладками конденсатора*.

1. Электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора.
2. У сферического конденсатора, состоящего из двух concentric сфер, все поле сосредоточено между ними.
3. Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

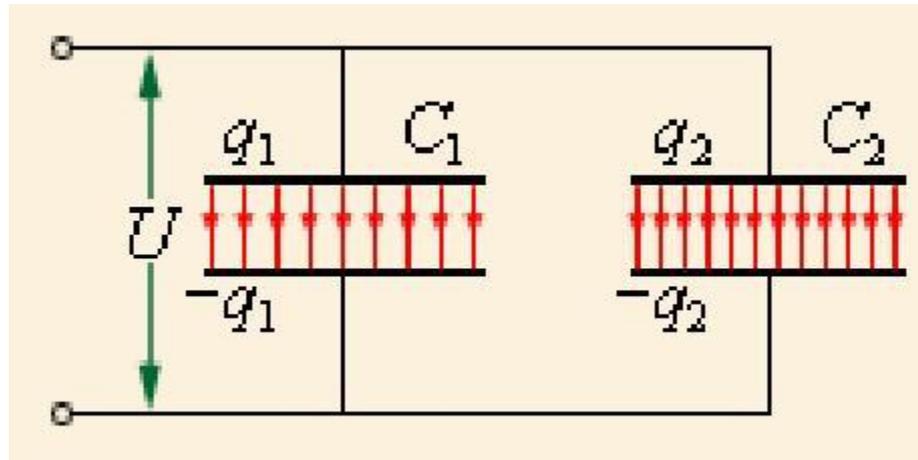
$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d$$
 –емкость плоского конденсатора

Примерами конденсаторов с другой конфигурацией обкладок могут служить сферический и цилиндрический конденсаторы. *Сферический конденсатор* – это система из двух концентрических проводящих сфер радиусов  $R_1$  и  $R_2$ . *Цилиндрический конденсатор* – система из двух соосных проводящих цилиндров радиусов  $R_1$  и  $R_2$  и длины  $L$ . Емкости этих конденсаторов, заполненных диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , выражаются формулами:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon \frac{L}{\ln R_2 / R_1} \quad (\text{цилиндрический конденсатор}).$$

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (\text{сферический конденсатор}).$$

# Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов.



1. При **параллельном соединении** конденсаторов
  - напряжения на конденсаторах одинаковы:  $U_1 = U_2 = U$ ,
  - заряды равны соответственно  $q_1 = C_1 U$  и  $q_2 = C_2 U$ .
- Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор емкости  $C$ , заряженный зарядом  $q = q_1 + q_2$  при напряжении между обкладками равном  $U$ .

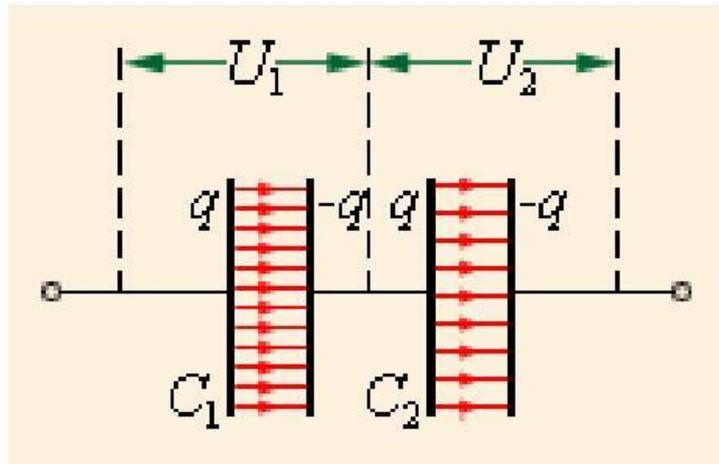
Отсюда следует

$$C = \frac{q_1 + q_2}{U} = \frac{q_1}{U} + \frac{q_2}{U}$$

Отношение

$$\frac{q_1}{U} = C_1 \quad \frac{q_2}{U} = C_2$$

$$C = C_1 + C_2$$



**2. При последовательном** соединении одинаковыми оказываются заряды обоих конденсаторов:  $q_1 = q_2 = q$ , а напряжения на них равны соответственно  $U_1 = \frac{q}{C_1}$  и  $U_2 = \frac{q}{C_2}$

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом  $q$  при напряжении между обкладками

$$U = U_1 + U_2.$$

Пластинки соседних конденсаторов, соединенные проводником, имеют одинаковый потенциал.

Следовательно,  $U = U_1 + U_2$ .

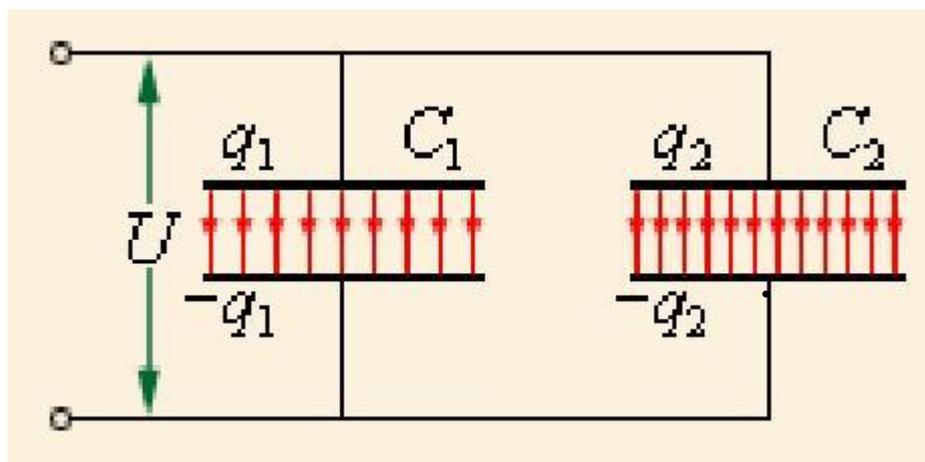
Поскольку

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

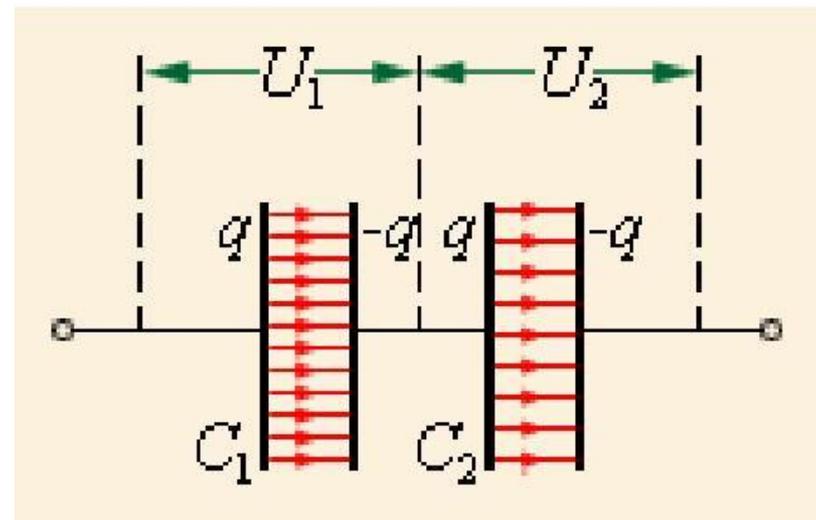
$$U = \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1 + C_2} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$$

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

Формулы для параллельного и последовательного соединения остаются справедливыми при любом числе конденсаторов, соединенных в батарею.



**Параллельное** соединение конденсаторов.  $C = C_1 + C_2$ .



**Последовательное** соединение конденсаторов.

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

В случае соединения  $n$  одинаковых конденсаторов

$$C = n \cdot C$$

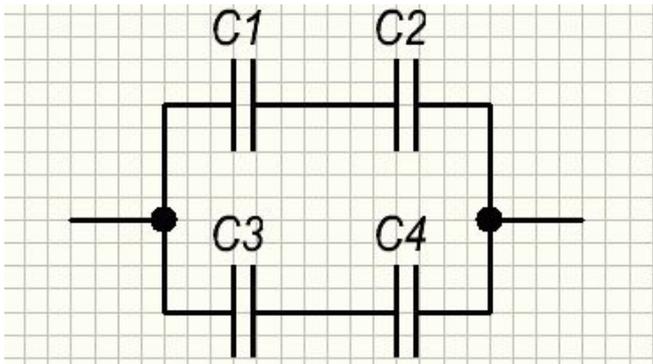
$$C = \frac{C}{n}$$

# Смешанное соединение конденсаторов

Смешанным соединением конденсаторов называется такое соединение их, при котором имеется и параллельное и последовательное соединение

При смешанном соединении конденсаторов для участков с параллельным соединением применяются формулы параллельного соединения конденсаторов, а для участков с последовательным соединением - формулы последовательного соединения конденсаторов.

Всякое смешанное соединение конденсаторов путем упрощений может быть сведено либо к параллельному соединению, либо к последовательному.



Эквивалентная емкость  
верхней ветви

$$C_{1,2} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Эквивалентная емкость  
нижней ветви

$$C_{3,4} = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}$$

Теперь это смешанное соединение конденсаторов может быть приведено к параллельному соединению. Эквивалентная емкость всей батареи конденсаторов

$$C = C_{1,2} + C_{3,4} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}$$

# Энергия конденсатора

Для того, чтобы сообщить проводнику некоторый заряд  $q$ , необходимо затратить некоторую работу.

Пусть очередная порция  $dq$  заряда подводится из бесконечности, где  $\varphi_1 = 0$ , тогда элементарная работа равна :

$$dA = dq(\varphi_1 - \varphi_2) = -\varphi \cdot dq$$

Вся работа вычисляется по формуле:

$$A = -\int_0^q \varphi \cdot dq = -\int_0^q \frac{q}{C} \cdot dq = -\frac{q^2}{2C}$$

Знак «минус» показывает, что для зарядки тела необходимо совершить некоторую внешнюю работу.

При разрядке электрическое поле само совершает работу, равную  $A$ .

Тогда получаем формулу энергии заряженного конденсатора:

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

$W_p$  – энергия электрического поля заряженного конденсатора

$q$  – модуль заряда любого из проводников конденсатора

$U$  – разность потенциалов между проводниками

$C$  – емкость конденсатора



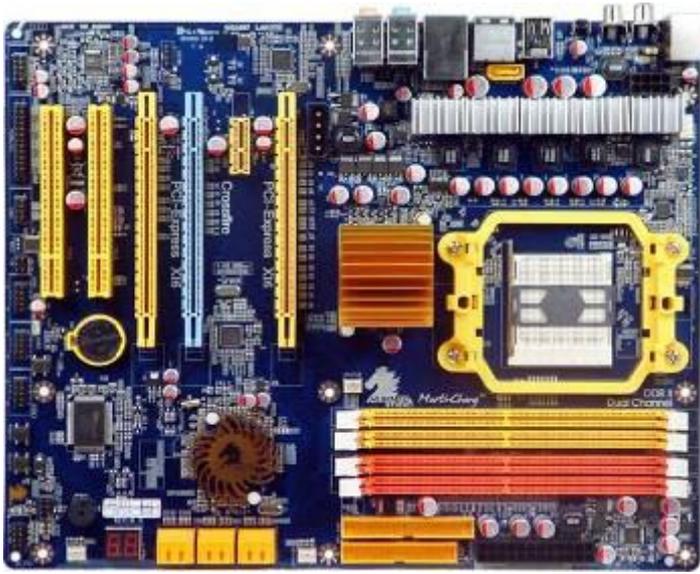
*Батарея конденсаторов*



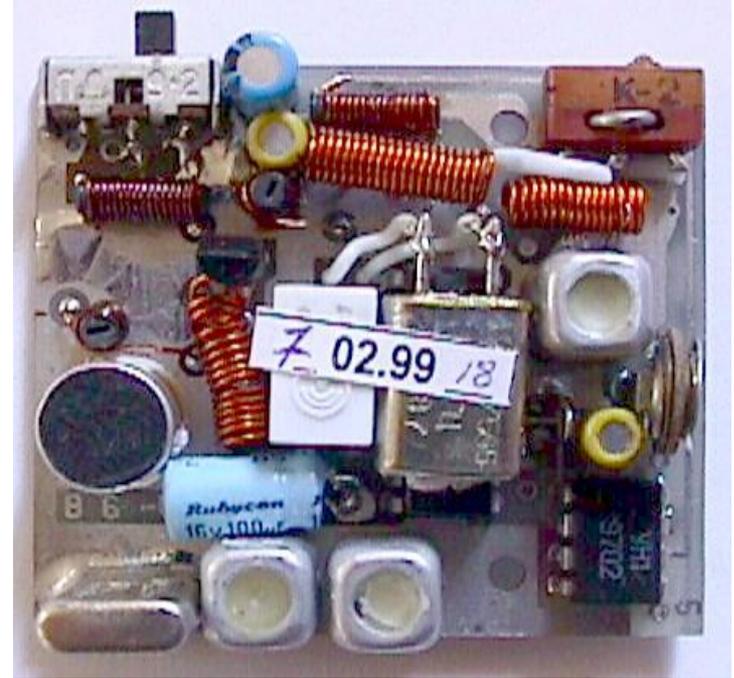
Светильники с разрядными лампами



Лампа фотовспышки



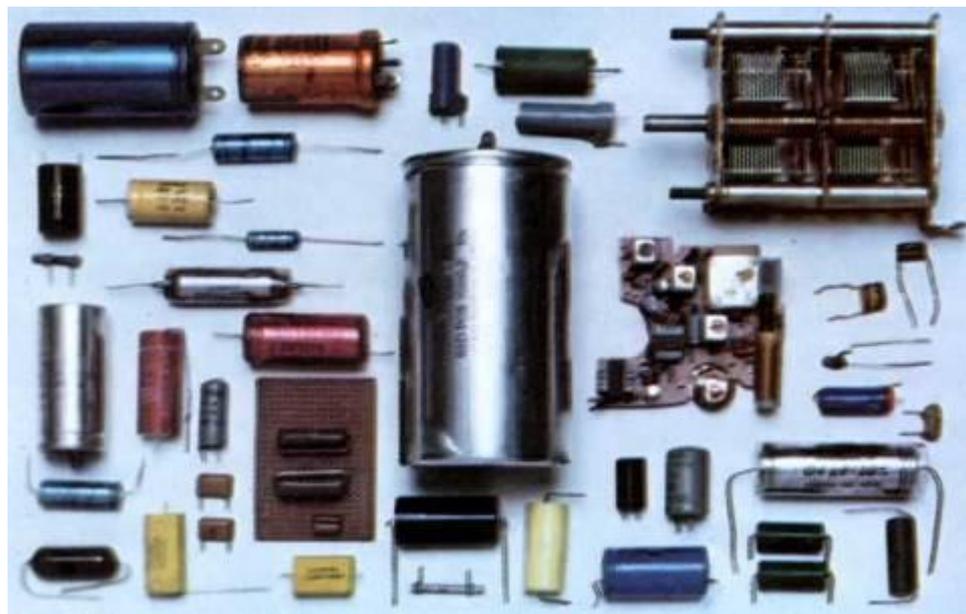
Полимерные конденсаторы с твёрдым электролитом на чипсете



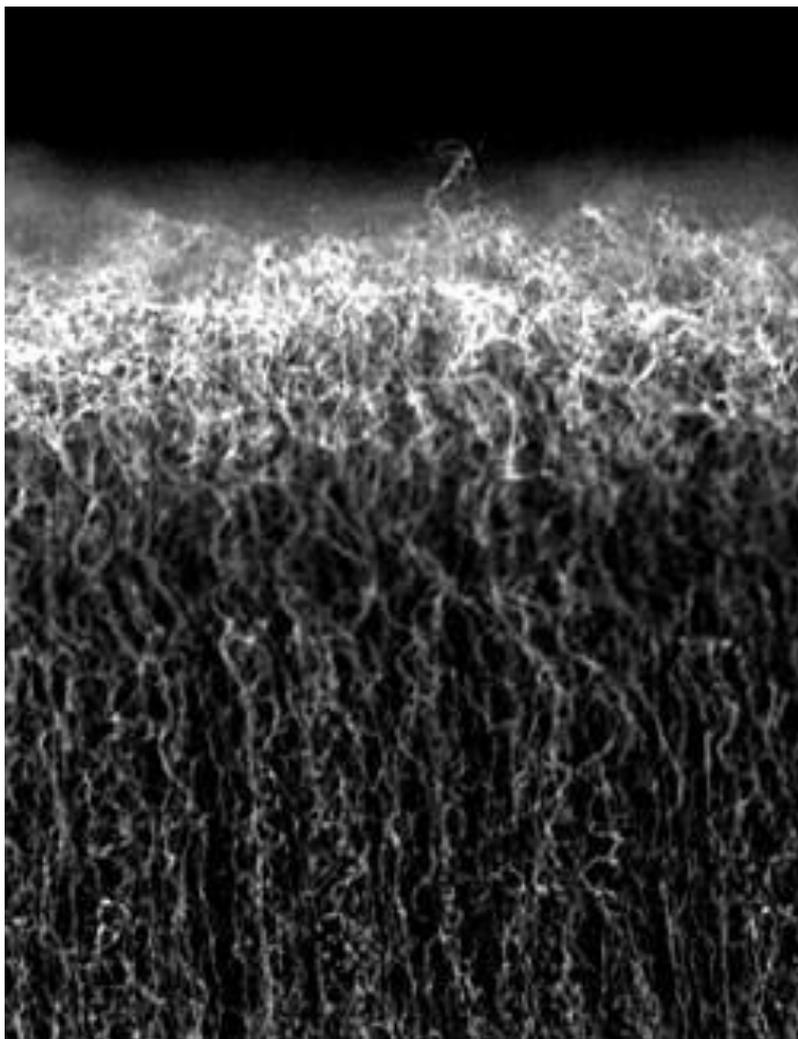
Плато радиостанции буровой



Схема радиоприёмника



# Электролитические конденсаторы



Исследователи из Массачусетского технологического института (МТИ) возлагают надежды на нитевидные углеродные частицы, называемые нанотрубками. Их сечение в 30000 раз меньше диаметра человеческого волоса, что позволяет разместить на поверхности огромное количество этих ворсинок. Тем самым площадь, доступная для расположения заряда, многократно возрастает. Удачная ассоциация есть на сайте [Sciencentral](#). Проводится параллель между махровым полотенцем, впитывающим влагу лучше, чем обычное, и «мохнатой» обкладкой конденсатора, задерживающей больший заряд, чем гладкая.