ЭП в веществе

До сих пор: ЭП только от зарядов в вакууме.

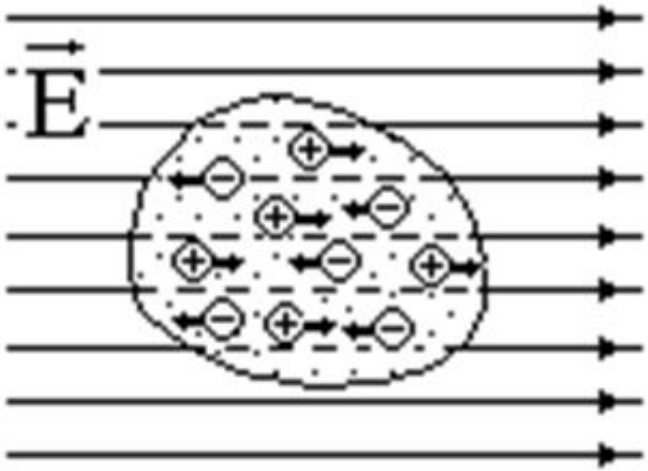
В присутствии вещества возможны 2 подхода:

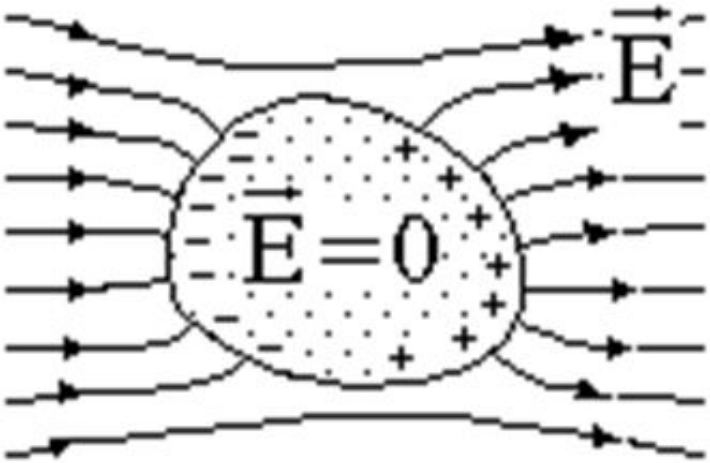
- учитывать все заряды ⇨ нужно знать положения всех ядер и электронов;
- влияние вещества описывается в общем, с помощью *феноменологических параметров*, напр., в сплошном диэлектрике: $E = q/(4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2)$ – в знаменателе безразмерный множитель ε, кот. показывает во сколько раз ЭП в диэлектрике слабее, чем в вакууме.

С т. з. поведения в ЭП поле вещества удобно разделять на проводники и диэлектрики.

Проводники во внешнем ЭП

Проводники ⇨ имеются свободные (подвижные) заряды, кот. могут перемещаться по объему проводника.



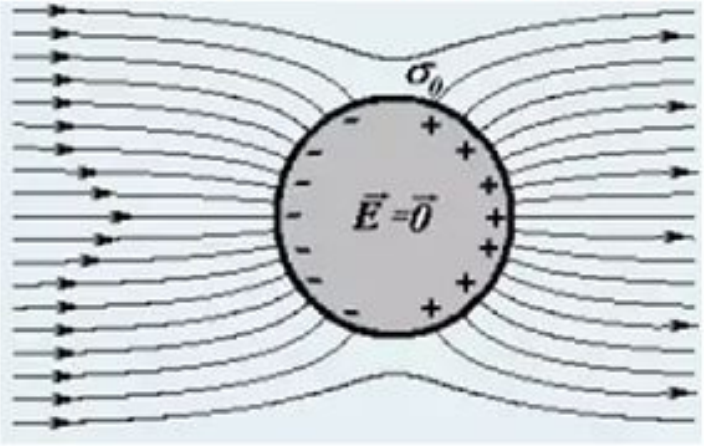


В ЭП, созданном внешними зарядами, свободные заряды начинают перемещаться так, чтобы скомпенсировать своим ЭП внешнее поле.

В результате:

Проводники во внешнем ЭП (2)

1. внутри проводника E = 0, иначе получается вечный двигатель первого рода;
2. плотность заряда ρ = 0 внутри проводника, т.к. $\rho = \varepsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} = \varepsilon_0 \operatorname{div} \mathbf{0} = 0$
3. индуцированные заряды находятся только на внешних поверхностях проводника;
4. т.к. E =0 внутри проводника, то весь проводник имеет один потенциал;
5. т.к. поверхность проводника эквипотенциальна, то $\vec{E}$ снаружи от проводника направлен по нормали к поверхности, а $E = \sigma/\varepsilon_0$



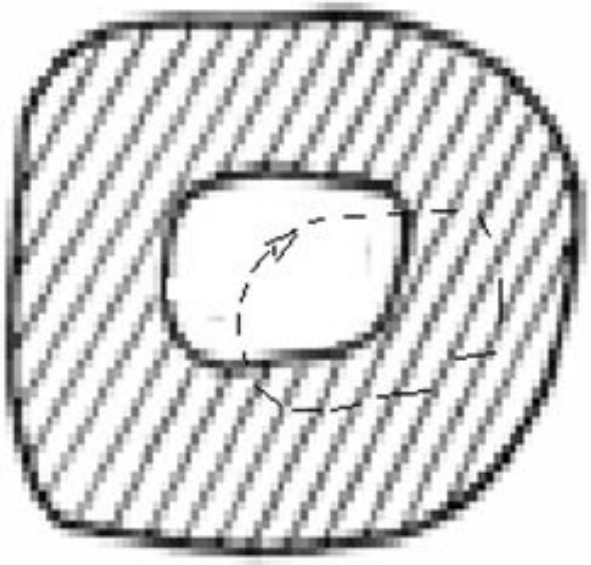
Проводники во внешнем ЭП (3)

6. E = 0 внутри полостей проводника

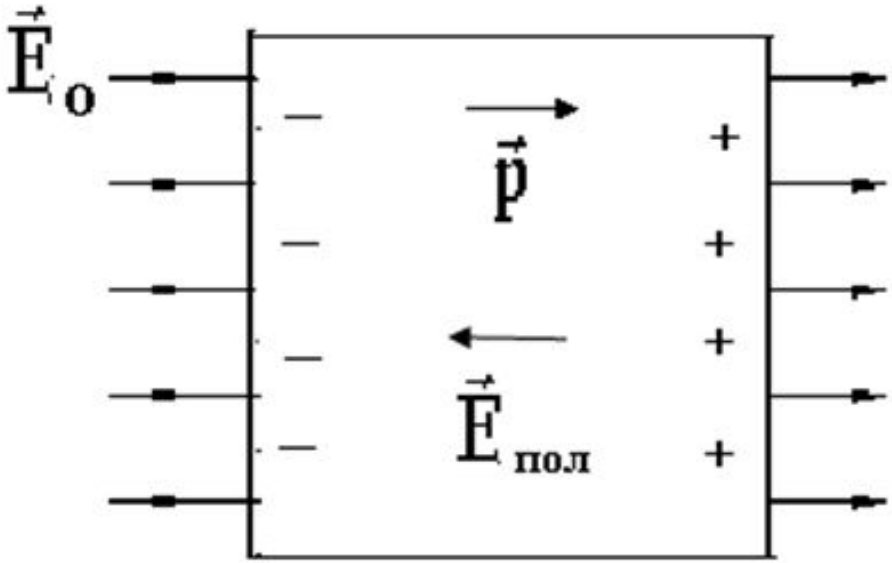
От противного: ЭП в полости ненулевое ⇨ можно выбрать одну из ЭСЛ и сделать ее частью контура для вычисления $Cir\vec{E}$ ⇨ замыкающая часть контура внутри тела проводника.

$\oint(\vec{E}, d\vec{l})$ = 0 = ∫(по полости) + ∫(по проводнику) = =∫(по полости)

∫(по полости) может быть = 0, только если $(\vec{E}, d\vec{l}) \equiv 0$, а т.к. $\cos\alpha \equiv 1$, то $E \equiv 0$



Диэлектрики во внешнем ЭП



Диэлектрики ⇨ свободных (= подвижных) зарядов нет, но есть *связанные* в атомах. Каждый объем нейтрален, но в нем «+» связанные заряды могут смещаться отн. «-».

Это явление наз. *поляризацией диэлектрика*.

ЭП внешних зарядов $\mathbf{E_0}$ ⇨ «-» заряды «выступают» на одной стороне объема диэлектрика, а «+» – на другой. Смещенные связанные заряды образуют *индуцированный дипольный момент* $\mathbf{p} \uparrow\uparrow \mathbf{E_0}$.

Вектор поляризации и ЭП поляризационных зарядов

Индуцированный момент $\vec{p}$ ~ объему, это характеристика <u>куска</u> диэлектрика.

$\vec{P} = \vec{p}/\Delta V$ – наз. *вектором поляризации*, он равен ДМ единицы объема, это характеристика <u>состояния</u> вещества.

$$p = \sigma_{пол} S\, l = \sigma_{пол}\, \Delta V \Rightarrow P = \sigma_{пол} \Rightarrow [P] = [\sigma] = Кл/м^2$$

$\sigma_{пол}$ – плотность поляризационных (связанных) зарядов на границах образца.

Эти заряды создают свое поле поляризационных зарядов $E_{пол}$, направленное против внешнего поля.

$$E_{пол} = \sigma_{пол}/\varepsilon_0 = P/\varepsilon_0$$

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_{пол} \Rightarrow E = E_0 - E_{пол} = E_0 - P / \varepsilon_0 \Rightarrow E < E_0$$

Вектор электростатической индукции (электрического смещения)

$$div\vec{E} = div\overrightarrow{E_o} - \frac{div\vec{P}}{\varepsilon_o} \quad \Rightarrow \quad div\left(\vec{E} + \frac{\vec{P}}{\varepsilon_o}\right) = div\overrightarrow{E_o} = \frac{\rho}{\varepsilon_o}$$

ρ – плотность свободных (несвязанных, внешних по отн. к в-ву диэлектрика) зарядов, они определяют поле $\overrightarrow{E_o}$.

$$div\left(\varepsilon_o\vec{E} + \vec{P}\right) = \rho$$

Векторная величина $\varepsilon_o\vec{E} + \vec{P}$ наз. вектором *электростатической индукции*, или вектором *электрического смещения*.

[D] = Кл / м^2

$$div\vec{D} = \rho$$

Теорема Гаусса для вектора смещения

$$div\vec{D} = \rho$$

Это - *теорема Гаусса для вектора смещения* в дифференциальной форме.
Она же в интегральной форме имеет вид:

$$\oiint (\vec{\boldsymbol{D}}, d\vec{\boldsymbol{S}}) = Q$$

где Q – величина <u>свободного</u> заряда внутри замкнутой поверхности S.

Векторы D и E

Сравнение $\vec{D}$ и $\vec{E}$ в диэлектрике:

$\vec{E}$	$\vec{D}$
$\vec{F} = q\vec{E}$ $div\vec{E} \neq \rho / \varepsilon_0$ происходит от любых зарядов В / м	$q\vec{D} \neq \vec{F}$ $div\,\vec{D} = \rho$ зависит только от свободных зарядов Кл / м^2

Связь между $\vec{D}$ и $\vec{E}$ упрощается, если $\vec{P} \sim \vec{E}$:

$$\vec{P} = \kappa\varepsilon_0\vec{E}$$

κ (каппа) – безразмерная величина, наз. *диэлектрической восприимчивостью*.

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \kappa\varepsilon_0\vec{E} = \varepsilon\,\varepsilon_0\vec{E}$$

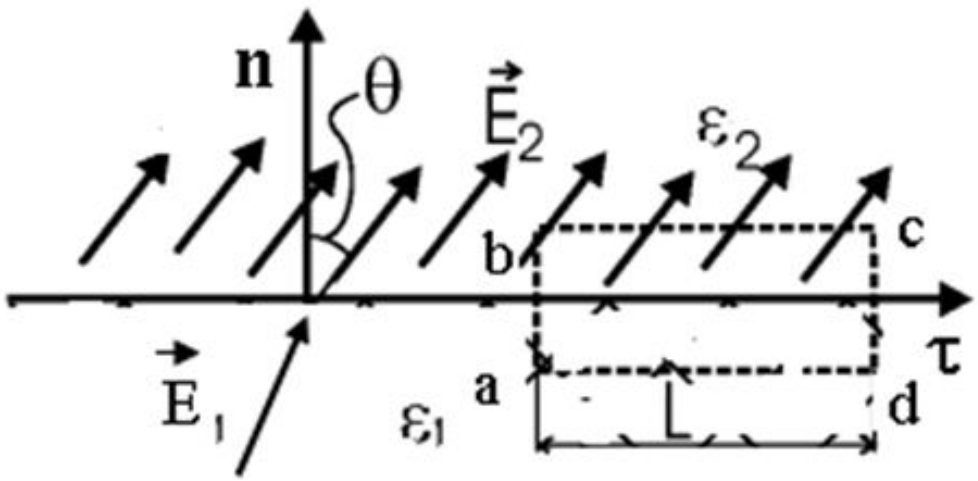
$\varepsilon = 1 + \kappa$ – *диэлектрическая проницаемость*.

$$\vec{D} = \varepsilon\,\varepsilon_0\vec{E}$$

Векторы D и E на границе раздела 2 сред

Векторы **D** и **E** ↓↑ при переходе из одной среды в другую: нормальные и тангенциальные компоненты по-разному.

Тангенциальная компонента вектора $\vec{E}$**:**



вычислим $Cir\,\vec{E}$ по прямоуг. контуру в плоскости, содержащей оба вектора $\vec{E_1}$ и $\vec{E_2}$, и охватывающему границу раздела.

По т. о циркуляции:

$$\oint (\vec{E}, d\vec{l}) = \int(\text{по ab}) + \int(\text{по bc}) + \int(\text{по cd}) + \int(\text{по da}) = 0$$

$$\int(\text{по bc}) = E_{\tau 2}\,L\,; \quad \int(\text{по da}) = -\,E_{\tau 1}\,L;$$

∫(по ab) и ∫(по cd) оба ~ высоте прямоугольника, которую устремим к 0.

Векторы D и E на границе раздела 2 сред (2)

$$\int(\text{по bc}) + \int(\text{по da}) = E_{\tau 2} L - E_{\tau 1} L = 0 \Rightarrow$$
$$E_{\tau 2} - E_{\tau 1} = 0 \Rightarrow E_{\tau 2} = E_{\tau 1}$$

- тангенциальная компонента вектора $\vec{E}$ сохраняется при переходе из одной среды в другую.

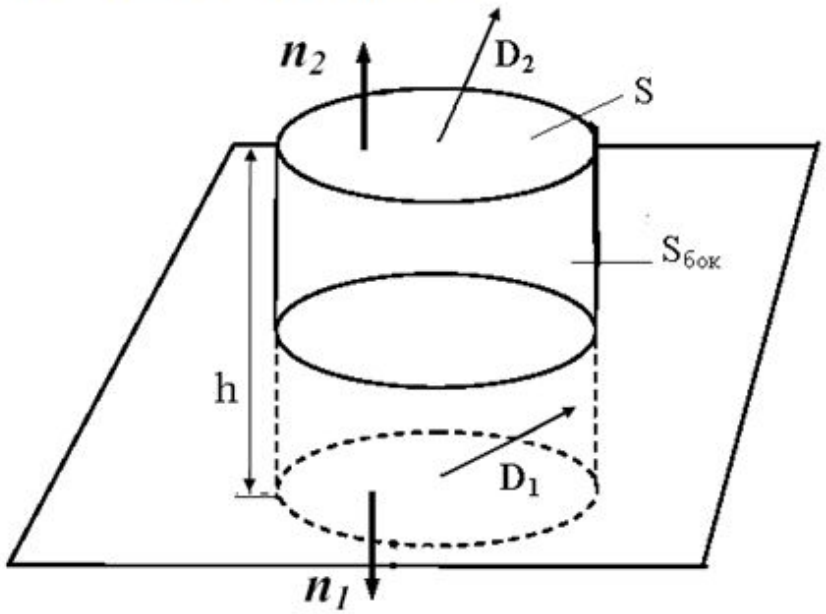
Для тангенциальных компонент вектора $\vec{D}$ действует соотношение:

$$D_{\tau 2} / \varepsilon_2 = D_{\tau 1} / \varepsilon_1$$

Векторы D и E на границе раздела 2 сред (3)

Нормальная компонента вектора $\vec{D}$:

вычислим поток $\vec{D}$ через пов-ть цилиндра, пересеченного границей раздела.



$$\oiint (\vec{D}, d\vec{S}) = Q$$

$D_{n2}\,S + \iint(\text{по } S_{бок}) - D_{n1}\,S = \rho Sh + \sigma S$

$h \to 0 \Rightarrow \iint(\text{по } S_{бок}) \to 0$ и $\rho Sh \to 0$.

$D_{n2}\,S - D_{n1}\,S = \sigma S$

$$D_{n2} - D_{n1} = \sigma$$

σ – плотность <u>свободных</u> зарядов на границе раздела.

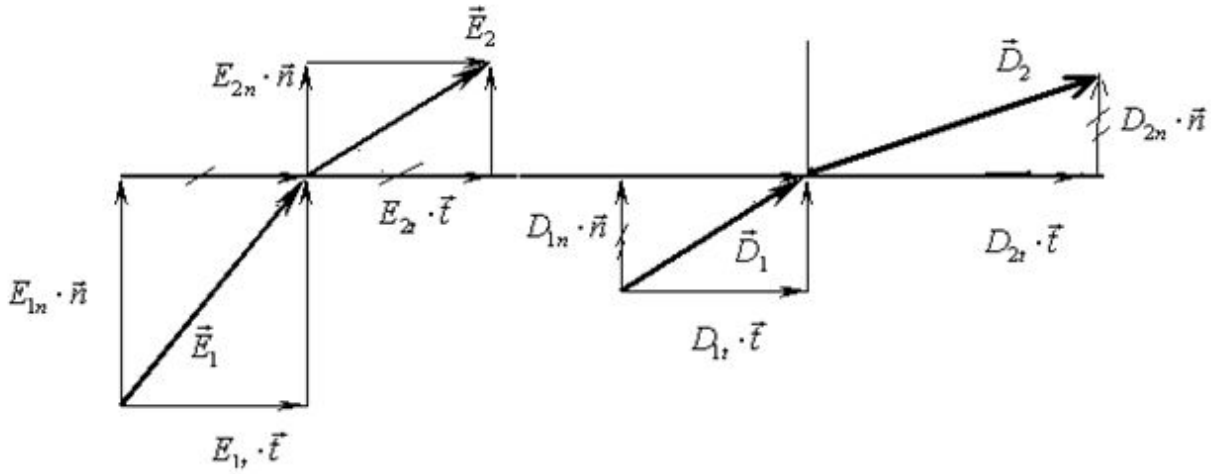
Если $\sigma = 0$, то: $D_{n2} = D_{n1}$

т.е. нормальная проекция вектора $\vec{D}$ сохраняется.

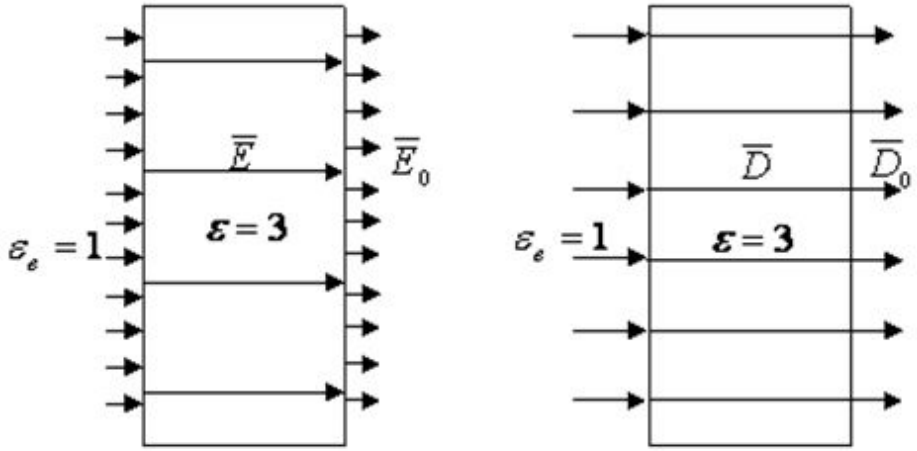
Для нормальной компоненты вектора $\vec{E}$ условия следующие:

$$\varepsilon_2 E_{n2} = \varepsilon_1 E_{n1}$$

Векторы D и E на границе раздела 2 сред (4)



Сохранение D_n и скачок E_n ⇨ линии вектора $\vec{D}$ непрерывны, а линии вектора $\vec{E}$ могут прерываться на границе раздела.

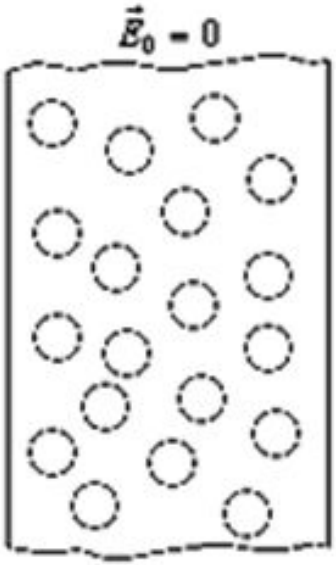


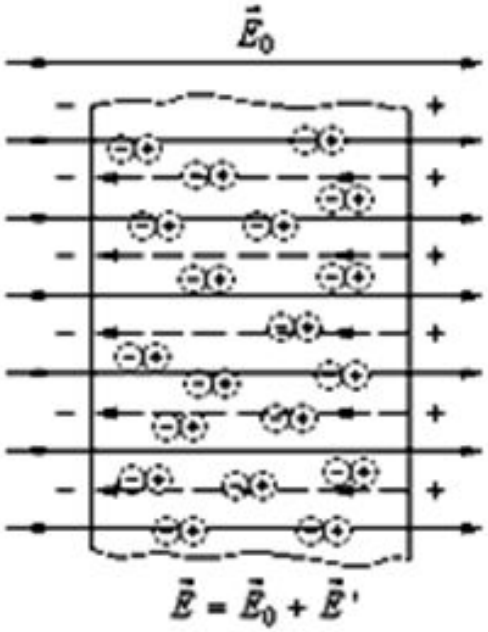
Механизмы поляризации

- *электронная* (упругая) поляризация — смещение эл. оболочек атомов во внешнем ЭП, время поляризации до 10^{-15} с, не связана с потерями энергии;
- *ионная* — смещение ионов в узлах крист. решетки во внешнем ЭП, время протекания 10^{-13} с, без потерь.
- *дипольная (ориентационная)* — ориентация собственных диполей во внешнем ЭП, потери на преодоление сил связи и внутреннего трения;
- *самопроизвольная (спонтанная)* — возникает в некот. кристаллах (*сегнетоэлектриках*) благодаря силам химической связи, характеризуется нелинейностью свойств и высокими значениями ε.

Неполярные диэлектрики

Неполярные диэлектрики - электронная и ионная поляризация, м.б. в крист-ком, жидком и газообразном сост.





Значения ε от 1 до неск. единиц.

При E = 0 значение p = 0 для каждого атома или молекулы.

E ≠ 0 ⇨ смещение эл-ных оболочек или ионов ⇨ индуцированный ДМ.

Неполярные диэлектрики (2)

Индуцированный ДМ атома:

$$\mathbf{p} = \alpha\, \mathbf{E} \text{ (направлен по полю).}$$

α - поляризуемость атома.

Вектор поляризации: $\mathbf{P} = n\mathbf{p} = n\,\alpha\,\mathbf{E}$

Диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость:

$$\kappa = n\alpha/\varepsilon_0 \text{ и } \varepsilon = 1 + n\alpha/\varepsilon_0$$

Значения $\kappa \lesssim 1 \Rightarrow \alpha \lesssim \varepsilon_0 / n = 10^{-11} / 10^{22} = 10^{-39}$ Ф·м^2

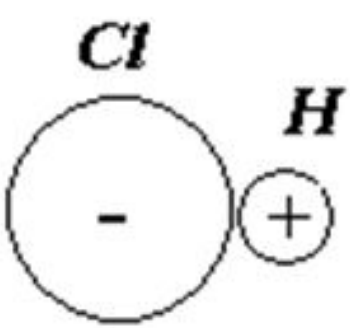
Признаки: 1)$\kappa \lesssim 1$;

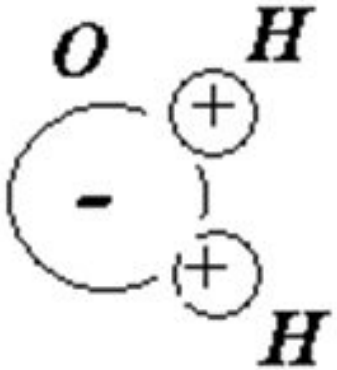
2) κ не зависит от температуры;

3) κ не зависит от частоты ЭП до 10^{15} (10^{11})Гц (в скобках для ионной поляризации).

Полярные диэлектрики

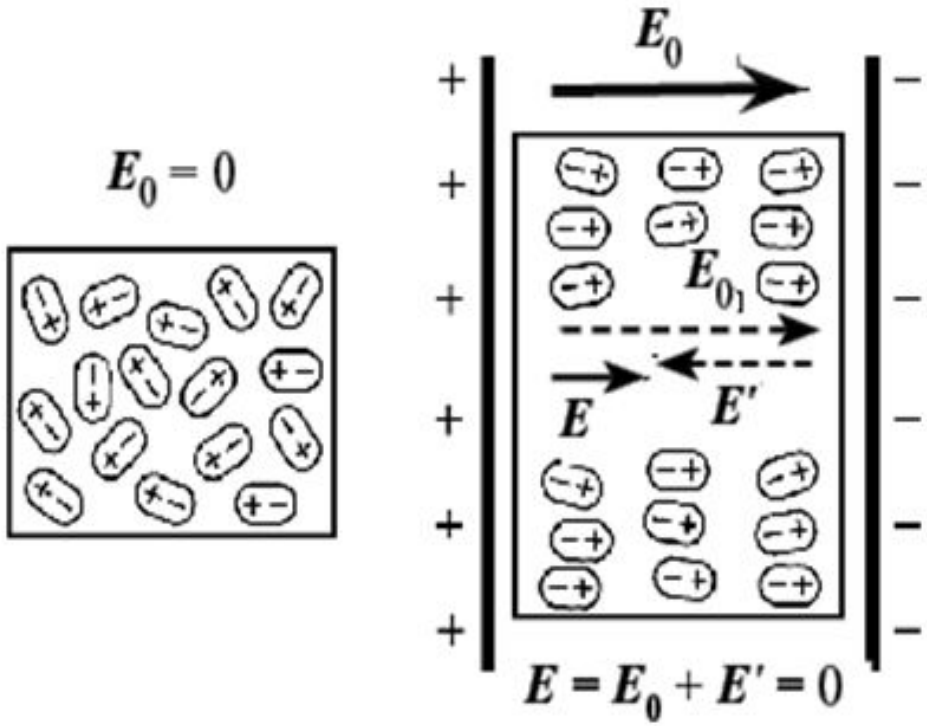
Полярные диэлектрики - дипольная (ориентационная) поляризация, м.б. кристаллическими, жидкими и газообразными. Значения ε до неск. десятков (в жидкостях и кристаллах при комн. температуре). Молекулы полярных диэлектриков имеют собственный (не наведенный) ДМ.





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

Полярные диэлектрики (2)



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

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

kT в знаменателе ⇦ тепловое движение нарушает ориентацию диполей вдоль ЭП.

Признаки:

1) $\kappa > 1$ ($\varepsilon = 81$ для воды при комнатной температуре);

2) ε зависит от частоты - ↓ с ↑ f, т.к. молекулы не успевают развернуться

3) зависит от температуры - ↓ с ↑ t^o

Полярные диэлектрики (3)