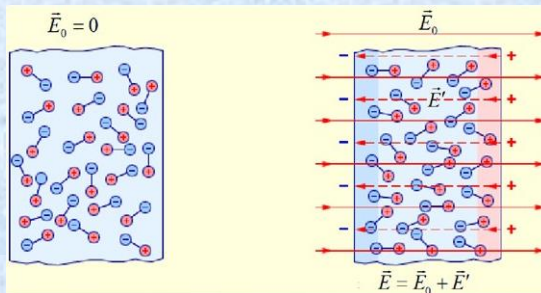
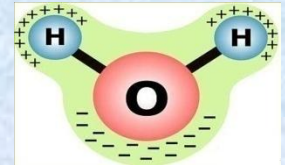


# Поляризация диэлектриков

Поляризация: смещение в противоположные стороны положительных и отрицательных зарядов под действием внешнего поля.

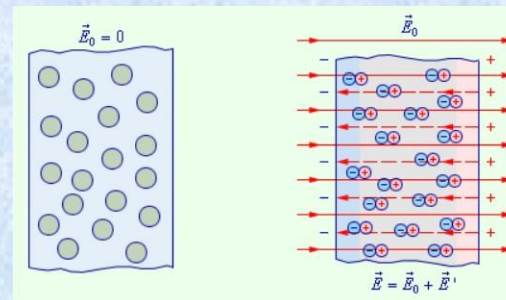
Полярные диэлектрики: центры тяжести положительных и отрицательных зарядов не совпадают.



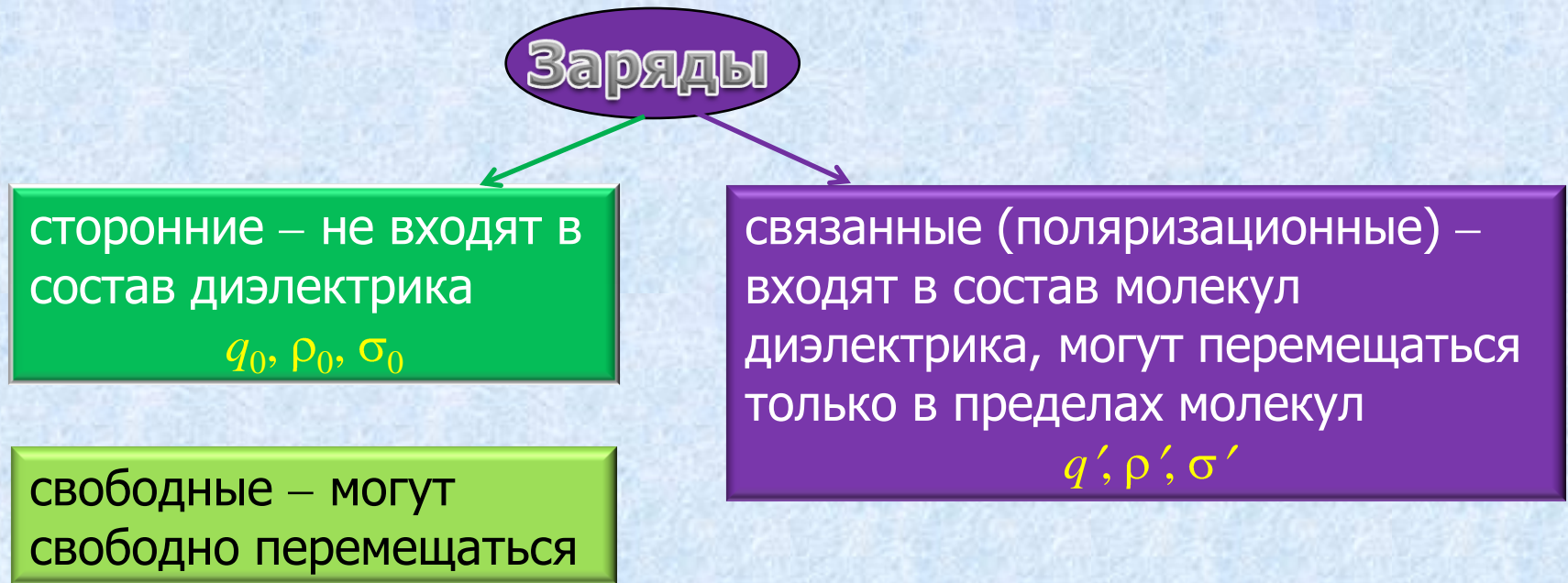
Ориентационная поляризация

Неполярные диэлектрики

Электронная поляризация



# Поле в диэлектриках



Если поле однородное и диэлектрик однородный, связанные заряды появляются только на поверхности

Поле в диэлектрике является суперпозицией полей свободных и связанных зарядов

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

# Поляризация диэлектрика

Под действием электрического поля молекула приобретает дипольный момент

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \beta \vec{E} \quad \beta - \text{поляризуемость молекулы}$$

Вопрос: Какова размерность  $\beta$ ?

Поляризованность (вектор поляризации) диэлектрика

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_i$$

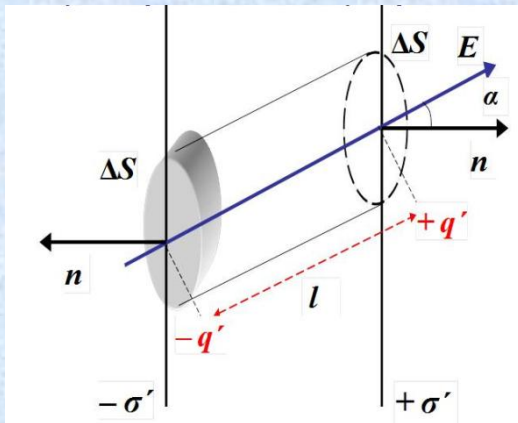
$$[P] = \text{Кл/м}^2$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad \varepsilon - \text{диэлектрическая восприимчивость} \quad \varepsilon \approx n^2$$

Вопрос: Какова размерность  $\varepsilon$ ?

Вопрос: Как зависит  $\varepsilon$  от температуры для полярных диэлектриков?

# Поляризация диэлектрика



$$\Delta V = \Delta S_{\perp} l = \Delta S l \cos \alpha$$

Дипольный момент

$$p_l = q' l = \sigma' \Delta S l$$

Поляризованность

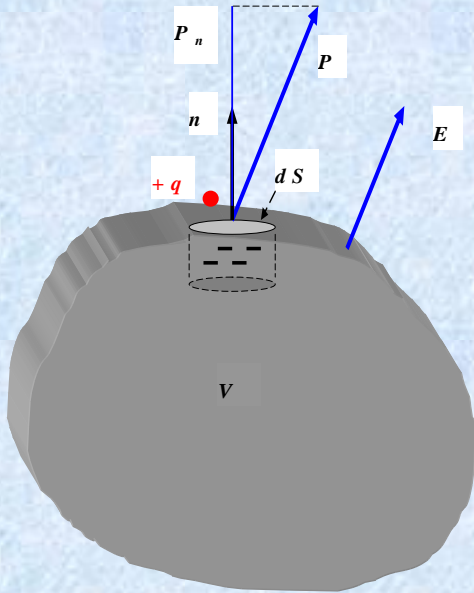
$$P = \frac{p_l}{\Delta V} = \frac{\sigma'}{\cos \alpha}$$

$$P \cos \alpha = P_n = \sigma'$$

Нормальная проекция вектора поляризации  $P_n$  численно равна плотности связанных зарядов



# Теорема Гаусса для вектора поляризации



Через площадку  $dS$  пройдет заряд

$$dq_{\text{ВЫШ}} = \sigma' dS = P_n dS = \vec{P} \cdot d\vec{S}$$

Через всю поверхность выйдет наружу заряд

$$q_{\text{ВЫШ}} = \oint_S dq_{\text{ВЫШ}} = \oint_S \vec{P} d\vec{S}$$

В объеме, ограниченном  $S$ , возникнет избыточный связанный заряд

$$\oint_S \vec{P} d\vec{S} = q_{\text{ВЫШ}} = -q'$$

В дифференциальной форме

$$\text{div} \vec{P} = -\rho'$$

Поляризованность зависит как от сторонних, так и от связанных зарядов, но источниками и стоками вектора  $P$  являются только связанные заряды

# Вектор электрической индукции

$$\varepsilon_0 \oint \vec{E} d\vec{S} = q + q' \quad \oint \vec{P} d\vec{S} = -q' \quad \oint (\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) d\vec{S} = q$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \text{Вектор электрической индукции}$$

Теорема Гаусса для вектора индукции

$$\oint \vec{D} d\vec{S} = q \quad \operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

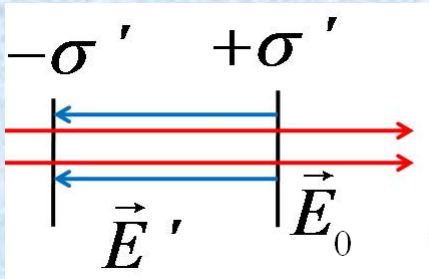
Источниками и стоками линий вектора  $D$  являются только свободные заряды

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \varkappa \vec{E} \quad \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 \varkappa \vec{E}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad \varepsilon = 1 + \varkappa \quad \text{— диэлектрическая проницаемость среды}$$

$$\varkappa > 0 \quad (\text{вектор } P \text{ сонаправлен вектору } E), \quad \varepsilon > 1$$

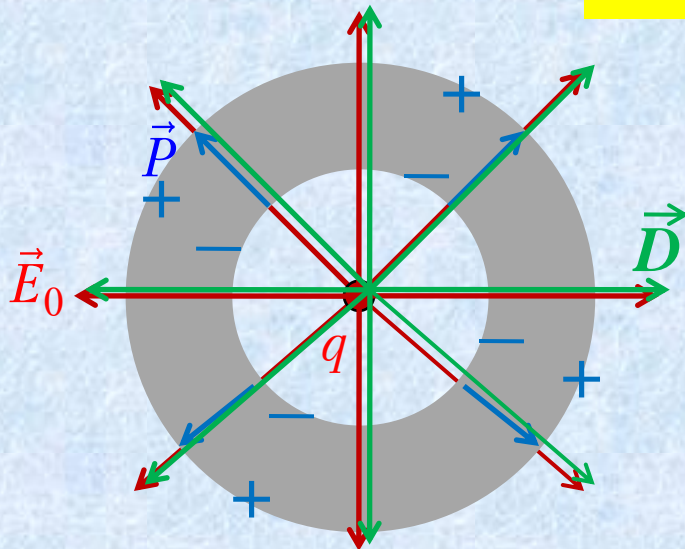
# Диэлектрическая проницаемость



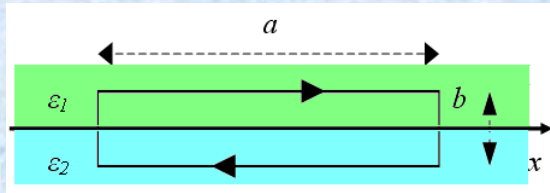
$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}' \quad E' = 2 \frac{\sigma'}{2\varepsilon_0} \quad \sigma' = P = \varepsilon_0 \alpha E$$

$$E = \frac{1}{1 + \alpha} E_0 = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость показывает во сколько раз поле в среде  $E$  меньше поля в вакууме  $E_0$



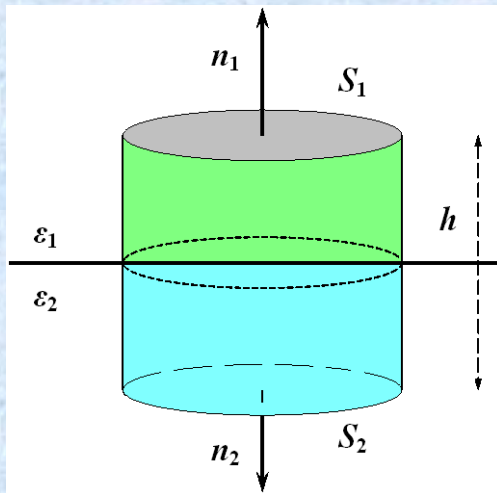
# Граничные условия



$$\oint \vec{E} d\vec{l} = E_{2\tau} - E_{1\tau} a + \langle E_n \rangle b = 0$$

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}$$

$$\frac{D_{1\tau}}{D_{2\tau}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$



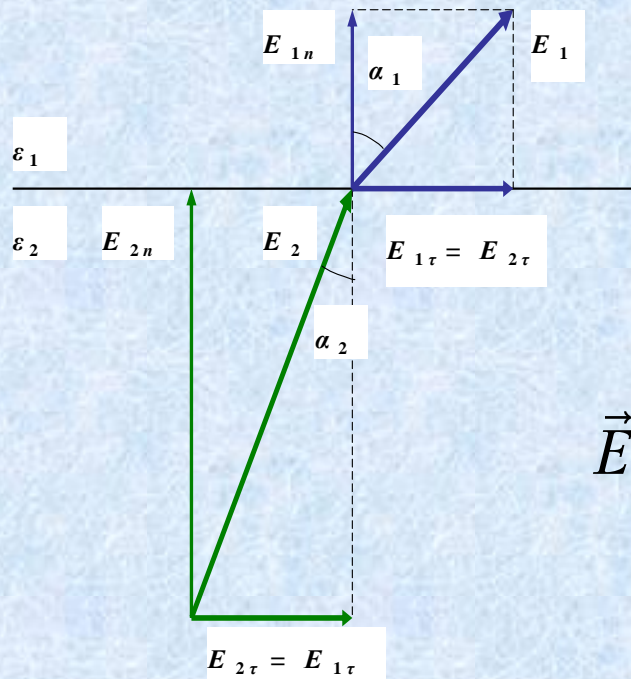
$$\Phi_D = D_{1n} S_1 - D_{2n} S_2 + \langle D_n \rangle S_{бок} = 0$$

$$D_{1n} = D_{2n}$$

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

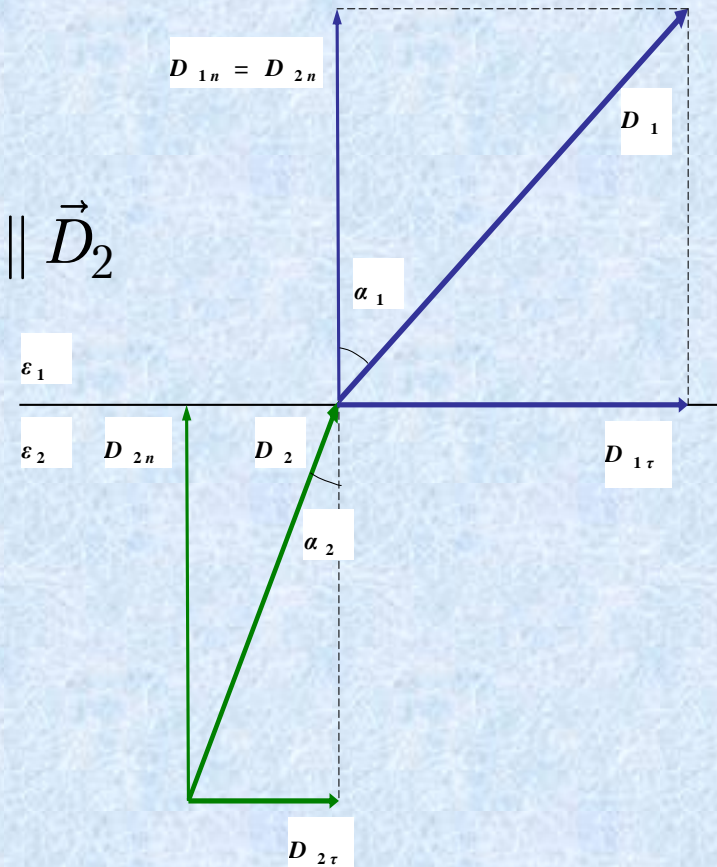


# Граничные условия



$$\vec{E}_2 \parallel \vec{D}_2$$

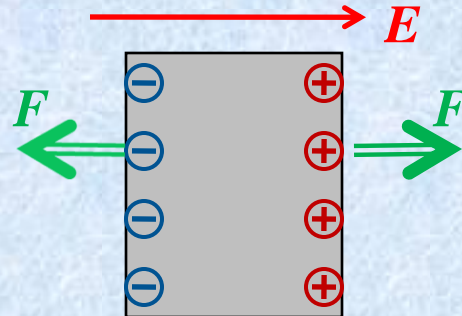
$$\vec{E}_1 \parallel \vec{D}_1$$



Вопрос: В какой среде диэлектрическая проницаемость больше?

# Электрострикция и пьезоэффект

Электрострикция: деформация диэлектрика под действием электрического поля



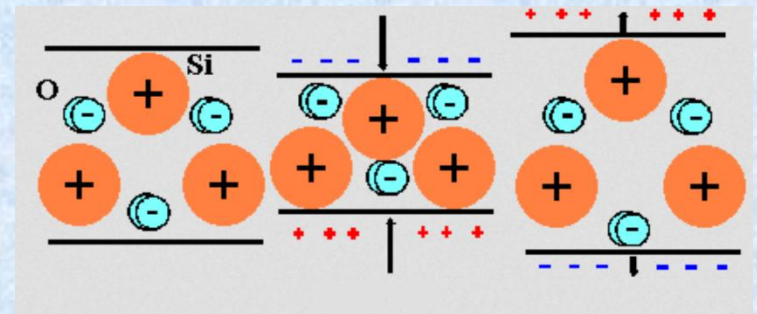
$$\Delta x \sim E^2$$

**Пьезоэффект** (Жак и Пьер Кюри, 1880 г.).

**Прямой:** деформация образца приводит к появлению электрического напряжения.

**Обратный:** приложение поля вызывает деформацию.

Кварц ( $\text{SiO}_2$ )

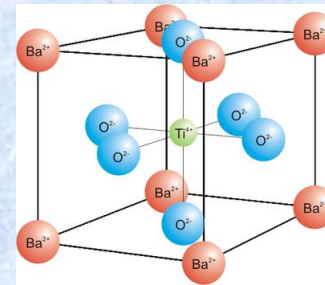
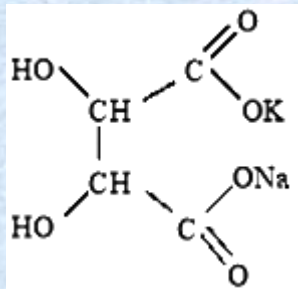


$$\Delta x \sim E$$

Вопрос: К диэлектрику приложено переменное напряжение с частотой  $f$ . С какой частотой будут генерироваться звуковые волны в случае а) электрострикции, б) пьезоэффекта?

# Сегнетоэлектрики

Сегнетова соль  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$  (1672 г.)      Титанат бария  $\text{BaTiO}_3$



1920 г.

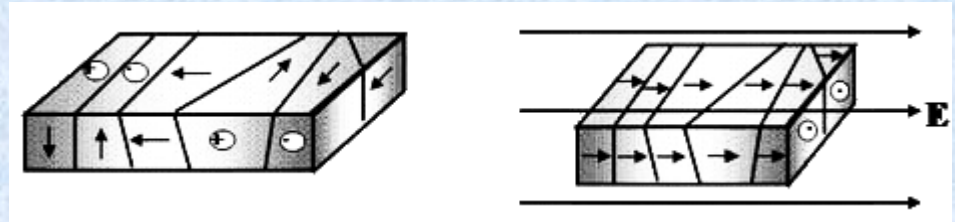
Диэлектрическая проницаемость в некотором интервале температур очень велика ( $\epsilon \sim 10^3 - 10^4$ )

Значение  $\epsilon$  зависит от напряженности внешнего поля и от предыстории образца

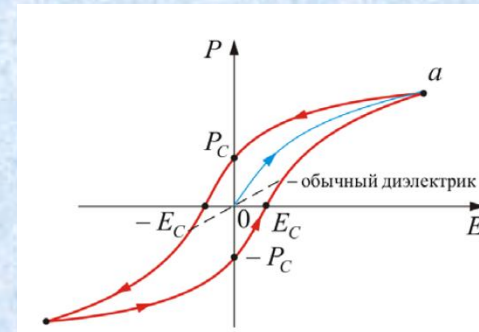
Анизотропия: сегнетоэлектрические свойства могут наблюдаться только вдоль одной из осей кристалла

# Сегнетоэлектрики

Доменная структура:  
кристалл разбит на  
области со спонтанной  
поляризацией



Гистерезис: поляризация зависит от  
предыстории, после снятия поля  
сохраняется остаточная поляризация



Точка Кюри: температура, выше которой  
пропадают сегнетоэлектрические  
свойства фазовый переход второго рода

