

***Диэлектрики в
электрическом
поле***

Лекция № 6

Содержание лекции:

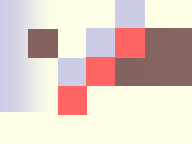
- *Диэлектрики в электрическом поле*
- *Поляризация диэлектриков*
- *Теорема Гаусса для вектора электрического смещения*
- *Условия на границе двух диэлектриков*



Диэлектрики в электрическом поле

Термин **«диэлектрик»** образован от греческого *diá* – через и английского *electric* – электрический и был введен в употребление М. Фарадеем для обозначения сред, через которые проникает электрическое поле.

Диэлектрики состоят из молекул. Заряды в диэлектрике не могут свободно перемещаться создавая ток. Тем не менее молекулы обладают электрическими свойствами.



Под действием электрического поля заряды в диэлектрике смещаются на расстояния порядка межатомных из положения равновесия – происходит **поляризация диэлектрика** – молекулы становятся электрическими диполями, ориентированными положительно заряженными концами по полю.

Возникшие заряды называются **индукционными**, или **связанными**.

Помимо них в диэлектрике могут быть **свободные (сторонние)** заряды - нескомпенсированные макроскопические заряды, появившиеся в результате, например электризации трением.

Характеристики диполя:

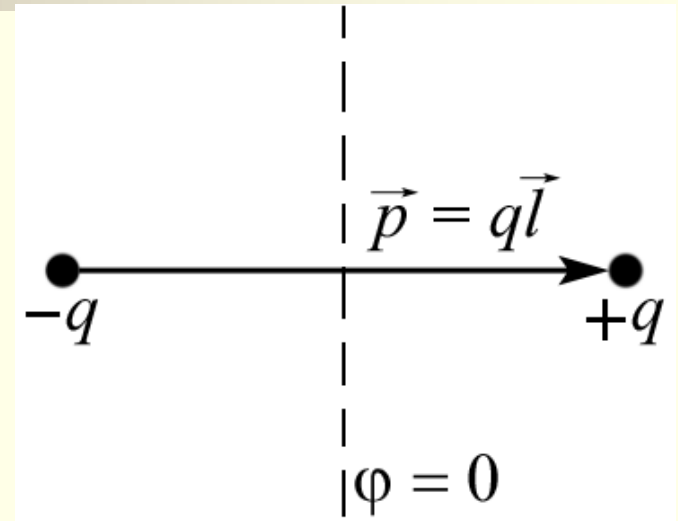
p – дипольный электрический момент

l – плечо диполя

Для системы зарядов:

$$\vec{p} = \sum_{e, я} q_i \vec{r}_i$$

\vec{r}_i – радиус-векторы зарядов



Дипольный момент определяет поведение молекулы во внешнем электрическом поле.

Неполярные молекулы (электронная поляризуемость):

в отсутствие электрического поля «центры тяжести» отрицательных и положительных зарядов молекул совпадают (нет собственного дипольного момента): $\text{H}_2, \text{O}_2 \dots$

Возникший в электрическом поле индуцированный дипольный момент пропорционален напряженности электрического поля:

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \beta \vec{E}$$

β - *поляризуемость* молекулы


Полярные молекулы (ориентационная поляризуемость):

в отсутствие электрического поля «центры тяжести» отрицательных и положительных зарядов молекул не совпадают (наличие собственного дипольного момента у молекул):

НСl, СО...

В отсутствие электрического поля диполи совершают хаотическое тепловое движение, их ориентация беспорядочна.

При внесении в поле происходит ориентация диполей по полю, сам дипольный момент не изменяется (**жесткий диполь**).

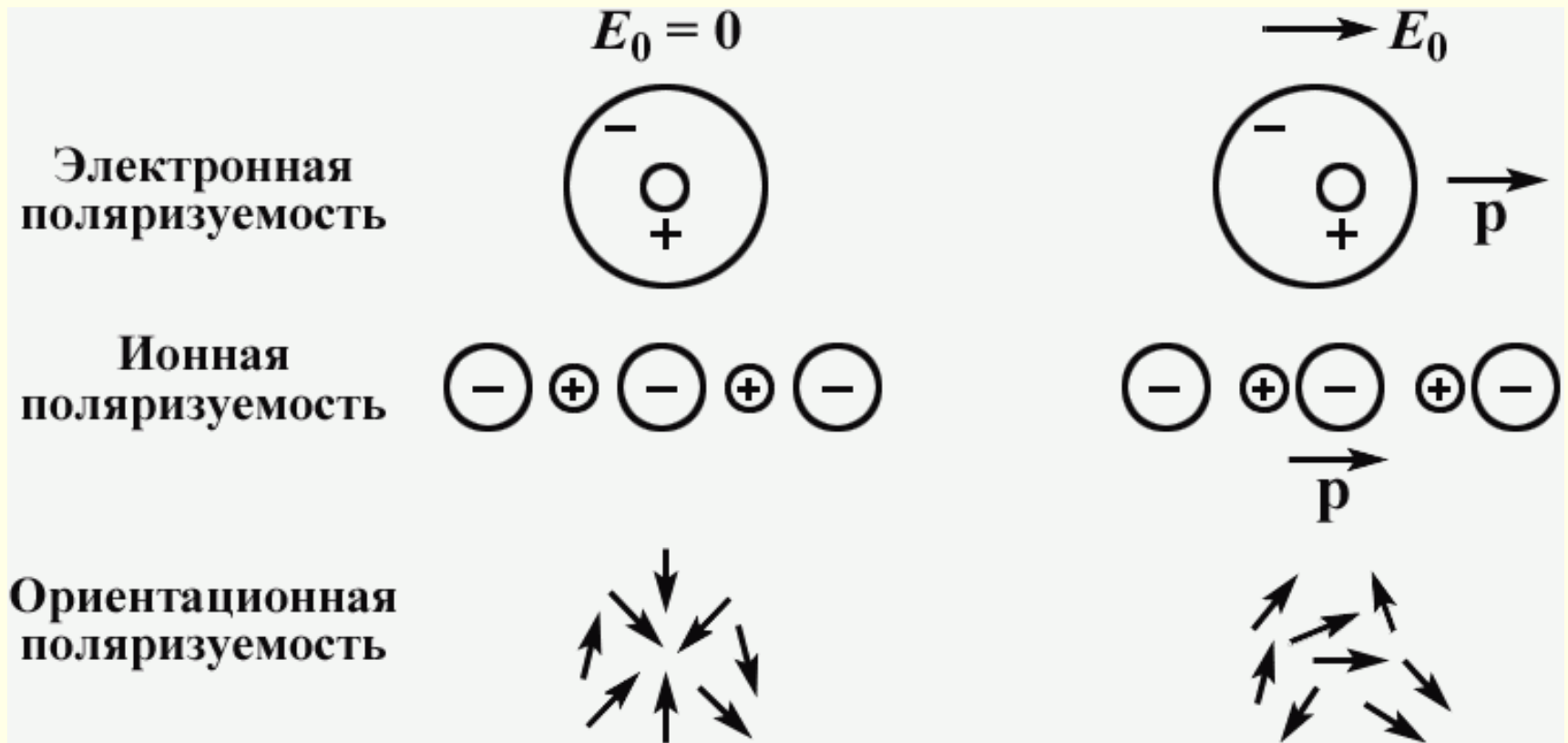


Ионные диэлектрические кристаллы (ионная поляризуемость):

2 решетки из ионов противоположных знаков.

При внесении в электрическое поле происходит сдвиг решеток. – **NaCl**.

Механизм поляризации



Схематическое изображение трех основных типов вкладов в поляризуемость. Слева – ситуация в отсутствие внешнего поля E_0 , справа – при включении поля E_0 ; \mathbf{p} – вектор дипольного момента

Поляризация диэлектриков

В отсутствие внешнего электрического поля суммарный дипольный момент диэлектрика **равен нулю**.

При внесении в поле происходит **поляризация диэлектрика** – дипольный момент становится отличным от нуля.

Степень поляризации характеризуется **дипольным моментом единицы объема диэлектрика**:

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

- **вектор поляризации**
(поляризованность).

Для **изотропных** диэлектриков:

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

κ – **диэлектрическая восприимчивость**

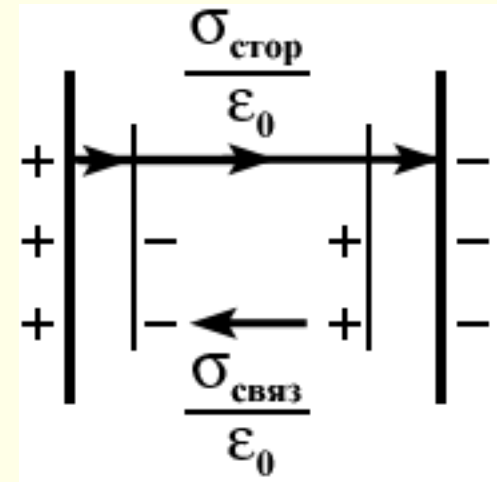
Если внести в однородное электрическое поле диэлектрик, то поле возникших связанных зарядов будет направлено противоположно внешнему полю и ослабляет его.

В результате внутри диэлектрика:

$$E = E_0 - E_{\text{связ}} = \frac{1}{\epsilon_0} (\sigma_{\text{стор}} - \sigma_{\text{связ}}) =$$

$$= \frac{1}{\epsilon_0} (\sigma_{\text{стор}} - \kappa \epsilon_0 E) = \frac{\sigma_{\text{стор}}}{\epsilon_0} - \kappa E$$

Тогда
$$E = \frac{\sigma_{\text{стор}}}{\epsilon_0 (1 + \kappa)} = \frac{E_0}{(1 + \kappa)} = \frac{E_0}{\epsilon}$$



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

ϵ показывает во сколько раз поле ослабляется в диэлектрике

Связанные (индукционные) заряды

- ВХОДЯТ в состав молекул диэлектрика
- не могут покинуть пределы молекулы, в состав которой они входят, под действием электрического поля.

Сторонние (свободные) заряды

заряды, находящиеся в пределах диэлектрика, но не входящие в состав его молекул;
расположенные за пределами диэлектрика.

Поверхностная плотность связанных зарядов:

$$\sigma_{\text{связ}} = P_n = \kappa \varepsilon_0 E_n$$

P_n – нормальная составляющая поляризованности;
 E_n – нормальная составляющая поля внутри диэлектрика.

$E_n > 0$ – на поверхности диэлектрика положительные заряды (линии напряженности выходят из диэлектрика).

$E_n < 0$ – на поверхности диэлектрика отрицательные заряды (линии напряженности входят в диэлектрик).

Объемная плотность связанных зарядов внутри диэлектрика:

$$\rho_{\text{связ}} = -\nabla \cdot \vec{P}$$

- **при неоднородной поляризации:** когда **не все** молекулы диэлектрика поляризованы и ориентированы одинаково.

В однородном диэлектрике $\rho_{\text{связ}} = 0$.

Введем вспомогательную величину, источником которой являются **только сторонние заряды**:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \text{- вектор электрического смещения (электрической индукции)}$$

Распишем P :

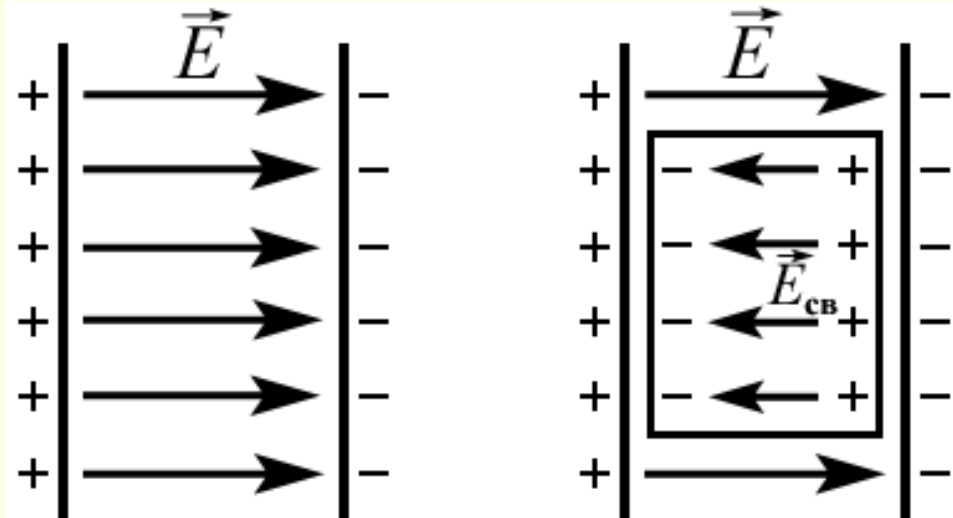
$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 \kappa \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \kappa) \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$$

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

$$\varepsilon = 1 + \kappa -$$

диэлектрическая проницаемость среды:

число, показывающее, во сколько раз напряженность поля в вакууме больше напряженности поля в однородном диэлектрике.



$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E = \varepsilon_0 E_0 = D_0$$

- электрическое смещение D внутри диэлектрика совпадает с электрическим смещением внешнего поля D_0 .

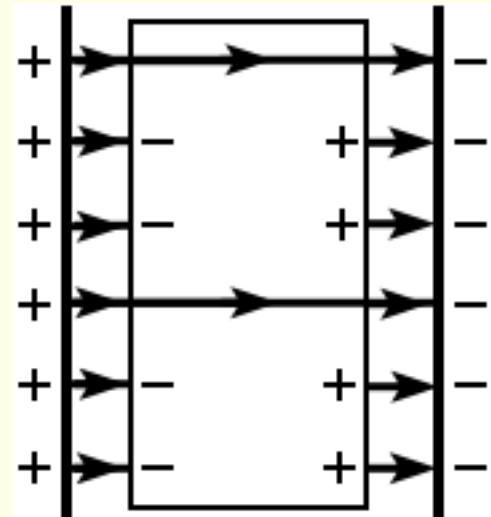
При $\varepsilon = 3$:

- Густота линий в диэлектрике в 3 раза меньше, чем вне пластины.
- Линии равноудалены, т.к. поле однородно.

Можно показать, что

$$\sigma_{\text{связ}} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \sigma_{\text{стор}}$$

Из трех линий \vec{E} , начинающихся (заканчивающихся) на сторонних зарядах, две должны начинаться (заканчиваться) на связанных зарядах.



Теорема Гаусса для вектора электрического смещения:

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho_{\text{стор}} dV = \sum q_{\text{стор}}$$

$$[\Phi_D] = \text{Кл.}$$

- поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен **алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности **сторонних** зарядов.**

В вакууме:

$$P_{\text{вак}} = 0 \quad \epsilon_{\text{вак}} = 1 \quad \kappa_{\text{вак}} = 0$$

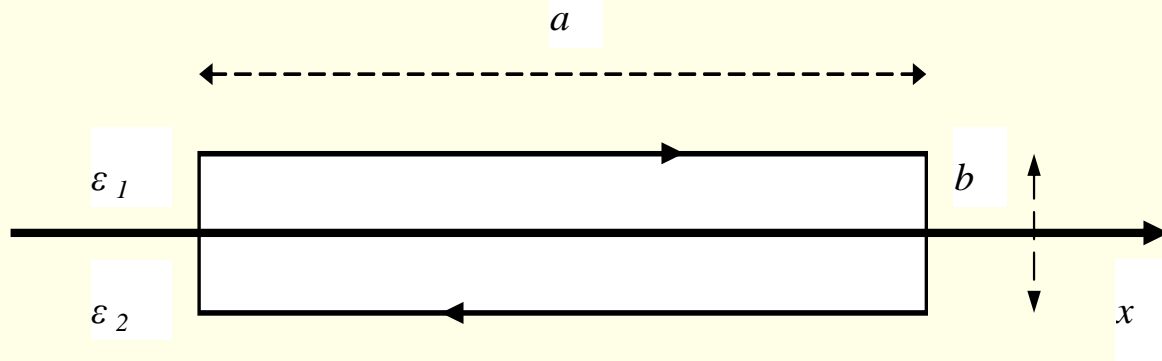
Линии вектора электрического смещения:

густота линий: число линий, пронизывающих единицу поверхности, равно численному значению вектора P .

• могут начинаться и заканчиваться **только на сторонних зарядах**, а через связанные заряды они проходят, не прерываясь.

Условия на границе двух диэлектриков

Выделим
прямоугольный
контур $a \times b$



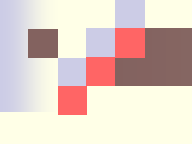
Циркуляция вектора \mathbf{E} по этому замкнутому контуру

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0$$

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = E_{1x} a - E_{2x} a + \langle E_n \rangle 2b$$

$E_{1x} = E_{1\tau}$, $E_{2x} = E_{2\tau}$ – тангенциальные составляющие вектора \mathbf{E} в 1 и 2 диэлектрике, соответственно.

$\langle E_n \rangle$ – среднее значение E_l на участках контура, перпендикулярных к границе.


$$(E_{2\tau} - E_{1\tau}) \cdot a = \langle E_n \rangle \cdot 2b$$

Сторона b контура мала: $b \rightarrow 0$.

Получим: $(E_{2\tau} - E_{1\tau}) \cdot a = 0 \Rightarrow E_{1\tau} = E_{2\tau}$.

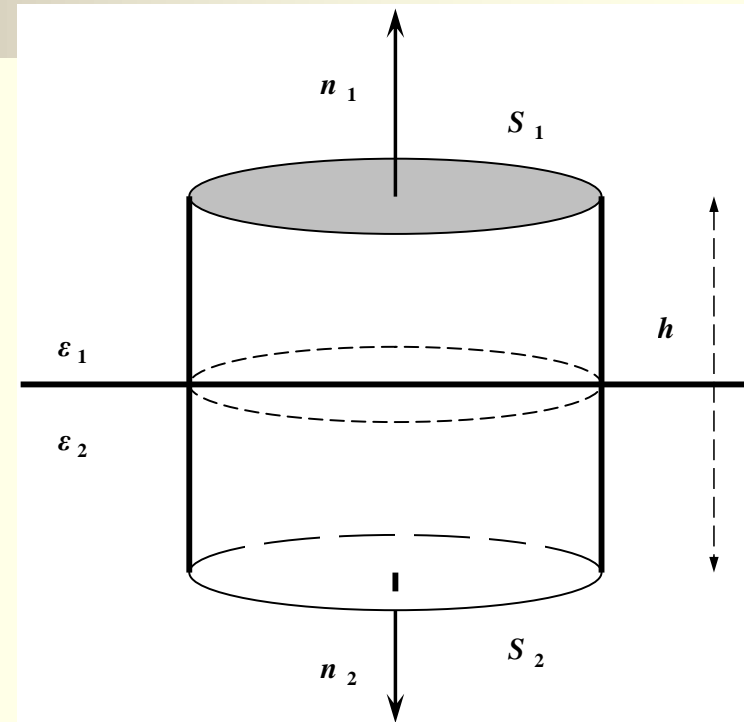
$$E_{1\tau} = E_{2\tau}$$

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

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

Выделим на границе раздела диэлектриков цилиндрическую поверхность высотой h .

Пусть $S_1 = S_2 = S \rightarrow 0$. Следовательно, поле в пределах S можно считать однородным.



Сторонних зарядов на границе 2-х диэлектриков нет. Следовательно, поток вектора электрической индукции

$$\Phi_D = \sum q_i = 0$$

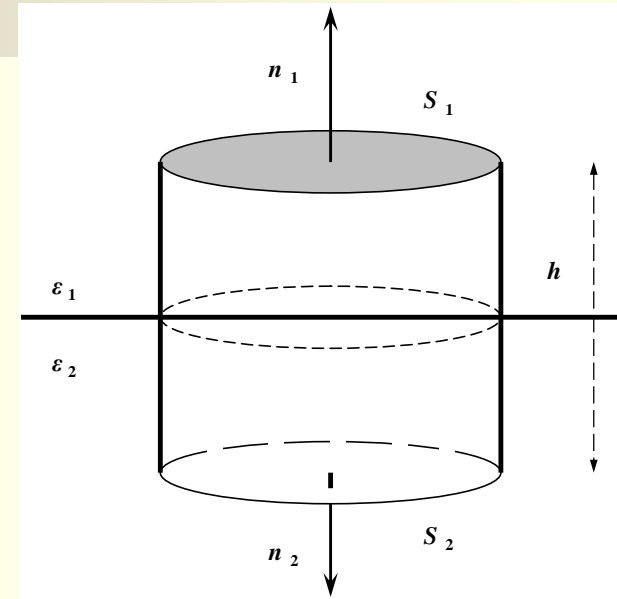
$$\Phi_D = D_{1n} S + D_{2n} S + \langle D_n \rangle S_{бок} = 0$$

D_{1n} – проекция вектора D
в первом диэлектрике на нормаль n_1 ,

D_{2n} – проекция вектора D
во втором диэлектрике на нормаль n_2 ,

$\langle D_n \rangle$ – значение D_n , усредненное по всей боковой поверхности.

Высота цилиндра h в пределе может быть сколь угодно малой ($h \rightarrow 0$), следовательно, $S_{бок} \rightarrow 0$.



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

Минус в уравнении объясняется тем, что вектора нормалей n_1 и n_2 направлены в противоположные стороны. Проекции векторов D_1 и D_2 на одну и ту же нормаль:

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

Поэтому

$$\int_s D_{1n} dS = \int_s D_{2n} dS$$

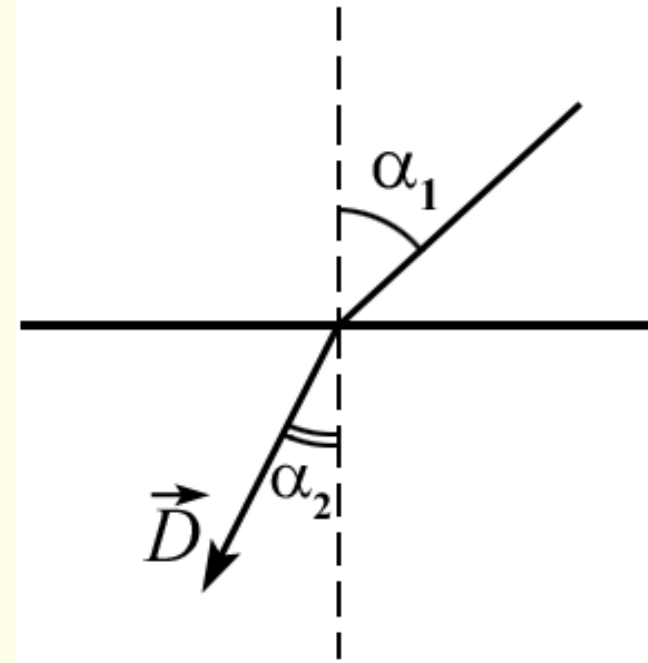
Следовательно, поток вектора D не изменяется при переходе через границу двух сред, что упрощает расчет поля в различных средах.

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Итог: при переходе через границу двух диэлектриков

$\left\{ \begin{array}{l} E_{\tau} \\ D_n \end{array} \right.$ изменяются непрерывно
(число входящих и
выходящих линий
одинаково)

$\left\{ \begin{array}{l} E_n \\ D_{\tau} \end{array} \right.$ претерпевают разрыв
(число входящих и
выходящих линий
различно)

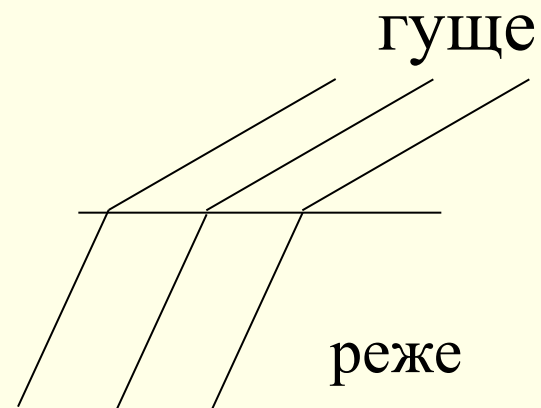


Закон преломления линий электрического смещения

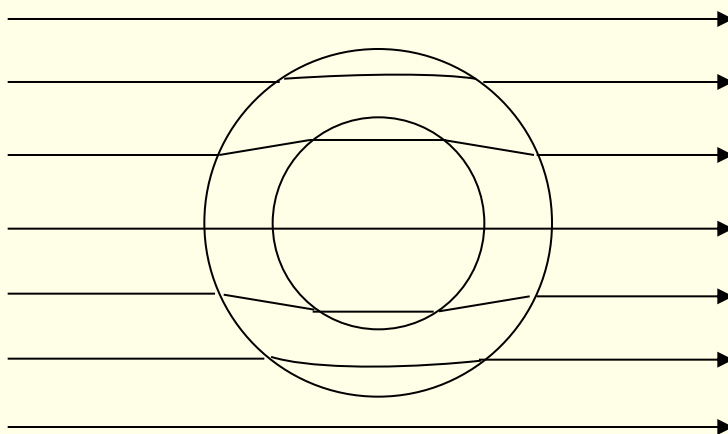
$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

При переходе в диэлектрик с меньшей ϵ угол α уменьшается – **линии D** располагаются реже.

При переходе в диэлектрик с большой ϵ угол α увеличивается – **линии D** располагаются гуще.



Роль полости в диэлектрике – частичное экранирование электрического поля:



– в стенках полости (диэлектрик с большей ϵ) силовые линии располагаются чаще из-за преломления, **внутри полости – реже.**

Пьезоэлектрики

Прямой пьезоэлектрический эффект – возникновение электрической поляризации при механических напряжениях (сгиб кристалла, его растяжение, сжатие).

Свойственен только ионным кристаллам, вследствие различия в деформации решеток положительных и отрицательных ионов.

В результате на противоположных участках поверхности кристалла выступают электрические разноименные заряды. Если сжатие заменить растяжением, происходит изменение знака электрических зарядов при пьезоэлектрическом эффекте.

При малых деформациях поляризация пропорциональна величине деформации.

Обратный пьезоэлектрический эффект – при внесении в электрическое поле в кристалле возникает механическое напряжение и происходит деформация кристалла.



Природный пьезоэлектрик - кварц

Пироэлектрики

Пироэлектрический эффект – возникновение электрической поляризации при изменении температуры кристалла.

Свойственен для некоторых пьезокристаллов:

- вследствие изменения температуры происходит сдвиг решеток положительных и отрицательных ионов.
- в результате на противоположных участках поверхности кристалла выступают разноименные заряды.

Поскольку поляризация происходит **в отсутствие внешнего электрического поля**, ее называют **спонтанной**.

$$\sigma = p \Delta T$$

σ - плотность возникающего поверхностного заряда;

p – пироэлектрическая константа;

ΔT – изменение температуры.



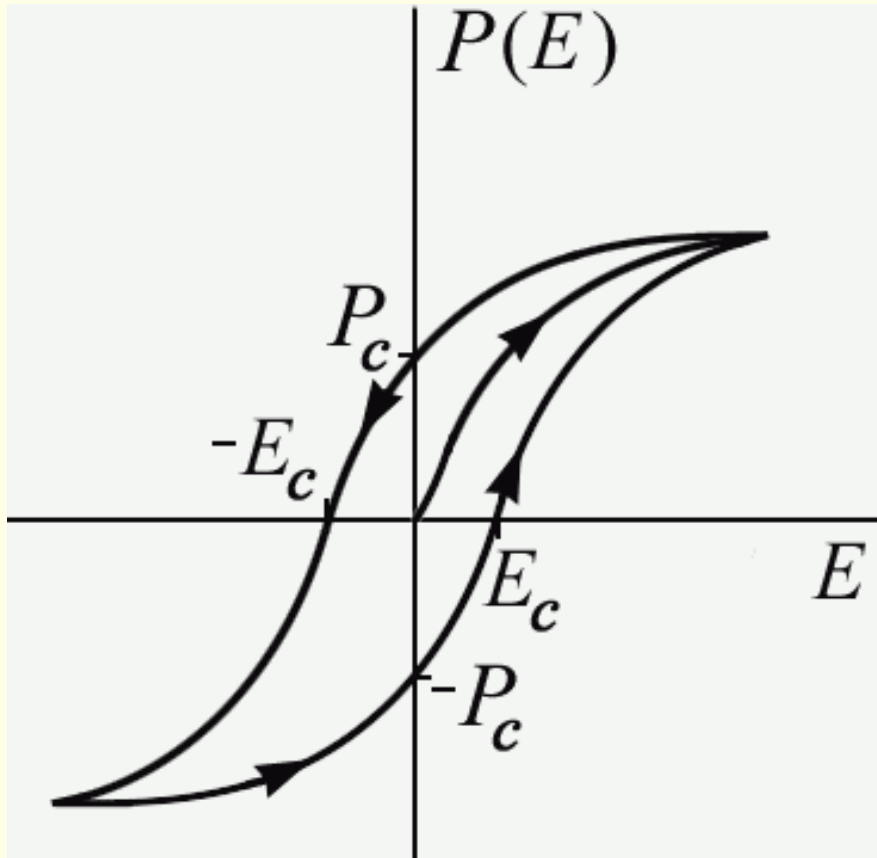
Типичный пьезоэлектрик - турмалин

Сегнетоэлектрики

– вещества, обладающие спонтанной поляризованностью P в отсутствие внешнего электрического поля.

Их отличие от остальных диэлектриков:

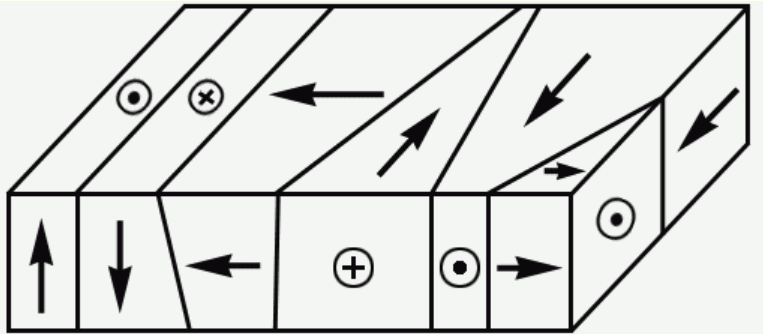
1. Диэлектрическая проницаемость $\sim 10^3$ (у остальных ~ 1)
2. Зависимость $P(E)$ – нелинейная
3. Наблюдается **гистерезис** – P определяется значением E не только в текущий, но и в предшествующие моменты времени (зависит от предыстории диэлектрика).



Кривая поляризованности сегнетоэлектрика – **петля гистерезиса:**
При $E = 0$ вещество сохраняет значение поляризованности, равное P_c – **остаточной поляризованности.**
Чтобы поляризованность стала равной нулю, необходимо приложить противоположно направленное поле напряженности E_c , называемой **коэрцитивной силой.**


Сегнетоэлектриками являются кристаллические вещества без центра симметрии.

Взаимодействие частиц в кристалле приводит к появлению в нем **доменов** – областей спонтанной поляризации:



Дипольные моменты в каждом из доменов параллельны друг другу, но для всего кристалла в отсутствие внешнего поля

$$p_{\Sigma} = 0.$$



Во внешнем поле дипольные моменты доменов ориентируются по полю.

Точка Кюри – температура, при которой сегнетоэлектрическое состояние исчезает.
(сегнетовая соль: является сегнетоэлектриком в интервале температур (-15 °С; +22,5 °С)).

Электреты

Электрет – вещество, обладающее тем же свойством, что и ионные кристаллы – способностью к поляризации в отсутствие внешнего электрического поля.

Электреты сохраняют состояние поляризации, создавая в окружающем пространстве электрическое поле.

Поляризация может быть получена искусственно.

Свободные поляризационные заряды на поверхности электрета нейтрализуются молекулами воздуха – электрет «разряжается».

Время жизни электретов колеблется **от нескольких часов до нескольких лет**.