

# Тема 4. ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

- 4.1. Поляризация диэлектриков
- 4.2. Различные виды диэлектриков
- 4.3. Вектор электрического смещения  $\vec{D}$
- 4.4. Поток вектора электрического смещения.
- 4.5. Теорема Остроградского-Гаусса для вектора
- 4.6. Изменение  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$  на границе раздела двух диэлектриков  $\vec{D}$

## 4.1. Поляризация диэлектриков

- Все вещества, в соответствии с их способностью проводить электрический ток, делятся на три основных класса:

- диэлектрики

$$\rho_{\text{д}} = 10^8 - 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

- полупроводники

$$\rho_{\text{п}} > \rho_{\text{д}} > \rho_{\text{п}} \cdot$$

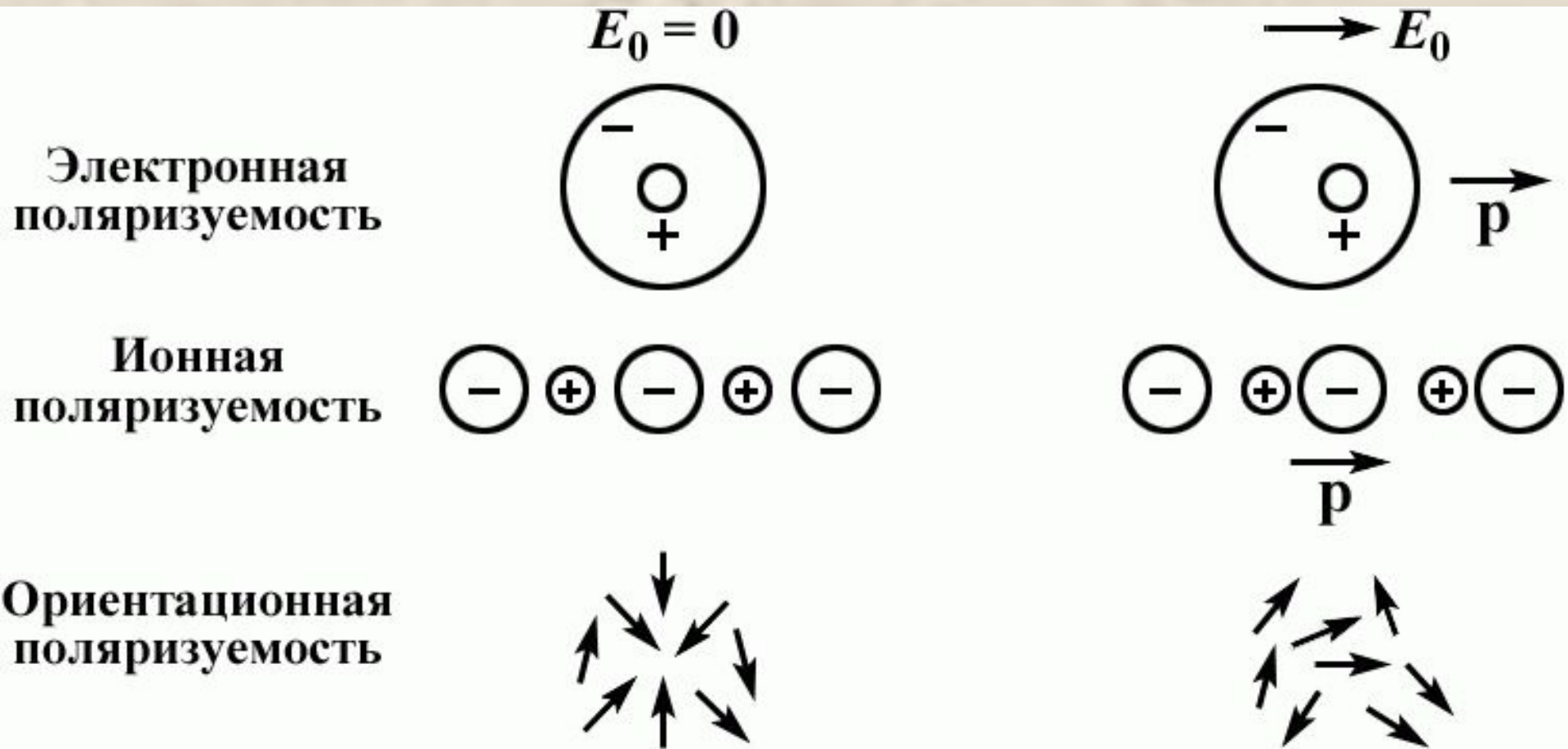
- проводники

$$\rho_{\text{п}} = 10^{-6} - 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

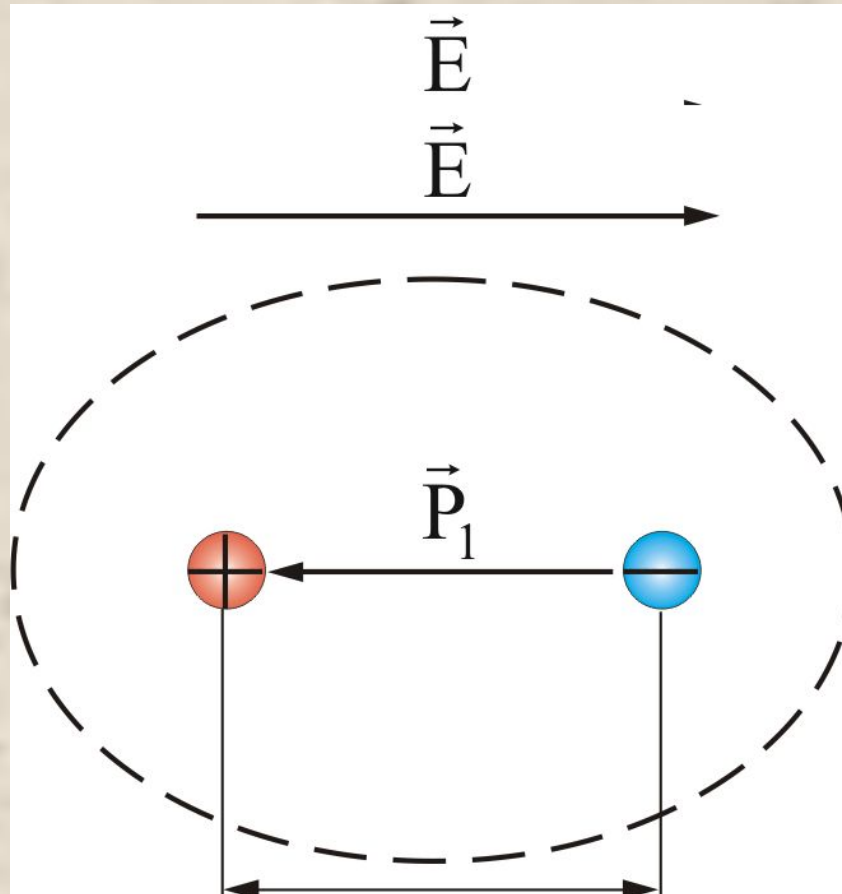
**В идеальной диэлектрике нет свободных зарядов способных перемещаться на значительные расстояния**

- Смещение электрических зарядов вещества под действием электрического поля называется **поляризацией.**

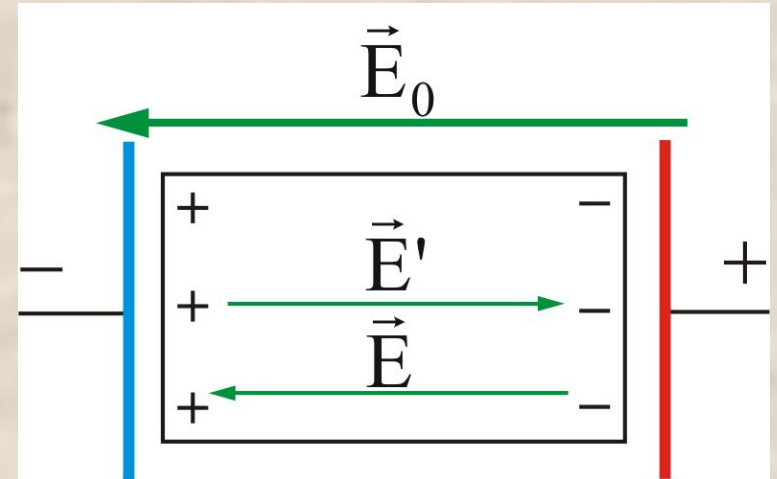
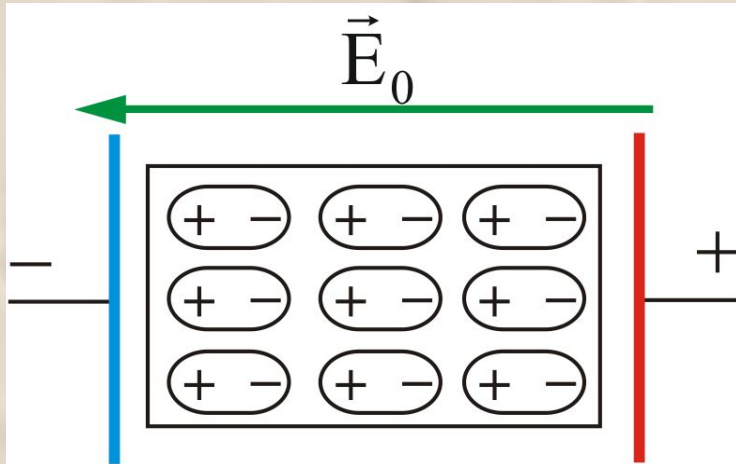
**Поляризация** разделяется на: электронную, ионную и ориентационную (дипольную).



- Главное в поляризации – смещение зарядов в электростатическом поле. В результате, каждая молекула или атом образует электрический момент  $P$

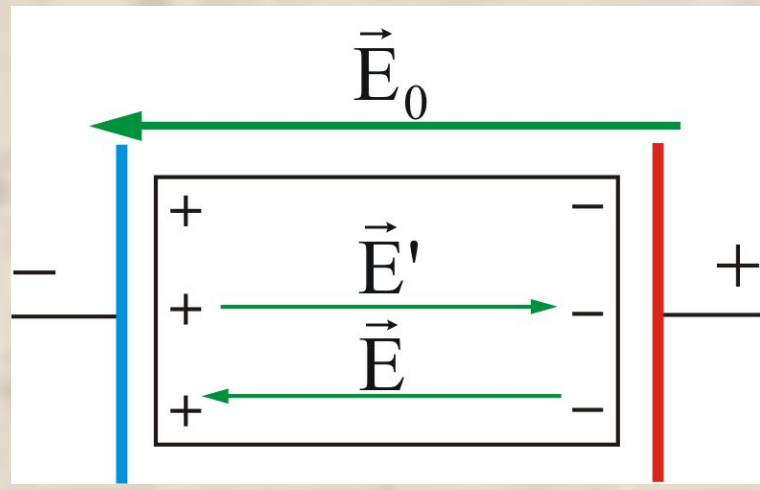


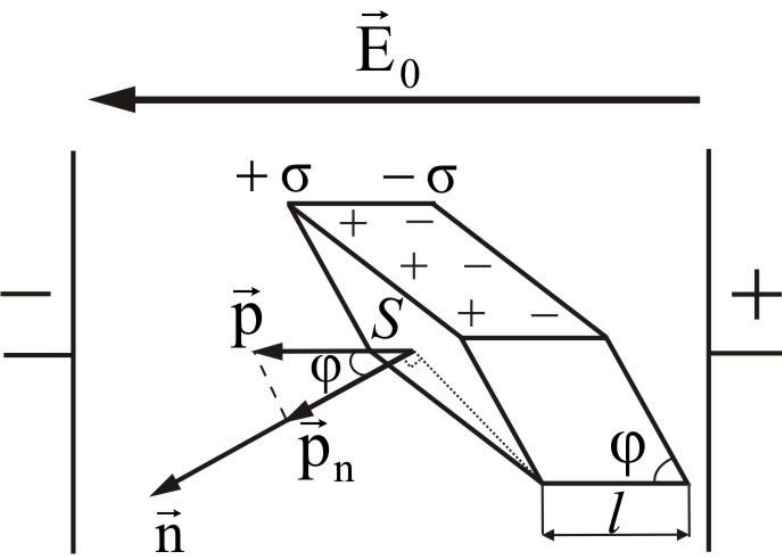
- Внутри диэлектрика электрические заряды диполей компенсируют друг друга. Но на внешних поверхностях диэлектрика, прилегающих к электродам, появляются заряды противоположного знака (**поверхностно связанные заряды**).



- $E'$  – электростатическое поле связанных зарядов.
- $E_0$  - внешнее поле
- Результирующее электростатическое поле внутри диэлектрика

$$E = E_0 - E'.$$





- Поместим диэлектрик в виде параллелепипеда в электростатическое поле

- Электрический момент тела:

- $$P = q l = \sigma' S l, \text{ è è è } P = \sigma' S l,$$

- $\sigma'$  – поверхностная плотность связанных зарядов.



- **Вектор поляризации** – электрический момент единичного объема.

$$\underline{P} = \sum_k^n \underline{P}_{1k} = n \underline{P}_1,$$

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

$$P = \underline{P}V = \underline{P}Sl \cos \phi \quad V = Sl \cos \phi$$

$$P = \sigma' Sl \quad \underline{P} \cos \phi = P_n$$

$$\sigma' = \underline{P}_n$$

$$\sigma' = \underline{P}_n$$

- Поверхностная плотность поляризационных зарядов равна нормальной составляющей вектора поляризации в данной точке поверхности.
- Индуцированное в диэлектрике электростатическое поле  $E'$  будет влиять только на нормальную составляющую вектора напряженности электростатического поля .

- Вектор поляризации можно представить так:

$$\underline{\underline{P}} = n \underline{\underline{P}}_1 = n \alpha \varepsilon_0 \underline{\underline{E}} = \chi \varepsilon_0 \underline{\underline{E}},$$

- где  $\alpha$  – поляризуемость молекул,

$\chi = n\alpha$  – диэлектрическая восприимчивость – макроскопическая безразмерная величина, характеризующая поляризацию единицы объема.

У результирующего поля изменяется только нормальная составляющая. Тангенциальная составляющая поля остается без изменения.

- В векторной форме результирующее поле можно представить так:

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

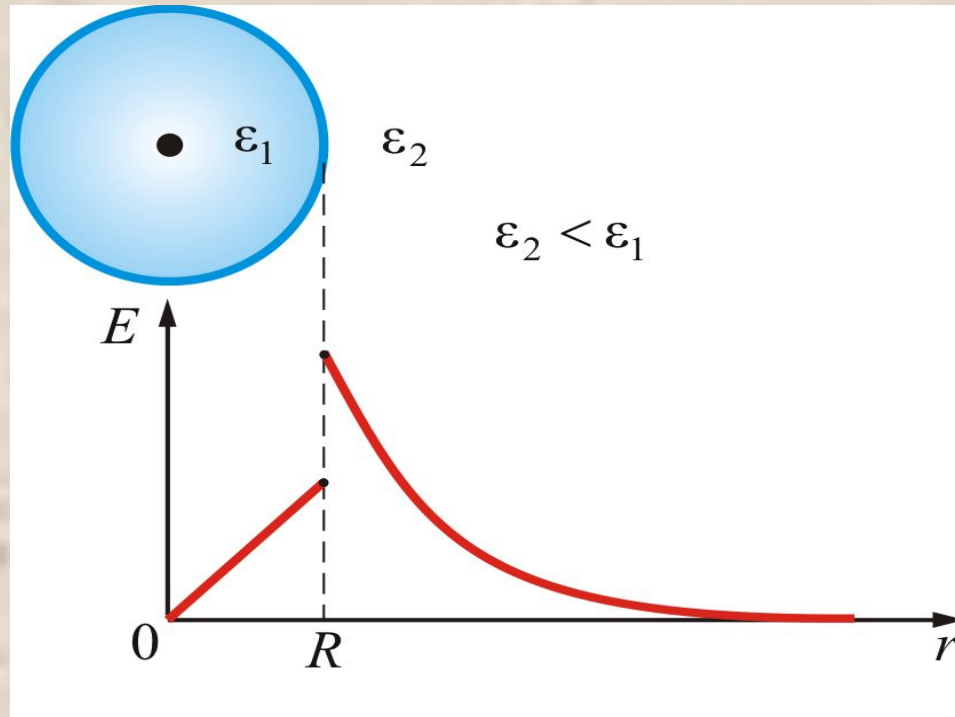
- Результирующая электростатического поля в диэлектрике равно внешнему полю, деленному на диэлектрическую проницаемость среды  $\epsilon$ :

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

- Величина  $\varepsilon = 1 + \chi$  характеризует электрические свойства диэлектрика.
- Физический смысл диэлектрической проницаемости среды  $\varepsilon$  – величина, показывающая во сколько раз электростатическое поле внутри диэлектрика меньше, чем в вакууме:

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

- График зависимости напряженности электростатического поля шара от радиуса, с учетом диэлектрической проницаемости двух сред показан на рисунке
- Как видно из рисунка, напряженность поля изменяется скачком при переходе из одной среды в другую .



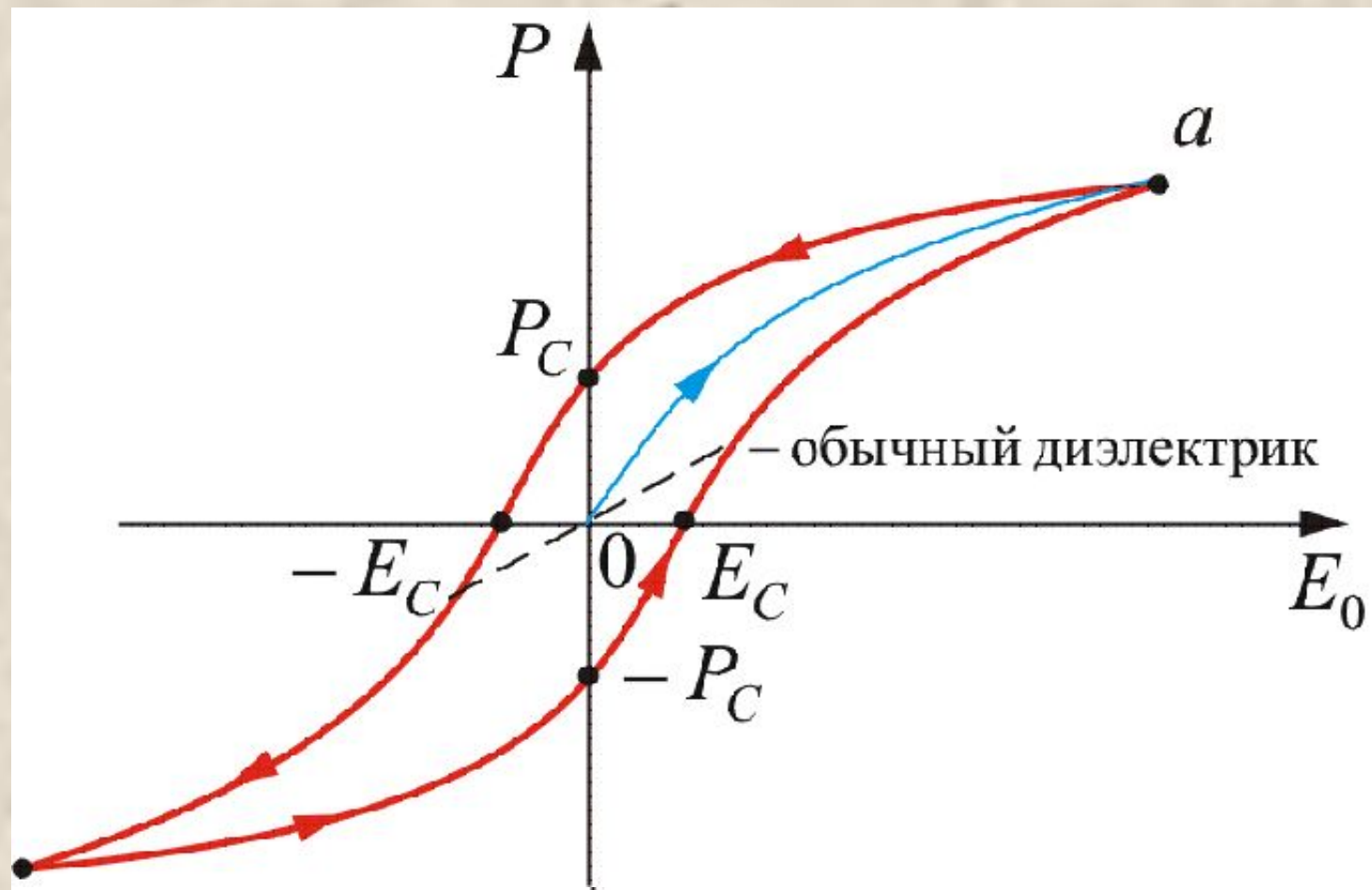
## 4.2. Различные виды диэлектриков

- В 1920 г. была открыта **спонтанная** (самопроизвольная) **поляризация**.
- Всю группу веществ, называли **сегнетоэлектрики** (или ферроэлектрики).
- Все сегнетоэлектрики обнаруживают резкую анизотропию свойств

- Основные свойства сегнетоэлектриков:
- 1. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  в некотором температурном интервале велика ( $\epsilon \sim 10^3 - 10^4$ ).
- 2. Значение  $\epsilon$  зависит не только от внешнего поля  $E_0$ , но и от предыстории образца.
- 3. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  (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:  $133^\circ \text{C}$ ; сегнетова соль: –  $18 + 24^\circ \text{C}$ ;

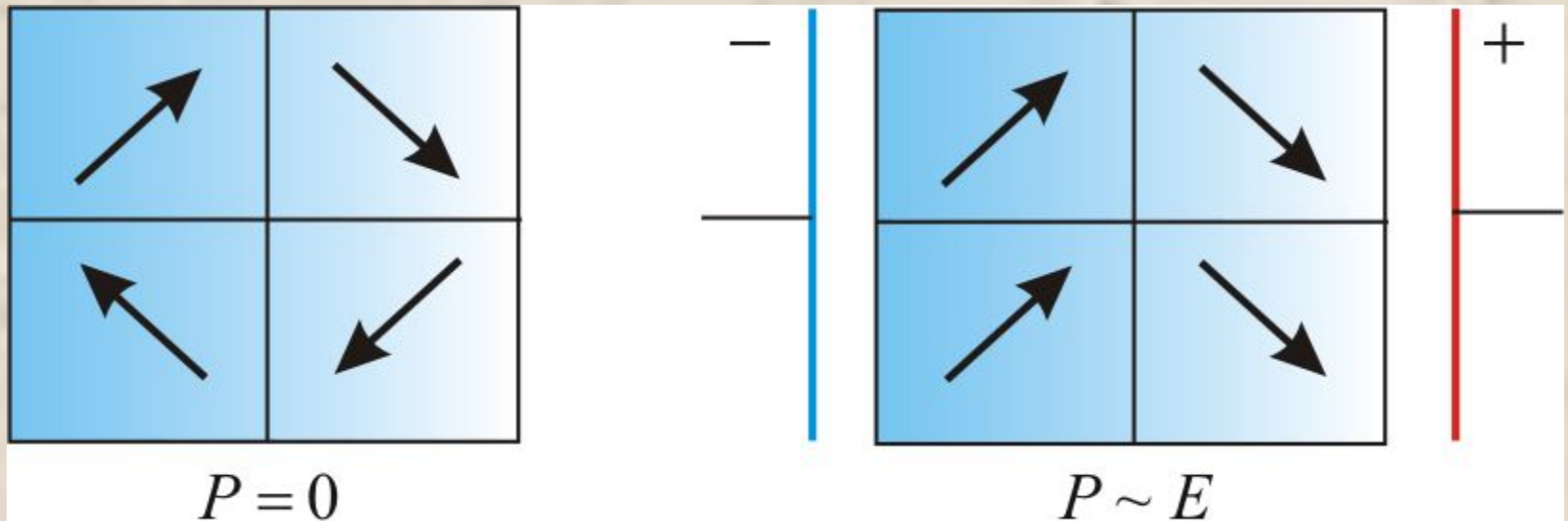


- Это свойство называется диэлектрическим гистерезисом
- Здесь точка  $a$  – состояние насыщения.



## Домены:

- минимальная потенциальная энергия и
- дефекты структуры
- **электреты** – диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего электростатического поля (аналоги постоянных магнитов).

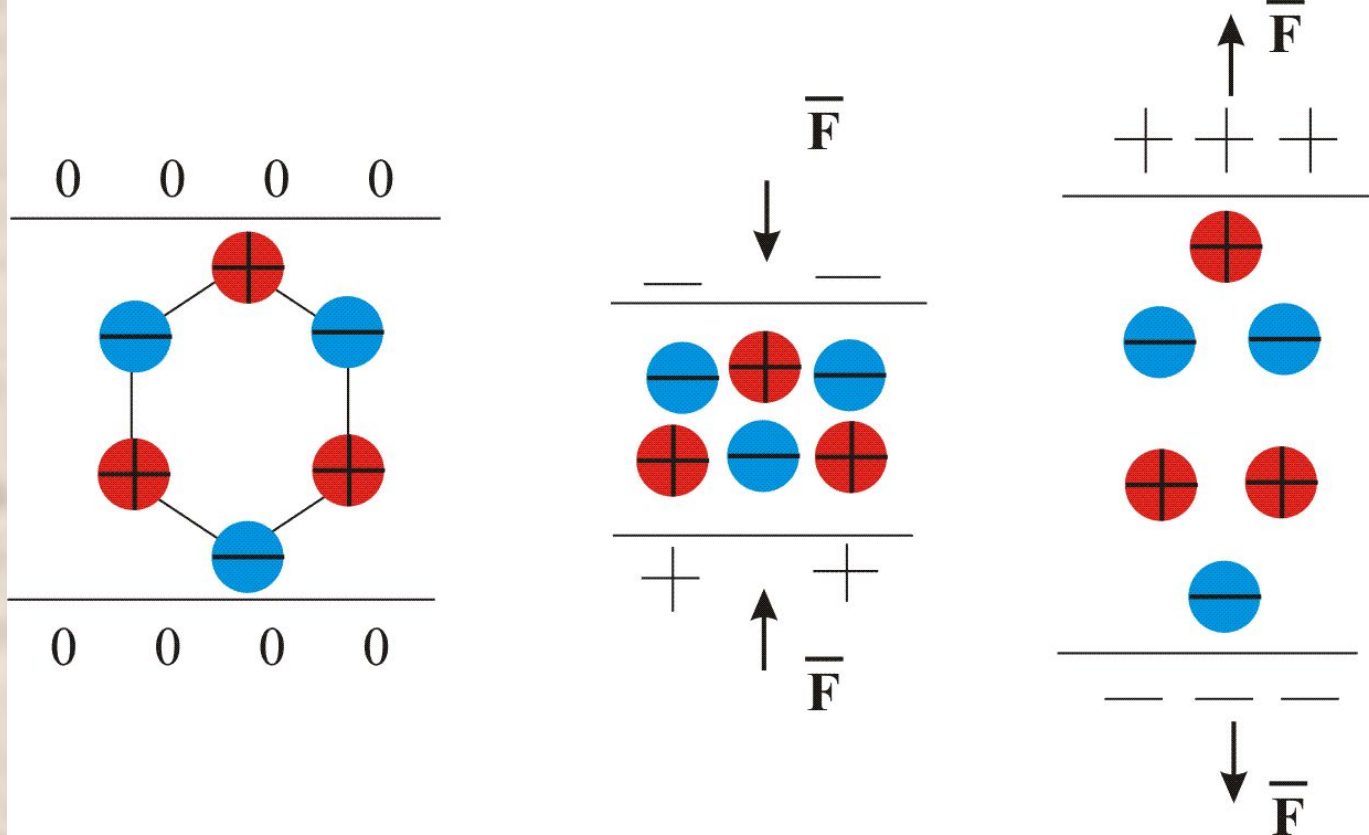


# Пьезоэлектрики

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



## Обратный пьезоэлектрический эффект:

- Если на пьезоэлектрический кристалл подать напряжение, то возникнут механические деформации кристалла, причем, деформации будут пропорциональны приложенному электрическому полю  $E_0$ .

### 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.

Примеры использования:

**сегнетоэлектрики** – электрические конденсаторы, ограничители предельно допустимого тока, позисторы, запоминающие устройства;

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

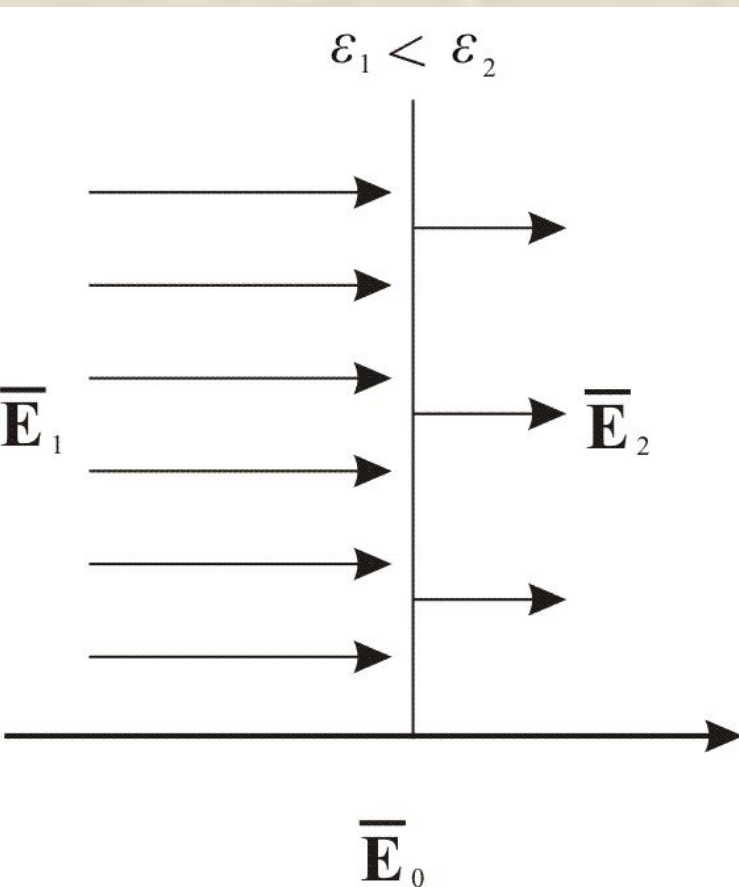
**пироэлектрики** – позисторы, детекторы ИК-излучения, болометры (датчики инфракрасного излучения), электрооптические модуляторы.

### 4.3. Вектор электрического смещения $\vec{D}$

Имеем границу раздела двух сред с  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , так что,

$$\epsilon_1 < \epsilon_2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad E_1 = E_2 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$



Напряженность электрического поля  $E$  изменяется скачком при переходе из одной среды в другую.

- **вектор электрического смещения (электрическая индукция).**

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

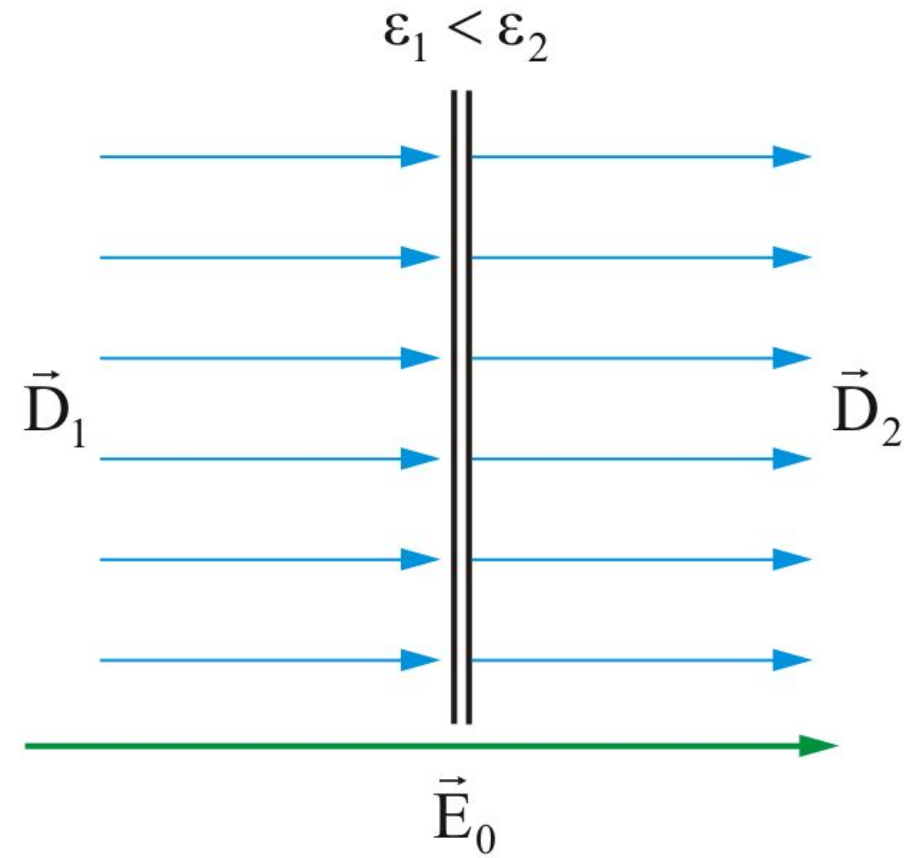
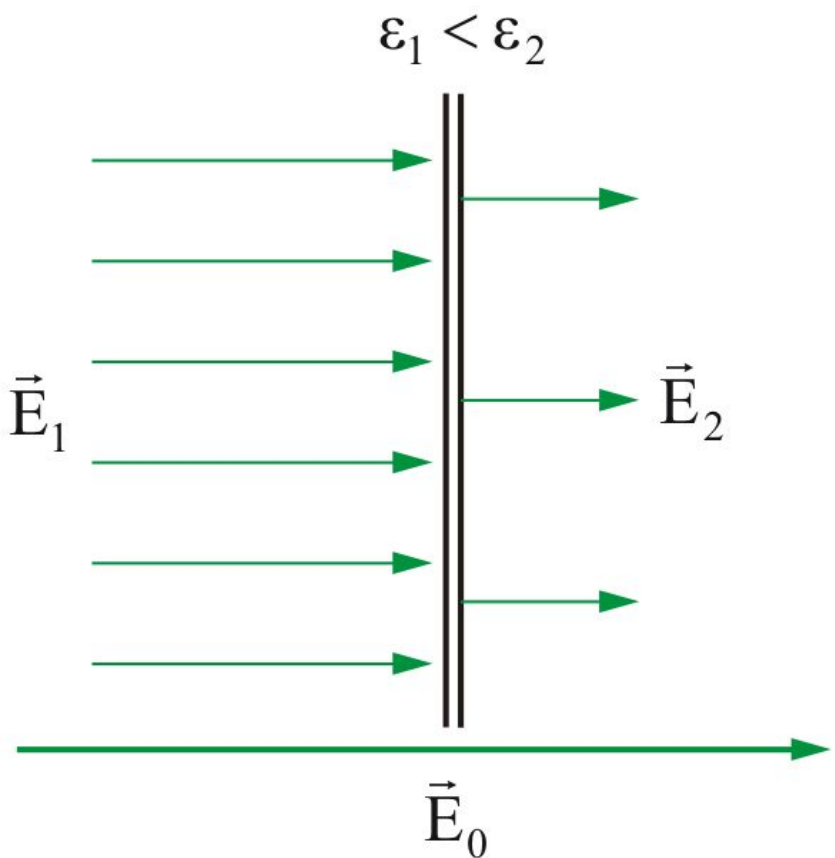
- $E_1 \varepsilon_1 = \varepsilon_2 E_2$  тогда  $\varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2$  отсюда и

$$D_{n1} = D_{n2}.$$



$$D_{n1} = D_{n2}$$

Таким образом, вектор  $\vec{D}$  остается неизменным при переходе из одной среды в другую и это облегчает расчет



Зная  $\vec{D}$  и  $\varepsilon$ , легко рассчитывать  $\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\varepsilon_0 \varepsilon}$ .

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

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P},$$

$\vec{P}$  - вектор поляризации,

•  $\chi$  - диэлектрическая восприимчивость среды

- Для точечного заряда в вакууме

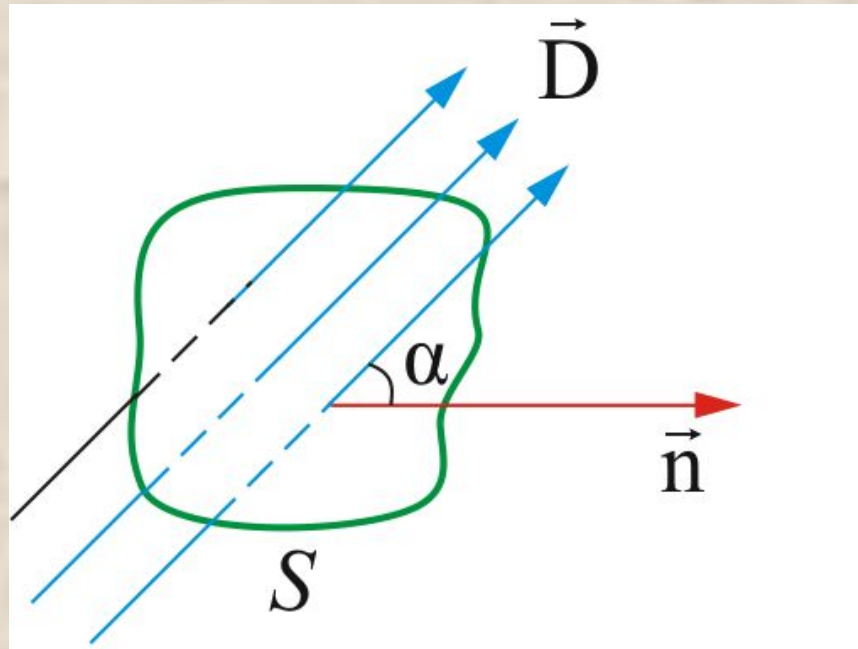
$$D = \frac{q}{4\pi r^2}.$$

- Для  $\vec{D}$  имеет место принцип суперпозиции, как и для  $\vec{E}$ , т.е.

$$\vec{D} = \sum_{k=1}^n \vec{D}_k.$$

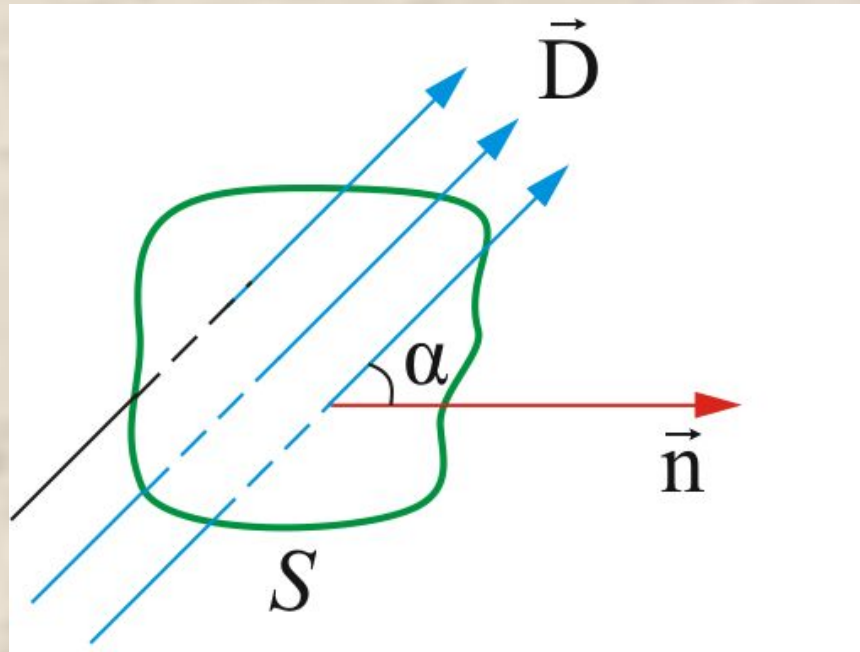
## 4.4. Поток вектора электрического смещения.

Пусть произвольную площадку  $S$  пересекают линии вектора электрического смещения  $\vec{D}$  под углом  $\alpha$  к нормали:



В однородном электростатическом поле поток вектора  $\vec{D}$  равен:

$$\hat{O}_D = DS \cos \alpha = D_n S.$$



Теорему Остроградского-Гаусса для вектора  $D$   
получим из теоремы Остроградского-Гаусса для  
вектора  $E$  :

$$\hat{O}_E = \oint_S E_n dS = \frac{\sum q_k}{\varepsilon_0 \varepsilon} \quad E_n = \frac{D_n}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \oint_S D_n dS = \frac{\sum q_k}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

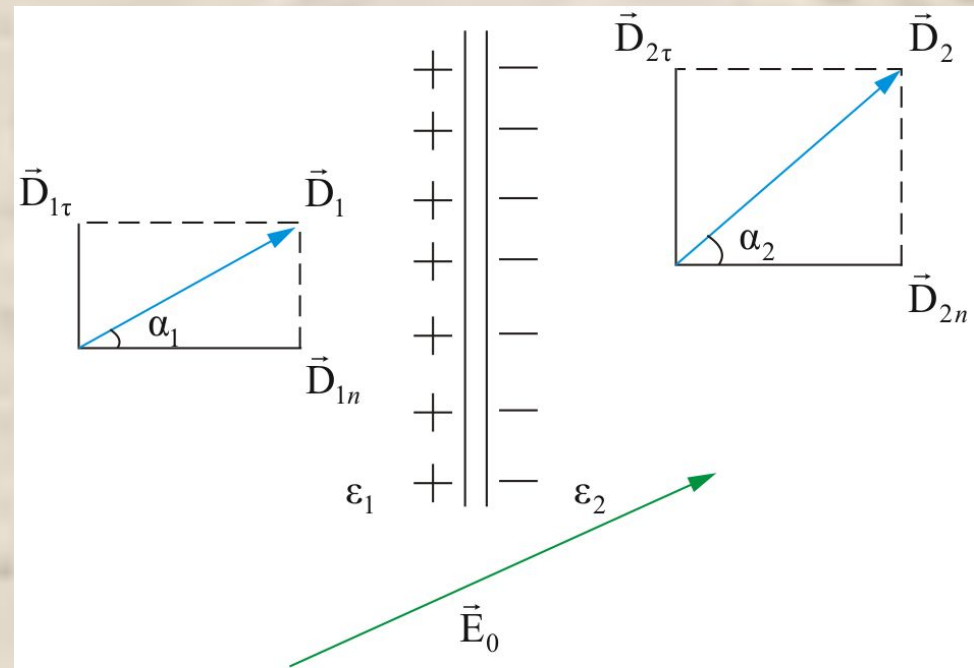
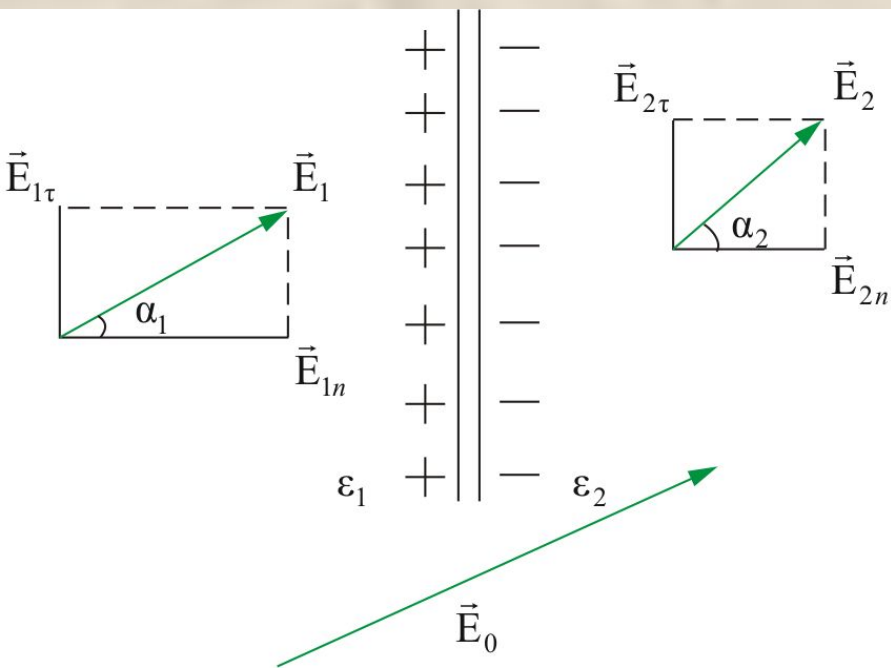
- Теорема Остроградского-Гаусса для  $\vec{D}$

$$\hat{O}_D = \oint_S D_n dS = \sum q_k.$$

- Поток вектора  $\vec{D}$  через любую замкнутую поверхность определяется **только свободными зарядами**, а не всеми зарядами внутри объема, ограниченного данной поверхностью.

## 4.5. Изменение $\vec{E}$ и $\vec{D}$ на границе раздела двух диэлектриков

Рассмотрим простой случай: два бесконечно протяженных диэлектрика с  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , имеющих общую границу раздела, пронизывает внешнее электростатическое поле.





- Пусть  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ .

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

- поверхностные заряды изменяют только нормальную составляющую, а тангенциальная составляющая остается постоянной, в результате направление вектора  $E$  изменяется:

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

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{E_{2\tau} E_{1n}}{E_{2n} E_{1\tau}} = \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1},$$

$$\overset{\sphericalangle}{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \overset{\sphericalangle}{\boldsymbol{\varepsilon}} \overset{\sphericalangle}{\mathbf{E}} \quad D_{1n} = \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_{1n} \quad D_{2n} = \varepsilon_2 \varepsilon_0 E_{2n}$$

$$\frac{D_{1n}}{D_{2n}} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 E_{1n}}{\varepsilon_2 \varepsilon_0 E_{2n}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_2 \varepsilon_1} = 1$$

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

$$\frac{D_{1\tau}}{D_{2\tau}} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 E_{1\tau}}{\varepsilon_2 \varepsilon_0 E_{2\tau}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2};$$

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

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{D_{2\tau} D_{1n}}{D_{2n} D_{1\tau}} = \frac{D_{2\tau}}{D_{1\tau}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

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

- Как видно из рисунка, при переходе из одной диэлектрической среды в другую вектор  $\vec{D}$  преломляется на тот же угол, что и  $\vec{E}$

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

- Входя в диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью, линии  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$  удаляются от нормали.

