

ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Поляризация диэлектриков

Все известные в природе вещества, в соответствии с их способностью проводить электрический ток, делятся на

три основных класса:

диэлектрики

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

полупроводники

$$\rho_{\text{д}} > \rho_{\text{п/п}} > \rho_{\text{пр}}$$

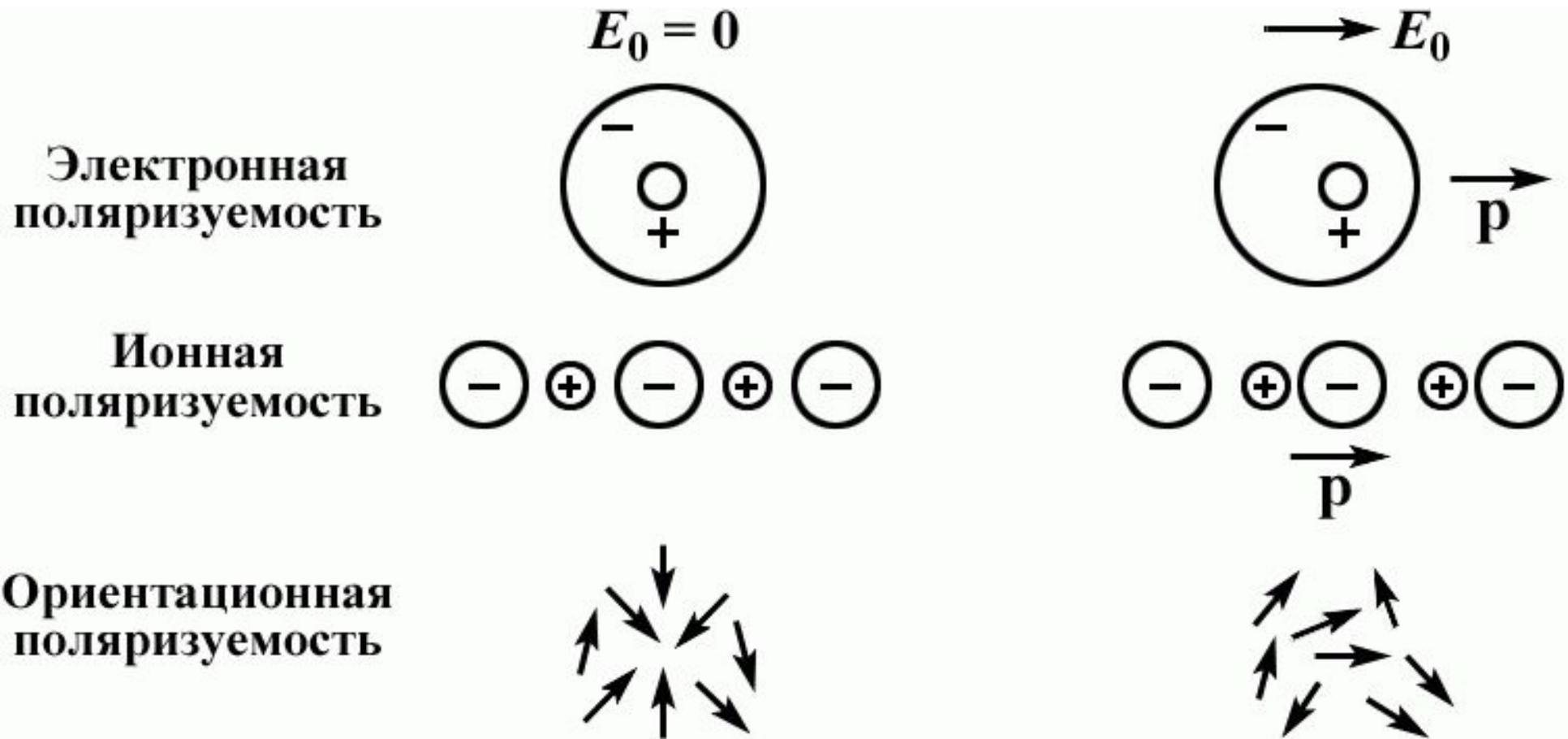
проводники

$$\rho_{\text{пр}} = 10^{-6} - 10^{-8} \text{ Ом/м}$$

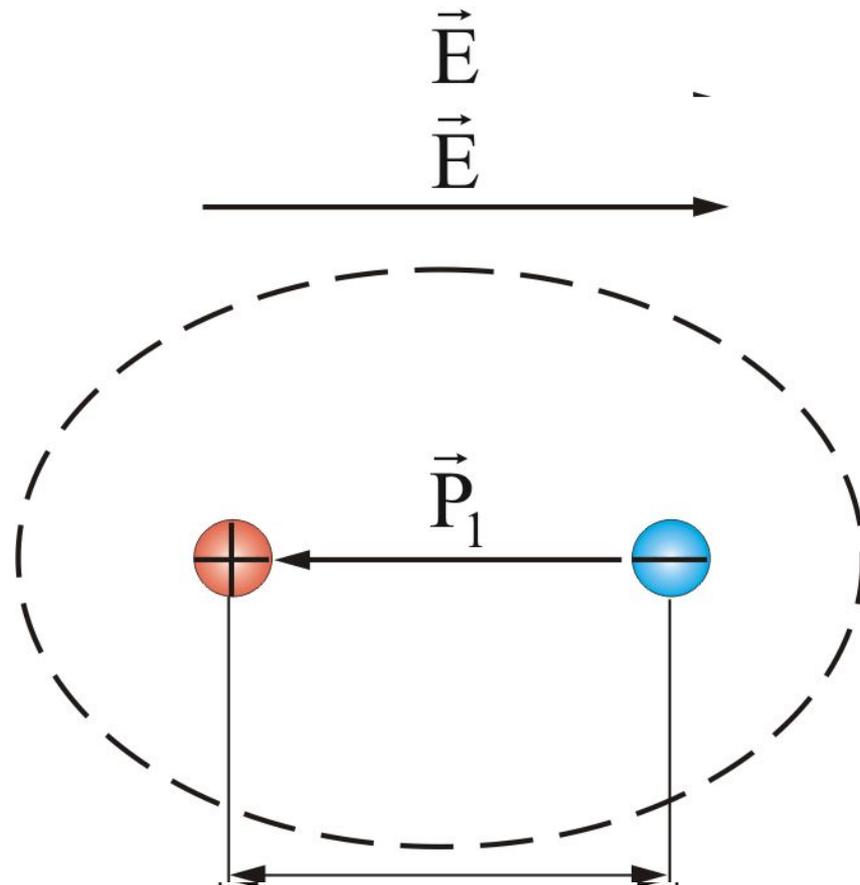
- **В идеальной диэлектрике свободных зарядов**, то есть способных перемещаться на значительные расстояния (превосходящие расстояния между атомами), **нет**.
- Но это не значит, что диэлектрик, помещенный в электростатическое поле, не реагирует на него, что в нем ничего не происходит.

- *Смещение электрических зарядов вещества под действием электрического поля называется поляризацией.*
- *Способность к поляризации является основным свойством диэлектриков.*

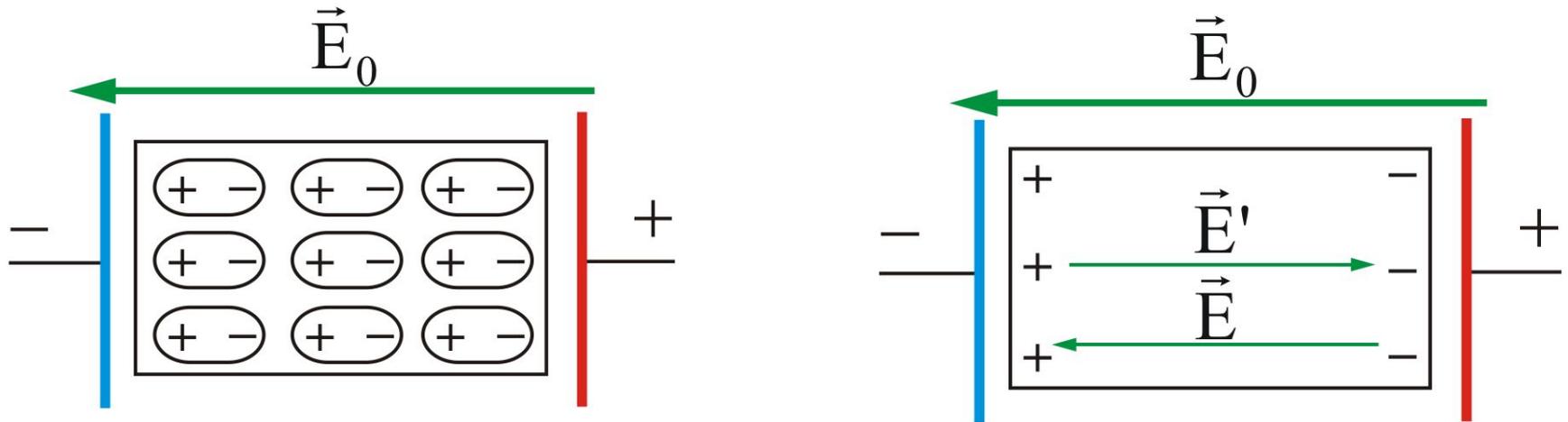
Поляризуемость диэлектрика включает составляющие – электронную, ионную и ориентационную (дипольную).



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

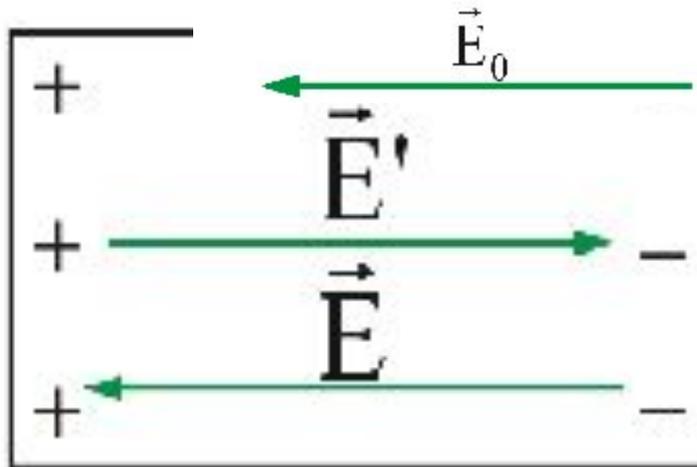


- **Внутри диэлектрика** электрические заряды диполей компенсируют друг друга. Но на внешних поверхностях диэлектрика, прилегающих к электродам, появляются заряды противоположного знака (**поверхностно связанные заряды**).



- Обозначим E' – **электростатическое поле связанных зарядов**. Оно направлено всегда против внешнего поля E_0
- Следовательно, **резльтирующее электростатическое поле внутри диэлектрика**

$$E = E_0 - E'$$



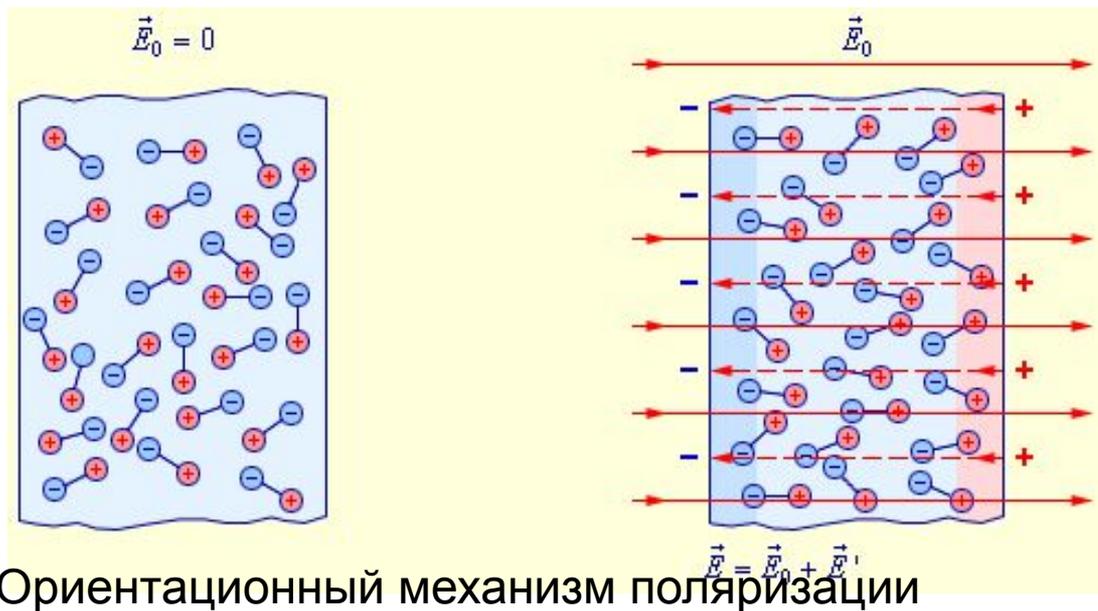
Заряженные частицы в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле \vec{E}_0 в нем возникает некоторое перераспределение зарядов, входящих в состав атомов или молекул. В результате такого перераспределения на поверхности диэлектрического образца появляются избыточные нескомпенсированные **связанные заряды**.

Связанные заряды создают электрическое поле, которое внутри диэлектрика **направлено противоположно вектору напряженности** внешнего поля. Этот процесс называется поляризацией диэлектрика. В результате полное электрическое поле $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше внешнего поля

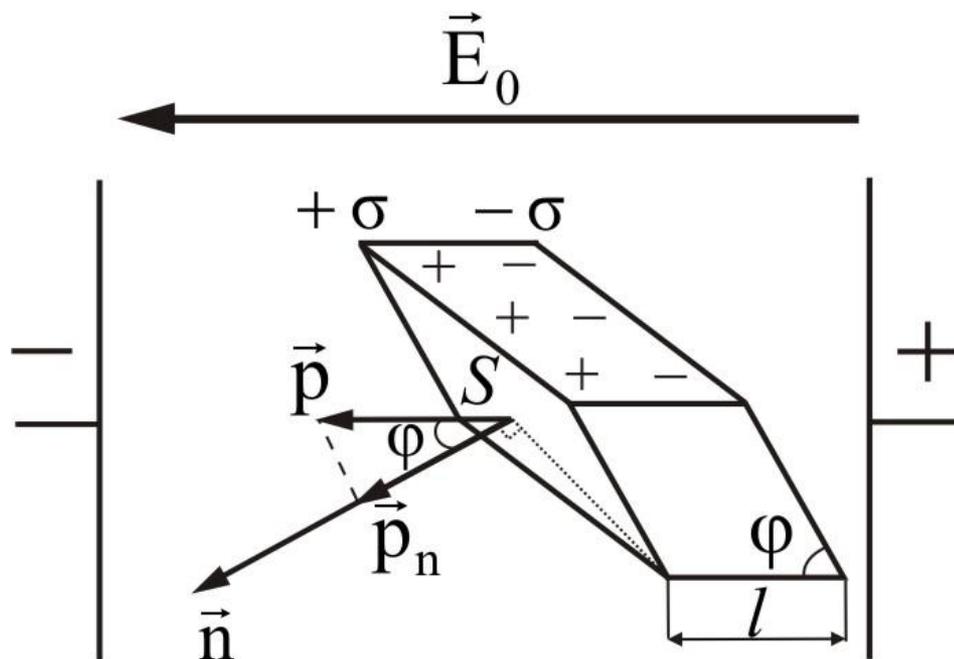
$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

диэлектрическая проницаемость вещества.



Ориентационный механизм поляризации полярного диэлектрика

Существует несколько механизмов поляризации диэлектриков. Основными из них являются ориентационная и электронная поляризации.



Поместим диэлектрик в виде параллелепипеда
электростатическое поле \vec{E}_0

Электрический момент тела, можно найти по
формуле:

$$P = ql = \sigma' S l, \text{ или } P = \sigma' S l \cos \varphi,$$

σ' – поверхностная плотность связанных зарядов

- Введем новое понятие – **вектор поляризации – электрический момент единичного объема.**

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

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

- С учетом этого обстоятельства,

- $$P = \underline{PV} = \underline{PSl} \cos \varphi$$

- (т.к. $V = Sl \cos \varphi$ — объем параллелепипеда).

- Приравняем и учтем, что $\underline{P} \cos \varphi = P_n$
— проекция \underline{P} на направление \underline{n} — вектора нормали,

- тогда

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

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

- **Поверхностная плотность** поляризованных зарядов равна нормальной составляющей вектора поляризации в данной точке поверхности.
- Отсюда следует, что **индуцированное в диэлектрике электростатическое поле E'** будет влиять только на нормальную составляющую вектора напряженности электростатического поля \vec{E}

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 α – **поляризуемость молекул**,

$\chi = n\alpha$ – **диэлектрическая**

восприимчивость – макроскопическая

безразмерная величина, характеризующая поляризацию единицы объема.

Следовательно, и у результирующего поля \vec{E} изменяется, по сравнению с E_0 , только нормальная составляющая.

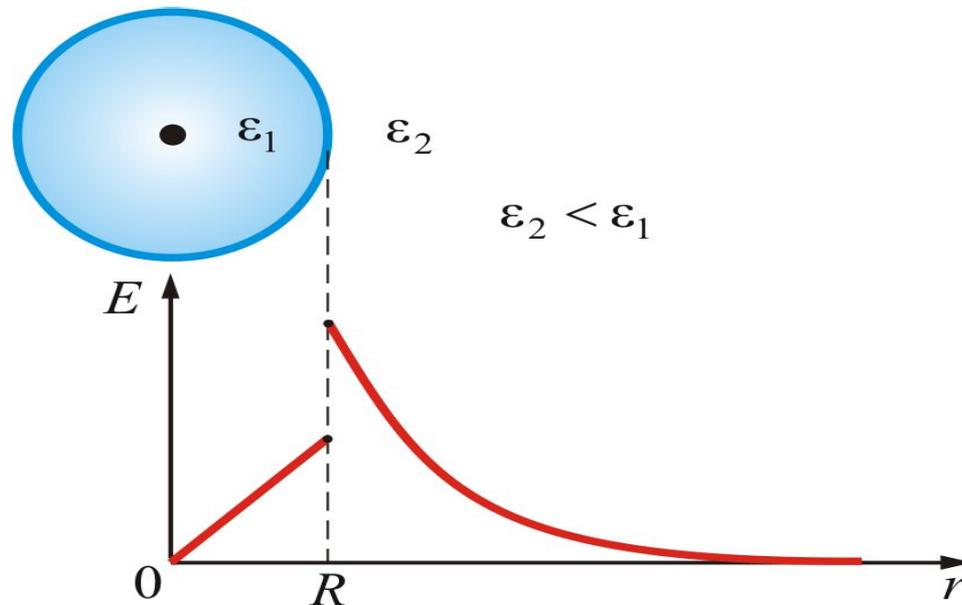
Тангенциальная составляющая поля остается без изменения.

- В векторной форме результирующее поле можно представить так:
$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$
-
- Результирующая электростатического поля в диэлектрике равна внешнему полю, деленному на диэлектрическую проницаемость среды ϵ :
$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon}$$
-

- Величина $\varepsilon = 1 + \chi$ характеризует электрические свойства диэлектрика.
- Физический смысл диэлектрической проницаемости среды:
 - ε – 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 (ϵ_2 и ϵ_1), показан на рисунке
- Как видно из рисунка, напряженность поля изменяется скачком при переходе из одной среды в другую .



Различные виды диэлектриков

- В 1920 г. была открыта **спонтанная** (самопроизвольная) **поляризация**.
- Всю группу веществ, называли **сегнетоэлектрики** (или *ферроэлектрики*).
- Все сегнетоэлектрики обнаруживают резкую анизотропию свойств (сегнетоэлектрические свойства могут наблюдаться только вдоль одной из осей кристалла). У изотропных диэлектриков поляризация всех молекул одинакова, у анизотропных – поляризация, и следовательно, вектор поляризации в разных направлениях разные.

- **Основные свойства сегнетоэлектриков:**

- 1. Диэлектрическая проницаемость ϵ в некотором температурном интервале велика

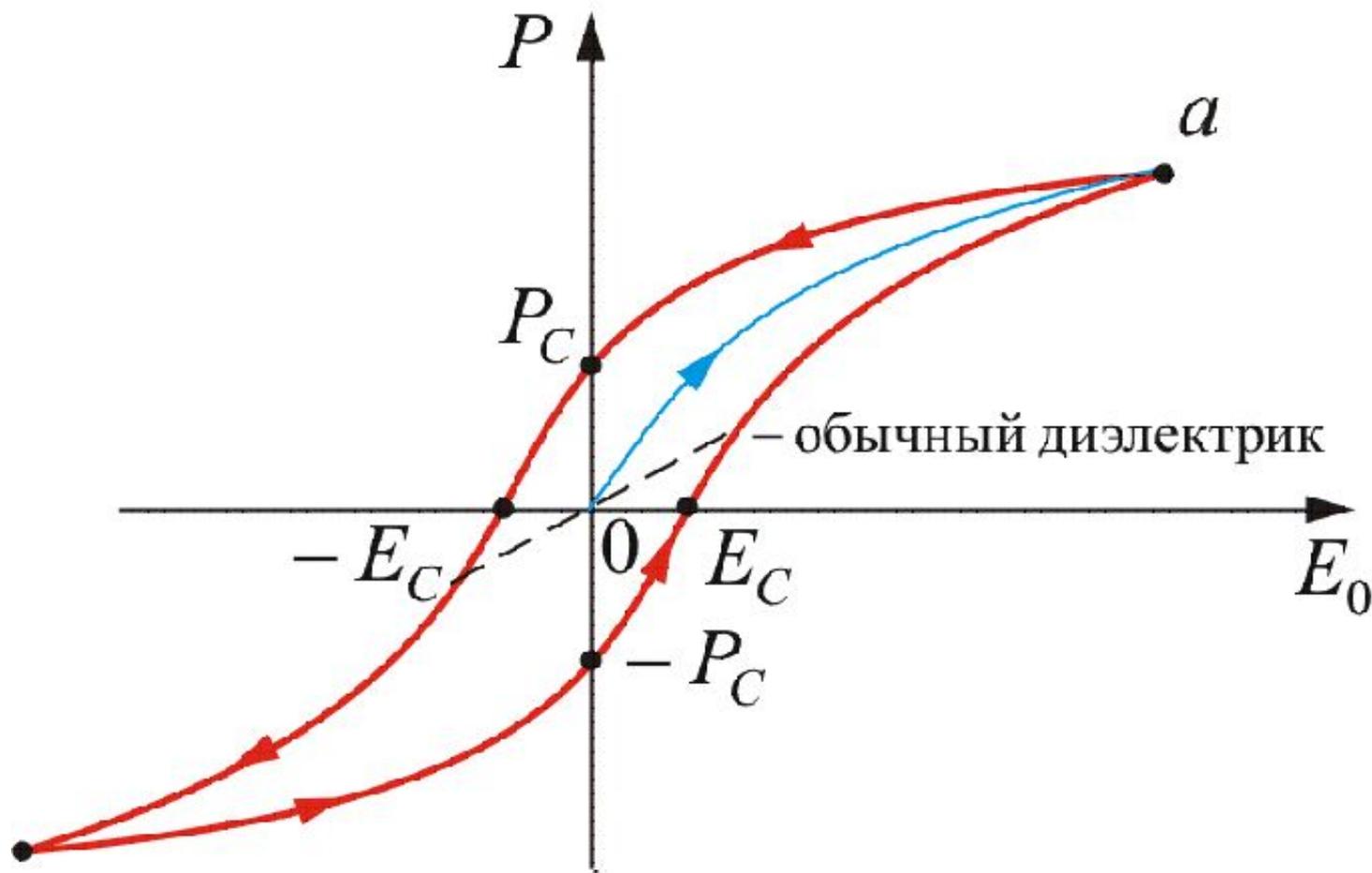
- $$\epsilon \sim 10^3 - 10^4$$

- 2. Значение ϵ зависит не только от внешнего поля E_0 , но и от предыстории образца.

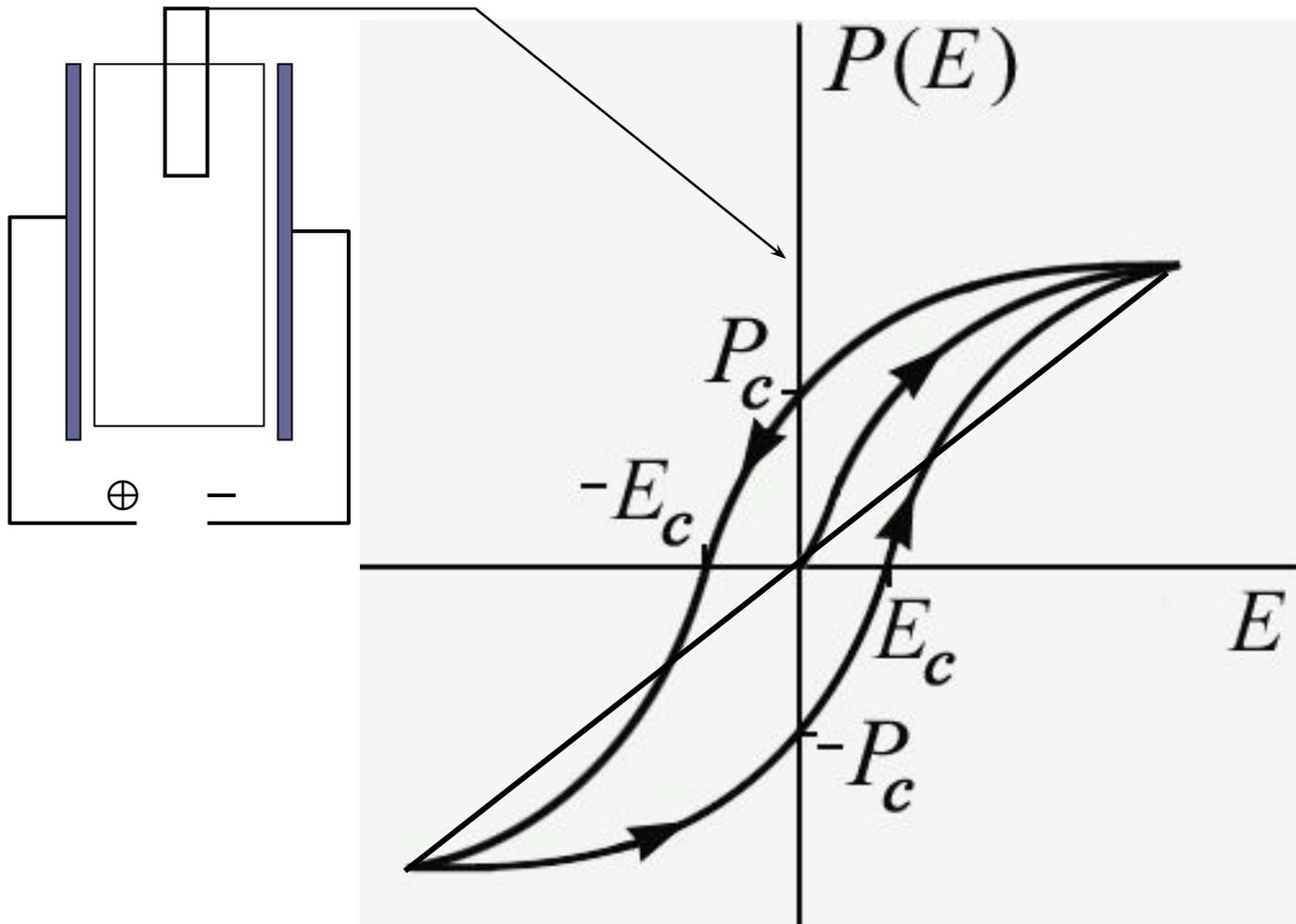
- 3. Диэлектрическая проницаемость ϵ (а следовательно, и P) – нелинейно зависит от напряженности внешнего электростатического поля (*нелинейные диэлектрики*).

- 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°C ;
 - сегнетова соль: $-18 + 24^{\circ}\text{C}$;
 - ниобат лития 1210°C .

- Нелинейная поляризация диэлектриков называется *диэлектрическим гистерезисом*
- Здесь точка *a* – состояние насыщения.

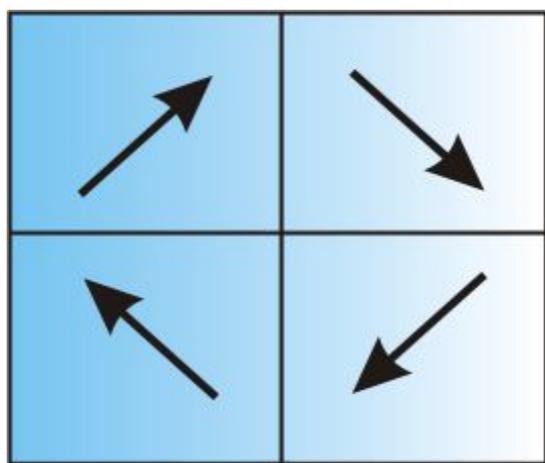


E_C – коэрцитивная сила, P_C – остаточная поляризация

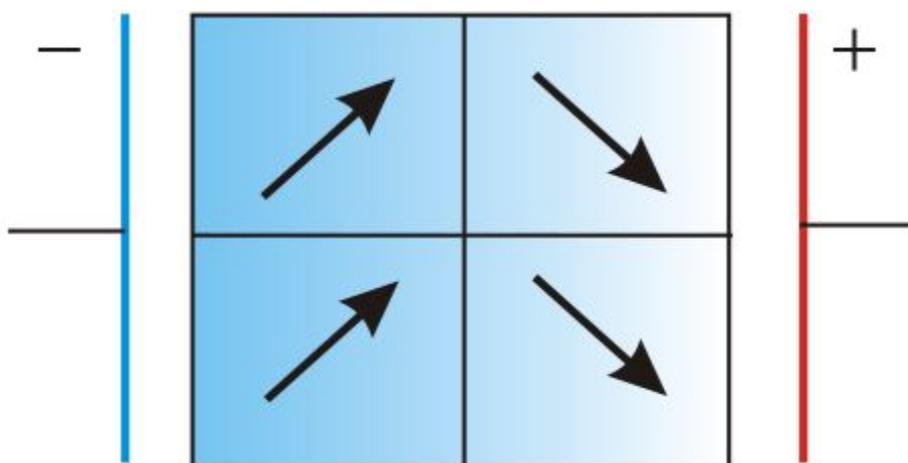


Кривая поляризации сегнетоэлектрика – петля гистерезиса. E_c – коэрцитивная сила, P_c – остаточная поляризация сегнетоэлектрика.

- Стремление к минимальной потенциальной энергии и наличие дефектов структуры приводит к тому, что сегнетоэлектрик разбит на **домены**

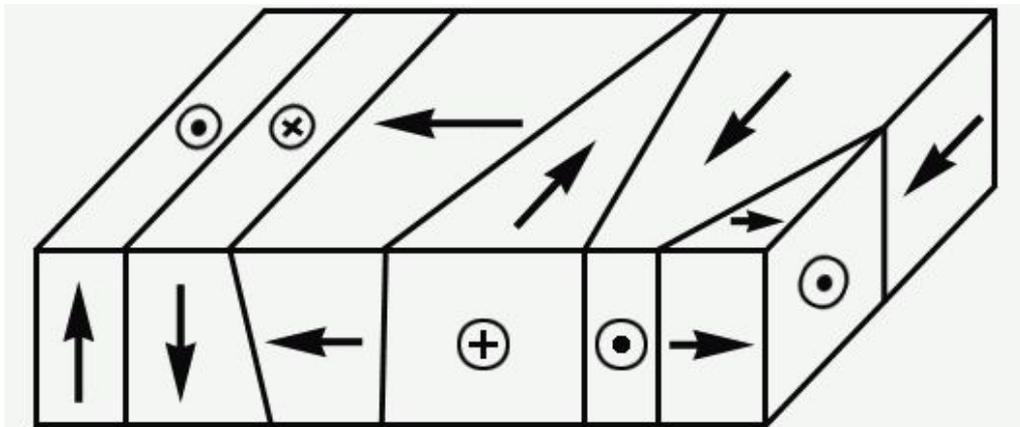


$$P = 0$$



$$P \sim E$$

Сегнетоэлектрики состоят из доменов – областей с различными направлениями поляризации. В отсутствии поля суммарный дипольный момент практически отсутствует. Под действием электрического поля E доменные границы смещаются так, что объем доменов, поляризованных по полю, увеличивается за счет доменов, поляризованных против поля.



Изображение доменов тетрагональной модификации BaTiO_3 . Стрелки указывают направление вектора поляризации

В сильном электрическом поле кристалл становится однодоменным. После выключения электрического поля образец остается поляризованным. P_c – остаточная поляризация.

Чтобы суммарные объемы доменов противоположного знака сравнялись, необходимо приложить поле противоположного направления E_c – коэрцитивное поле.

- Среди диэлектриков есть вещества, называемые **электреты** – диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего электростатического поля (аналоги постоянных магнитов).

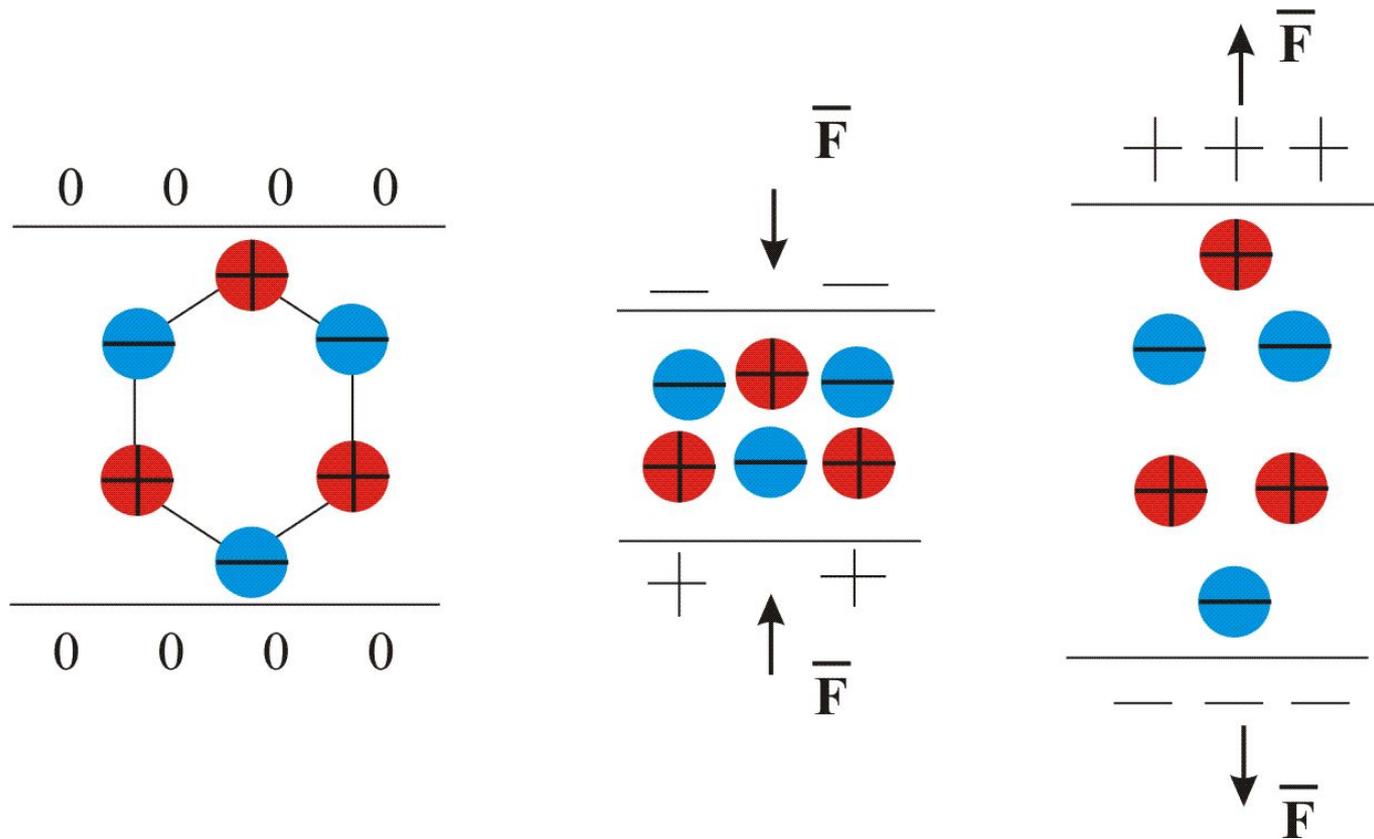
Пьезоэлектрики

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.

Если замкнуть обкладки, то потечет ток.



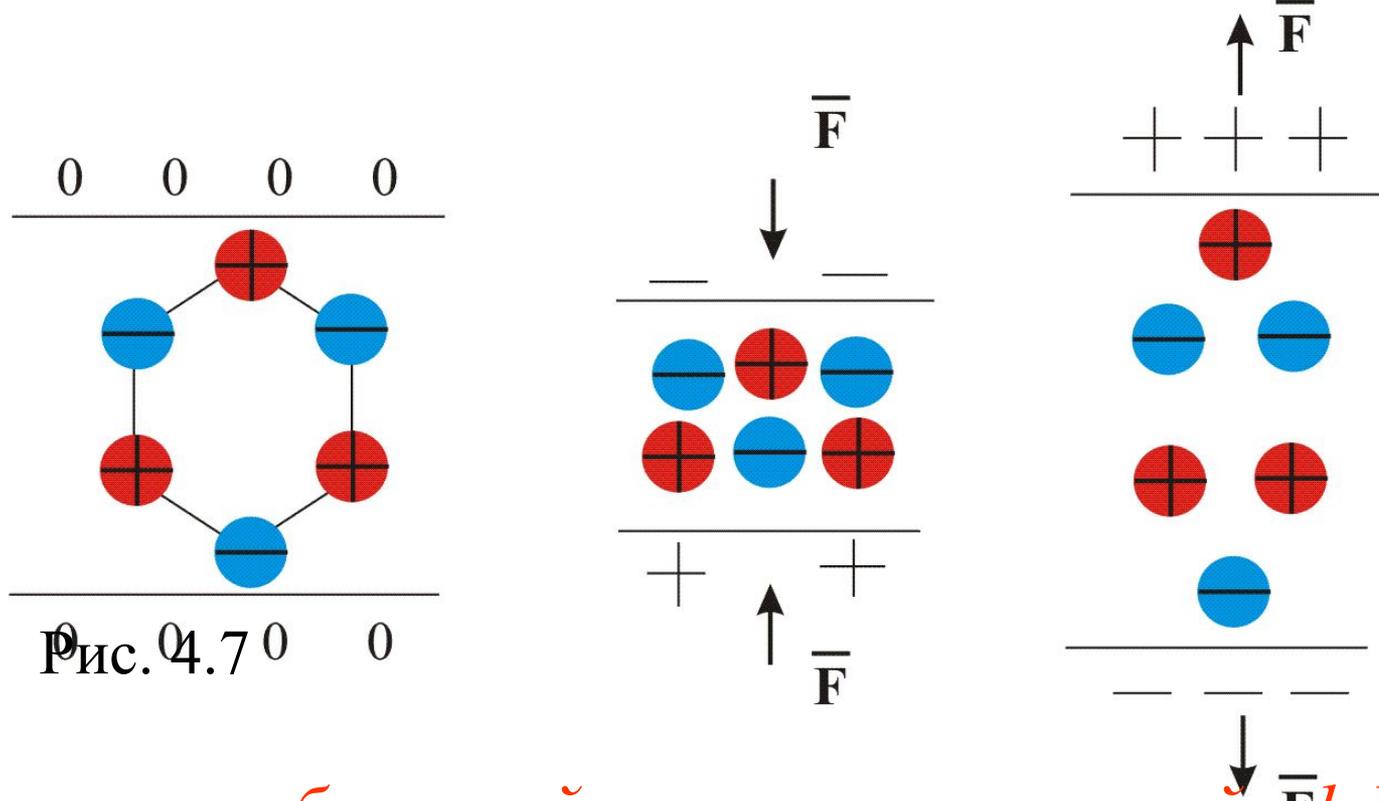


Рис. 4.70

Возможен и обратный пьезоэлектрический эффект:

- Возникновение поляризации сопровождается механическими деформациями.
- Если на пьезоэлектрический кристалл подать напряжение, то возникнут механические деформации кристалла, причем, деформации будут пропорциональны приложенному электрическому полю E

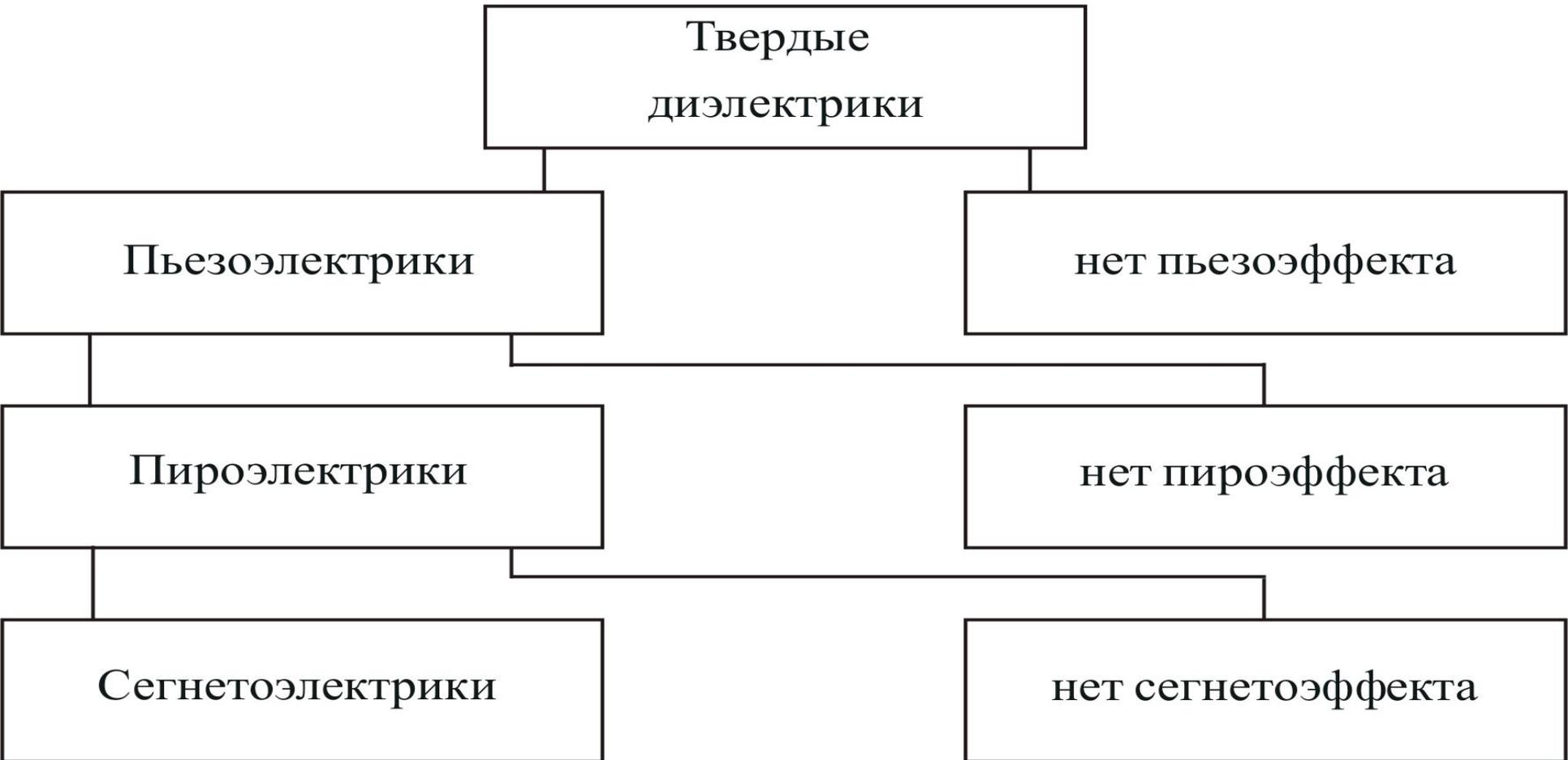
- Сейчас известно более 1800 пьезокристаллов.
- Все сегнетоэлектрики обладают пьезоэлектрическими свойствами
- Используются в пьезоэлектрических адаптерах и других устройствах).

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.
- Появление зарядов связано с изменением существующей поляризации при изменении температуры кристаллов.

Все пирозэлектрики являются пьезоэлектриками, но не наоборот. Некоторые пирозэлектрики обладают сегнетоэлектрическими свойствами.



В качестве **примеров** использования различных диэлектриков можно привести: **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.

Практическое применение пьезоэффекта.

Пьезоэлектрические преобразователи (например, пьезоэлектрический манометр), двигатели, пьезоэлектрические стабилизаторы и фильтры, пьезоэлектрические датчики, звукопринимающие устройства, микрофоны, кварцевые излучатели ультразвука и пр.

В течение последних 5-7 лет сформировалась и интенсивно развивается новая отрасль медицины, основанная на использовании близкодействующих статических электрических полей для стимулирования позитивных биологических процессов в организме человека.

Попадая вместе с имплантатом в организм человека, электретная пленка своим полем оказывает дозированное локальное воздействие на поврежденный орган, способствуя его лечению в оптимальных биофизических условиях.

В основе этого процесса лежит природный эффект, состоящий в том, что внешнее близкодействующее электрическое поле определенной величины и знака, действуя на клеточном уровне, является катализатором появления здоровых новообразований в живых тканях.



Характерные фотографии срезов костной ткани, полученные в результате серии экспериментов. Электретное покрытие существенно ускоряет процессы заживления.

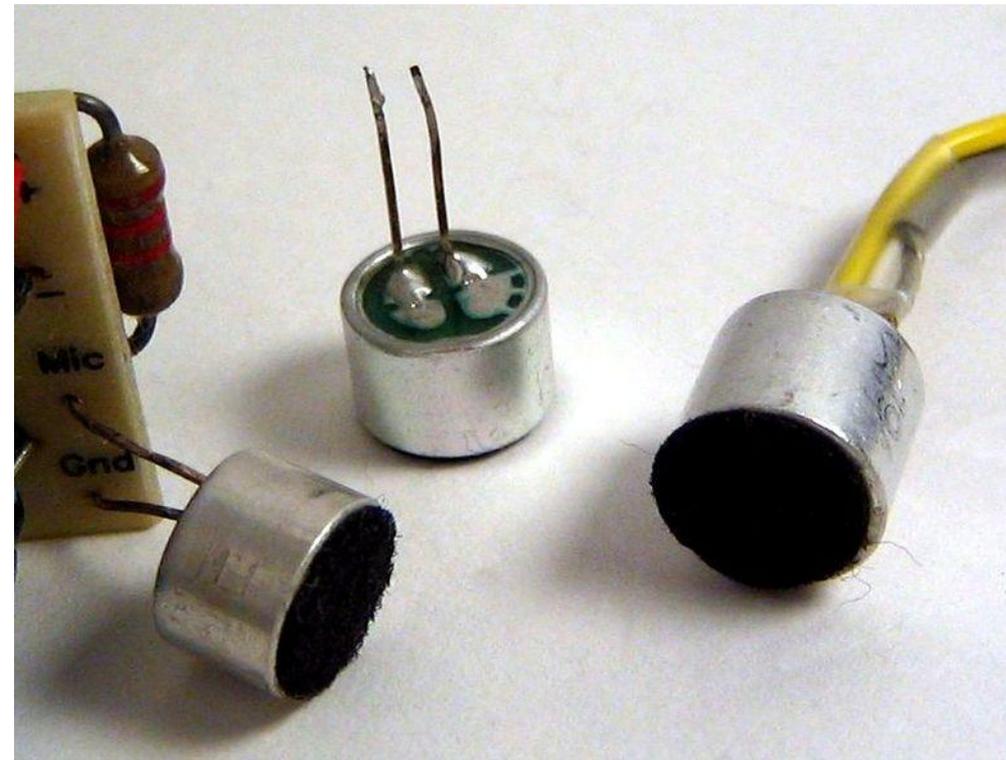
К концу третьего месяца после операции вокруг имплантатов с электретным покрытием практически полностью завершается процесс формирования костной ткани, отсутствуют признаки воспалительной реакции.



Речевой ненаправленный электретный микрофон МК-Boost является фирменным продуктом компании «Гран При».

Тонкая плёнка из гомоэлектрета Тонкая плёнка из гомоэлектрета помещается в зазор конденсаторного микрофона Тонкая плёнка из гомоэлектрета помещается в зазор конденсаторного микрофона (т.е. конденсатора, у которого одна из обкладок (мембрана) имеет возможность перемещаться под действием внешнего а

При изменении ёмкости, пр вследствие смещения мембраны, на конденсаторе проявляется за изменение напряжения, соответствующее акустическому сигналу.





Блоки пьезоэлектрических преобразователей предназначены для совместной работы с электронным блоком дефектоскопа УДС2-РДМ-2. Используются в схемах проверки нитей железнодорожного пути.

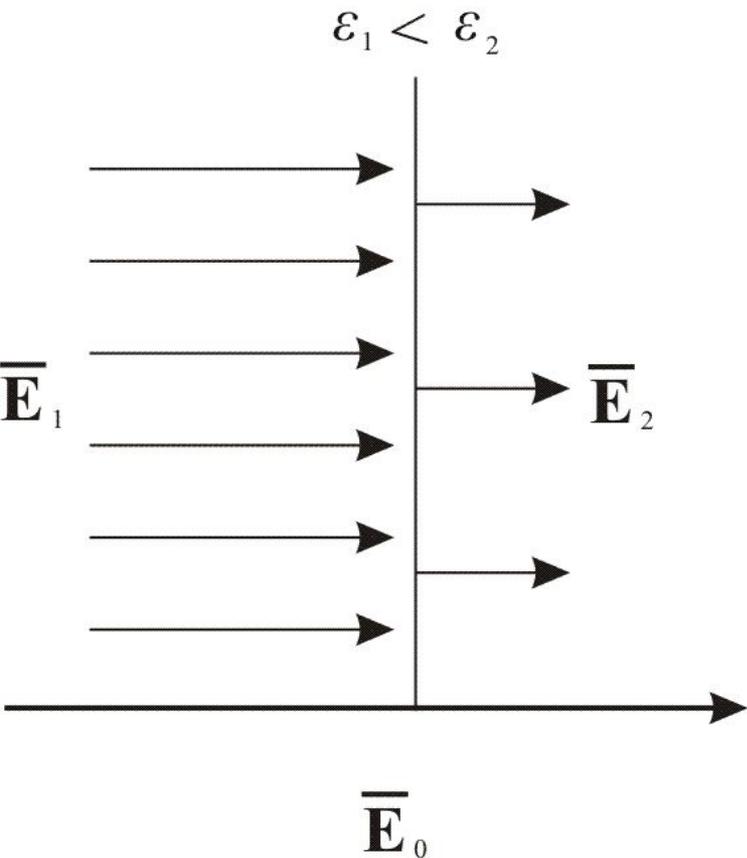
Блоки преобразователей являются составной частью системы ультразвукового контроля и конструктивно состоят из резонаторов, установленных в специальном корпусе, закрепленных на износостойчивом основании. Блоки оснащены системой подачи контактной жидкости.



Пьезоэлектрические преобразователи ПЭП 3
предназначены для
создания в
жидкостях
ультразвуковых
колебаний, их
приема с
последующим
преобразованием в
электрический
сигнал в составе
ультразвуковых
счетчиков
жидкостей и тепла.

Вектор электрического смещения \vec{D}

Имеем границу раздела двух сред с ϵ_1 и ϵ_2 ,
так что, $\epsilon_1 < \epsilon_2$.



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

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

- Главная задача электростатики – расчет электрических полей \vec{E} то есть в различных электрических аппаратах, кабелях, конденсаторах,....
- Эти расчеты сами по себе не просты да еще наличие разного сорта диэлектриков и проводников еще более усложняют задачу.

- Для упрощения расчетов была введена новая векторная величина – **вектор электрического смещения** (электрическая индукция).

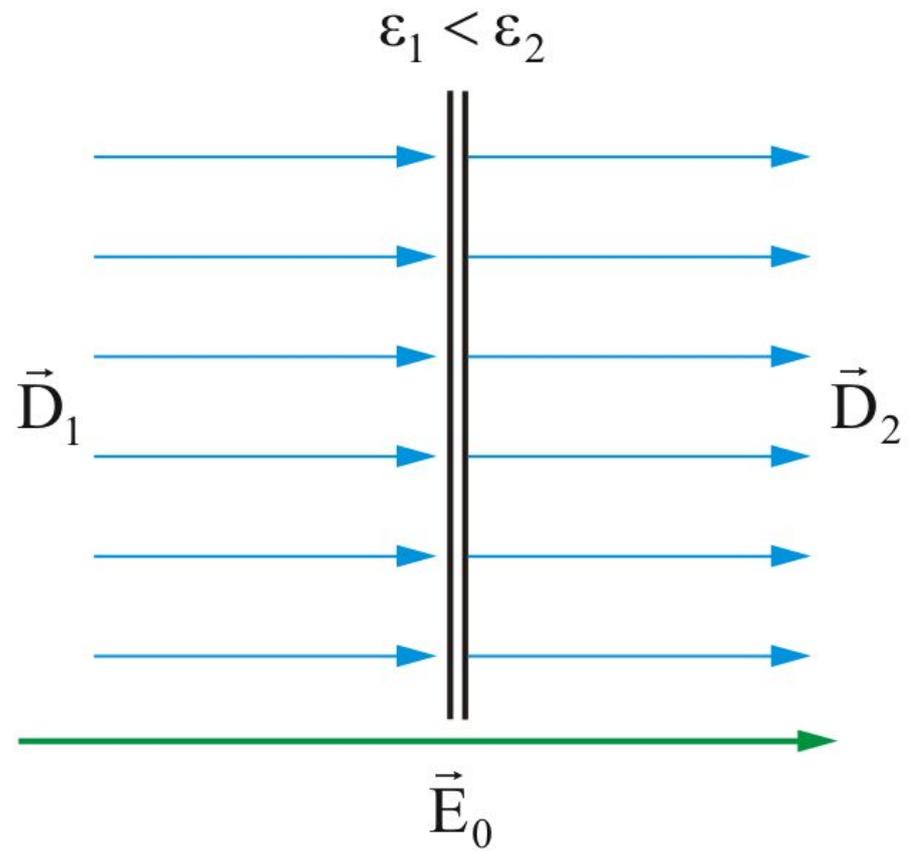
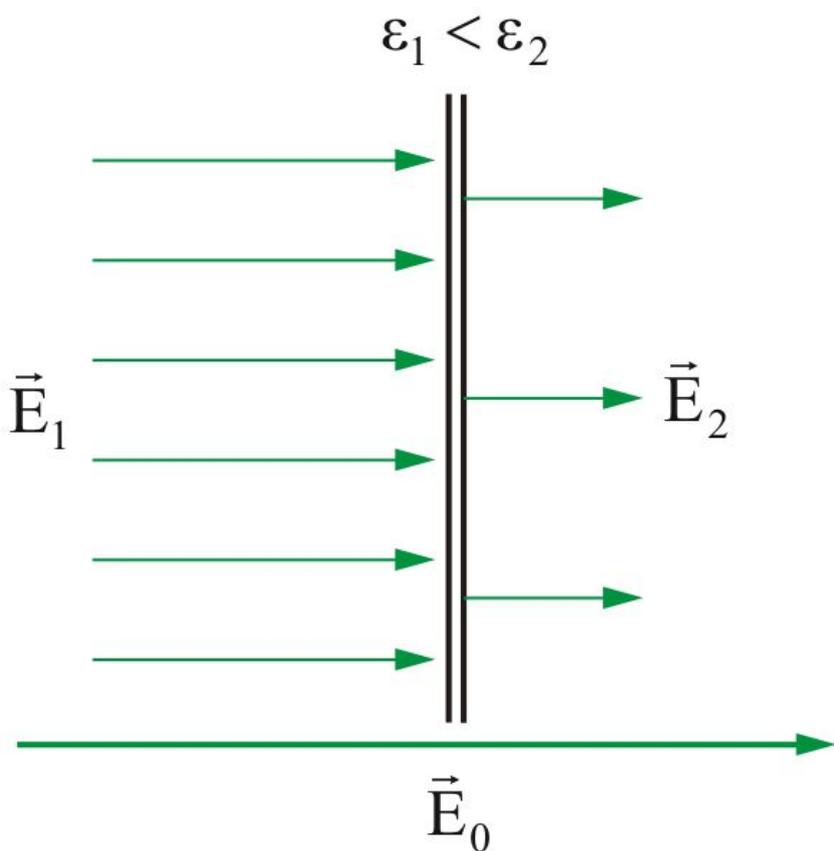
$$\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{\mathbf{E}}$$

- Из предыдущих рассуждений $E_1 \varepsilon_1 = \varepsilon_2 E_2$ 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 \vec{D}



Зная \vec{D} и ϵ , легко рассчитывать

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

$$\underline{\underline{D}} = \epsilon \epsilon_0 \underline{\underline{E}} = (1 + \chi) \epsilon_0 \underline{\underline{E}} = \epsilon_0 \underline{\underline{E}} + \chi \epsilon_0 \underline{\underline{E}}$$

отсюда можно записать:

$$\underline{\underline{D}} = \epsilon_0 \underline{\underline{E}} + \underline{\underline{P}},$$

где $\underline{\underline{P}}$ - вектор поляризации,

χ - диэлектрическая восприимчивость среды, характеризующая поляризацию единичного объема среды.

- Для точечного заряда в вакууме

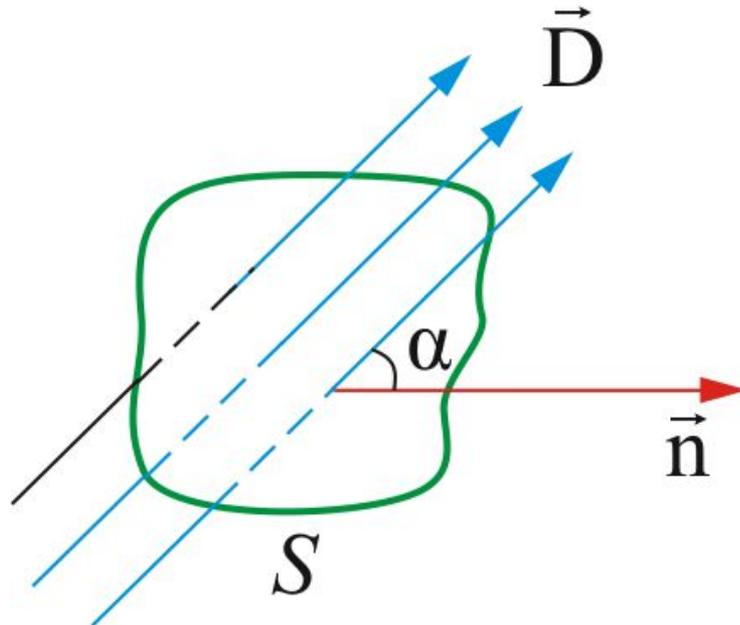
$$D = \frac{q}{4\pi r^2}.$$

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

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

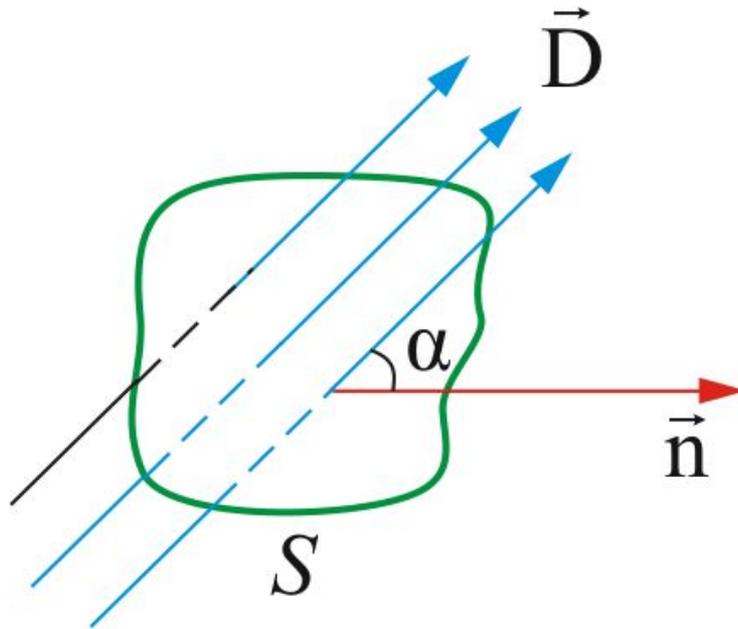
Поток вектора электрического смещения.

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



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

$$\Phi_D = DS \cos \alpha = D_n S.$$



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

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{\sum q_k}{\epsilon_0 \epsilon} \quad E_n = \frac{D_n}{\epsilon_0 \epsilon}$$

$$\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \oint_S D_n dS = \frac{\sum q_k}{\epsilon_0 \epsilon}$$

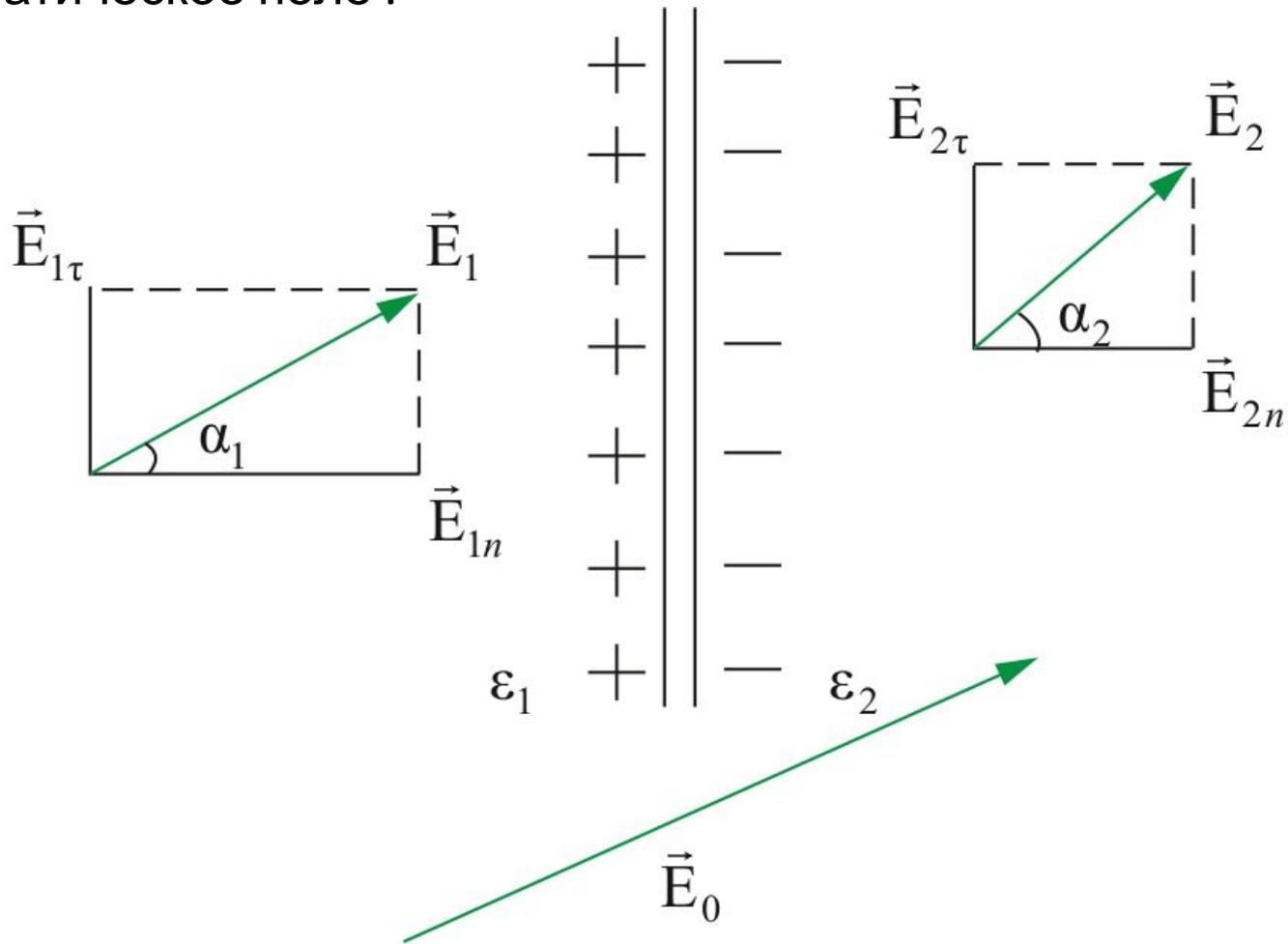
- **Теорема Остроградского-Гаусса для**

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum q_k.$$

- Поток вектора \mathbf{D} через любую замкнутую поверхность определяется **только свободными зарядами**, а не всеми зарядами внутри объема, ограниченного данной поверхностью.
- Это позволяет не рассматривать связанные (поляризованные) заряды, влияющие на \mathbf{E} и упрощает решение многих задач.
- В этом смысл введения вектора \mathbf{D} .

Изменение \vec{E} и \vec{D} на границе раздела двух диэлектриков

Рассмотрим простой случай : два бесконечно протяженных диэлектрика с ϵ_1 и ϵ_2 , имеющих общую границу раздела, пронизывает внешнее электростатическое поле .

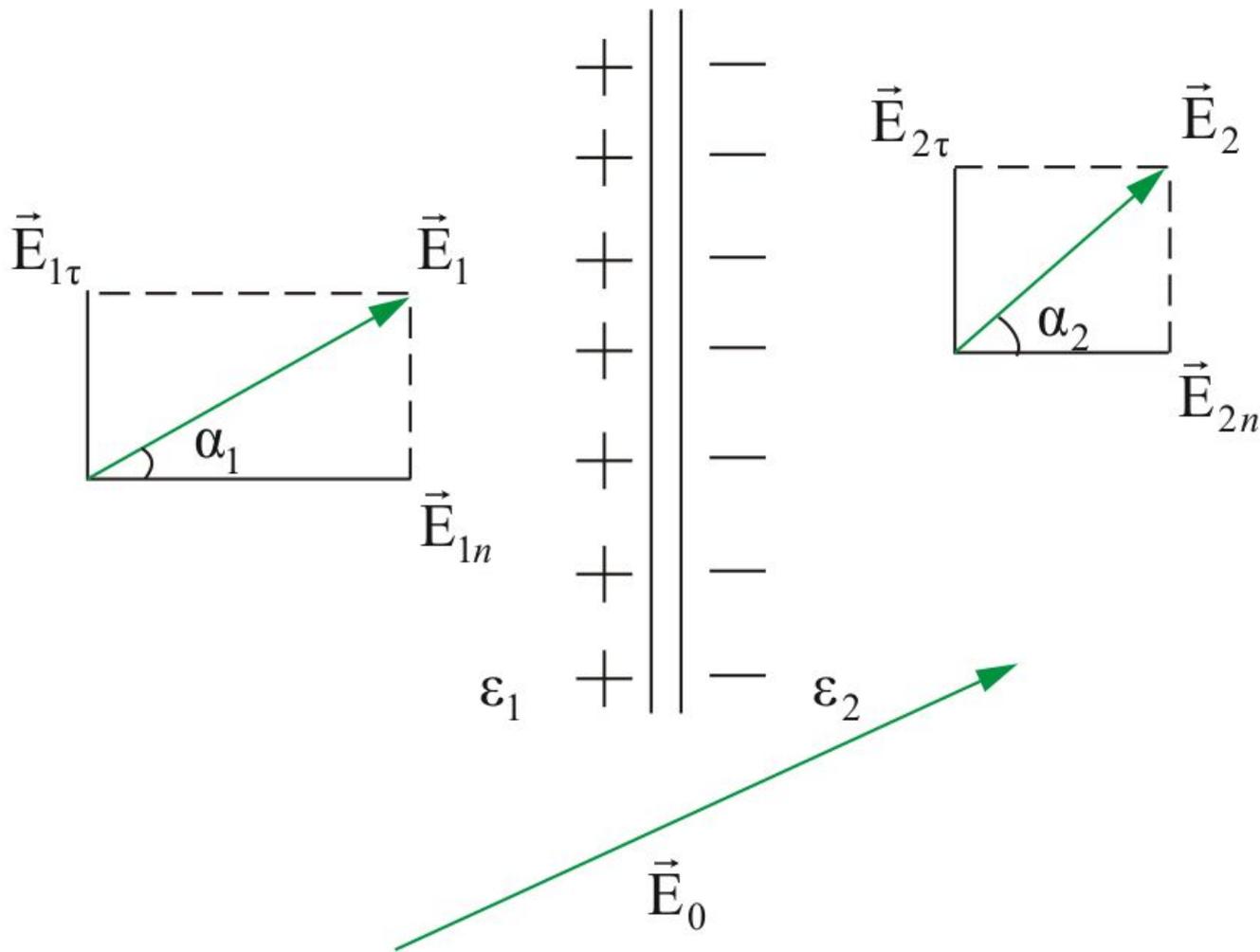


• Пусть $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$.

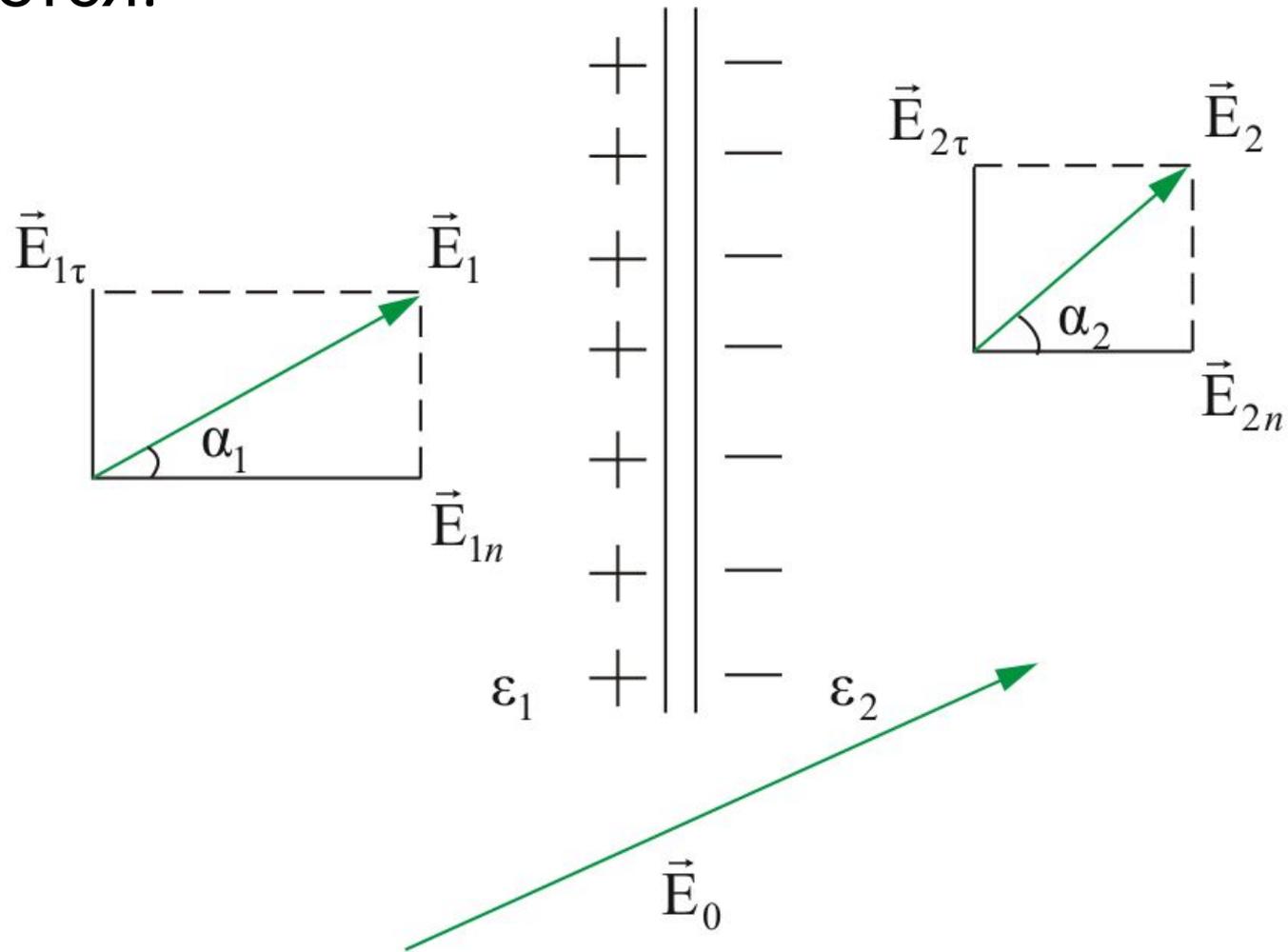
мы знаем, что

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

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



- Образовавшиеся поверхностные заряды изменяют только *нормальную составляющую* \vec{E} а тангенциальная составляющая остается постоянной, в результате направление вектора \vec{E} изменяется:



- То есть направление вектора E

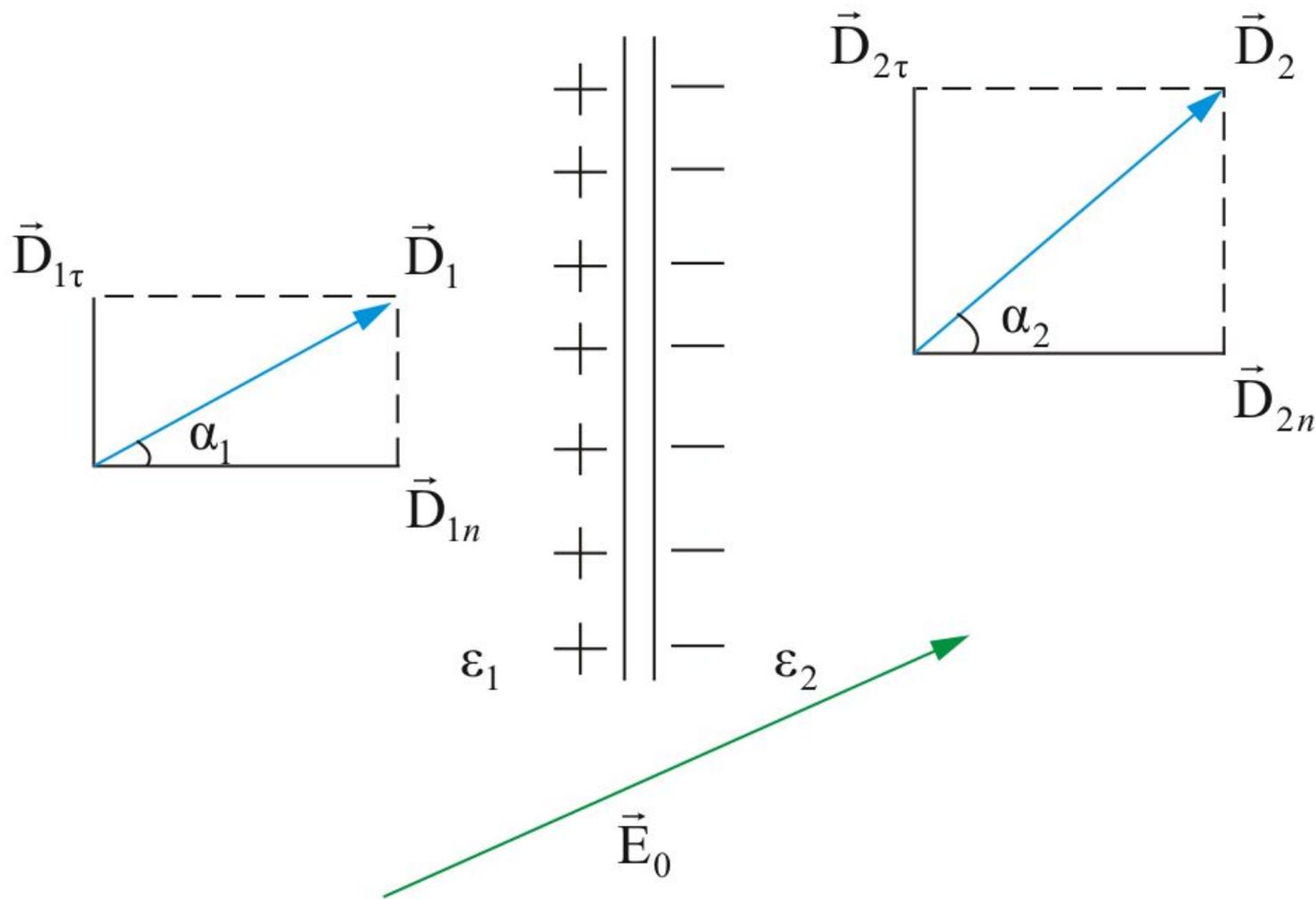
изменяется:

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

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

- ***Это закон преломления вектора напряженности электростатического поля.***

- Рассмотрим изменение вектора \vec{D} и его проекций D_n и D_τ



• Т.к. $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$ то имеем:

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

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

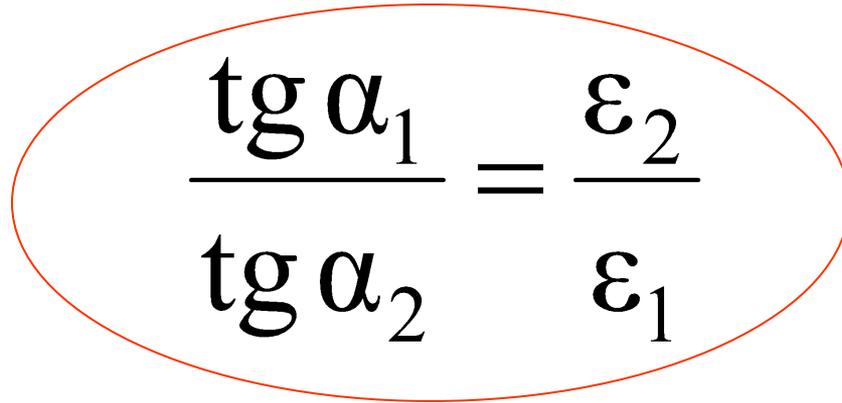
• т.е. $D_{1n} = D_{2n}$ — нормальная составляющая вектора не изменяется.

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

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

• т.е. тангенциальная составляющая вектора увеличивается в $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ раз

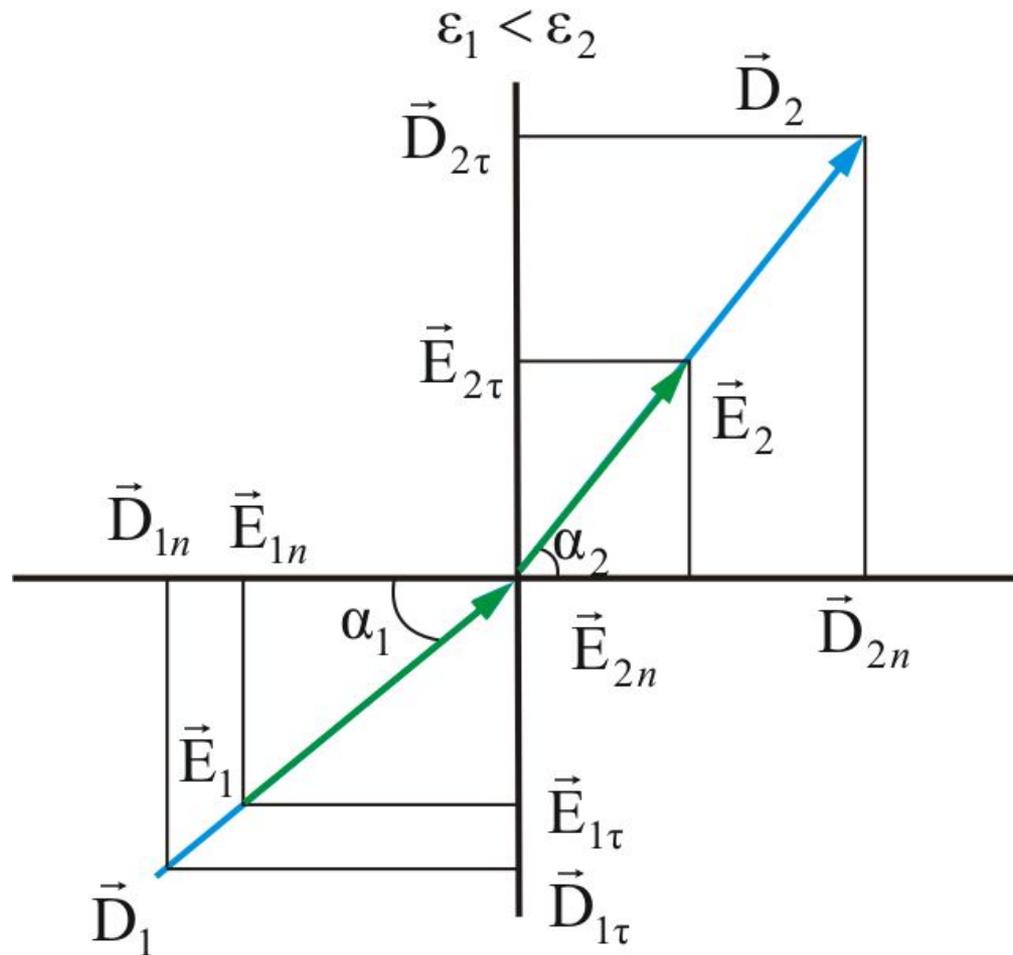
$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{D_{2\tau} D_{1n}}{D_{2n} D_{1\tau}} = \frac{D_{2\tau}}{D_{1\tau}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$


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

- **закон преломления вектора D .**

- Объединим рисунки 4.12 и 4.13 и проиллюстрируем **закон преломления для векторов E и D** :

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



- 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.

