

Лекция 23

Диполь. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Электрическое смещение. Теорема Гаусса для вектора электрического смещения. Поведение векторов напряженности и электрического смещения на границе раздела двух диэлектриков. Электреты, пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики.

Классификация веществ

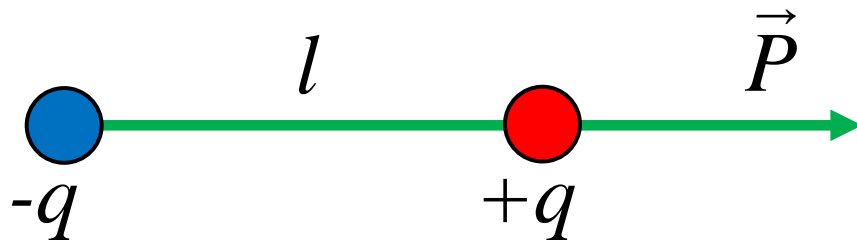
Свободными называются заряды, которые при приложении сколь угодно слабого внешнего электрического поля могут перемещаться по всему объему тела.

Связанными называются заряды, которые при наложении достаточно сильного внешнего электрического поля лишь незначительно смещаются от положений равновесия.

Классификация веществ по концентрации свободных зарядов:

- ✓ проводники – свободных зарядов $10^{22}-10^{24} \text{ см}^{-3}$;
- ✓ диэлектрики – свободных зарядов $10^8-10^{10} \text{ см}^{-3}$;
- ✓ полупроводники – свободных зарядов $10^{12}-10^{15} \text{ см}^{-3}$;

Электрический диполь



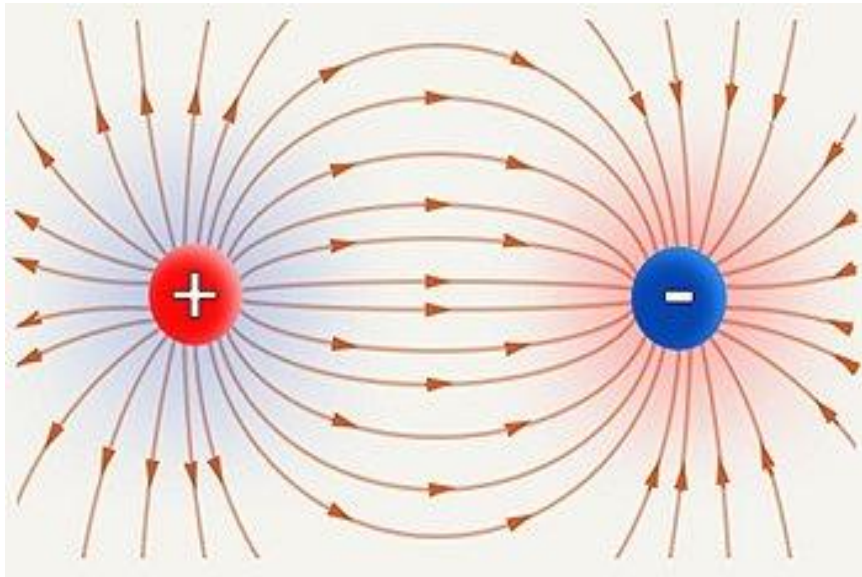
Электрический диполь – система, состоящая из равных по абсолютной величине положительного и отрицательного точечных электрических зарядов.

\vec{l} – плечо диполя (вектор, равный по модулю расстоянию и направленный от отрицательного заряда к положительному).

$\vec{P} = q\vec{l}$ – электрический момент диполя (дипольный момент)

Электрическое поле диполя

Диполь электрически нейтрален, однако он создает электрическое поле. Согласно принципу суперпозиции

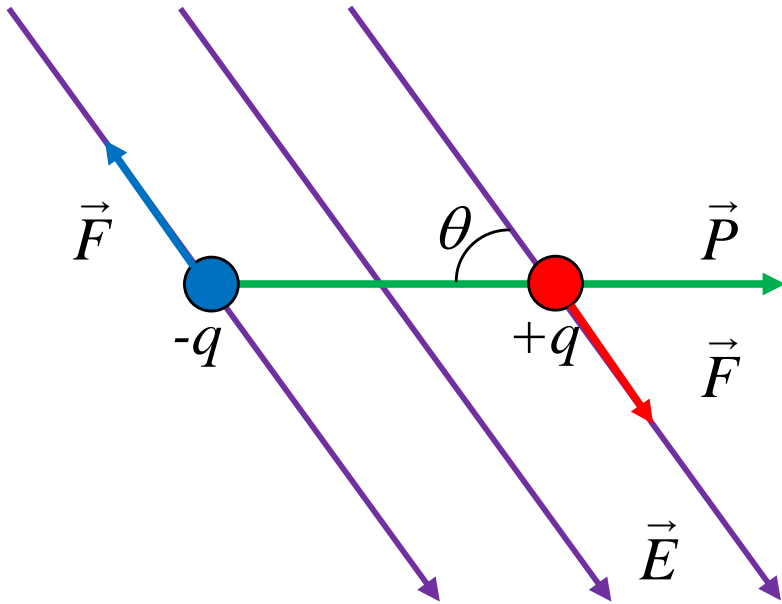


$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

Если $r \gg l$, то диполь можно считать точечным. В этом случае поле диполя убывает гораздо быстрее, чем поле точечного заряда.

$$E \sim \frac{P}{r^3}$$

Диполь в электрическом поле



Во внешнем электрическом поле на электрический диполь действует пара сил. В однородном поле эта пара образует момент сил, который стремится повернуть дипольный момент вдоль линии напряженности. Это положение устойчиво.

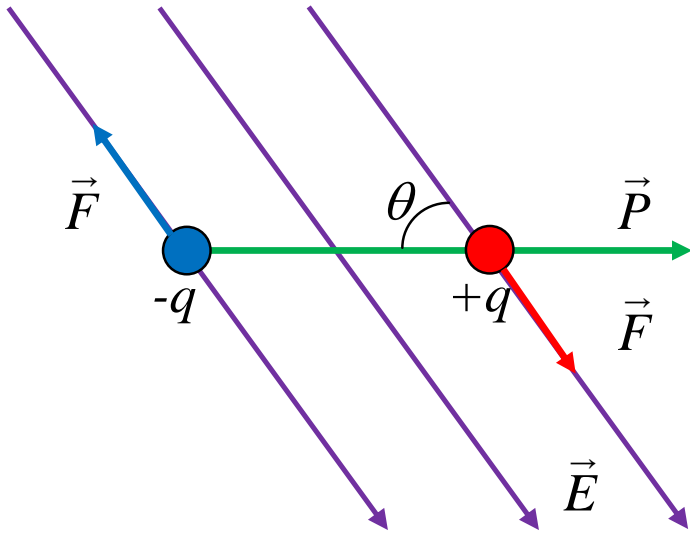
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

$$\vec{M} = [\vec{l} \times \vec{F}] = [\vec{l} \times q\vec{E}]$$

$$\vec{M} = [\vec{P} \times \vec{E}]$$

$$M = PE \sin \theta$$

Потенциальная энергия диполя



В неоднородном электрическом поле силы, действующие на положительный и отрицательный заряд, различаются, поэтому их сумма отлична от нуля и диполь будет либо втягиваться в область более сильного поля, либо выталкиваться.

Из устойчивого положения повернем диполь на малый угол. При этом нужно совершить работу против сил поля.

$$dA = Md\theta = PE \sin \theta d\theta$$

$$dA = dW$$

$$W = -PE \cos \theta = -(\vec{P}, \vec{E})$$

$$W(0) = -PE$$

$$W(\pi/2) = 0$$

$$W(\pi) = PE$$

Строение диэлектриков

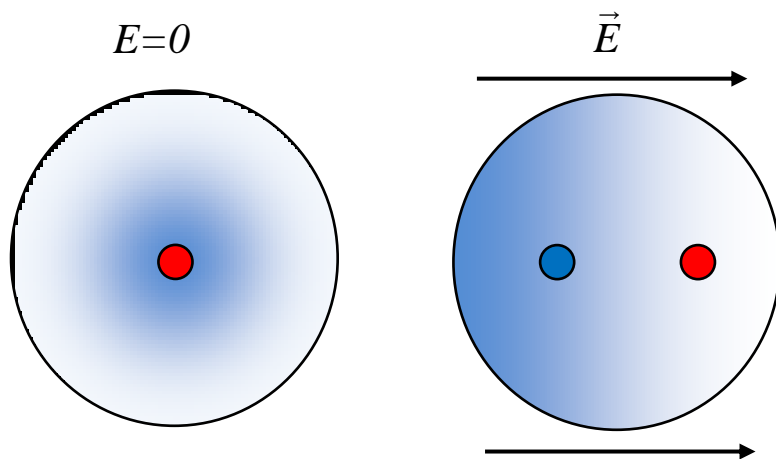
Диэлектрики состоят из атомов и молекул. Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронных оболочек. В целом атом электрически нейтрален, поскольку заряды ядра и электронов равны, однако молекулу можно рассматривать как электрический диполь.

По строению диэлектрики можно разделить на три класса:

- ✓ неполярные диэлектрики,
- ✓ полярные диэлектрики,
- ✓ ионные диэлектрики.

Неполярные диэлектрики: O_2 , H_2 , C_6H_6 , ...

Если молекулы обладают симметричным строением, то в отсутствии внешнего электрического поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают. Дипольный момент таких молекул равен нулю, а диэлектрик, состоящий из таких молекул, называется неполярным.



Наведенный упругий дипольный момент

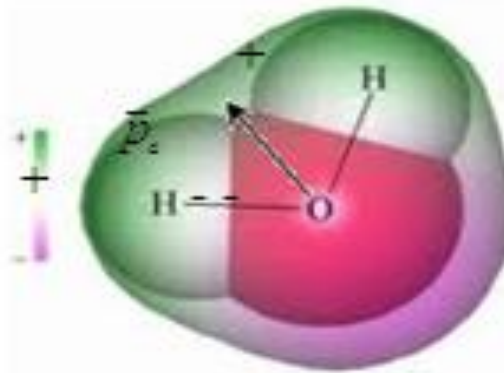
$$\vec{P} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\alpha = 4\pi r^3 \quad \text{поляризуемость атома}$$

Во внешнем электрическом поле молекула теряет симметричность. Под действием сил поля положительно заряженные ядра смещаются по полю, а электронные оболочки, деформируясь, смещаются против поля. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Молекула становится диполем. Такой диполь называется упругим, поскольку он пропорционален напряженности поля. При исчезновении поля исчезает и дипольный момент.

Полярные диэлектрики: H_2O , HCl ,...

Если молекулы имеют асимметричное строение, то в отсутствие внешнего электрического поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Такие молекулы называются полярными. Их дипольный момент определяется структурой молекулы и не изменяется под действием внешних факторов. Поэтому он носит название жесткого.

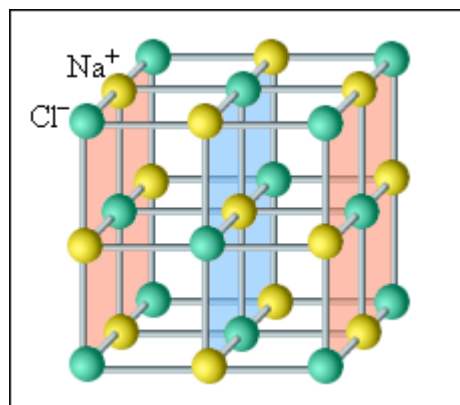


Во внешнем электрическом поле полярная молекула ориентируется дипольным моментом по полю.

Реальные молекулы во внешнем электрическом поле не только ориентируются, но и испытывают деформацию. У них появляется наведенный дипольный момент.

Ионные диэлектрики: NaCl ,...

В ионных диэлектриках нельзя выделить отдельные молекулы. Эти диэлектрики имеют кристаллическое строение. В узлах пространственной решетки располагаются ионы разных знаков. Такую кристаллическую решетку можно рассматривать как систему двух подрешеток. Одна подрешетка состоит из положительных ионов, другая – из отрицательных.

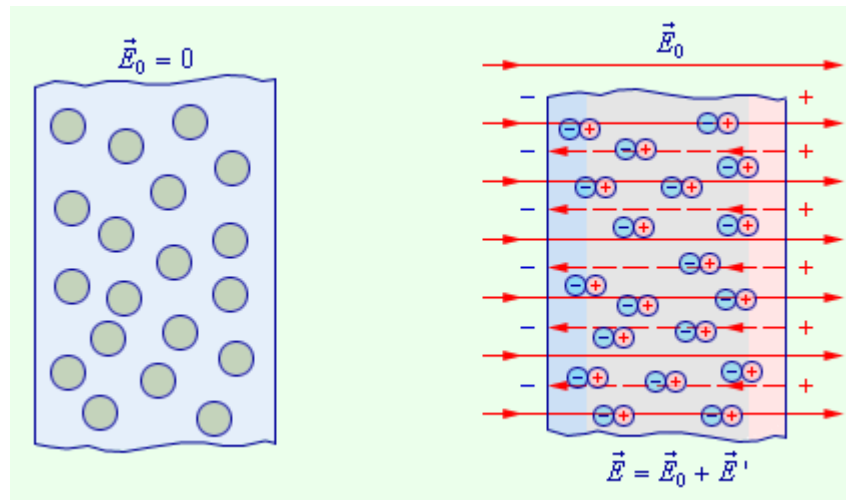


Поляризация диэлектриков

Поляризация - обратимое смещение электрических зарядов, приводящее к возникновению суммарного дипольного момента молекул, отличного от нуля, при внесении диэлектрика в электрическое поле.

Электронная (деформационная) поляризация

Электронная (деформационная) поляризация – возникновение дипольного момента в неполярных молекулах. Электронная поляризация обусловлена смещением электронной оболочки атома относительно ядра во внешнем поле.

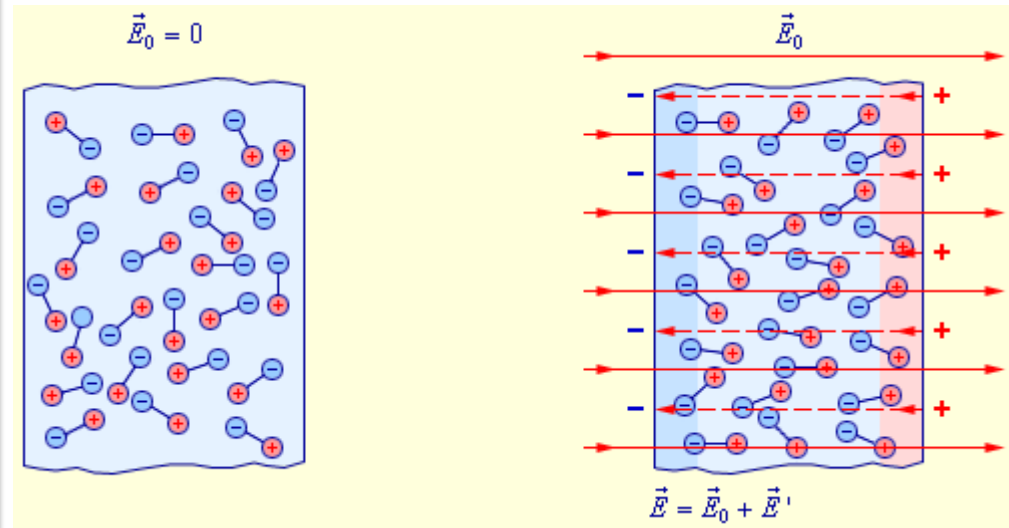


Процесс деформации электронной оболочки неполярной молекулы не зависит от температуры. Дипольный момент появляется не только у отдельной молекулы, но и у макроскопических объемов вещества.

Ориентационная поляризация

Ориентационная поляризация – возникновение дипольного момента в диэлектрике с полярными молекулами вследствие ориентации дипольных моментов молекул по направлению поля.

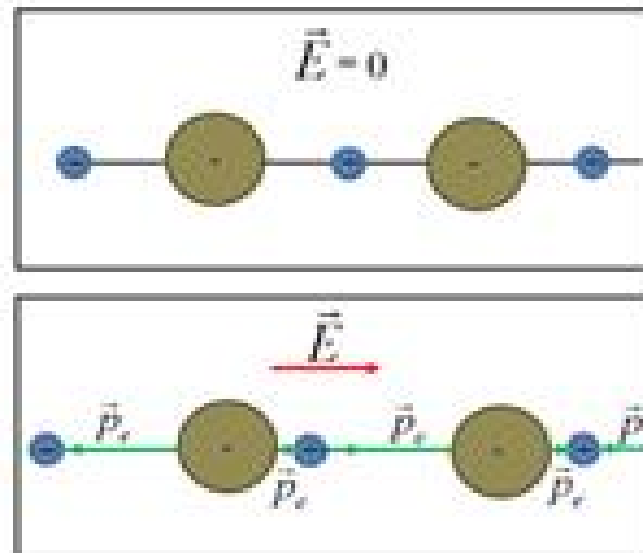
Несмотря на то, что полярные молекулы имеют дипольный момент, в любом бесконечно малом объеме вещества векторная сумма дипольных моментов равна нулю, поскольку в результате хаотического теплового движения молекул их дипольные моменты ориентированы хаотично. Электрическое поле диполей в этом случае компенсирует друг друга.



Внешнее электрическое поле пытается ориентировать дипольные моменты молекул по полю, однако тепловое движение мешает этому. Тем не менее у диполей появится преимущественная ориентация, поэтому в бесконечно малом объеме вещества векторная сумма дипольных моментов становится отличной от нуля.

Ионная поляризация

Ионная поляризация – возникновение дипольного момента в ионных кристаллах, вызванное смещением подрешеток положительных ионов вдоль поля, а отрицательных – против поля.



Вектор поляризации

Количественно степень поляризации диэлектрика в электрическом поле характеризуется вектором поляризации. Вектор поляризации – дипольный момент единицы объёма вещества.

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{P}_i$$

Объем должен быть настолько малым, чтобы внутри него электрическое поле можно было считать однородным, и вместе с тем содержать достаточно, чтобы можно было применять статистические методы исследования, количество молекул.

Для однородного неполярного диэлектрика, находящегося в однородном электрическом поле:

$$\vec{P} = n\vec{P}_i = n\alpha\epsilon_0\vec{E} \qquad \vec{P} = \kappa\epsilon_0\vec{E}$$

κ - диэлектрическая восприимчивость (поляризуемость).

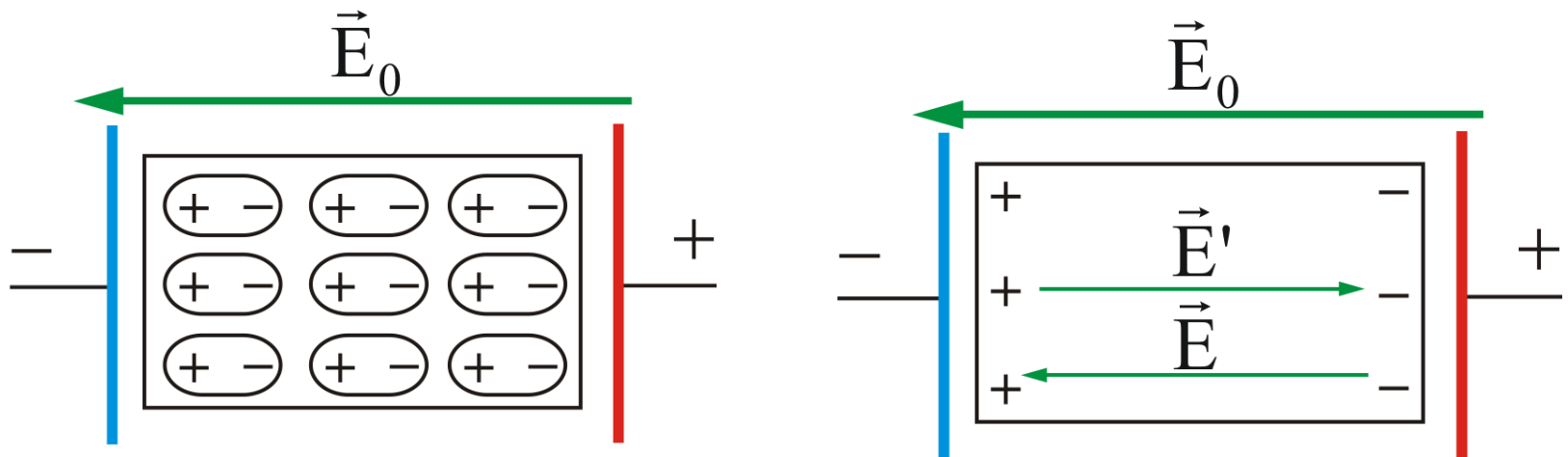
Для однородного полярного диэлектрика, находящегося в однородном электрическом поле:

$$\vec{P} = \kappa\epsilon_0\vec{E} \qquad \kappa = \frac{nP_m^2}{3\epsilon_0kT}$$

Если температура и внешнее электрическое поле не слишком велики, то диэлектрическая восприимчивость вычисляется по формуле Дебая-Ланжевена.

Поверхностные поляризационные заряды

Поляризация диэлектрика создает отличный от нуля дипольный момент в любом малом объеме вещества, оставляя его электронейтральным. Объемный заряд любого малого объема равен нулю. Внутри диэлектрика электрические заряды диполей компенсируют друг друга. Но на внешних границах диэлектрика появляются поверхностные поляризационные заряды. Они создают свое электрическое поле, направленное противоположно внешнему. В результате наложения двух полей внешнее ослабляется.



Относительная диэлектрическая проницаемость

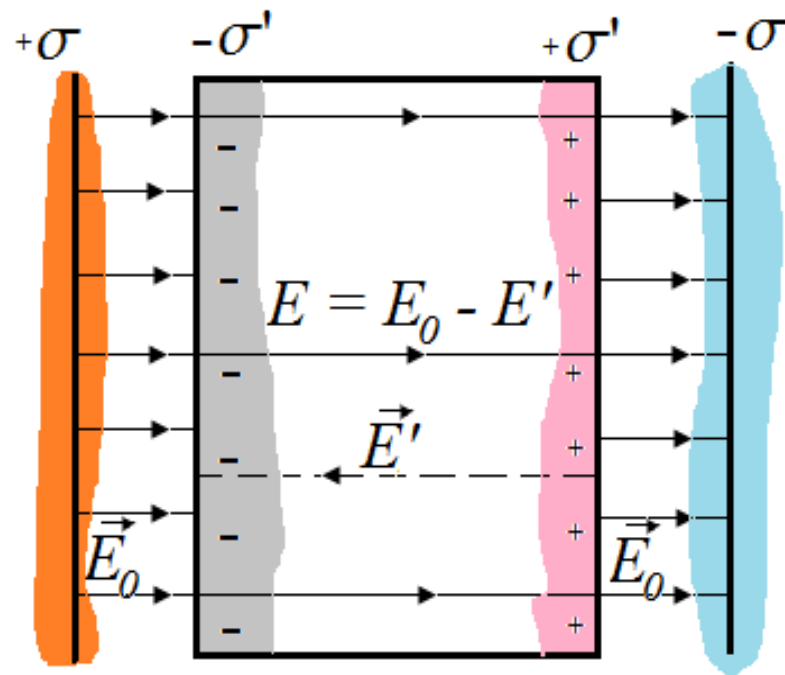
$$P = \frac{NP_0}{V} = \frac{q'd}{Sd} = \sigma'$$

$$E = E_0 - E'$$

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$$

$$P = \kappa\varepsilon_0 E$$

$$E = E_0 - \kappa E \quad E = \frac{E_0}{1 + \kappa} = \frac{E_0}{\varepsilon}$$



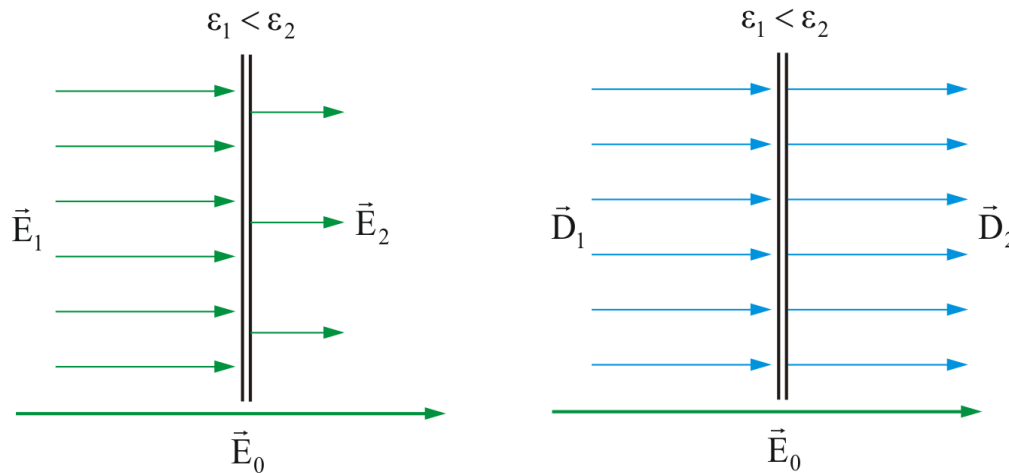
Относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз ослабляется электрическое поле вследствие поляризации диэлектрика по сравнению с вакуумом.





Вектор электрического смещения (индукции)

Напряженность электрического поля зависит от свойств среды. Кроме того, вектор напряженности претерпевает скачкообразные изменения при переходе через границу диэлектрика, поэтому для непрерывного описания электрического поля с учетом поляризационных свойств среды вводится вектор электрического смещения (электрической индукции),



$$q_p = -\oint P_n dS$$

$$\oint \epsilon_0 E_n dS = q + q_p$$

$$\oint (\epsilon_0 E_n + P_n) dS = q$$

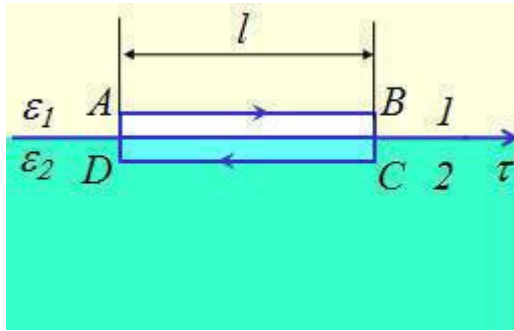
$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

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

$$\oint D_n dS = q$$

Полный поток вектора смещения в диэлектрике сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности сторонних электрических зарядов.

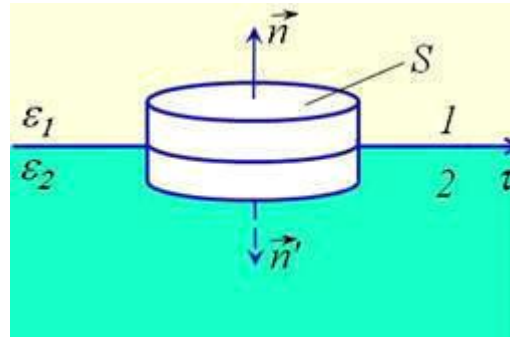
Граничные условия



$$\oint E_l dl = 0$$

$$E_{1\tau} l - E_{2\tau} l = 0$$

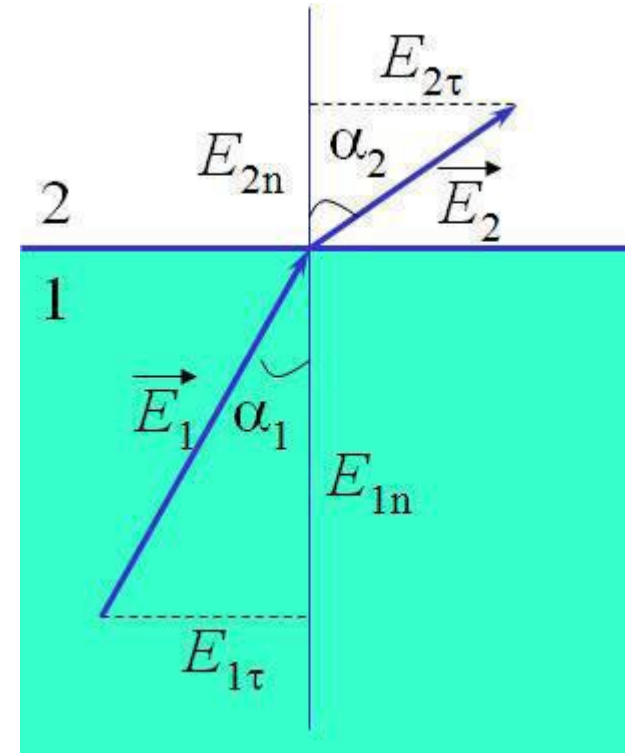
$$E_{1\tau} = E_{2\tau}$$



$$\oint D_n dS = q$$

$$D_{1n} \Delta S - D_{2n} \Delta S = 0$$

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

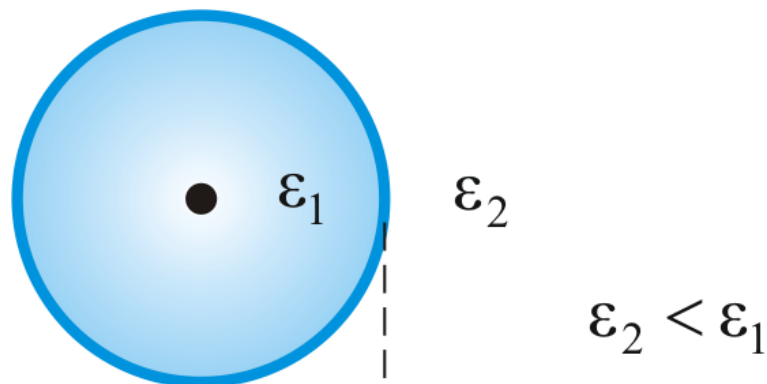


$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1\tau} = E_{2\tau} \\ \varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n} \end{array} \right.$$

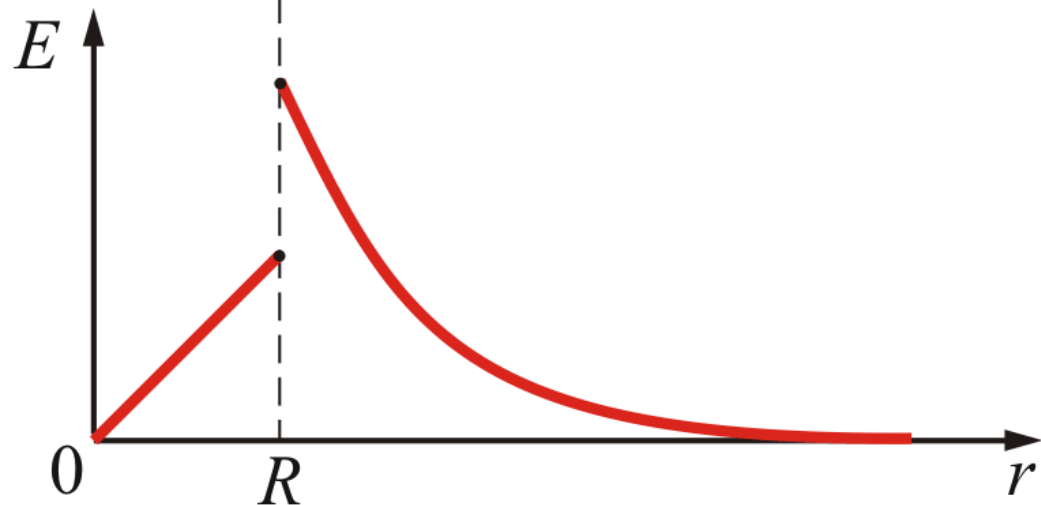
$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_2 D_{1\tau} = \varepsilon_1 D_{2\tau} \\ D_{1n} = D_{2n} \end{array} \right.$$

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

Напряженность поля диэлектрического шара



$$E(r) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r, & r < R \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_2\epsilon_0} \frac{q}{r^2}, & r \geq R \end{cases}$$



Вещество	Проницаемость
Вакуум	1
Воздух	1,0006
Углекислый газ	1,0009
Стекло	3,7-10
Вода	81
Парафин	2,0-3,0

Сегнетоэлектрики

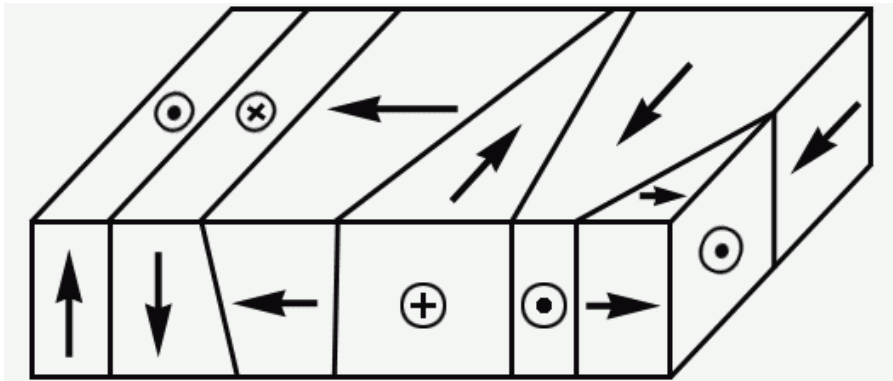
Сегнетоэлектрики – диэлектрики, обладающие спонтанной поляризацией в отсутствии электрического поля.

Основные свойства сегнетоэлектриков:

- ✓ Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков значительно превышает проницаемость диэлектриков, достигая значений 10^3-10^4 .
- ✓ Значение диэлектрической проницаемости зависит не только от внешнего поля, но и от того, каким оно было ранее.
- ✓ Диэлектрическая проницаемость, а следовательно и вектор поляризации, нелинейно зависят от напряженности внешнего электростатического поля.
- ✓ По достижению критической температуры (ее называют температурой или точкой Кюри) сегнетоэлектрические свойства исчезают.

Свойства сегнетоэлектриков объясняются тем, что в отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрики представляют собой мозаику из доменов – областей с различными направлениями спонтанной (самопроизвольной) поляризованности. Так, что в целом сегнетоэлектрик не поляризован, т.е. его дипольный момент равен нулю.

Под действием электрического поля доменные границы смещаются так, что объем доменов, поляризованных по полю, увеличивается за счет доменов, поляризованных против поля. Возникающее при этом электрическое поле доменов будет поддерживать их некоторую ориентацию и после прекращения действия внешнего поля.



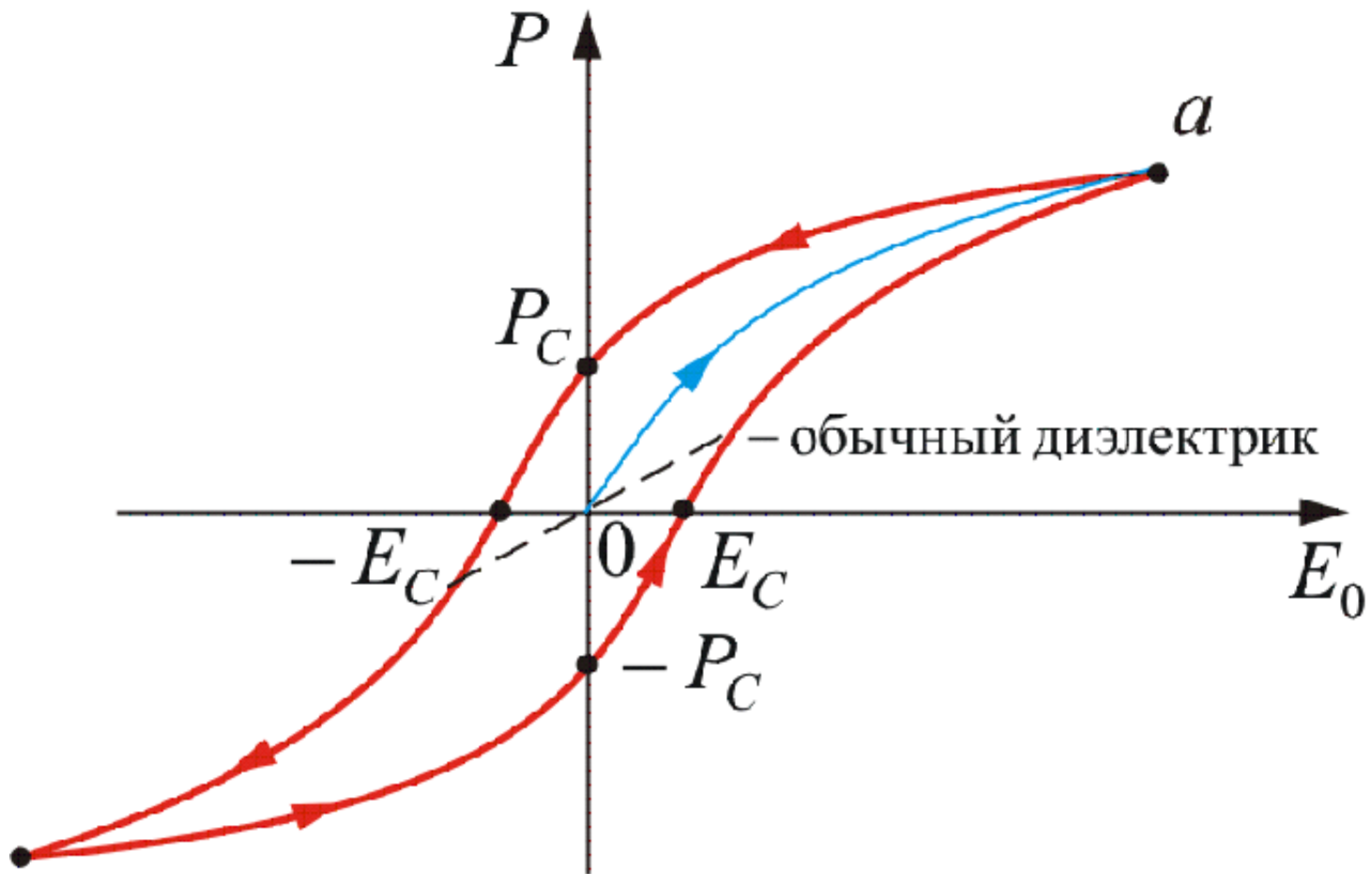
Изображение доменов BaTiO₃.
Стрелки указывают направление вектора поляризации

В сегнетоэлектриках наблюдается явление диэлектрического гистерезиса (запаздывания). С ростом напряженности внешнего электрического поля поляризованность растет, достигая при этом насыщения (a).

С уменьшением внешнего поля уменьшение поляризованности происходит по другой кривой, и в отсутствии поля сегнетоэлектрик сохраняет остаточную поляризацию (P_c). Сегнетоэлектрик остается поляризованным в отсутствие внешнего электрического поля.

Снять остаточную поляризованность можно приложив внешнее электрическое поле обратного направления ($-E_c$), называемое коэрцитивной силой. Полный цикл образует петлю гистерезиса.

Гистерезис

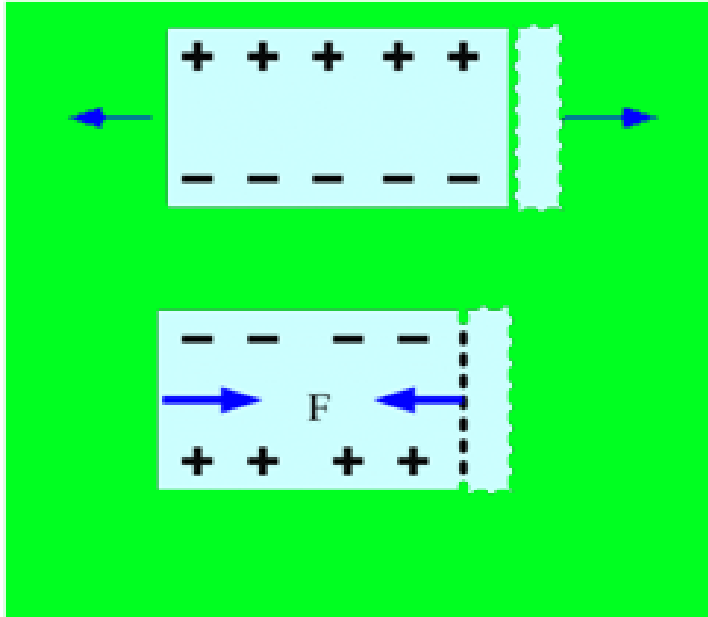


E_C – коэрцитивная сила, P_C – остаточная поляризация

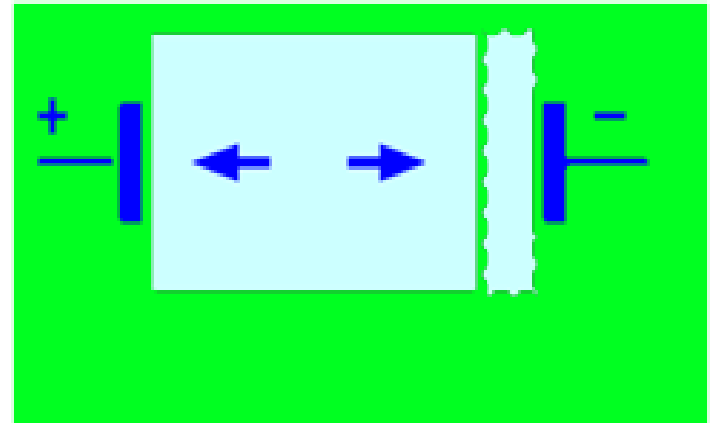
Пьезоэлектрики

Пьезоэлектрики – диэлектрики, поляризующиеся при механическом воздействии.

Прямой пьезоэффект



Обратный пьезоэффект



Электреты

Электреты – диэлектрики, сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, вызвавшего поляризацию.

Стабильные электреты получают:

- ✓ нагревая, а затем охлаждая диэлектрик в сильном электрическом поле (термоэлектреты);
- ✓ освещая в сильном электрическом поле (фотоэлектреты);
- ✓ подвергая радиоактивному облучению (радиоэлектреты);
- ✓ поляризацией в магнитном поле (магнитэлектреты).