

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2024 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Сапугольцева Ольга Владимировна

# ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

*Поляризацией* называется процесс смещения упруго связанных зарядов или ориентация диполей под действием электрического поля.

*В результате поляризации в объеме диэлектрика возникает суммарный электрический момент  $P$ , отличный от нуля.*

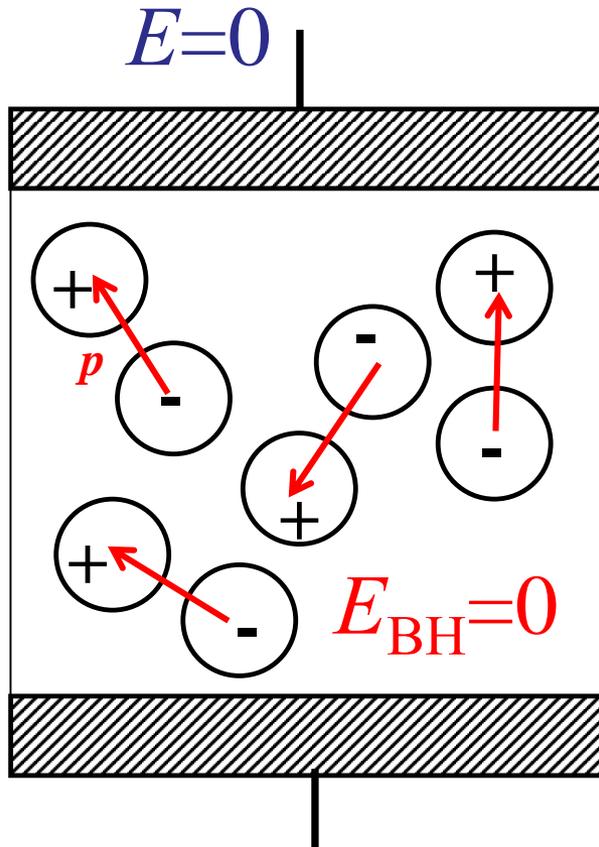
*Поляризованностью (вектором поляризации)*

$P$  называется индуцированный электрический момент единицы объёма диэлектрика:

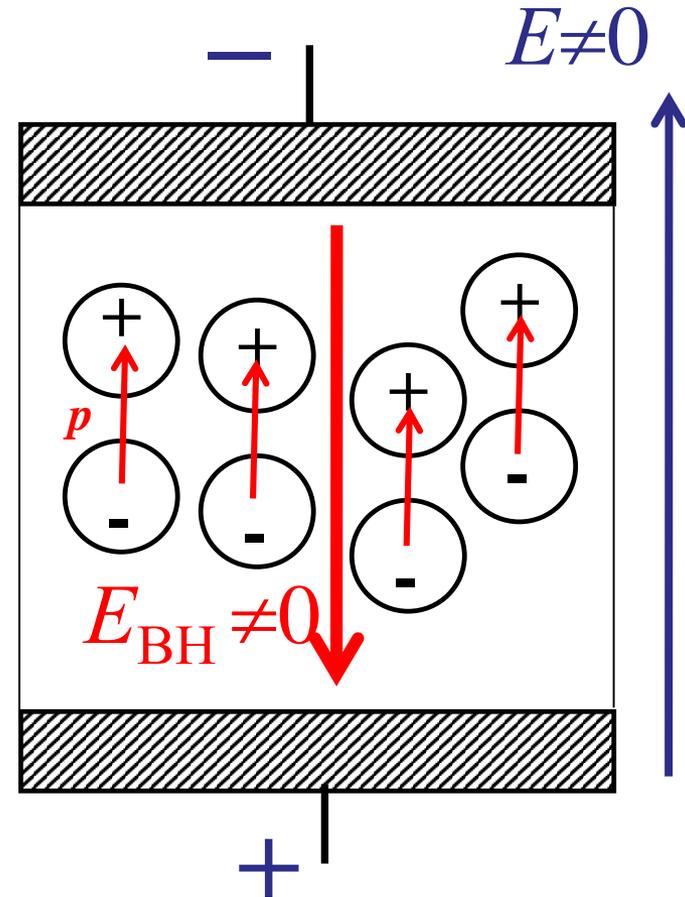
$$P = dp/dV$$

# ПОЛЯРИЗОВАННОСТЬ $P$

$$\sum p = P = 0$$



$$\sum p = P \neq 0$$



Система, состоящую из электродов, между которыми находится диэлектрик и к указанным электродам подводится напряжение

# Поляризация диэлектриков

- В любом веществе, независимо от наличия или отсутствия в нем свободных носителей заряда, всегда имеются **связанные заряды**: *электроны оболочек атомов, ионы*.
- Под действием **внешнего эл. поля** связанные заряды в диэлектрике **смещаются** из своих равновесных состояний: *положительные в направлении* вектора напряженности поля  $E$ , *отрицательные в обратном направлении*.
- В результате этого каждый элементарный объем диэлектрика  $dV$  приобретает индуцированный эл. момент  $dp$ . **Образование индуцированного эл. момента  $P$**  в диэлектрике и представляет собой явление **поляризации**.

Для линейных (*не активных*) диэлектриков:

$$P = \varepsilon_0 \chi E, \text{ [Кл/м}^2\text{]}$$

$\chi$  – диэлектрическая восприимчивость (безразмерная величина)

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная  
(*абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума*)

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость  
вещества

$\varepsilon = 1 + \chi$  – относительная диэлектрическая  
проницаемость

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  показывает во сколько раз напряженность электрического поля в диэлектрике  $E$  меньше напряженности поля в вакууме  $E_0$ :

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

Электрическое смещение (электрическая индукция)  $D$   
[Кл/м<sup>2</sup> ]:

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

Сила притяжения между пластинами конденсатора  $F$ :

$$F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2 S}{2} = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon S}$$

Где:

$S$  – площадь пластины конденсатора [м<sup>2</sup>];

$E$  – напряженность электрического поля [В/м];

$q$  – заряд пластины конденсатора [Кл].

Напряженность электростатического поля,  
создаваемого зарядом  $E$ :

$$E = \frac{F}{q} = \frac{q}{4\pi \cdot r^2 \cdot \varepsilon_0}$$

Где:

$F$  – сила, с которой поле действует на заряд [Н];

$r$  – расстояние от заряда до выбранной точки поля [м];

$q$  – заряд, образующий поле [Кл].

Поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора  $\sigma_1$  :  $\sigma_1 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E$  [Кл/м<sup>2</sup>].

Вследствие *поляризации* диэлектрика при подключенном источнике постоянного напряжения на пластинах конденсатора удерживается дополнительный заряд  $\sigma_d$ , так что  $\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_0$ , где  $\sigma_0$  – поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора в отсутствие диэлектрика.

Поверхностная плотность заряда на диэлектрике  $\sigma_2$ :  $\sigma_2 = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E$  [ Кл/м<sup>2</sup> ], где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость.

Работа по раздвижению (сдвигению) пластин  $A$ :

$$A = W_2 - W_1.$$

Энергия конденсатора может быть выражена как ( $W_1$  – до зарядки,  $W_2$  – после зарядки):

$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2} \qquad W_2 = \frac{C_2 U_2^2}{2}$$

Если *после зарядки* конденсатор отключают от источника, то *заряд на обкладках не изменится*.

Объемная плотность энергии конденсатора  $w$ :

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$$

$w$  – плотность энергии, Дж/м<sup>3</sup>

$V$  – объем, м<sup>3</sup>

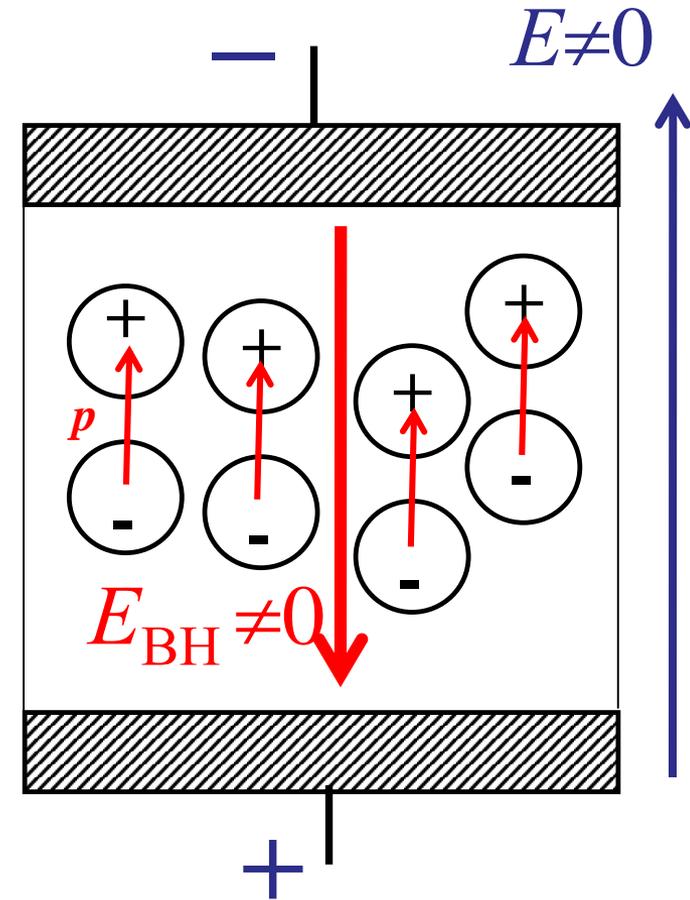
$E$  – напряженность, В/м

$$\varepsilon = Q/Q_0 = (Q_0 + Q_d)/Q_0 = 1 + Q_d/Q_0 \text{ всегда } > 1$$

Для конденсатора к обкладкам которого приложено напряжение  $U$   $Q = CU$  и значит:

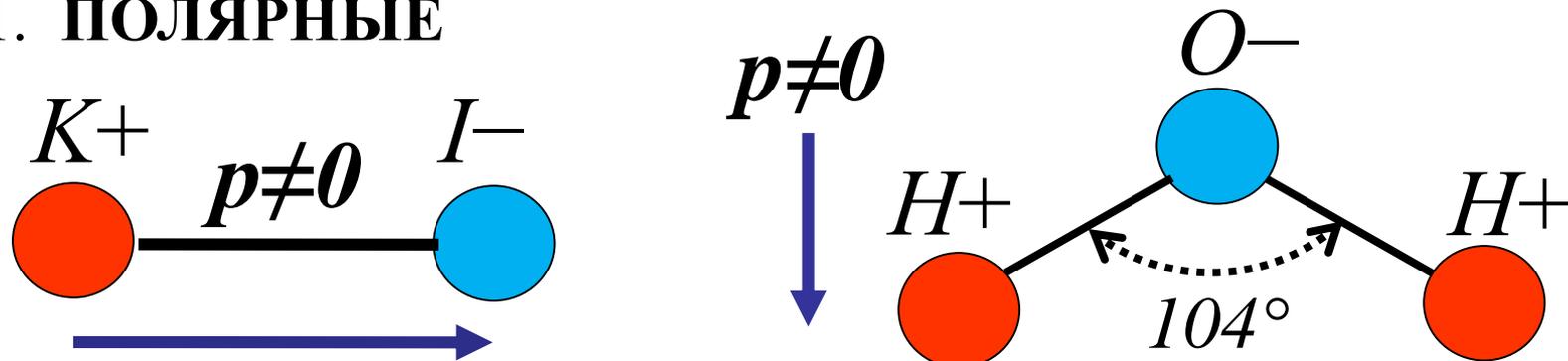
$$\varepsilon = C/C_0.$$

$\varepsilon$  показывает во сколько раз ёмкость  $C$  конденсатора, между обкладками которого диэлектрик, больше ёмкости  $C_0$  конденсатора, между обкладками которого вакуум.

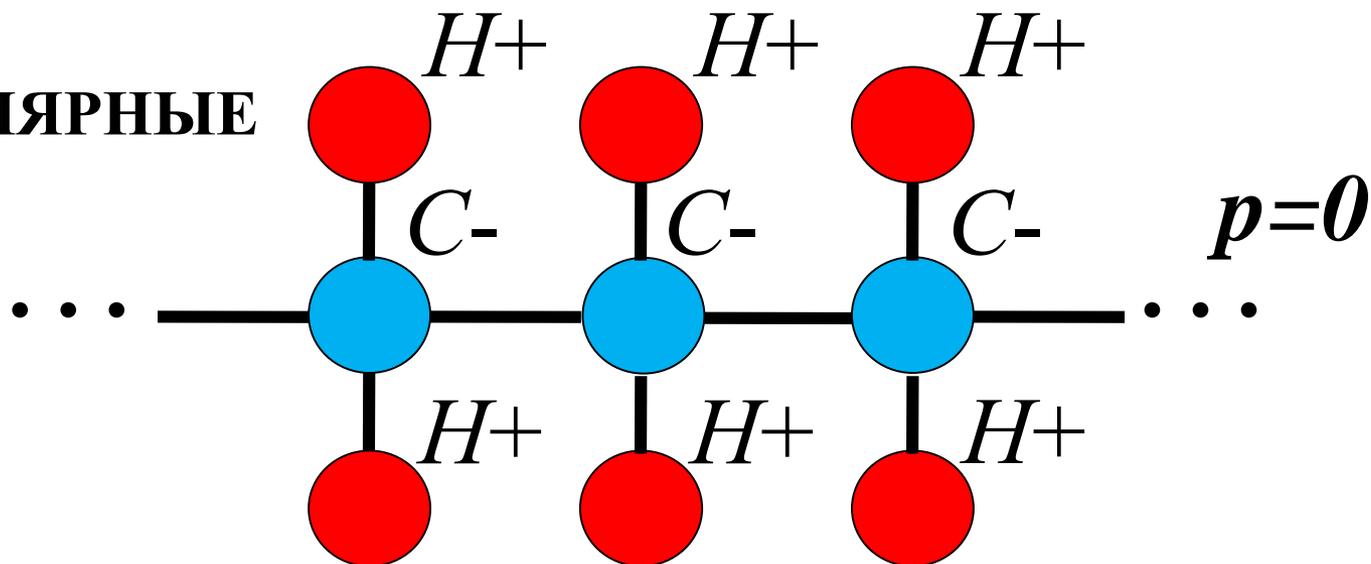


# По способности к поляризации диэлектрики подразделяются на:

## 1. ПОЛЯРНЫЕ



## 2. НЕПОЛЯРНЫЕ



Различают **2 ВИДА** поляризации:

**1. БЫСТРЫЕ** (упругие):

*Малое время установления  $\tau$ .*

*Не приводят к потерям энергии при промышленных частотах.*

- Электронная,
- Ионная упругая,
- Дипольная упругая.

**2. МЕДЛЕННЫЕ** (неупругие, релаксационные):

*Большое время установления  $\tau$ .*

*Приводят к потерям энергии и нагреву диэлектрика.*

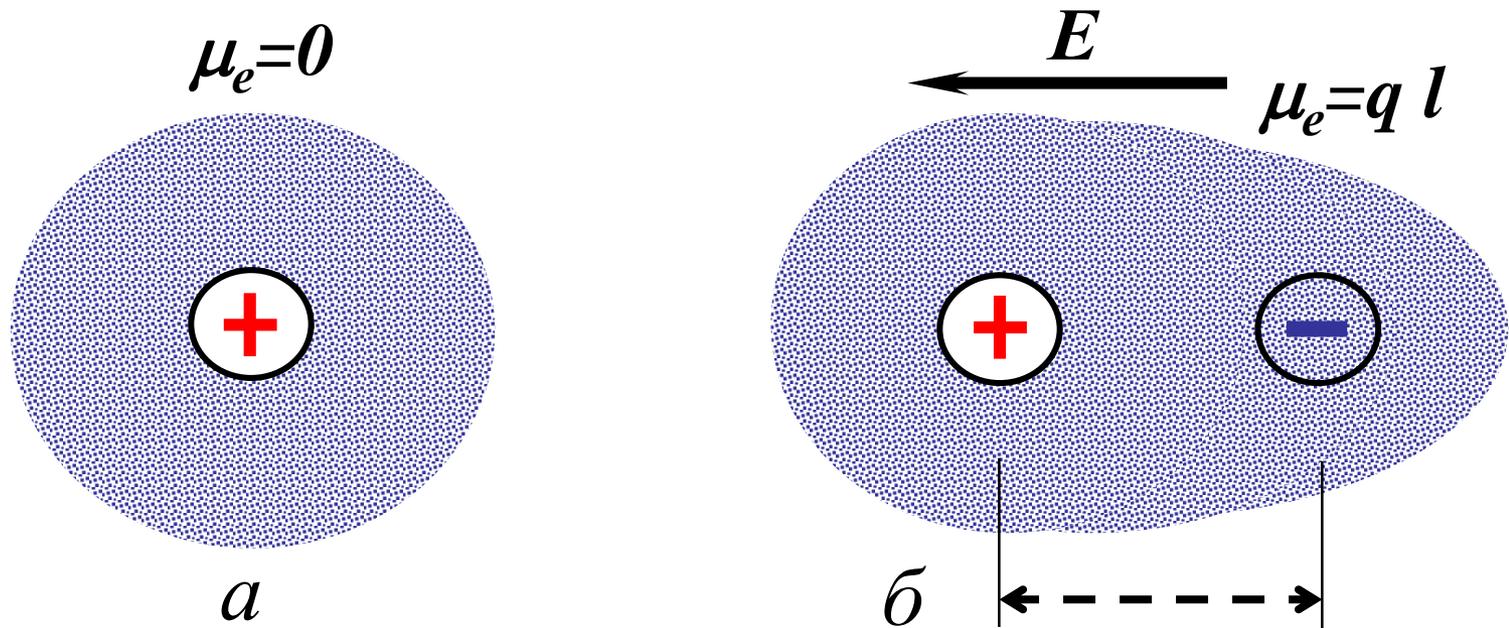
- Ионно-релаксационная,
- Дипольно-релаксационная,
- Миграционная (междуслойная),
- Спонтанная.

# Электронная поляризация

Наблюдается во всех диэлектриках.  $\tau \sim 10^{-15}$  с.

Не зависит от частоты электромагнитного поля вплоть до частот оптических колебаний.

Не приводит к потере энергии поля.

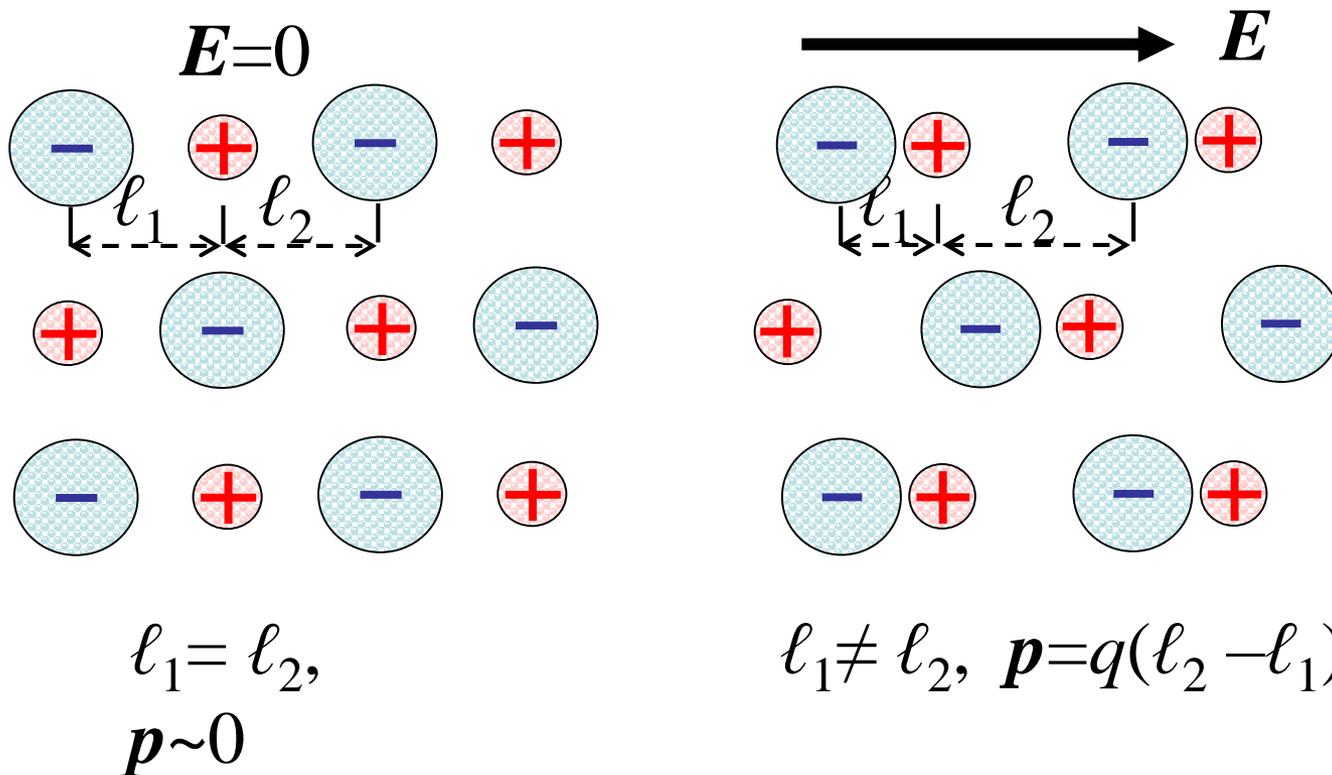


Смещение центра заряда электронного облака относительно положительно заряженного ядра под действием внешнего эл. поля.

# Ионная упругая поляризация

Характерна для ионных кристаллов с плотной упаковкой ионов ( $NaCl$ ,  $LiF$  и т.п.).  $\tau \sim 10^{-13}$  с

Не связана с потерями энергии и не зависит от частоты, вплоть до частот инфракрасного диапазона.

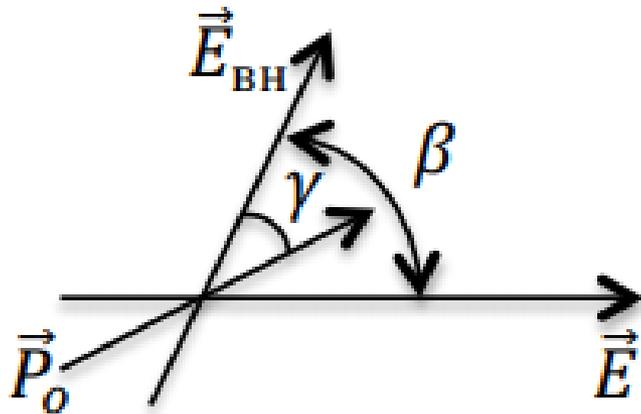


Упругое смещение связанных ионов из положений равновесия на расстояния, не превышающие постоянную кристаллической решетки.

# Дипольная упругая поляризация

Характерна для твердых диэлектриков – полярных кристаллов.

Вклад дипольной упругой поляризации может обуславливать анизотропию (разные свойства) диэлектрической проницаемости.



Упругий поворот диполя  $P_0$  во внешнем эл. поле  $E$ .

Во многих диэлектриках имеются молекулы, которые обладают собственным электрическим моментом  $P_0$ , т.е. представляют собой диполи даже в отсутствии внешнего эл. поля.

# Ионно-релаксационная поляризация

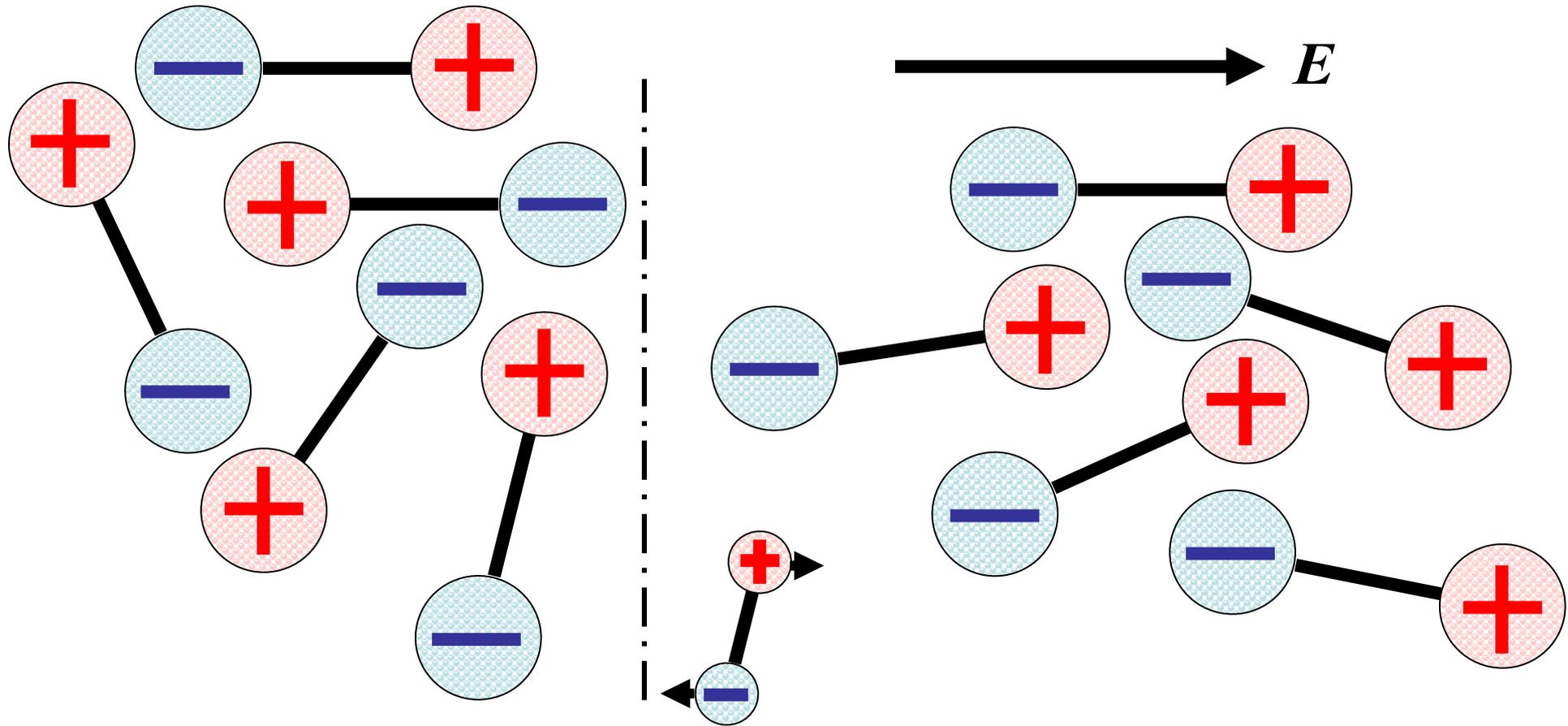
Наблюдается в *ионных диэлектриках аморфного строения* (стекла, керамика и т.д.), а также в *неорганических кристаллических диэлектриках с неплотной упаковкой ионов* (рыхлого строения).

Заключается в *смещениях слабосвязанных ионов* под действием внешнего электрического поля на расстояния, *превышающие амплитуду ангармонических тепловых колебаний.*

Поляризация заметно усиливается с повышением температуры за счет ослабления сил межионного взаимодействия.

# Дипольно-релаксационная поляризация

В большинстве случаев  $\tau \sim 10^{-6} - 10^{-10}$  с.



Заключается в повороте (ориентации) дипольных молекул в направлении внешнего электрического поля.

# Дипольно-релаксационная поляризация

- ВОЗМОЖНА, если *межмолекулярные взаимодействия* не мешают диполям ориентироваться ВДОЛЬ ПОЛЯ.
- С увеличением температуры взаимодействие между диполями ослабляется, что должно усиливать дипольно-релаксационную поляризацию. Однако в то же время *возрастает энергия хаотического теплового движения* молекул, что *уменьшает ориентирующее влияние* внешнего эл. поля.

# Дипольно-релаксационная поляризация

- Величина поляризации с увеличением  $T$  *вначале возрастает*, пока *ослабление сил межмолекулярного взаимодействия преобладает* над возрастанием интенсивности хаотического теплового движения молекул.
- Когда *интенсивность теплового движения молекул будет преобладать* (тепловая энергия «разбрасывает» диполи), величина поляризации *будет уменьшаться*.

Наблюдается в полярных газах, жидкостях и в некоторых твердых диэлектриках.

В органических диэлектриках наблюдается ориентация не самой молекулы, а имеющихся в ней полярных *радикалов* по отношению к молекуле.

Такую поляризацию называют *дипольно-радикальной*.

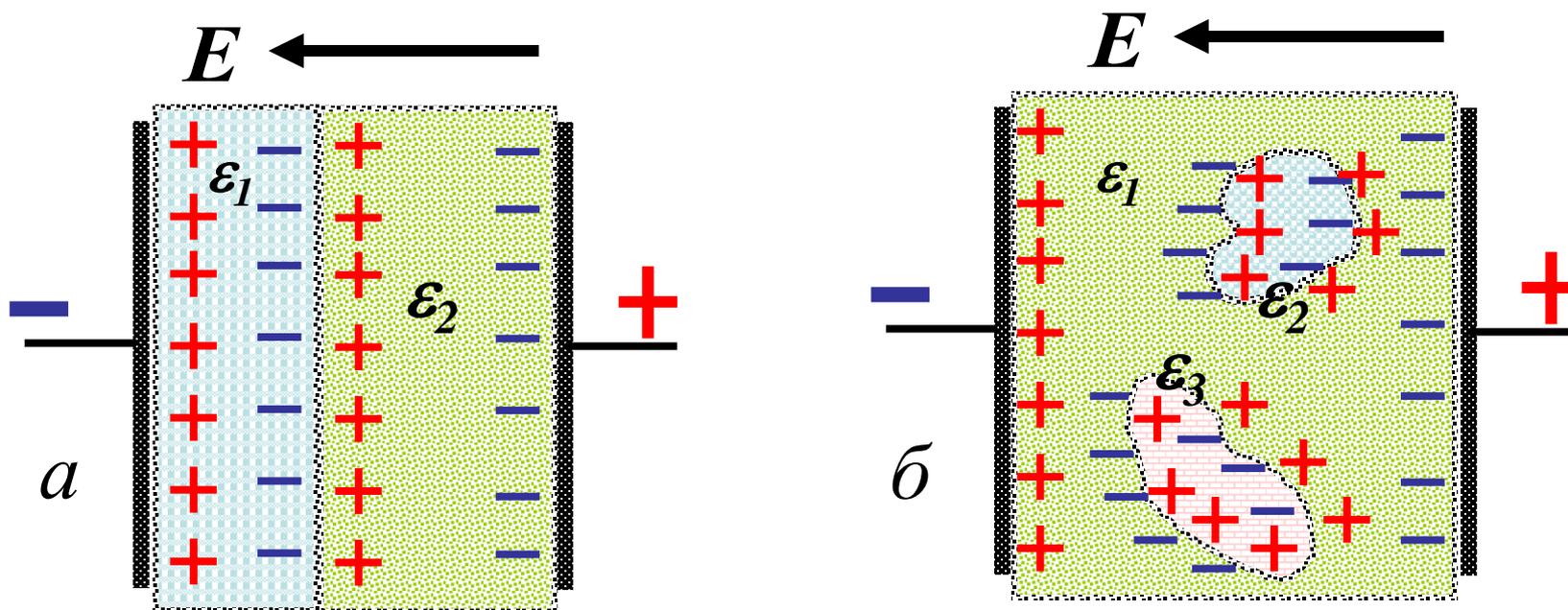
При снятии приложенного  $E$  ориентация дипольных моментов  $p$  нарушается хаотическим тепловым движением молекул, и суммарная поляризованность  $P$  спадает с течением времени  $t$ :

$$P(t) = P_0 \exp(-t/\tau)$$

*Радикалы* - частицы, содержащие один или несколько неспаренных электронов на внешней электронной оболочке.

# Миграционная поляризация (междуслойная, структурная)

Наблюдается в диэлектриках, содержащих проводящие и полупроводящие включения или слои с различной проводимостью, в композиционных материалах. Время установления: секунды, минуты и даже часы.



Перераспределение зарядов в слоистых диэлектриках (а) и диэлектриках с включениями (б).

# Миграционная поляризация (междуслойная, структурная)

- При внесении *неоднородных материалов* в эл. поле, *свободные электроны и ионы* проводящих и полупроводящих включений *начинают перемещаться* в пределах каждого включения, образуя *поляризованные области* на границе раздела сред.
- Этот вид поляризации обычно возможен лишь на *низких частотах* в виде включенного последовательно с емкостью  $C_{ст}$  активного сопротивления  $R_{ст}$ .

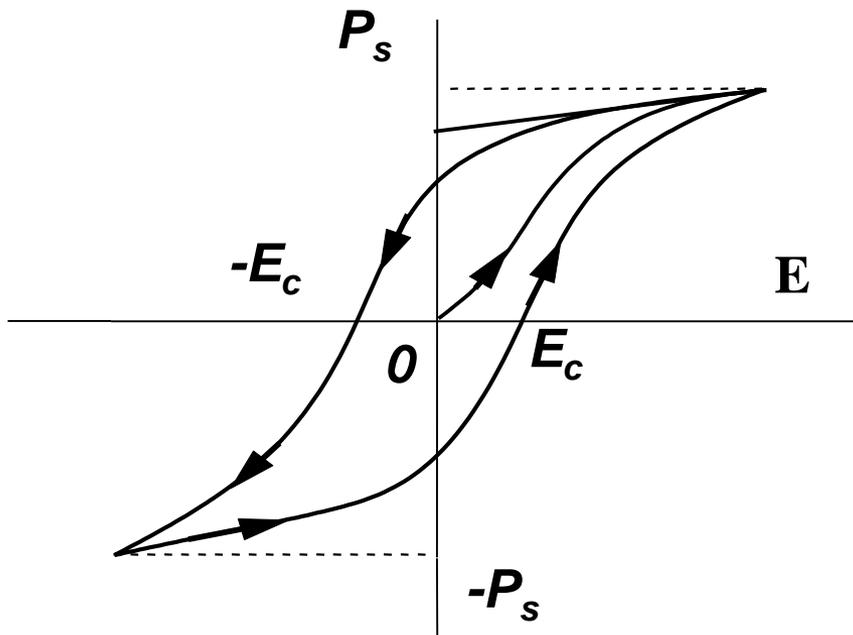
# Спонтанная поляризация

Возникает без внешних воздействий в *активных* диэлектриках в виде *доменов*.

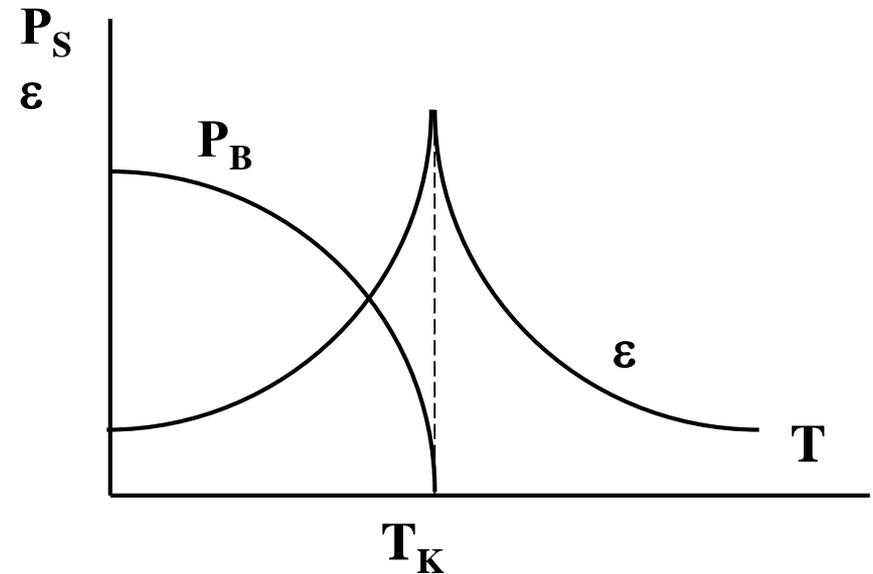
*Сегнетоэлектрики:* сегнетова соль  
 $NaKSC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ ; титанат бария  $BaTiO_3$ ; нитрит  
натрия  $NaNO_2$  и т.д.

Наличие доменной структуры приводит к сильной поляризации во внешнем поле:

$$\epsilon > 1000$$



Цикл поляризации сегнетоэлектриков.



Температурные зависимости спонтанной поляризованности  $P_s$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  в сегнетоэлектриках.

По видам поляризационных процессов диэлектрики можно разделить на:

**1. *Нейтральные и слабополярные,***

способные в основном к **электронной поляризации:**

- твёрдые – парафин, сера, ПЭ;
- жидкие – бензол, трансформаторное масло;
- газы – азот, водород.

**2. *Полярные,***

**электронная и дипольно-релаксационная поляризация:**

- органические жидкие;
- полужидкие;
- твёрдые вещества – компаунды, смолы, целлюлоза.

### ***3. Ионные кристаллы с плотной упаковкой,***

электронная и ионная (упругая) поляризация:

кварц, слюда, каменная соль,  
корунд, рутил, перовскит.

### ***4. Неорганические стёкла и керамика,***

электронная и ионно-релаксационная поляризация:

фарфор, микалекс.

### ***5. Неоднородные диэлектрики,***

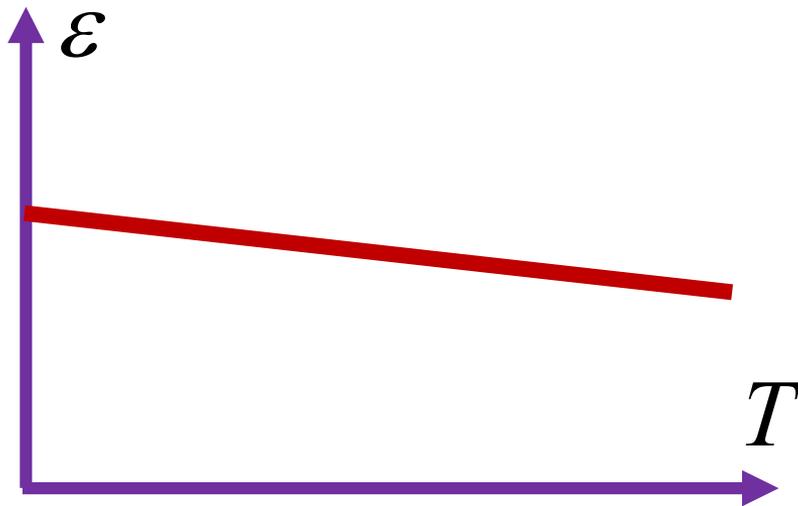
в зависимости от состава способны к **любым** видам  
поляризации.

### ***6. Активные диэлектрики,***

сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики и т.д.

Зависимость  $\varepsilon$  от температуры для неполярных диэлектриков:

**электронная поляризация**

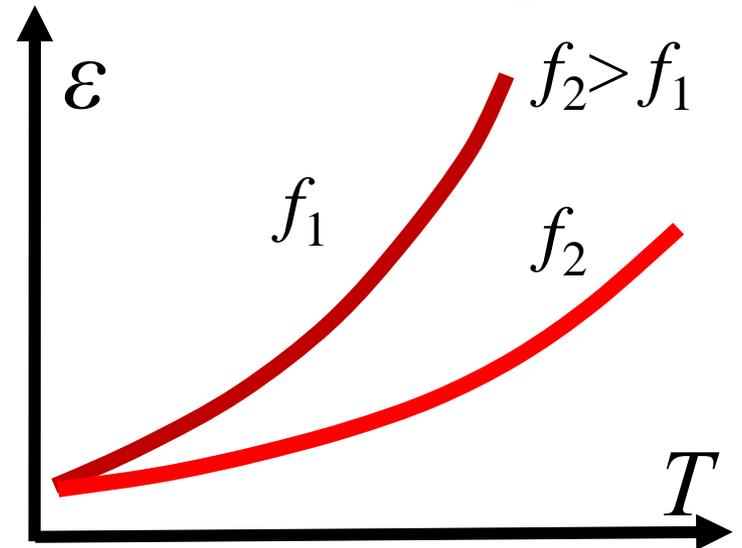


$$\text{TK}\varepsilon < 0$$

так как с ростом  $T$

поляризуемость не изменяется, но  
увеличивается объем

**ионная поляризация**



$$\text{TK}\varepsilon > 0$$

так как с ростом  $T$  возрастает  
поляризуемость ионов

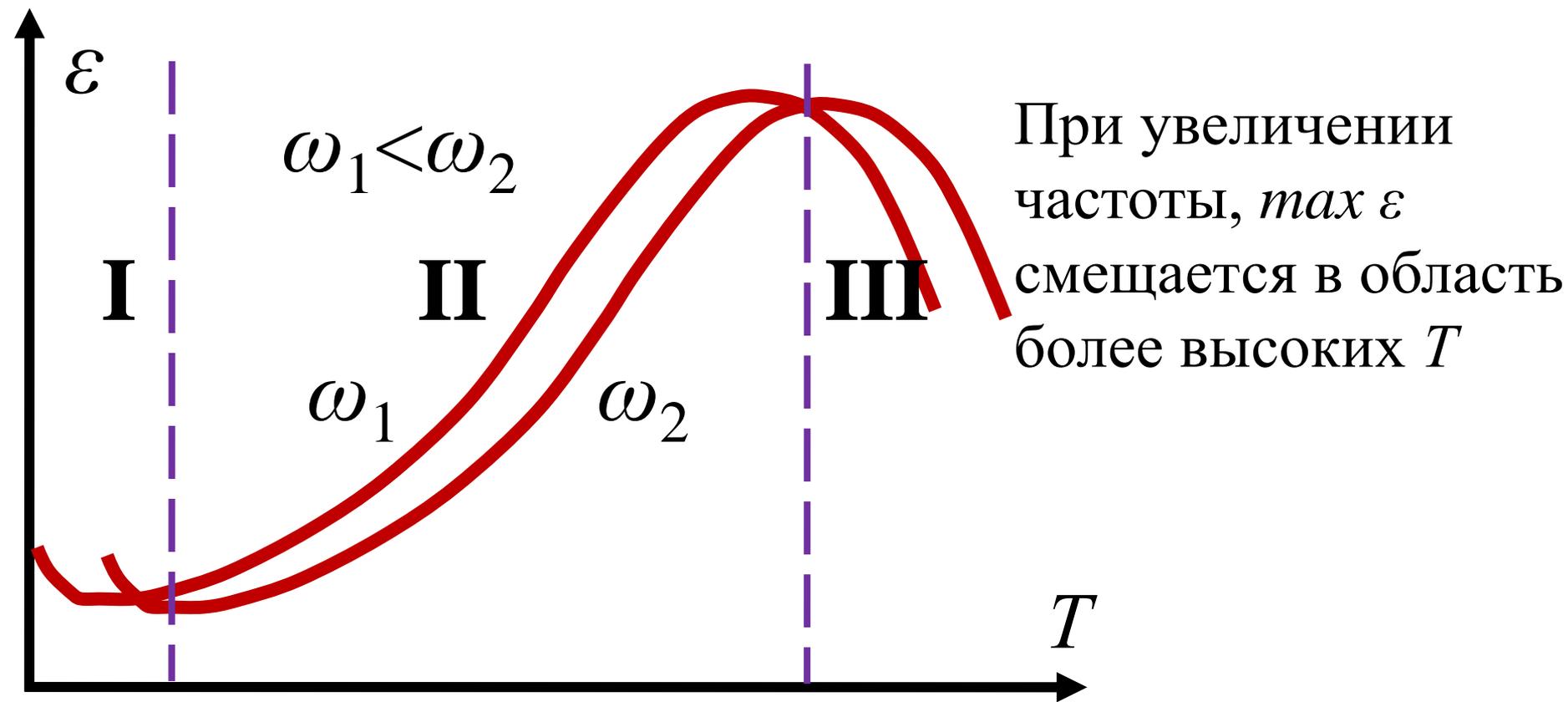
*Электронная поляризация* – смещение электронных оболочек относительно ядра атома.

*$\epsilon$*  описывает электрические свойства *единицы объема вещества*;  *$\epsilon$*  незначительно *уменьшается*, т.к. происходит термическое расширение вещества, *уменьшается число поляризованных частиц в единице объема*.

*Ионная поляризация* – смещение связанных ионов из положений равновесия.

*$\epsilon$*  *увеличивается*, т.к. происходит ослабление упругих сил в ионном диэлектрике и *увеличивается амплитуда колебаний иона* (ионы удаляются друг от друга).

Зависимость  $\varepsilon$  от температуры  
для полярных диэлектриков  
(дипольно-релаксационная поляризация)

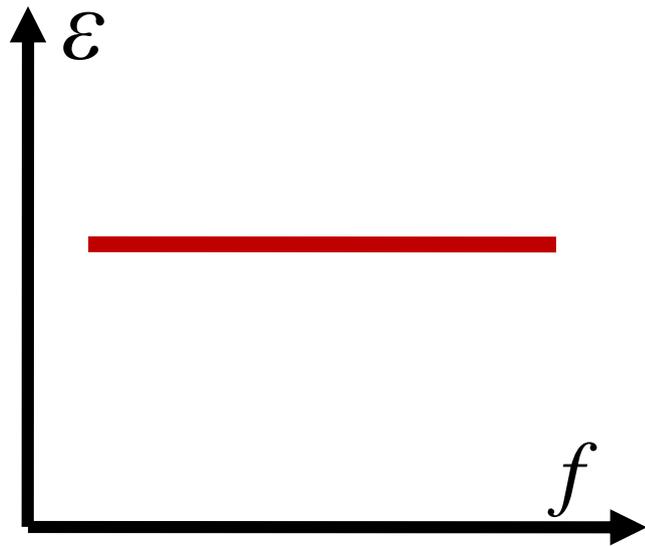


**I область** – реализуется *только электронная поляризация*, за счет термич. расширения уменьшается, диполи не принимают участие, т.к. сил эл. поля не хватает, чтобы диполи ориентир. вслед за полем (велики силы межмолекул. взаим-я).

**II область** – *ослабевают силы межмолекулярного взаимодействия*, диполи приобретают некоторую свободу, вклад дипольной поляриз. все больше.

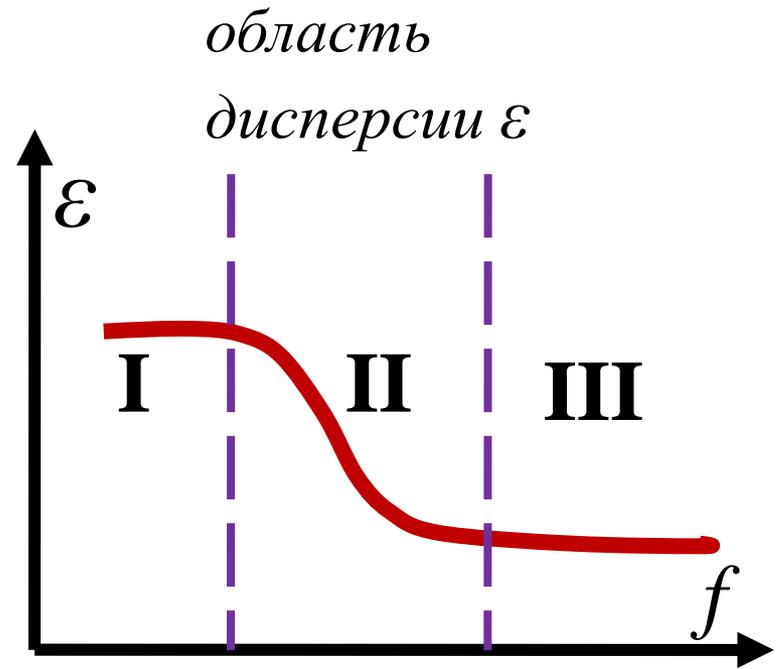
**III область** – *возрастает интенсивность хаотического теплового движения* молекул, тепловая эн-я дезориентирует диполи, разбрасывает, вклад дипольной поляриз. все меньше.

# Зависимость $\varepsilon$ от частоты приложенного переменного электрического поля



Неполярный  
диэлектрик

Все поляриз. успевают установиться за полупериод  $E$ , эл-ны и ионы успевают принять свое первонач. положение.



Полярный  
диэлектрик

Дисперсия – зависимость от частоты.

**I область** — все виды поляризации *успевают установиться* за один полупериод поля  $E$ .

**II область** — медленные виды поляризации за полупериод изменения напр-я *не успевают полностью переориентироваться* по направл. поля  $E$ , чем выше  $f$ , тем на меньший угол разворачивается молекула относительно положения равновесия.

**III область** — медленные виды поляризации не реализуются, диполи и ионы *не успевают реагировать на изменения внешнего поля*; существует только электронная поляризация (диэлектрик ведёт себя как неполярный).

# Диэлектрическая проницаемость КОМПОЗИЦИОННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Для параллельного соединения:

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 S_1 / h + \varepsilon_0 \varepsilon_2 S_2 / h$$

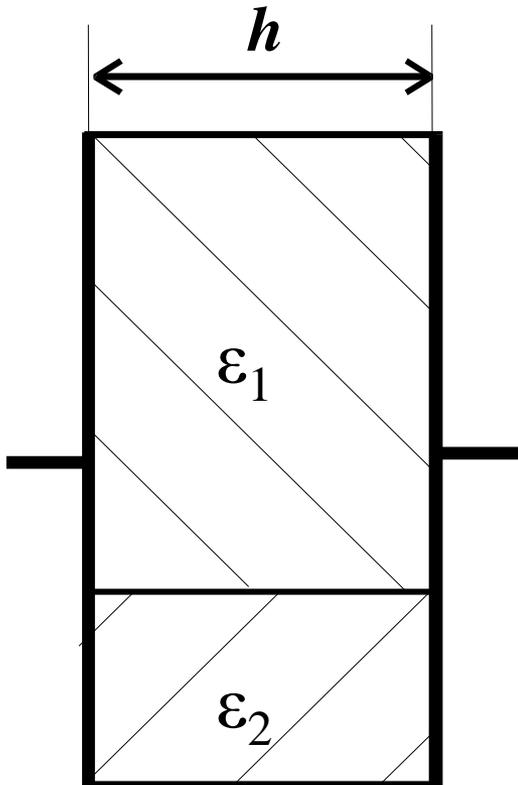
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon^* (S_1 + S_2) / h$$

$$\varepsilon^* = y_1 \varepsilon_1 + y_2 \varepsilon_2$$

$$y_1 = S_1 / (S_1 + S_2); \quad y_2 = S_2 / (S_1 + S_2)$$

объемные концентрации  $y_1 + y_2 = 1$

$$\varepsilon^* = \sum_{i=1}^{i=m} y_i \varepsilon_i$$



Для последовательного соединения:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2$$

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 S / h_1; \quad C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 S / h_2$$

$C = \varepsilon_0 \varepsilon^* S / (h_1 + h_2)$ , обозначив

$$y_1 = h_1 / (h_1 + h_2), \quad y_2 = h_2 / (h_1 + h_2),$$

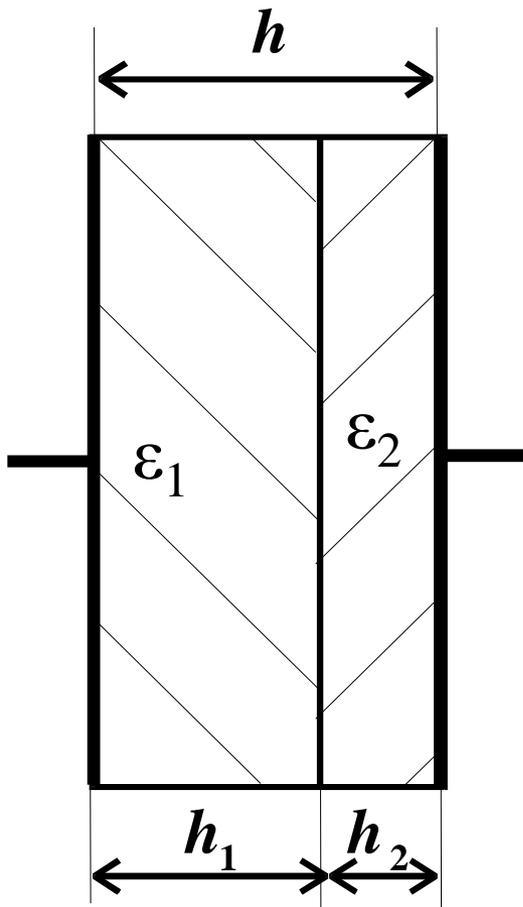
получаем:

$$1/\varepsilon^* = y_1/\varepsilon_1 + y_2/\varepsilon_2$$

ИЛИ

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / (y_1 \varepsilon_2 + y_2 \varepsilon_1).$$

$$\frac{1}{\varepsilon^*} = \sum_{i=1}^{i=m} \left( \frac{y_i}{\varepsilon_i} \right)$$

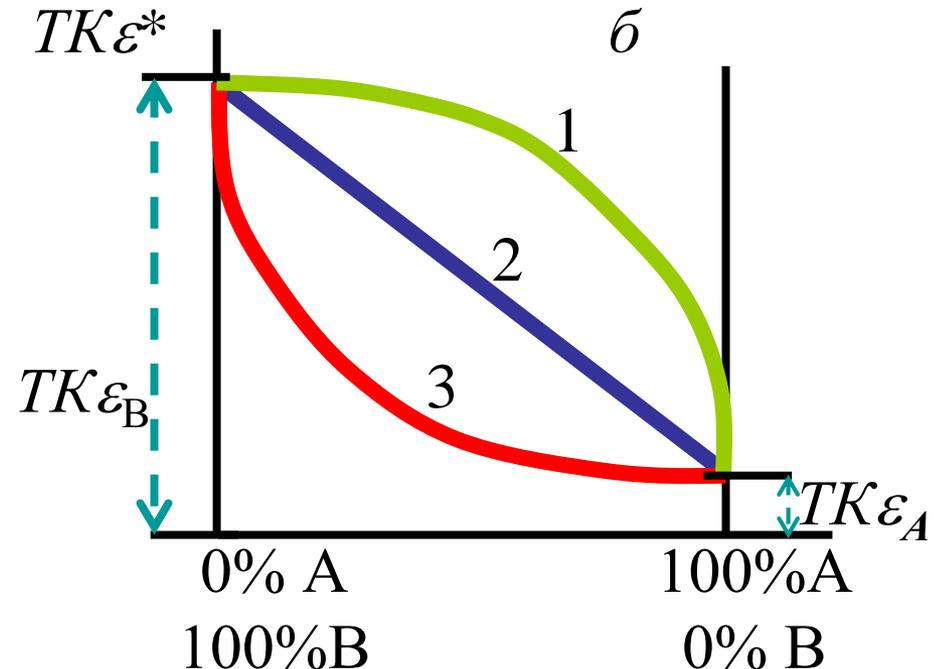
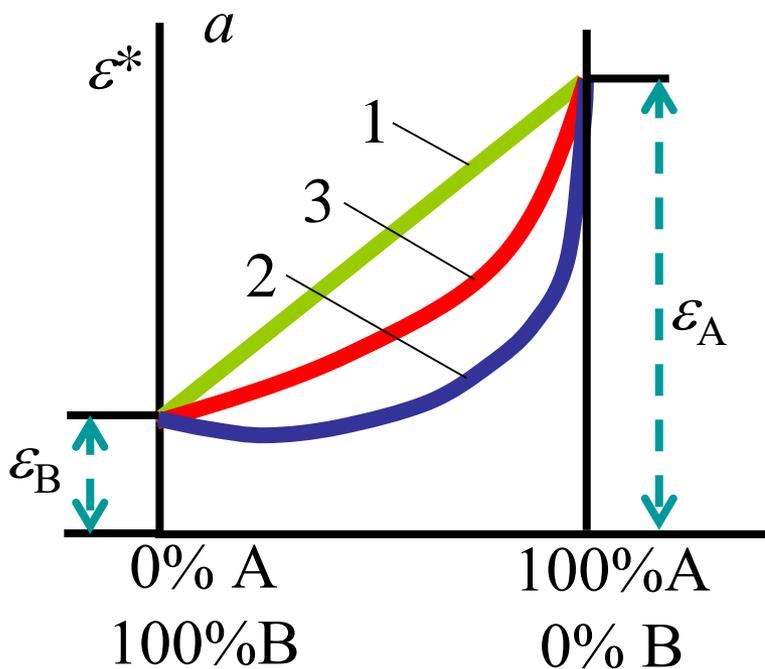
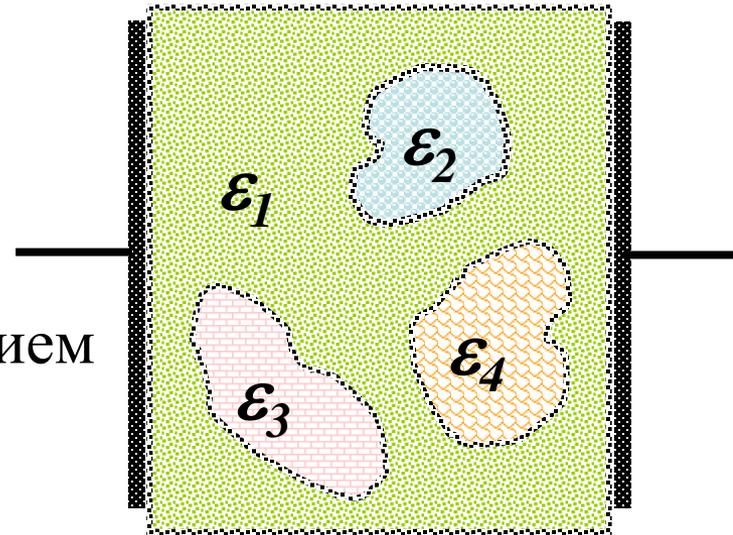


Для статистических смесей выполняется неравенство Винера:

$$[\sum (y_i / \varepsilon_i)]^{-1} \leq \varepsilon^* \leq \sum y_i \cdot \varepsilon_i$$

Для смеси с разным объемным содержанием компонентов  $A$  и  $B$  в смеси:

- 1 – модель параллельного подключения;
- 2 – модель последовательного подключения;
- 3 – статистическая смесь (керамика, стекла).



Существует несколько **приближенных формул** расчета эффективной диэлектрической проницаемости для статистических смесей, которые дают тем более точный результат, чем ближе значения  $\epsilon_j$ .

Формула Лихтенекера-Роттера или **логарифмический закон смешения** приводит к «арифметическому закону смешения» для температурных коэффициентов диэлектрической проницаемости.

$$\lg \epsilon^* = \sum y_i \lg \epsilon_i$$

$$TK \epsilon^* = \sum y_i TK \epsilon_i$$

$$\sum y_i = 1$$

Формула Ландау-Лившица

$$\sqrt[3]{\epsilon^*} = \sum y_i \sqrt[3]{\epsilon_i}$$

Если  $\epsilon$  сильно отличаются друг от друга (2-40) – формула Л-Р., если незначительно – формула Л-Л.