

# Диэлектрические материалы

Ковалева Т.Ю.

лекции

# Диэлектрические материалы

- Определение, классификация
- Электропроводность диэлектриков
- Поляризация диэлектриков
- Виды поляризации
- Диэлектрические потери
- Пробой диэлектриков
- Виды пробоя

# Определение, классификация диэлектрических материалов

- Диэлектрическими принято называть материалы, имеющие низкую плотность подвижных носителей заряда (ионов и электронов).
- Удельное электрическое сопротивление диэлектриков в  $10^{12}$  -  $10^{25}$  раз выше, чем у проводниковых материалов.
- Диэлектрическими являются материалы с ковалентной, поляризационной или ионной связью между атомами.
- Диэлектрики с ионной связью существуют только в твердом состоянии.
- Энергия возбуждения электронов на уровни проводимости превосходит 5 электрон-вольт.

## Классификация

- По агрегатному состоянию диэлектрики бывают твердыми, жидкими и газообразными.
- По происхождению диэлектрики могут быть естественными и искусственными, органическими и неорганическими.
- По электрической структуре все диэлектрики можно разделить на неполярные и полярные.
- У неполярных диэлектриков в отсутствие внешнего поля собственный дипольный момент структурных единиц (атомов, молекул, элементарных кристаллических ячеек) равен нулю

# Определение, классификация диэлектрических материалов

- Диэлектрическими принято называть материалы, имеющие низкую плотность подвижных носителей заряда (ионов и электронов).
- Удельное электрическое сопротивление диэлектриков в  $10^{12}$  -  $10^{25}$  раз выше, чем у проводниковых материалов.
- Диэлектрическими являются материалы с ковалентной, поляризационной или ионной связью между атомами.
- Диэлектрики с ионной связью существуют только в твердом состоянии.
- Энергия возбуждения электронов на уровни проводимости превосходит 5 электрон-вольт.

## Классификация

- По агрегатному состоянию диэлектрики бывают твердыми, жидкими и газообразными.
- По происхождению диэлектрики могут быть естественными и искусственными, органическими и неорганическими.
- По электрической структуре все диэлектрики можно разделить на неполярные и полярные.
- У неполярных диэлектриков в отсутствие внешнего поля собственный дипольный момент структурных единиц (атомов, молекул, элементарных кристаллических ячеек) равен нулю

# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Электропроводность диэлектриков
  - Кол-во свободных зарядов в диэлектриках мало и поэтому проводимость их тоже мала ( $10^{-8}$ ,  $10^{-18}$ ) сим/см.
  - В принципе проводимость в диэлектрике может возникать по 2-м причинам.
1. Вследствие смещения зарядов – токи смещения. Эти токи кратковременны и длительность их зависит от вида поляризации. Токи смещения при различных видах замедленной поляризации носят название абсорбционных токов.  
Плотность абсорбционного тока  $J_{об} = \frac{dD}{dt}$
  2. Вследствие перемещения ионов примесей

# **ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

## ***продолжение***

- Электропроводность диэлектриков определяется в основном перемещением ионов.
- На концентрацию ионов оказывают влияние:
  1. состав материала,
  2. температура, облучение материала частицами высоких энергий.
- Концентрация подвижных носителей заряда в полярных материалах, как правило, выше, чем в неполярных.
- Это связано с тем, что ионы примесей электрически взаимодействуют с дипольными моментами полярных молекул, поэтому очистка полярных материалов от примесей затруднена.

# Влияние температуры на электропроводность диэлектриков

- При повышении температуры энергия системы повышается на величину  $kT$  и вероятность выхода иона из потенциальной ямы возрастает. Поэтому электропроводность диэлектриков при повышении температуры растет в соответствии с выражением:
- $$g = g_0 \exp(E_a/kT) \quad (1)$$
- где:  $g$  - удельная электропроводность диэлектрика,  $g_0$  - константа,  $E_a$  - энергия активации выхода иона из потенциальной ямы,  $kT$  - тепловая энергия системы. Зависимость электропроводности от температуры показана на рис. 1

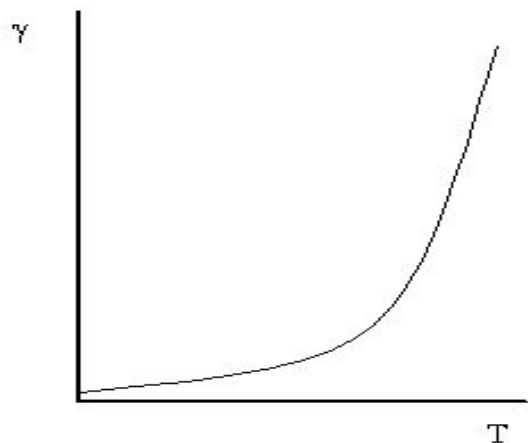
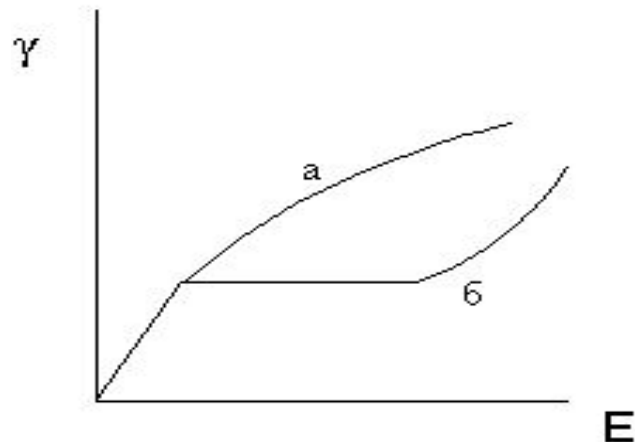


Рис. 1. Зависимость электропроводности от температуры.

# Влияние напряженности поля на электропроводность диэлектриков (продолжение)

- При сравнительно небольших значениях напряженности поля электропроводность диэлектриков следует закону Ома.
- Однако при повышении напряженности поля электропроводность перестает следовать закону Ома.
- При дальнейшем повышении напряженности поля возможны два случая: в первом электропроводность быстро нарастает с ростом напряженности поля (рис. 2 а), а во втором - вначале наступает насыщение электропроводности, и лишь затем в сильных полях наблюдается ее резкий рост (рис. 2 б).

Рис.2. Зависимость электропроводности от напряженности поля для загрязненных диэлектриков и чистых диэлектриков с ионной связью (а) и не ионных кристаллов высокой чистоты (б).





# Влияние напряженности поля на электропроводность (продолжение)

- Эти два случая возможны для следующих типов диэлектриков:
  1. Первый случай наблюдается в загрязненных диэлектриках и чистых диэлектриках с ионной связью, в которых при увеличении напряженности поля происходит увеличение заряженных частиц.
  2. Второй случай типичен для не ионных диэлектриков высокой чистоты, в которых число заряженных частиц ограничено, что и вызывает насыщение электропроводности.
  3. В очень сильных полях происходит размножение ионов в результате перехода к пробое диэлектриков.

# ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Поляризация возникает под действием электрического поля
- Поляризация – смещение упруго связанных зарядов под действием электрического поля на расстояние не превышающее размера частиц
- По электрической структуре все диэлектрики можно разделить на полярные и неполярные.
- У полярных диэлектриков структурные единицы вещества имеют собственный дипольный момент.
- У неполярных диэлектриков в отсутствие внешнего поля дипольного момента нет.
- При помещении диэлектрика в электрическое поле диполи в полярных диэлектриках поворачиваются по полю.
- В неполярных диэлектриках внешнее электрическое поле приводит к смещению зарядов внутри электрически нейтральных молекул, что также приводит к появлению электрических диполей (индуцированные диполи).
- Величина дипольных моментов ( $m$ ), наводимых внешним полем, пропорциональна напряженности внешнего поля:  $m = aE$ , где  $a$  коэффициент пропорциональности, называемый поляризуемостью.
- Диэлектрическую проницаемость можно определить как отношение вектора электрического смещения  $D$  к напряженности  $E$  внешнего поля, вызвавшего это смещение:  $\epsilon = D/E$

# Виды поляризации

- Поскольку вектор электрического смещения является суперпозицией напряженности электрического смещения и поляризации:
- $D = E + P$
- то диэлектрическую проницаемость можно выразить как:
- $\epsilon = 1 + P/E$
- По механизму смещения заряженных частиц различают электронную, ионную и дипольную поляризацию. По характеру смещения заряженных частиц поляризация может быть упругой (безгистерезисной) и релаксационной (гистерезисной).

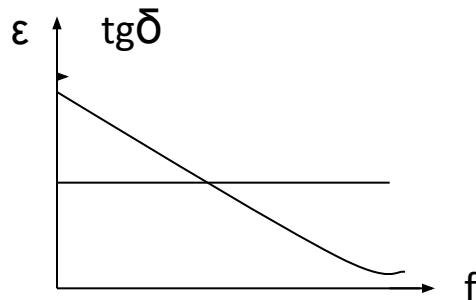
## Упругая поляризация

Упругая поляризация не связана с тепловым движением молекул. К ней относятся следующие виды поляризации:

- а) поляризация упругого электронного смещения;
- б) поляризация ионного упругого смещения;

### Поляризация упругого электронного смещения

Этот вид поляризации связан со смещением электронных оболочек атомов относительно ядер и имеет место во всех без исключения диэлектриках, за исключением абсолютного вакуума, за исключением абсолютного вакуума. .



# Упругая электронная поляризация

У неполярных диэлектриков с ковалентной связью между атомами поляризация упругого электронного смещения является основным видом поляризации (полиэтилен, трансформаторное масло, парафин, водород), рис.2

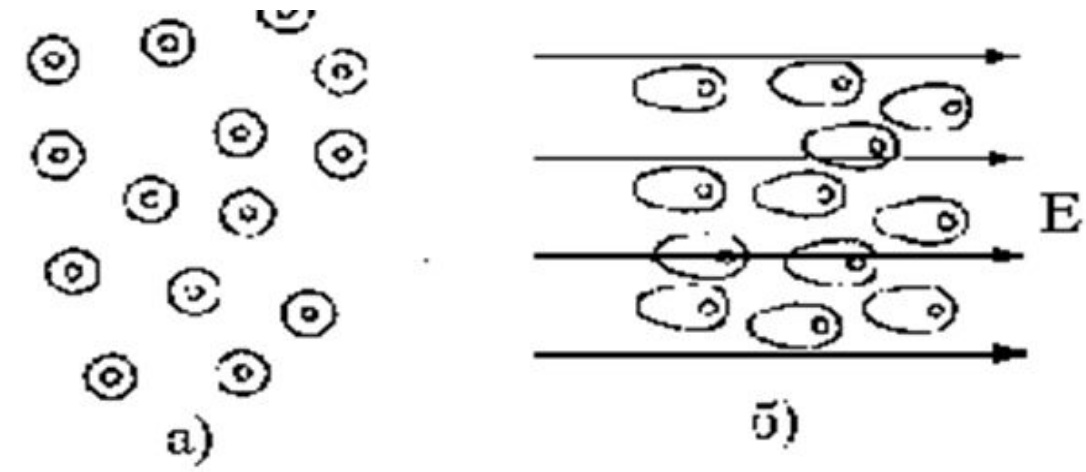


Рис. 2. Деформация симметричных электронных оболочек атомов и образование диполей при наличии электрического поля. а) симметричные электронные оболочки атомов при отсутствии электрического поля; б) деформированные электронные оболочки атомов при наличии внешнего поля напряженностью  $E$ .

# Упругая электронная поляризация

## продолжение

- Дипольный момент, возникающий в атомах вследствие упругого электронного смещения, увеличивается при увеличении радиусов электронных оболочек атомов и количества электронов на них.
- Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) неполярных диэлектриков мала, так как общий эффект поляризации при упругой деформации электронных оболочек в электрическом поле невелик..
- У парафина  $\epsilon=1,8 - 2,2$ ; у алмаза  $\epsilon = 2,4$ ; у кремния  $\epsilon - 12,5$ ; у германия  $\epsilon - 16,0$ .
- Однако в качестве диэлектрических материалов алмаз, кремний, германий не используются.
- Используются различные углеводороды, и типичные значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  для диэлектриков с неполярными молекулами составляют  $1,8 - 2,6$ .
- При возрастании температуры объем диэлектрика возрастает, и диэлектрическая проницаемость, в соответствии с выражением  $\bar{P} = \frac{\sum m}{V}$  уменьшается, где  $P$  - суммарный дипольный момент в единице объема тела  $V$ , который является численной характеристикой поляризации.

# Упругая электронная поляризация

## Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

- Особенно заметно уменьшение  $\epsilon$  при плавлении и испарении диэлектриков, когда их объем существенно возрастает.

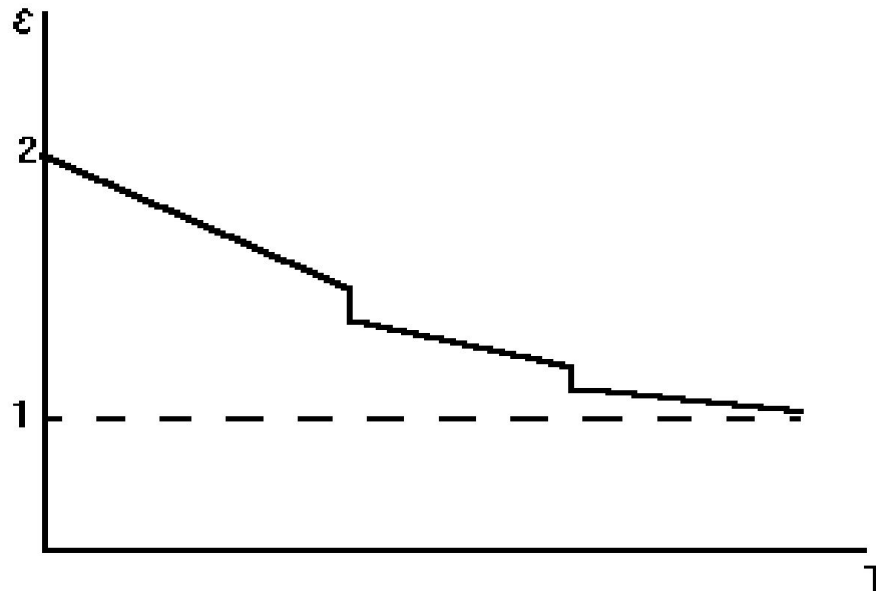


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для неполярных диэлектриков.

# Упругая электронная поляризация

## Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты

- В неполярных диэлектриках диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты внешнего поля. Это связано с тем, что частота вращения электронов на орбитах велика  $\sim 10^{15} - 10^{16}$  Гц.
- Поляризация существует до ультрафиолетового частотного диапазона.

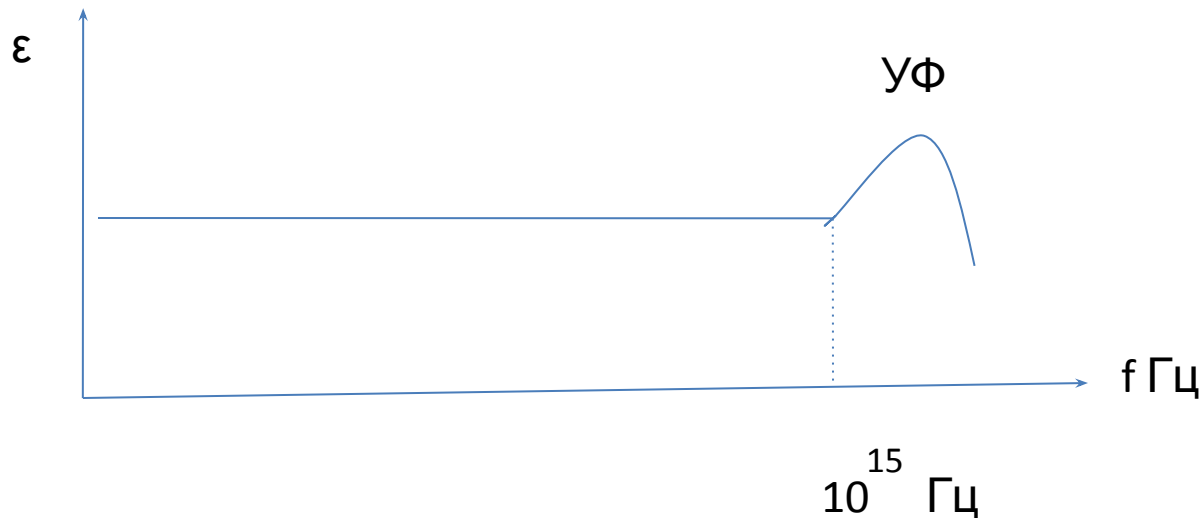


Рис.3 Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты

# Поляризация упругого ионного смещения.

- Этот вид поляризации вызван упругим смещением ионов из равновесных положений под действием внешнего электрического поля.
- Он характерен для ионных кристаллов (мрамор, поваренная соль, слюда, кварц и др.).
- Важно отметить, что в таких материалах, наряду с поляризацией упругого ионного смещения, присутствует и поляризация упругого электронного смещения.
- Типичная величина диэлектрической проницаемости составляет 5-150. Так у поваренной соли ( $\text{NaCl}$ )  $\epsilon=6$ , у корунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  $\epsilon=9$ , у рутила ( $\text{TiO}_2$ )  $\epsilon=110$ , у титаната кальция ( $\text{CaTiO}_3$ )  $\epsilon=150$ .
- Из приведенных данных следует, что величина поляризации возрастает с увеличением радиусов ионов и с увеличением их зарядов.



## Поляризация упругого ионного смещения. (продолжение)

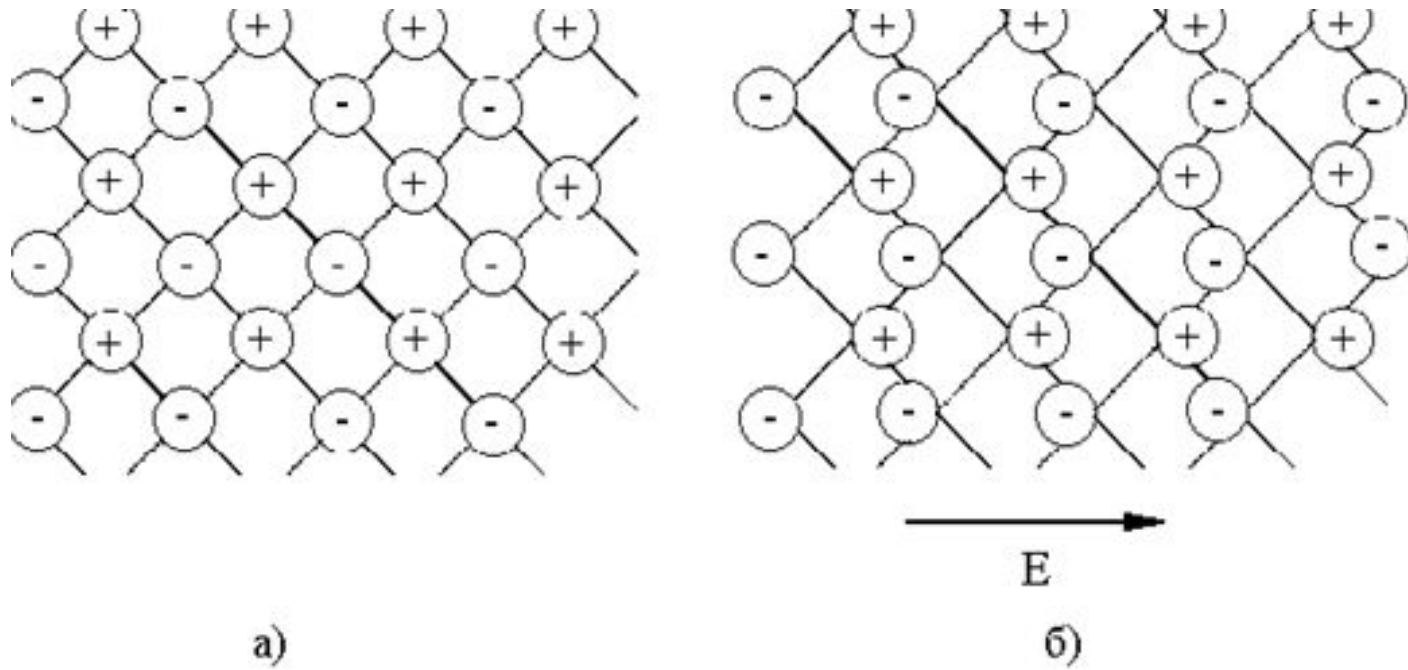


Рис4. Смещение ионов и упругая ионная поляризация при наличии электрического поля.

а) электрическое поле отсутствует, б) электрическое поле присутствует.

# Поляризация упругого ионного смещения. (продолжение)

- Повышение температуры увеличивает межатомные расстояния, вследствие чего связь между отдельными ионами ослабляется, и облегчается взаимное смещение ионов под действием внешнего электрического поля.
- Поэтому при повышении температуры диэлектрическая проницаемость ионных кристаллов возрастает (рис. 5).
- Время установления этого механизма поляризации сравнимо с периодом оптических колебаний ионов в кристаллической решетке и составляет  $10^{-12}$  -  $10^{-13}$  с.
- Поэтому до частот  $10^{12}$ -  $10^{13}$  Гц диэлектрическая проницаемость веществ с ионной связью не зависит от частоты внешнего поля, аналогично электронной поляризации.
- Ионная упругая поляризация существует до ИК частотного диапазона.

# Поляризация упругого ионного смещения. (продолжение)

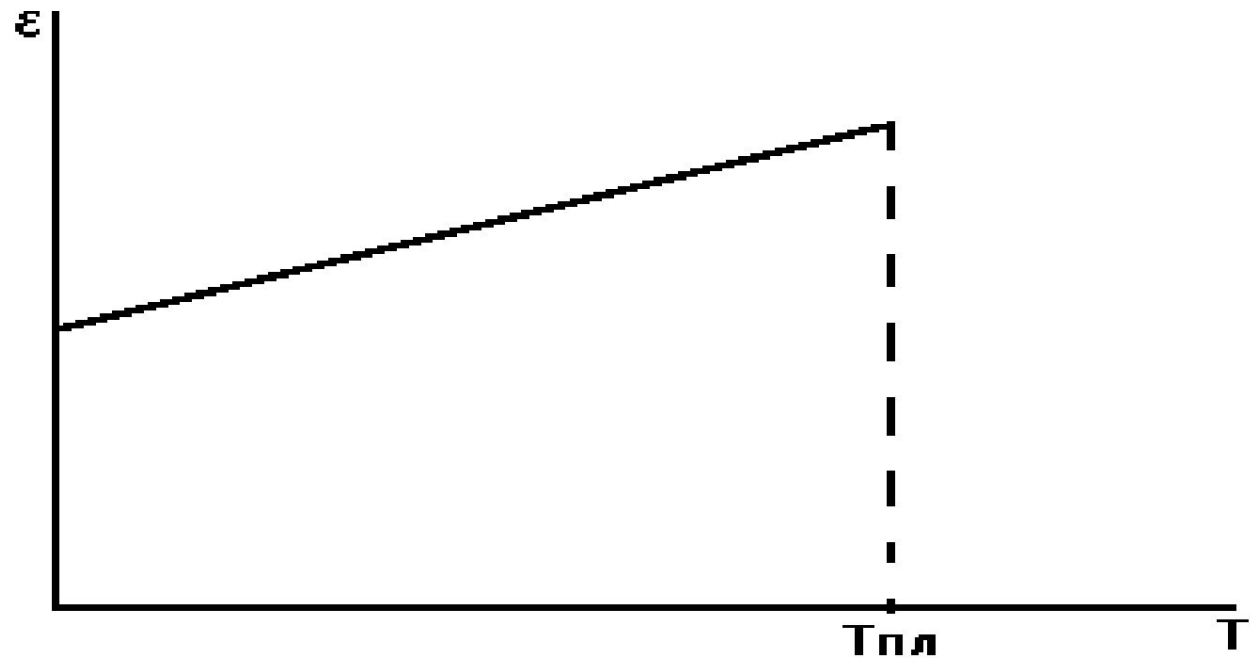


Рис. 5 Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для ионных кристаллов.

# Виды поляризации релаксационного типа.

- В ряде диэлектриков электроны ионы и дипольные молекулы могут скачком переходить из одного положения в другое.
- Эти переходы осуществляются частицами благодаря получению ими энергии при тепловых колебаниях.
- Электрическое поле снижает энергетический барьер для перехода по полю и повышает энергетический барьер для перехода против поля.
- В итоге, диэлектрик поляризуется, причем для поляризации требуется время.
- Эти виды поляризации являются релаксационными.
- Основные виды релаксационной поляризации:
  1. дипольно-релаксационная,
  2. ионно-релаксационная
  3. электронно-релаксационная поляризация.

# Дипольно-релаксационная поляризация

- Поляризация этого вида наблюдается во многих твердых и жидких диэлектриках с полярными группами: компаунды, бакелит, аминопласты и др.
- При дипольно-релаксационной поляризации происходит смещение полярных молекул или смещение радикалов, входящих в состав крупных молекул.
- Дипольно-релаксационная поляризация сопровождается необратимыми потерями энергии при нахождении диэлектриков в переменном электрическом поле.
- Диэлектрическая проницаемость полярных веществ сильно зависит от их температуры и частоты внешнего электрического поля.
- При низких температурах, когда подвижность молекул и радикалов, входящих в состав молекул, мала, поворот диполей на большие углы невозможен, и в материале наблюдается поляризация электронного упругого смещения и дипольно-упругая поляризация.