

[Радиоматериалы и радиокомпоненты]

[210303.65 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура»

210305.65 «Средства радиоэлектронной борьбы» ]

[ИИБС, кафедра Электроники]

[Преподаватель Останин Борис Павлович]

---

# Радиоматериалы и радиокомпоненты

---

## Раздел 1

### Свойства радиоматериалов.

#### Лекция 3

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Основным свойством диэлектриков является их способность к поляризации. Под действием электрического поля его связанные заряды упорядочиваются.

Различают четыре механизма (вида) поляризации.

## Электронная поляризация

В чистом виде проявляется у *неполярных* диэлектриков, состоящих из электрически нейтральных молекул, у которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают (полистирол, полиэтилен и др.).

$$m = ql$$

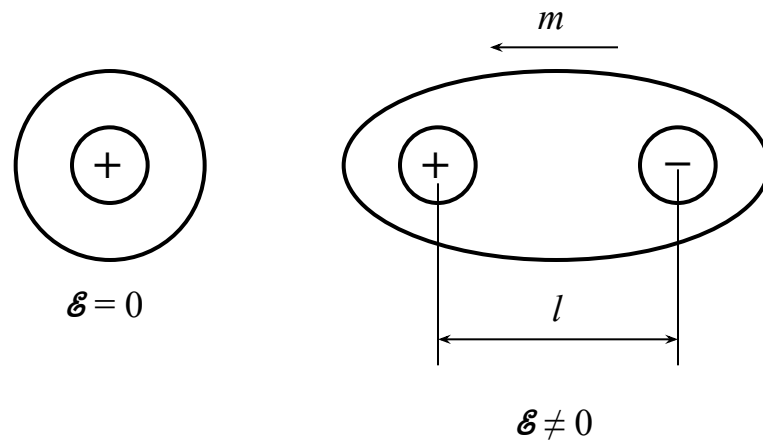
$l$  - расстояние между центрами положительного и отрицательного зарядов диполя.

В то же время электрический момент

$$m = \alpha_{\text{э}} \mathcal{E}$$

$\alpha_{\text{э}}$  - электронная поляризуемость. Зависит от структуры атома или молекулы,  $\text{Ф} \cdot \text{м}^2$ .

Процесс образования диполя протекает практически мгновенно ( $10^{-14} \dots 10^{-16}$  с) и наблюдается у всех видов диэлектриков.



Интенсивность процесса поляризации ...

$$P_{др} = m n$$

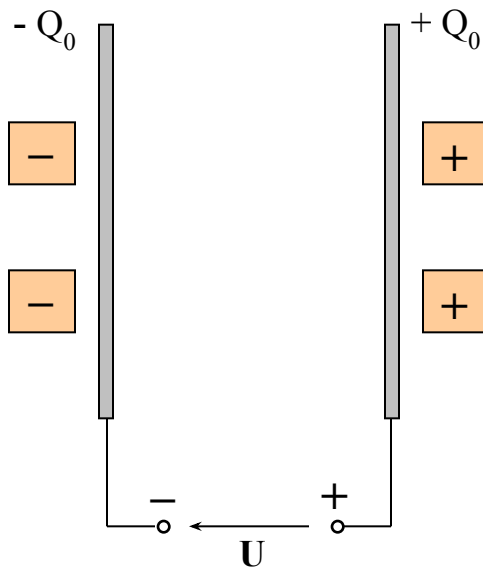
$P_{др}$  - поляризованность диэлектрика,  
 $n$  - количество частиц в единице объёма.

О способности диэлектрика поляризоваться судят по увеличению ёмкости конденсатора при помещении этого диэлектрика между обкладками конденсатора.

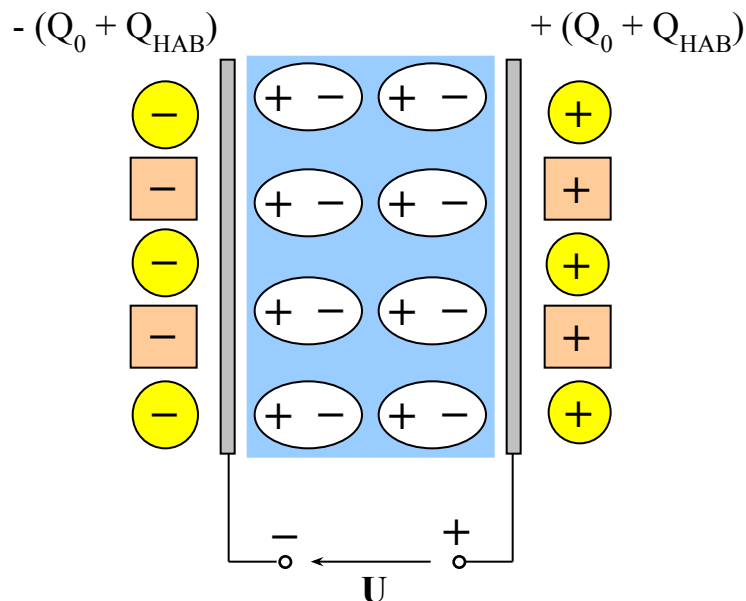
Без диэлектрика

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

$\varepsilon_0$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума ( $8,84 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  
 $S$  - площадь обкладок конденсатора;  
 $D$  - расстояние между обкладками.



$$Q_0 = C_0 U$$



$$C_D = \frac{Q_0 + Q_{НАВ}}{U} \quad C_D = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d} = \epsilon C_0$$

Для неполярных диэлектриков  $\epsilon = 2 \dots 2,5$ .

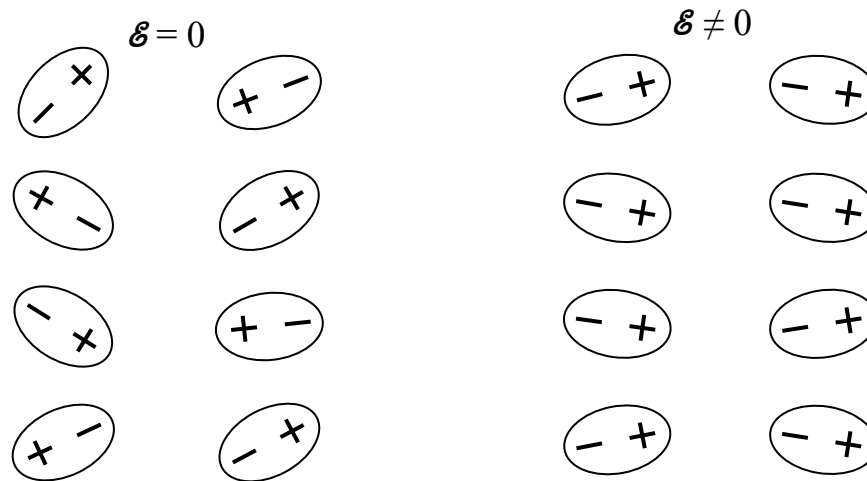
Связь между  $\epsilon$  и  $P_{ДР}$

$$P_{ДР} = \epsilon_0 (\epsilon - 1) \mathcal{E}$$



## Дипольная поляризация

Имеет место в полярных диэлектриках, молекулы которых представляют собой твёрдые диполи (бакелит, целлюлоза, эпоксидная смола).



Поворот диполей в направлении поля связан с преодолением межмолекулярных сил, поэтому протекает сравнительно медленно и сопровождается потерями энергии на нагрев диэлектрика.

$$P_{DP}(t) = P_{DP}(0) \exp \frac{-(t - t_0)}{\tau_0}$$

$P_{DP}(0)$  - величина поляризованности в момент времени  $t_0$ , когда прекращается действие поля;

$\tau_0$  - время релаксации, в течение которого поляризованность уменьшается в  $e$  раз ( $e = 2,71$ ) от первоначального значения.

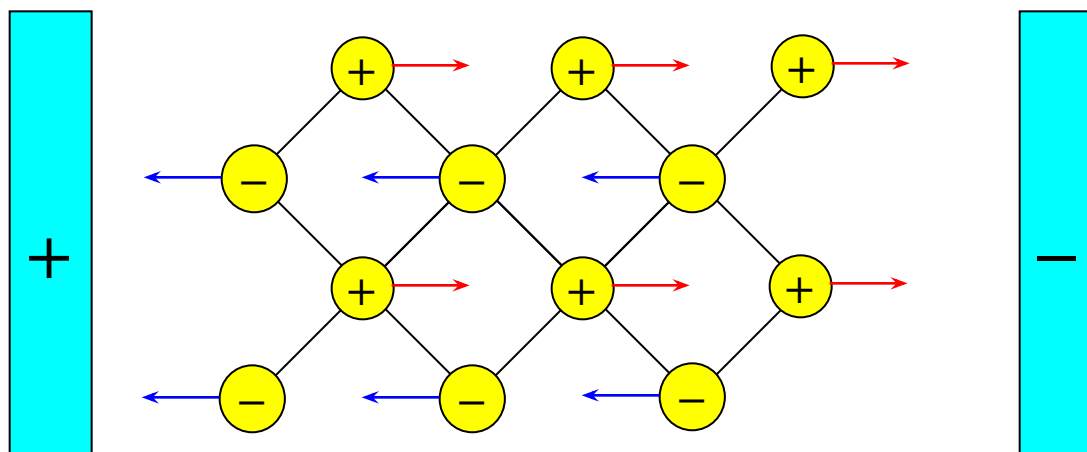
Процесс дипольной поляризации сопровождается электронной поляризацией, поэтому степень поляризованности полярного диэлектрика более высокая и относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  достигает 6...9.

## Ионная поляризация

Кристаллические диэлектрики можно подразделить на кристаллические диэлектрики с плотной упаковкой ионов и с неплотной.

### С плотной упаковкой

У кристаллических диэлектриков, имеющих плотную ионную структуру (слюда)...



В состоянии равновесия действие сил электрического поля уравнивается...

$$q\mathcal{E} = k_{УПР}\Delta x$$

$k_{УПР}$  - коэффициент упругой связи;  
 $\Delta x$  - смещение ионов, меньше периода решётки;  
 $\mathcal{E}$  - напряжённость электрического поля.

$$\Delta x = \frac{q\mathcal{E}}{k_{УПР}}$$

Время установления ионной поляризации – порядка  $10^{-13}$  с.

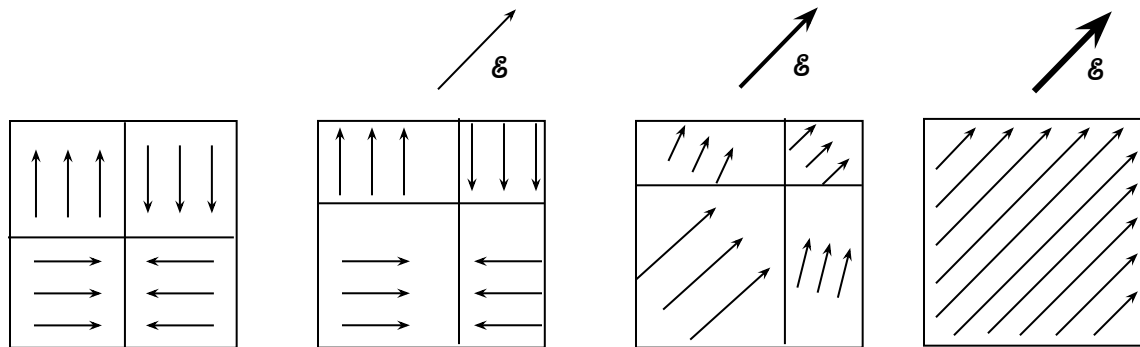
$$\varepsilon = 5...12$$

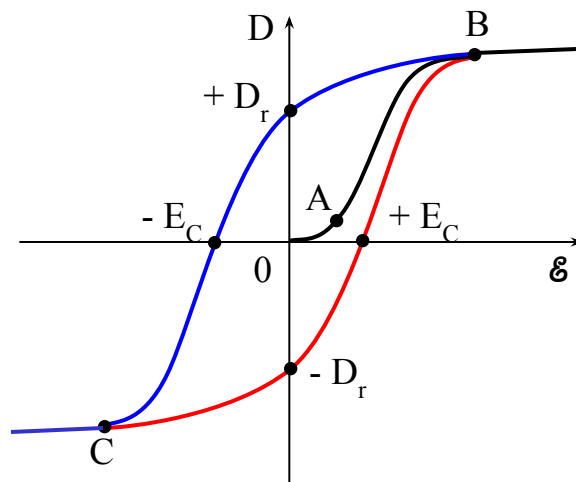
## **С неплотной упаковкой**

В ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов (органической стекло, и др.) ионы под воздействием поля смещаются на расстояния, превышающие постоянную решётки. После снятия поля ионы постепенно возвращаются к центру равновесия. Такой вид поляризации называется ионно-релаксационной.

## Спонтанная (самопроизвольная) поляризация

Этот вид поляризации имеет место в твёрдых диэлектриках – сегнетоэлектриках [кварц, титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) и др.]. У них даже при отсутствии внешнего электрического поля наблюдается самопроизвольная (спонтанная) ориентация диполей в отдельных областях, называемых доменами. Размеры доменов –  $10^{-4} \dots 10^{-1}$  см. В каждом из доменов электрические моменты направлены одинаково, а в разных доменах по-разному. Поэтому общий электрический момент сегнетоэлектрика равен нулю.





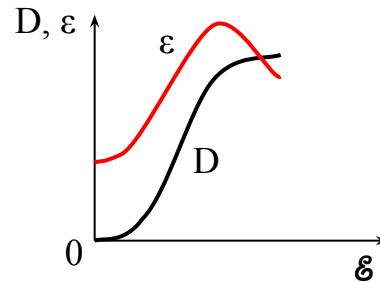
При помещении сегнетоэлектрика в электрическое поле, по мере роста напряженности поля будет происходить обратимое смещение границ доменов в направлении поля и линейное возрастание электрической индукции  $D$  (участок OA). В сильных электрических полях смещение доменных границ принимает необратимый характер, при этом разрастаются те домены, у которых вектор спонтанной поляризации имеет наименьший угол с направлением вектора напряженности электрического поля. Одновременно с этим происходит поворот диполей по направлению поля (участок AB).

Явление *гистерезиса* ...



Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика определяется по основной кривой поляризации

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 \mathcal{E}}$$

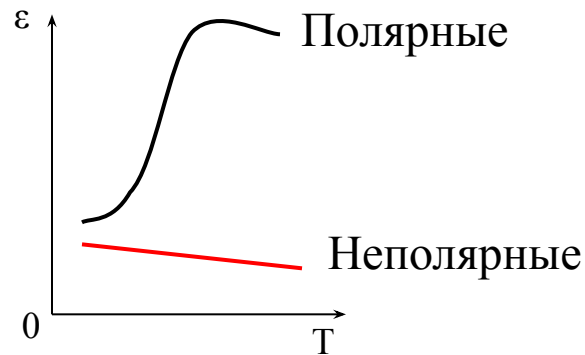


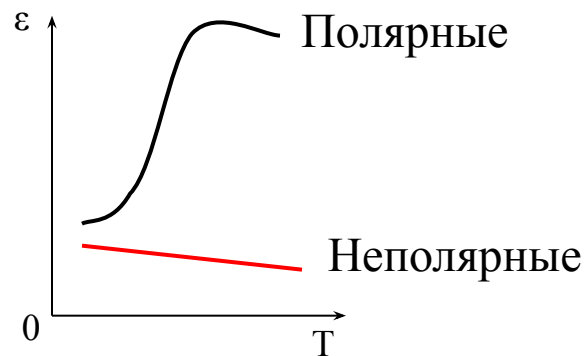
Относительная диэлектрическая проницаемость, измеренная в слабых полях, называется *начальной*. В сильных полях диэлектрическая проницаемость достигает значения  $10^4 \dots 10^6$ .

## Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и частоты

Влияние температуры на величину диэлектрической проницаемости оценивают *температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости*:

$$\alpha_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT}$$



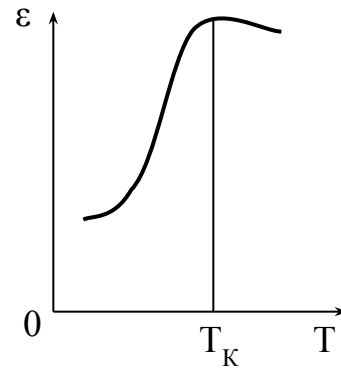


У неполярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость слабо уменьшается с ростом температуры, т.к. уменьшается плотность диэлектрика, а, следовательно, количество поляризуемых частиц. Величина  $\alpha_\epsilon$  отрицательна, примерно равна коэффициенту линейного расширения диэлектрика и составляет около  $-100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ .

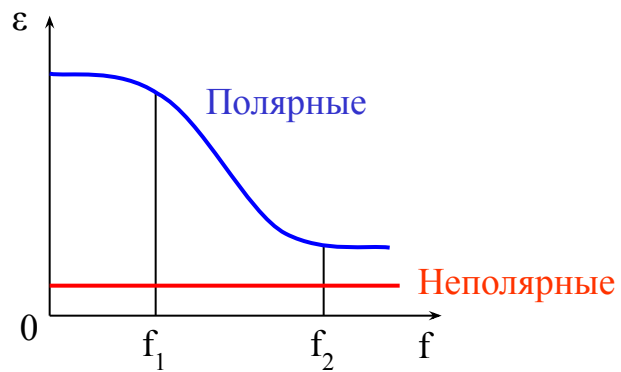
У полярных диэлектриков зависимость  $\varepsilon(T)$  имеет характерный максимум. В области низких температур повышение температуры ведёт к ослаблению межмолекулярных сил, что облегчает поворот диполей под действием сил поля. В области высоких температур  $\varepsilon$  уменьшается из-за возрастания беспорядочных тепловых колебаний. В ионных кристаллах с плотной упаковкой наряду с уменьшением плотности вещества наблюдается возрастание поляризуемости ионов вследствие ослабления упругих связей между ними при тепловом расширении, поэтому диэлектрическая проницаемость с ростом температуры возрастает ( $\alpha_\varepsilon = +100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ). У некоторых кристаллов, содержащих ион титана (рутил  $\text{TiO}_2$ , перовскит  $\text{CaTiO}_3$ ), преобладает электронная поляризация, поэтому с ростом температуры диэлектрическая проницаемость уменьшается ( $\alpha_\varepsilon = -1500 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  для перовскита,  $\alpha_\varepsilon = -750 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  для рутила). Эти диэлектрики применяют в термокомпенсирующих конденсаторах.

В ионных кристаллах с неплотной упаковкой с увеличением температуры возрастает число слабо связанных ионов, поэтому диэлектрическая проницаемость возрастает. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости таких диэлектриков достигает значения  $\alpha_\epsilon = +100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ .

Наиболее сильная зависимость от температуры наблюдается у сегнетоэлектриков, у которых увеличение температуры приводит к ослаблению сил, препятствующих ориентации доменов. Поэтому поляризованность доменов с ростом температуры возрастает, что ведёт к увеличению диэлектрической проницаемости. Рост диэлектрической проницаемости происходит до температуры  $T_K$ , называемой *температурой Кюри*. За пределами этой температуры происходит распад доменов и резкое уменьшение диэлектрической проницаемости.



Частотная зависимость диэлектрической проницаемости обусловлена инерционностью процессов поляризации. У неполярных диэлектриков, характеризующихся электронной поляризацией, процесс образования упругих диполей протекает практически мгновенно, поэтому диэлектрическая проницаемость не зависит от частоты. У полярных диэлектриков в области нижних частот вплоть до частоты  $f_1$  диполи успевают поворачиваться за половину периода колебаний, поэтому диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты. На частотах выше  $f_1$  диполи не успевают следовать за изменениями электрического поля, вследствие чего снижается интенсивность дипольной поляризации и резко уменьшается диэлектрическая проницаемость. На частотах выше  $f_2$  процесс дипольной поляризации полностью отсутствует и сохраняется только электронная поляризация.





## Электропроводность диэлектриков

У диэлектриков очень широкая запрещённая зона. Поэтому свободные носители здесь практически отсутствуют. Основной причиной электропроводности является наличие в объёме и на поверхности ионов различных примесей. При высоких температурах проводимость может быть также обусловлена ионами самого материала. Различают объёмную и поверхностную проводимость.

Объёмная проводимость создаётся ионами примесей или ионами самого диэлектрика, которые, находясь в состоянии первоначального закрепления и совершая тепловые колебания, способны преодолеть силы взаимодействия с другими молекулами и перейти в новое положение временного закрепления. В отсутствие электрического поля направления перемещения ионов равновероятны, и ток равен нулю. При наличии поля движение ионов создаёт ток, плотность которого

$$j = qN_T v_T$$

$N_T$  - концентрация диссоциированных ионов;

$v_T$  - средняя скорость движения ионов.

Скорость  $v_T$  пропорциональна напряжённости поля  $\mathcal{E}$ :

$$v_T = \mu_T \mathcal{E},$$

$\mu_T$  - подвижность ионов.

Тогда

$$j = qN_T\mu_T = \sigma_D \mathcal{E}.$$

$\sigma_D = qN_T\mu_T$  - удельная объёмная проводимость диэлектрика.

Величины  $N_T$  и  $\mu_T$  зависят от температуры:

$$N_T = N \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right)$$

$$\mu_T = \mu_{\max} \exp\left(-\frac{E_{\text{ПЕР}}}{kT}\right)$$

$N_T$  - концентрация диссоциированных ионов;

$N$  - общая концентрация ионов;

$\mu_{\max}$  - предельная подвижность ионов;

$E_D$  - энергия диссоциации, необходимая, для преодоления действия сил молекулярного взаимодействия;

$E_{\text{ПЕР}}$  - энергия перемещения диссоциированного иона, необходимая для перемещения иона из одного состояния закрепления в другое.

Подставляя  $N_T$  и  $\mu_T$  в формулу  $\sigma_D = qN_T\mu_T$  получим:

$$\sigma_D = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$A$  - коэффициент пропорциональности, включающий в себя  $N_T$  и  $\mu_T$  ;  
 $E_a$  - суммарная энергия активизации ( $E_a = E_D + E_{ПЕР}$ ).

Так как в объёме имеются как ионы примеси, так и собственные ионы, то

$$\sigma_D = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right)$$

$A_1$  и  $E_1$  - характеризуют примесную ионную проводимость,  
 $A_2$  и  $E_2$  - характеризуют собственную ионную проводимость.

При низких температурах преобладает первое слагаемое, а при высоких – второе. Ток, создаваемый движением ионов, называют током сквозной проводимости.

Поверхностная проводимость обусловлена наличием влаги, загрязнениями, различными дефектами на поверхности диэлектрика. По способности реагировать на влагу различают гидрофобные и гидрофильные материалы. Гидрофобные практически не смачиваются, и их удельное сопротивление велико. Гидрофильные смачиваются (адсорбируют влагу), и на поверхности образуется непрерывный токопроводящий слой. Адсорбцией влаги обладают полярные и ионные диэлектрики. Для уменьшения поверхностной электропроводности эти материалы защищают гидрофобными покрытиями.

## Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют мощность, расходуемую электрическим полем на поляризацию диэлектрика. Эта мощность выделяется в виде тепла. Потери обусловлены медленными поляризациями и электропроводностью диэлектрика.

### Неполярные диэлектрики

У неполярного диэлектрика пропорционально изменению напряженности поля изменяются электрические моменты диполей и, соответственно, электрические заряды, наводимые на обкладках конденсатора. В результате возникает ток смещения (ёмкостный ток), пропорциональный скорости изменения напряжённости электрического поля

$$I_{CM} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Если напряжённость поля изменяется по синусоидальному закону, то

$$I_{CM} = U\omega C$$

$I_{CM}$  опережает приложенное напряжение на  $90^\circ$ .

### Полярные диэлектрики

Если между обкладками помещён полярный диэлектрик, то поворот неупругих диполей запаздывает относительно изменения напряжения на величину временной релаксации

$$\tau_0 = 10^{-8} \text{ с}$$

В результате этого отставания возникающий ток опережает напряжение на угол меньше  $90^\circ$ . Этот ток называется *током абсорбции*.

Таким образом, ток смещения  $\underline{I}_{CM}$  обусловлен электронной поляризацией, а ток абсорбции  $\underline{I}_{AB}$  – дипольной. Кроме того, в диэлектрике существует сквозной ток  $\underline{I}_{CK}$ , совпадающий по фазе с напряжением. Следовательно, полный ток

$$\underline{I} = \underline{I}_{CM} + \underline{I}_{AB} + \underline{I}_{CK}$$

Активная составляющая полного тока

$$I_A = I_{CK} + I_{A AB}$$

Реактивная составляющая полного тока

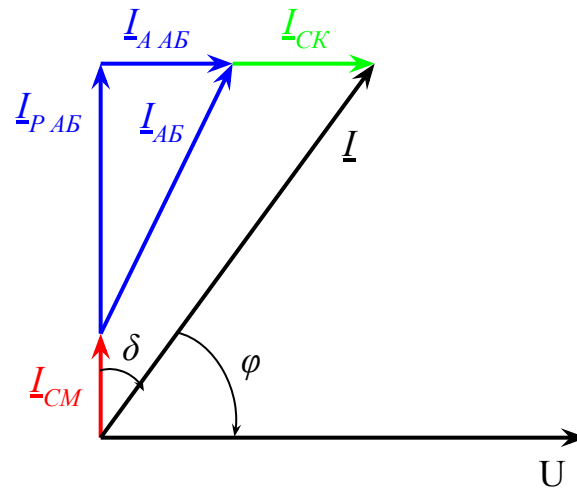
$$I_P = I_{CM} + I_{P AB}$$



$$\underline{I} = \underline{I}_{CM} + \underline{I}_{AB} + \underline{I}_{CK}$$

$$I_A = I_{CK} + I_{A AB}$$

$$I_P = I_{CM} + I_{P AB}$$



$\delta$  - угол диэлектрических потерь.

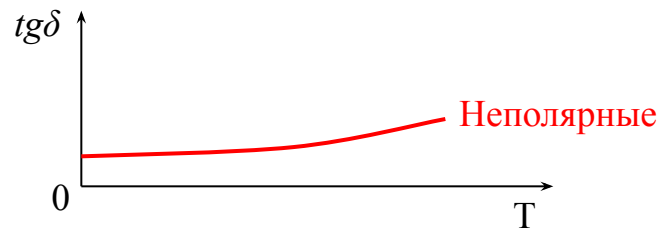
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_A}{I_P} \quad \delta = \operatorname{arctg} \frac{I_A}{I_P}$$

Мощность, выделяемая в диэлектрике

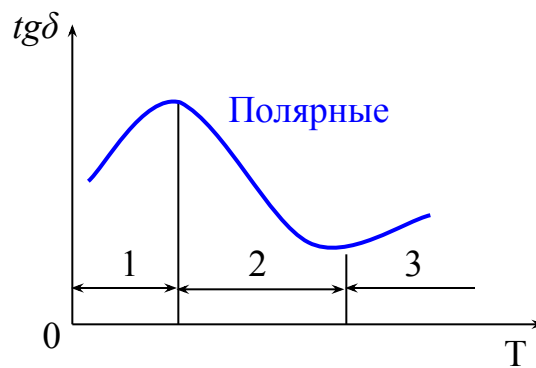
$$P = UI_A = UI_P \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

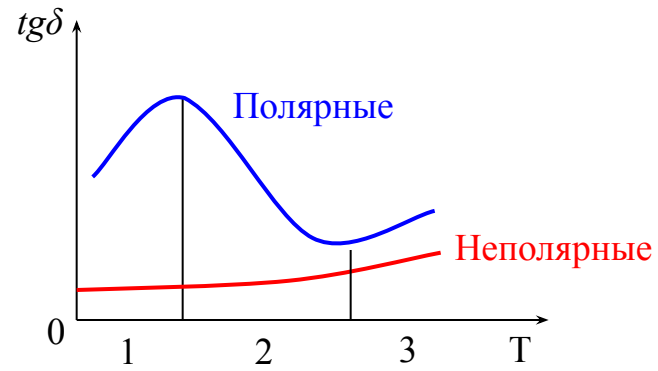
Потери в диэлектрике определяются  $\operatorname{tg} \delta$  и т.д. У широко применяемых диэлектриков  $\operatorname{tg} \delta = (2 \dots 5) 10^{-3}$ , у высококачественных -  $\operatorname{tg} \delta = (2 \dots 5) 10^{-4}$ .

У неполярных диэлектриков при возрастании температуры  $\operatorname{tg} \delta$  увеличивается из-за возрастания тока  $I_{CK}$ .



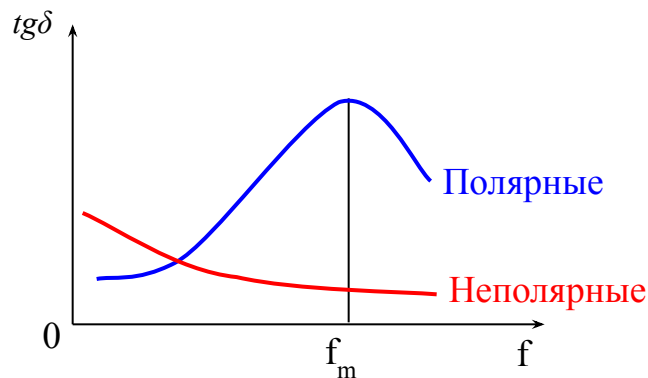
У полярных диэлектриков возможности поворота молекул при низких температурах ограничены из-за сил трения между ними. Поэтому количество молекул, участвующих в процессе дипольной поляризации, и время установления поляризации  $\tau_0$  невелики, вследствие чего  $tg \delta$  мал. По мере роста температуры облегчается поворот молекул, возрастает их количество, уменьшается время  $\tau_0$ , что ведёт к увеличению  $tg \delta$  (участок 1). Так происходит до тех пор, пока время  $\tau_0$  не окажется равным периоду изменения поля. Здесь  $tg \delta$  достигает максимума. При дальнейшем повышении температуры время  $\tau_0$  становится существенно меньше периода изменения напряженности поля, запаздывание дипольной поляризации практически исчезает и  $tg \delta$  уменьшается (участок 2). С повышением частоты максимум  $tg \delta$  смещается в область более высокой температуры. При дальнейшем повышении температуры  $tg \delta$  начинает увеличиваться, что связано с увеличением сквозного тока (участок 3).

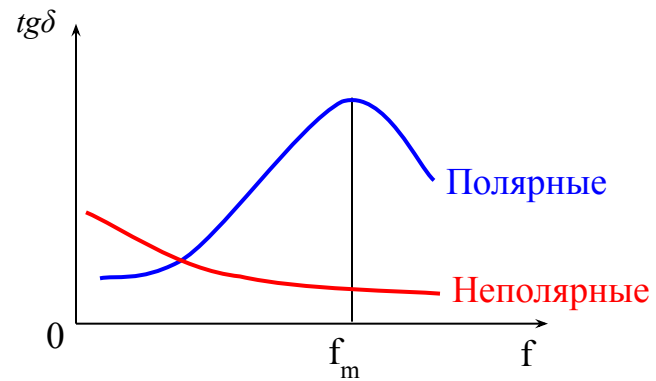




В неполярных диэлектриках с увеличением частоты возрастает ток  $I_P$ , а ток  $I_A$  сохраняется неизменным, поэтому  $tg\delta$  уменьшается

В полярных диэлектриках в области низких частот ток  $I_{AB}$  невелик, поэтому при повышении частоты  $tg\delta$  уменьшается за счёт роста тока  $I_{CM}$ . Затем с ростом частоты возрастает число переориентаций полярных молекул в единицу времени и увеличивается ток  $I_{AB}$ , вследствие чего растёт  $tg\delta$ . На частоте  $f_m$  время установления дипольной поляризации становится равным длительности периода изменения напряжённости поля и  $tg\delta$  достигает максимума. При дальнейшем увеличении частоты не хватает времени для переориентации полярных молекул, поэтому увеличивается ток  $I_{A AB}$ , что ведёт к уменьшению  $tg\delta$ .





## Электрическая прочность диэлектриков

Диэлектрики – изоляционные материалы. Повышение напряжения свыше  $U_{\text{ПР}}$  может привести к *пробою* диэлектрика

Электрическая прочность  $\mathcal{E}_{\text{ПР}}$  – минимальная напряжённость однородного электрического поля, приводящая к *пробою* диэлектрика.

$$\mathcal{E}_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{d_{\text{Д}}}$$

$d_{\text{Д}}$  – толщина диэлектрика.

## Четыре разновидности пробоя

### 1. Электрический пробой

Ударная ионизация атомов. Лавинообразный процесс нарастания тока. Развитие в течение  $10^{-7} \dots 10^{-5}$  с. Процесс обычно локализован в узкой области. Появляется разрядный канал, внутри которого повышается давление, что приводит к появлению трещин или к полному разрушению диэлектрика. Обычно этот вид пробоя наступает при  $\mathcal{E}_{ПР} = 10^3$  МВ/м

### 2. Тепловой пробой

*Тепловой пробой* наступает, когда количество теплоты, выделяемой в диэлектрике, превышает количество теплоты, отводимой от него в окружающую среду. Расплавление или обугливание



### 3. Электрохимический пробой

*Электрохимический пробой* обусловлен медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, которые развиваются под действием поля или разрядов в окружающей среде

### 4. Поверхностный пробой

*Поверхностный пробой.* Пробивается воздух вблизи поверхности твёрдого диэлектрика. Появляется проводящий канал. Напряжения пробоя зависит от давления, температуры и влажности воздуха. Для предотвращения поверхностного пробоя поверхность изолятора делают ребристой. Эффективная мера борьбы – замена воздуха жидким диэлектриком

## Классификация диэлектрических материалов

### *По функциям*

1. Электроизоляционные
2. Конденсаторные

*Электроизоляционные* – для отделения друг от друга элементов схемы и для изоляции токоведущих частей. Обладают невысокой диэлектрической проницаемостью и большим удельным сопротивлением.

*Конденсаторные* – для увеличения ёмкости конденсаторов. Они имеют повышенное значение  $\varepsilon$  и малый  $tg\delta$ .

## *По особенностям строения*

1. Полимерные материалы
2. Пластмассы
3. Электроизоляционные лаки, эмали и компаунды
4. Стёкла и ситаллы
5. Радиокерамические материалы
6. Резины
7. Волокнистые материалы
8. Слюды
9. Активные диэлектрики

1. ***Полимерные материалы*** – высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа многократно повторяющихся звеньев (мономеров). В зависимости от пространственной структуры макромолекул подразделяются на
  - 1.1. *Линейные* – образуют цепочечную последовательность повторяющихся звеньев. Термопластичны.
  - 1.2. *Пространственные* – образуют пространственную сетку. Не размягчаются (терморезистивны).

**2. Пластмассы** – многокомпозиционные материалы, состоящие из связующего вещества и наполнителей. Изделия из них изготавливают методом горячего прессования или литья под давлением. Корпуса РЭА, ламповые панельки, штепсельные разъёмы и т.д.

1.1. Гетинакс

1.2. Текстолит

1.3. Стеклотекстолит.

Стеклотекстолит отличается от гетинакса и текстолита повышенной механической прочностью и лучшими электрическими характеристиками. Слоистые пластики, облицованные красномедной фольгой с одной или с двух сторон, используются для изготовления печатных плат.

**3. Электроизоляционные лаки, эмали и компаунды** применяют для изоляции защиты элементов РЭА от внешних воздействий.

### 3.1. Электроизоляционные лаки

*Пропиточные лаки* – для пропитки обмоток трансформаторов, дросселей и т.д.

*Покровные лаки* – для создания на поверхности пропитанных обмоток и печатных плат электроизоляционных защитных покрытий.

*Эмальлаки* – для тонкоплёночной изоляции обмоточных проводов.

*Клеящие лаки* – для склеивания различных материалов.

### 3. 2 Электроизоляционные эмали

*Электроизоляционные эмали* – лаки, в состав которых входят неорганические вещества, повышающие твёрдость и механическую прочность лаковой плёнки.

## Компаунды

В основном состоят из тех же веществ, которые входят в состав лаковой основы электроизоляционных лаков, но не содержат растворителей.

*Пропиточные* – служат для заполнения пор, капилляров и воздушных включений в электроизоляционных материалах, используемых для изоляции обмоток трансформаторов, вследствие чего повышается электрическая прочность материала.

*Заливочные* – для герметизации радиокомпонентов и узлов РЭА.

#### 4. *Стёкла и ситаллы*

Стёкла и ситаллы – сплавы из специально подобранных оксидов. Имеют аморфную структуру.

##### **Стёкла**

*Кварцевое стекло*  $\varepsilon = 3,2 \dots 3,5$ ;

$tg\delta = 0,0002$ ;

$\mathcal{E}_{ПР} = 35 \dots 40$  МВ/м;

$\rho = 10^{14} \dots 10^{15}$  Ом/м.

**Ситаллы** – закристаллизованные стёкла, имеющие микрокристаллическую структуру.

$\varepsilon = 7,5 \dots 8,5$ ;

$tg\delta = (1 \dots 80)10^{-3}$ ;

$\mathcal{E}_{ПР} = 40 \dots 60$  МВ/м;

$\rho = 10^8 \dots 10^{12}$  Ом/м.

Ситаллы хорошо шлифуются, благодаря чему находят применение в качестве подложек гибридных интегральных микросхем.



## **5. Радиокерамические материалы**

*1. Установочные*

*2. Конденсаторные*

*Установочные* керамические материалы применяется для изготовления изоляторов и конструкционных деталей.

*Конденсаторные* керамические материалы используются в качестве диэлектрика конденсаторов ( $\varepsilon = 10 \dots 230$ ;  $\text{tg}\delta = 0,0001 \dots 0,0006$ ).

## **6. Резины**

Резины – для изоляции проводов и кабелей ( $\varepsilon = 3 \dots 7$ ;  $\text{tg}\delta = 0,02 \dots 0,1$ ).

## **7. Волокнистые материалы**

*Волокнистые материалы* – дерево, бумага, картон, лакоткани ( $\varepsilon = 7$ ;  $\text{tg}\delta = 0,01$ ).  
Применяются в качестве изоляционных материалов. Специальная конденсаторная бумага – в качестве диэлектрика низкочастотных конденсаторов.

## 8. Слюды

*Слюды* – водные алюмосиликаты с ярко выраженной слоистой структурой. В радиоэлектронике применяются

*Мусковит*. Высокочастотный диэлектрик ( $\varepsilon \approx 6...7$ ,  $\text{tg}\delta \approx 0,0003$ ).  
Способен работать при  $500...600\text{ C}^\circ$ . В его состав входят  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

*Флогопит*. Низкочастотный диэлектрик ( $\varepsilon \approx 7$ ,  $\text{tg}\delta \approx 0,0015$ ).  
Способен работать при  $800...900\text{ C}^\circ$ . В его состав кроме  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  входит  $\text{MgO}$ .

Фторофлогопит – синтетическая слюда ( $\varepsilon \approx 8$ ,  $\text{tg}\delta \approx 0,0002$ ).  
Способен работать до  $1100\text{ C}^\circ$ .

## *9. Активные диэлектрики*

- 1. Сегнетоэлектрики*
- 2. Пьезоэлектрики*
- 3. Пироэлектрики*
- 4. Электреты*

Активные диэлектрики характеризуются сильной зависимостью от внешних энергетических воздействий, что позволяет осуществлять генерацию, усиление, модуляцию и другие преобразования электрических и оптических сигналов. Находят применение в устройствах функциональной электроники (УФЭ), отличительной чертой которых является несхемотехнические принципы их построения.

## *По очереди*

**Сегнетоэлектрики.** Имеют доменную структуру и характеризуются спонтанной поляризацией, направление которой можно менять с помощью внешнего электрического поля. Следствием доменного строения сегнетоэлектриков является нелинейная зависимость их электрической индукции от напряжённости электрического поля и резко выраженная температурная зависимость диэлектрической проницаемости.

### *Применение.*

1. Для изготовления малогабаритных низкочастотных конденсаторов
2. Нелинейных конденсаторов (варикондов), ёмкость которых зависит от приложенного напряжения
3. Для ячеек памяти в вычислительной технике
4. Для модуляции и преобразования лазерного излучения

**Пьезоэлектрики.** Обладают сильно выраженным *пьезоэффектом*.

1. *Прямой пьезоэффект.* Под действием механических напряжений происходит поляризация диэлектрика. На поверхности возникают электрические заряды, линейно зависящие от механических усилий.
2. *Обратный пьезоэффект.* Изменение размеров диэлектрика под воздействием электрического поля.

**Пироэлектрики.** У них спонтанная поляризованность изменяется при изменении температуры. При неизменной температуре спонтанная поляризованность скомпенсирована свободными зарядами противоположного знака из-за процессов электропроводности и адсорбции заряженных частиц из окружающей атмосферы. При изменении температуры спонтанная поляризованность изменяется. Это сопровождается освобождением некоторого заряда на поверхности пироэлектрика. В подключённой цепи возникает электрический ток, пропорциональный скорости изменения температуры.

*Применяются* для создания тепловых датчиков и приёмников лучистой энергии, принцип действия которых состоит в том, что при облучении зачернённой (поглощающей) поверхности кристалла происходит его нагрев и возникает импульс тока, регистрируемый электронной схемой.

**Электреты.** Способны длительное время сохранять поляризованное состояние и создавать в окружающем их пространстве электрическое поле. Как постоянный магнит – магнитное поле.

*Применяются*

1. Для изготовления микрофонов
2. Телефонов
3. Механических вибраций
4. И др.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните, какие материалы называют проводниковыми.
2. Укажите, какое свойство диэлектриков является основным.
3. Укажите виды поляризации диэлектриков.
4. Опишите электронную поляризацию.
5. Опишите дипольную поляризацию.
6. Опишите ионную поляризацию.
7. Опишите спонтанную (самопроизвольную) поляризацию.
8. Укажите причины диэлектрических потерь.
9. Укажите виды пробоя диэлектриков.
10. Укажите классификацию диэлектрических материалов.