

Диэлектрическими потерями

называется энергия, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии на него электрического поля E и вызывающая нагрев диэлектрика.

Диэлектрические потери наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжении.

В постоянном поле:

потери P в диэлектрике обусловлены выделением тепла Джоуля при прохождении СКВОЗНОГО ТОКА:

$$P = U^2/R ,$$

R – сопротивление диэлектрика,

U – приложенная разность потенциалов.

В переменном поле:

$$U = U_0 \cdot \sin \omega t$$

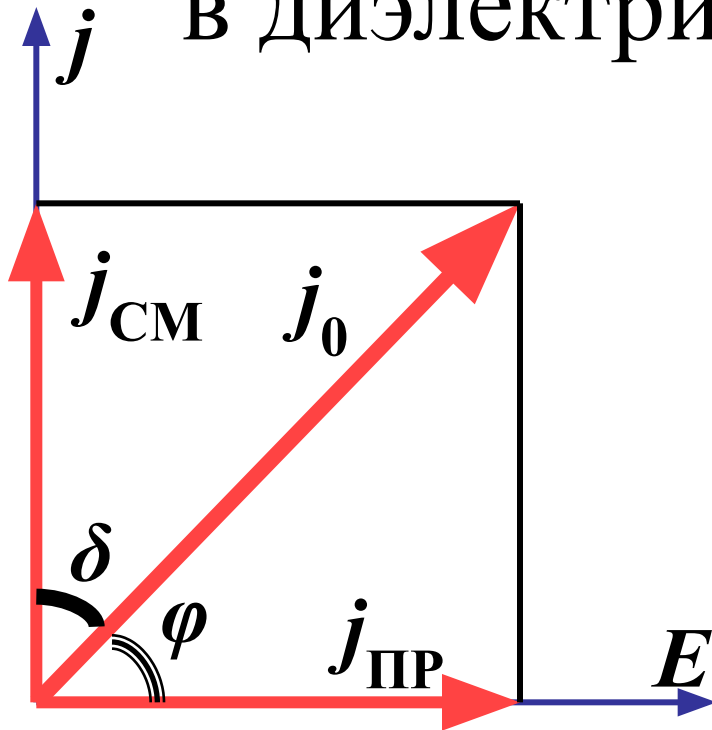
U_0 – амплитуда,

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота переменного напряжения

Энергия поля затрачивается на:

1. выделение тепла Джоуля;
2. медленные виды поляризации.

Векторная диаграмма токов в диэлектрике конденсатора



$$j_{\text{CM}} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega E \quad \text{A/M}^2$$

$$j_{\text{ПР}} = \gamma E \quad \text{A/M}^2$$

$$\text{tg} \delta = \frac{j_{\text{ПР}}}{j_{\text{CM}}} = \frac{j_{\text{a}}}{j_{\text{c}}} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega}$$

$$Q = 1/\text{tg} \delta$$

В «идеальном» диэлектрике ток проводимости $I_a=0$. В переменном поле ток, протекающий через конденсатор – это ток смещения в диэлектрике $I=I_r$.

В «идеальном» диэлектрике ток I отстаёт по фазе от вектора напряжения E на 90° .

В хороших диэлектриках угол сдвига фаз ϕ близок к 90° .

Угол δ , дополняющий угол ϕ до 90° :

$$\delta = 90^\circ - \phi.$$

наз. *углом диэлектрических потерь*.

Отношение активной и реактивной составляющих полного тока:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_r,$$

наз. *тангенсом угла диэлектрических потерь*, который м.б. определён экспериментально.

Потери на проводимость: $P = U^2/R$

$$I_a = U/R_a \quad \Rightarrow \quad P = U \cdot I_a ;$$

$$I_a = I_r \operatorname{tg} \delta \quad \Rightarrow \quad P = U \cdot I_r \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

$$I_r = U \cdot \omega \cdot C \quad \Rightarrow \quad P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [\text{Вт}]$$

Чем больше $\operatorname{tg} \delta$ изоляции, тем сильнее она нагревается в переменном поле.

Для неоднородного диэлектрика или поля, формула даёт среднее значение потерь по всему объёму

диэлектрика, или ***полные диэлектрические потери.***

Удельными диэлектрическими потерями p называется мощность, рассеиваемая в данном единичном объёме диэлектрика.

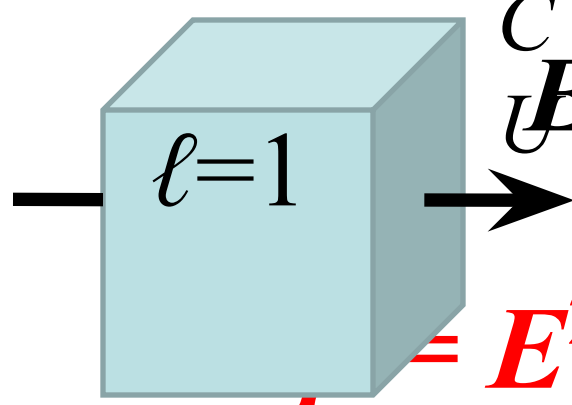


Diagram illustrating a dielectric cube with length $\ell = 1$. The electric field E is applied across the cube, and the voltage U is measured across it. The capacitance C is given by $C = \epsilon\epsilon_0 \cdot \Delta$, where $\Delta = S/\ell$. The voltage U is given by $U = E \cdot \ell$.

$$p = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot \operatorname{tg}\delta \quad [\text{Вт/м}^3].$$

Чем больше ϵ и $\operatorname{tg}\delta$, тем больше потери p в данном месте диэлектрика.

$\epsilon \cdot \operatorname{tg}\delta$ — коэффициент диэлектрических потерь

Виды диэлектрических потерь

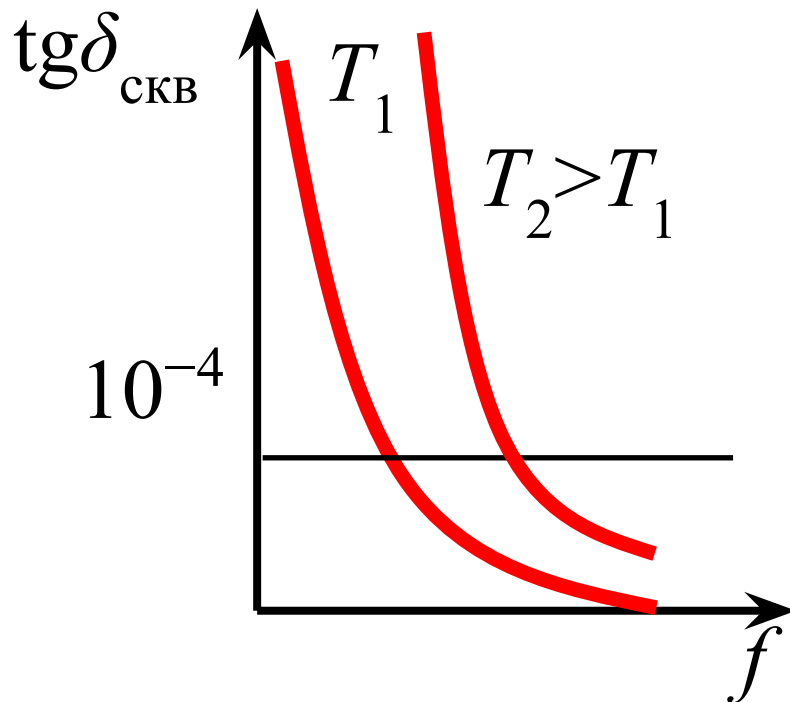
1. Потери на сквозную электропроводимость.
2. Потери на медленные виды поляризации.
3. Потери на неоднородность структуры диэлектрика.
4. Ионизационные потери.
5. Резонансные потери.

Диэлектрические потери на сквозную электропроводимость

наблюдаются во всех диэлектриках

$$P_{\text{СКВ}} = \gamma \cdot E^2$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{СКВ}} = \frac{\gamma_{\text{СКВ}}}{\omega \varepsilon \varepsilon_0} = \frac{1,8 \cdot 10^{-10}}{f \varepsilon \rho_v}$$

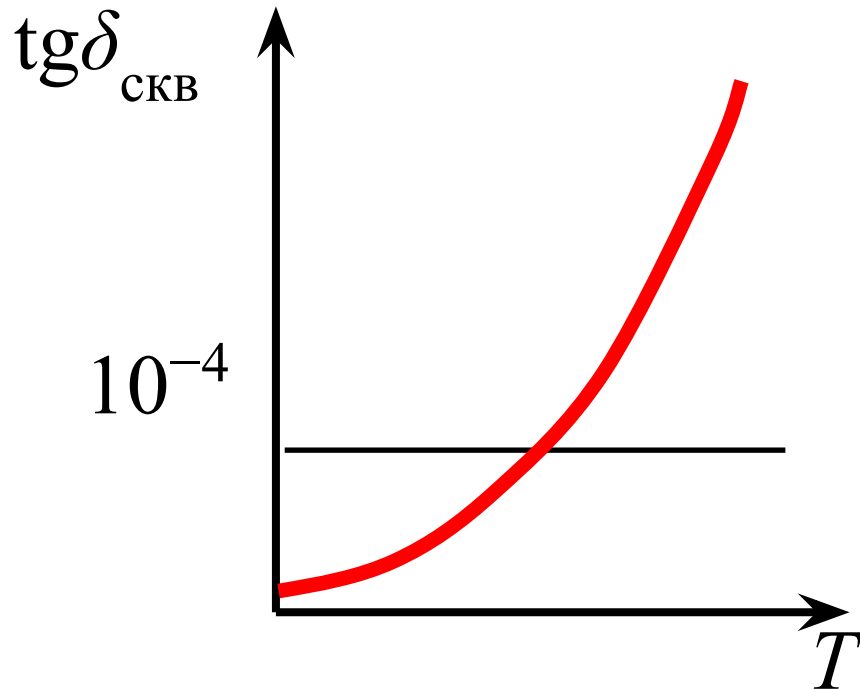


При $\rho > 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $f > 10 \text{ кГц}$,
 $\operatorname{tg} \delta_{\text{СКВ}} < 10^{-4}$.

Потери существенны лишь
при $50 < f < 1000 \text{ Гц}$, при
повышенных $T (> 100^\circ \text{ С})$ и
при снижении ρ (увлажнение).

С ростом T потери экспоненциально
возрастают из-за роста проводимости γ :

$$P_T = P_0 \cdot \exp(\alpha T)$$



P_T – потери при T ;

P_0 – потери при
 $T = 0^\circ\text{C}$ (или 20°C);

α – постоянная,
определяемая свойствами
диэлектрика.

Диэлектрические потери на медленные виды поляризации

проявляются в полярных диэлектриках и только
в переменных электрических полях

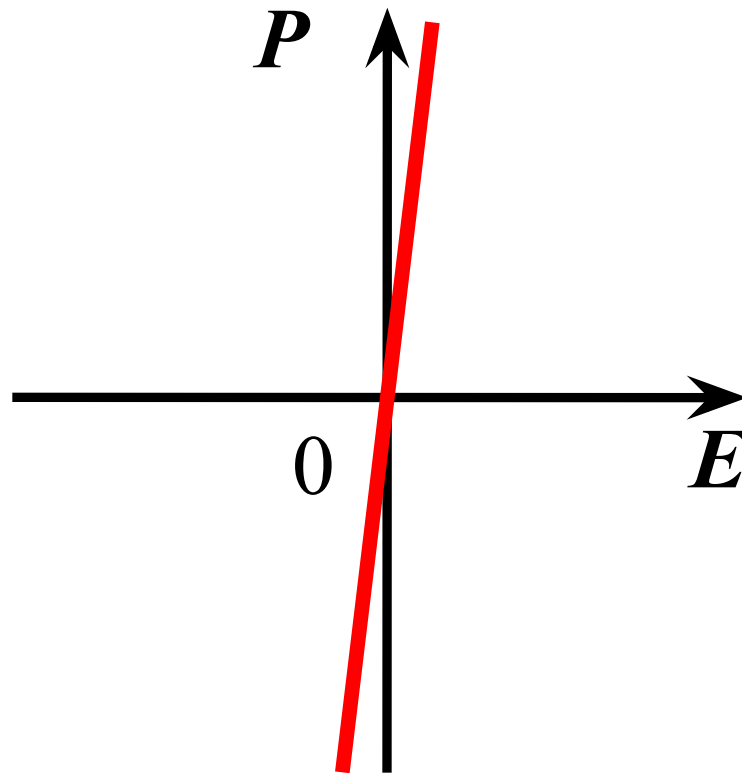
Работа, синусоидального поля E на поляризацию единицы объема диэлектрика за один период определяется интегралом по замкнутому контуру $P(E)$ и равна площади петли $P(E)$:

$$\omega = \oint P dE$$

Если $\tau \ll 1/f$

(область очень низких частот поля),

То $\mathbf{P}$ успевает следовать за $\mathbf{E}$, и $\oint \mathbf{P} d\mathbf{E} = 0$.



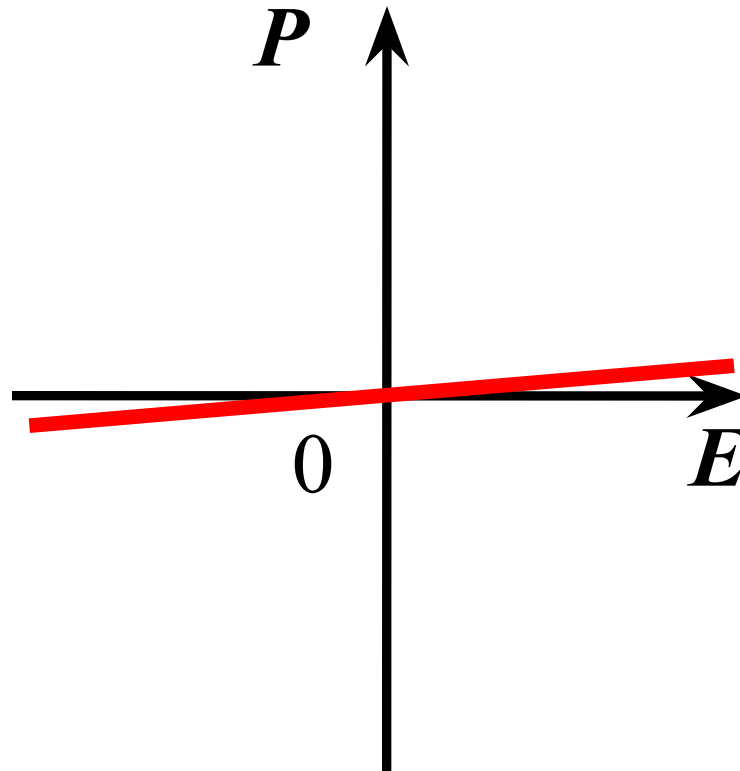
$\tau \ll 1/f$

Если $\tau \gg 1/f$,

(область очень высоких частот поля), то поляризация не успевает установиться

за полупериод изменения E ,

$$P=0 \text{ и } \oint P dE = 0.$$



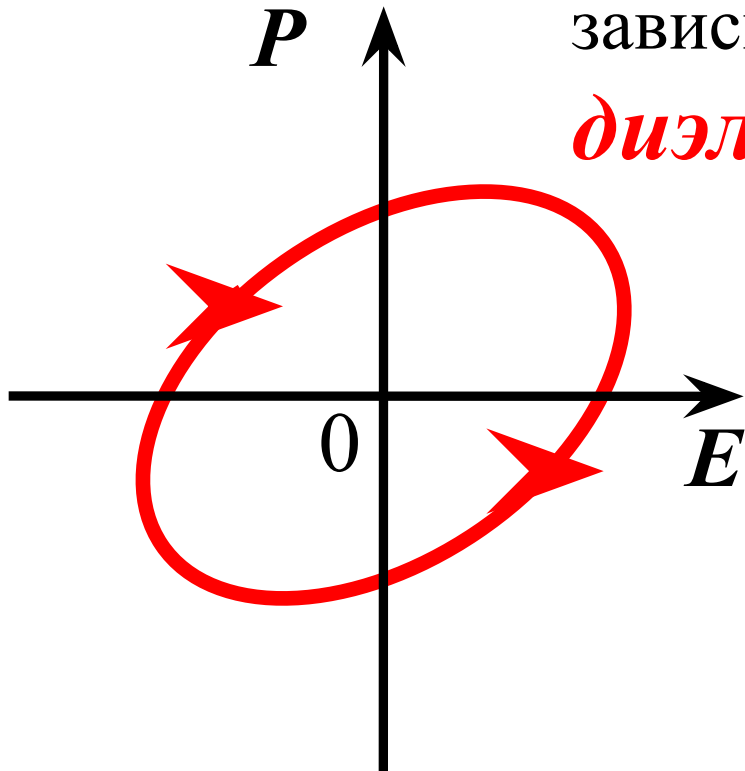
$$\tau \gg 1/f$$

Если $\tau \approx 1/f$,

то P отстает по фазе от E , и $\oint P dE > 0$.

На поляризацию затрачивается энергия поля E , переходящая в диэлектрические потери.

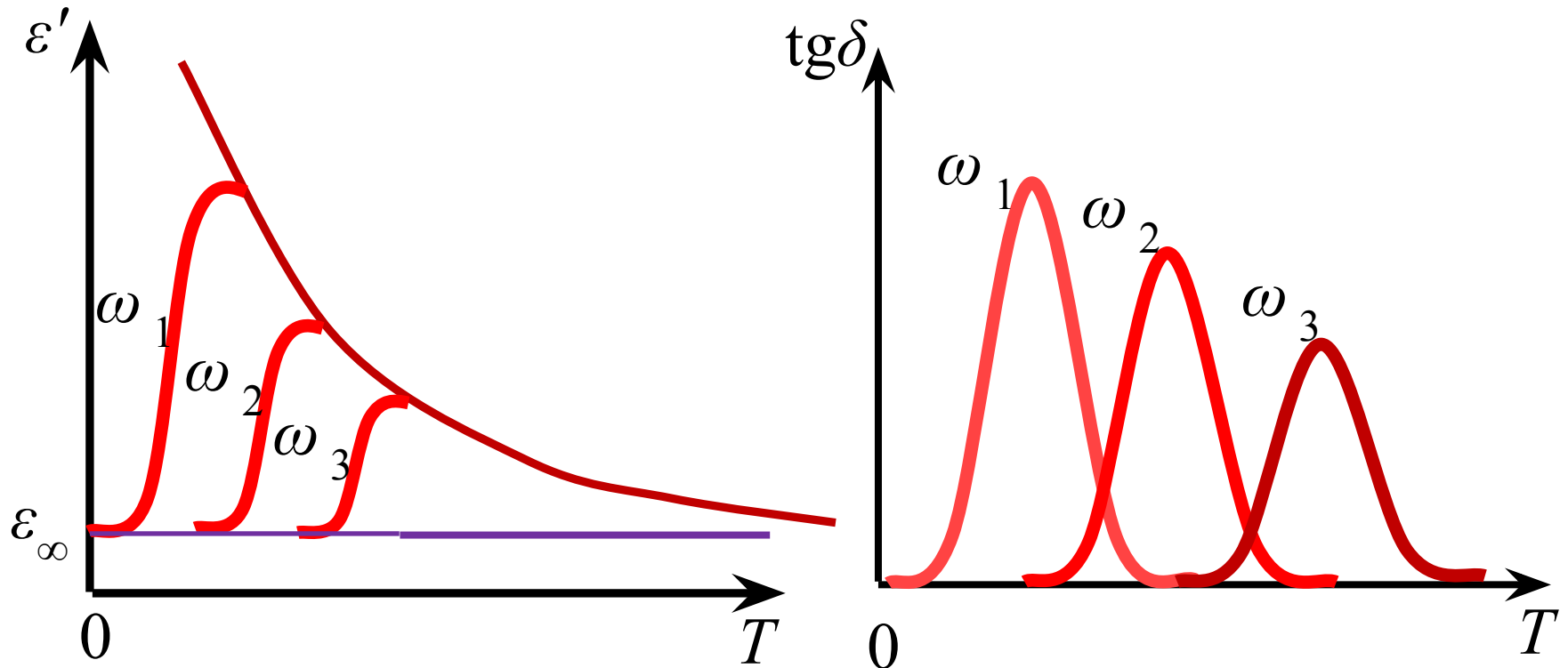
В области частот $f \approx 1/\tau$ наблюдается зависимость ε от частоты, называемая *диэлектрической дисперсией*.



Условие максимума
потерь: $\tau \approx 1/f$

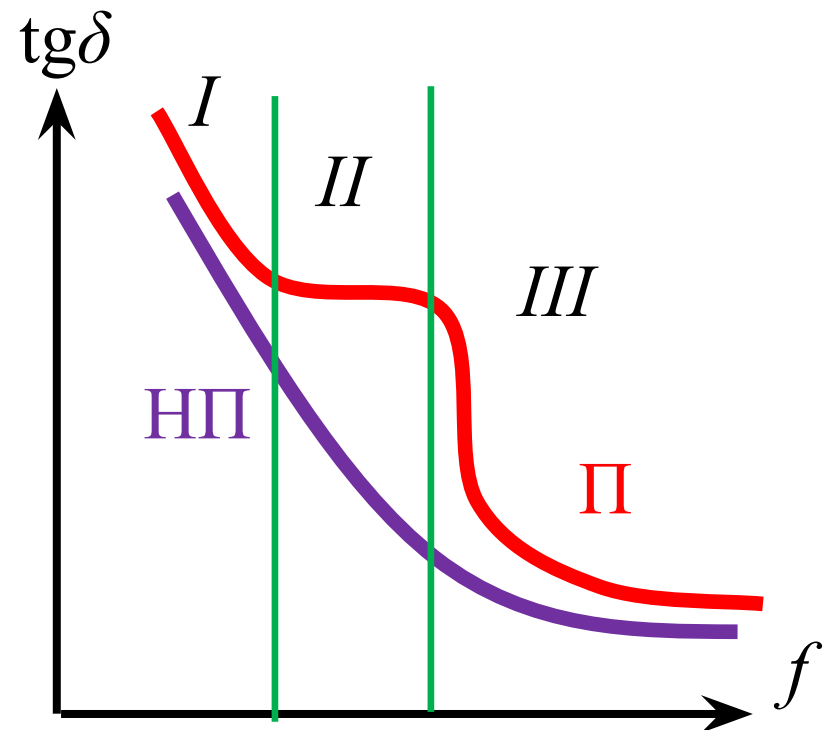
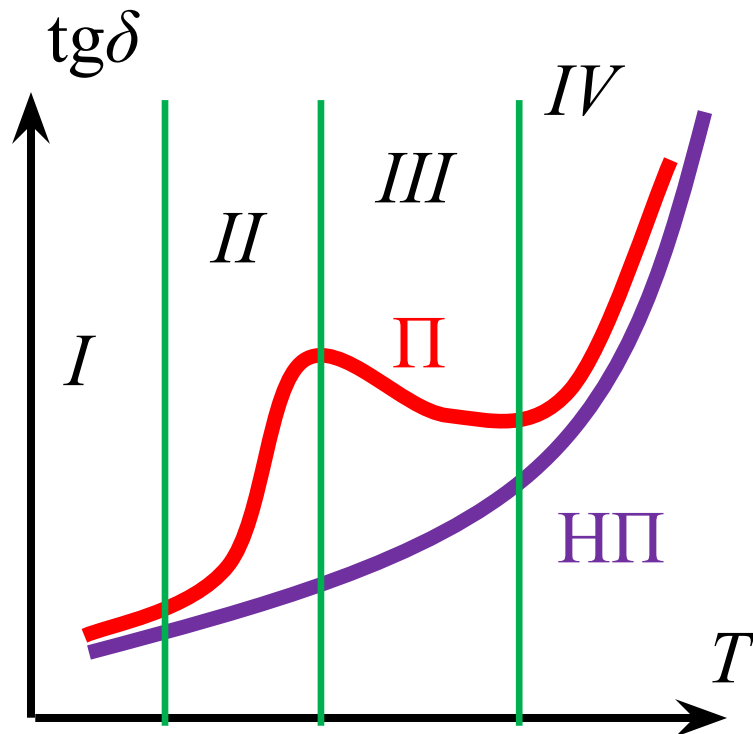
Время установления τ релаксационных видов поляризации уменьшается с ростом температуры $\Rightarrow$ с ростом T максимум диэлектрической дисперсии смещается в область более высоких частот электрического поля.

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$$



Диэлектрические потери в полярных диэлектриках складываются из потерь на электропроводность и релаксационных потерь.

Зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от T и f для полярного (П) и неполярного (НП) жидкого диэлектрика:



Диэлектрические потери на неоднородность структуры

характерны для композиционных диэлектриков
и диэлектриков с примесями
(в том числе и проводящими)

гетинакс, текстолит, слюдопласты, керамика,
компаунды, пропитанные материалы и т.д.

Миграционная поляризация обусловлена
миграцией зарядов в проводящих включениях и
их накоплением на границах неоднородностей.

Время установления τ очень велико.

Для композиционных материалов, состоящих из хороших диэлектриков, частота релаксации $f_p < 1$ Гц и миграционные потери малы даже на промышленной частоте (50 Гц).

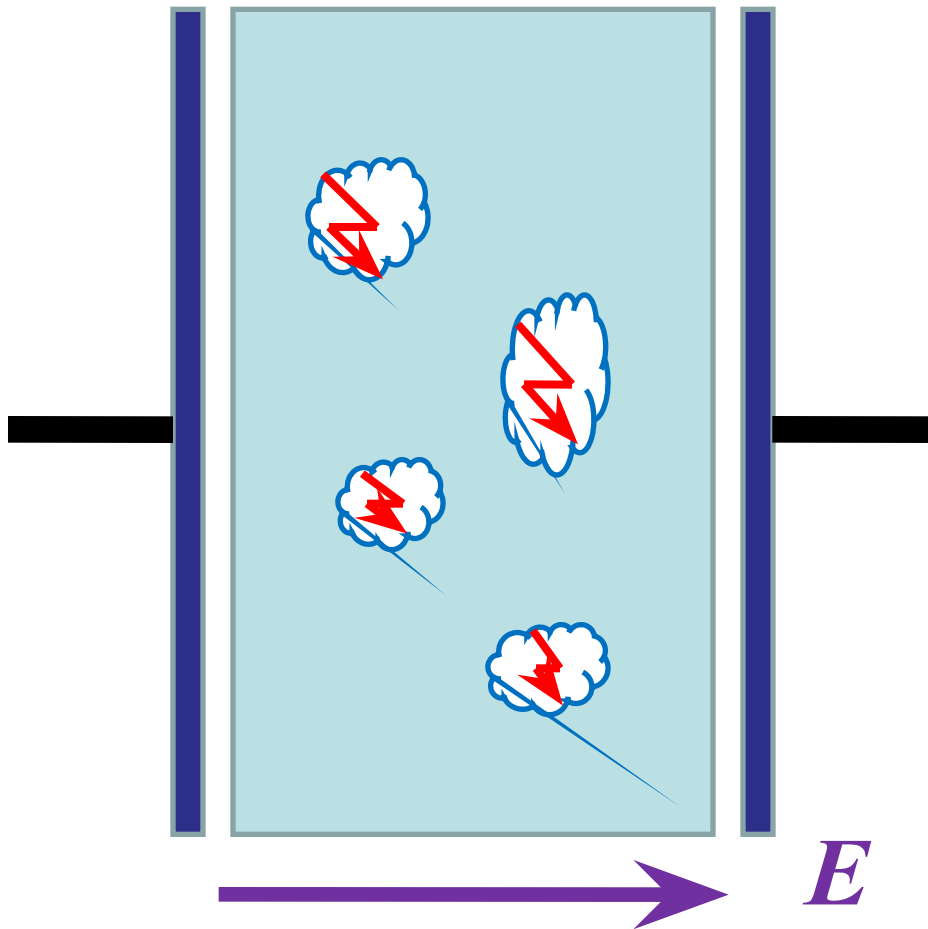
Если в диэлектрике есть проводящие включения, то f_p оказывается в области рабочих частот и миграционные потери необходимо учитывать.

Так, при увлажнении $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика возрастает, так как проводимость воды велика.

В случае миграционной поляризации, как и дипольной, возникает **интервал времен τ релаксации**, что приводит к увеличению частотного интервала миграционных потерь. Причина: неодинаковые свойства основной среды и проводящих включений диэлектрика, неодинаковая форма и ориентация включений.

С ростом T удельная проводимость γ растет экспоненциально, поэтому частота релаксации и максимума миграционных потерь повышается с ростом температуры.

Ионизационные диэлектрические потери в пористых диэлектриках при повышении напряжения сверх *порога ионизации* $U_{\text{ион}}$



Ионизационные потери:

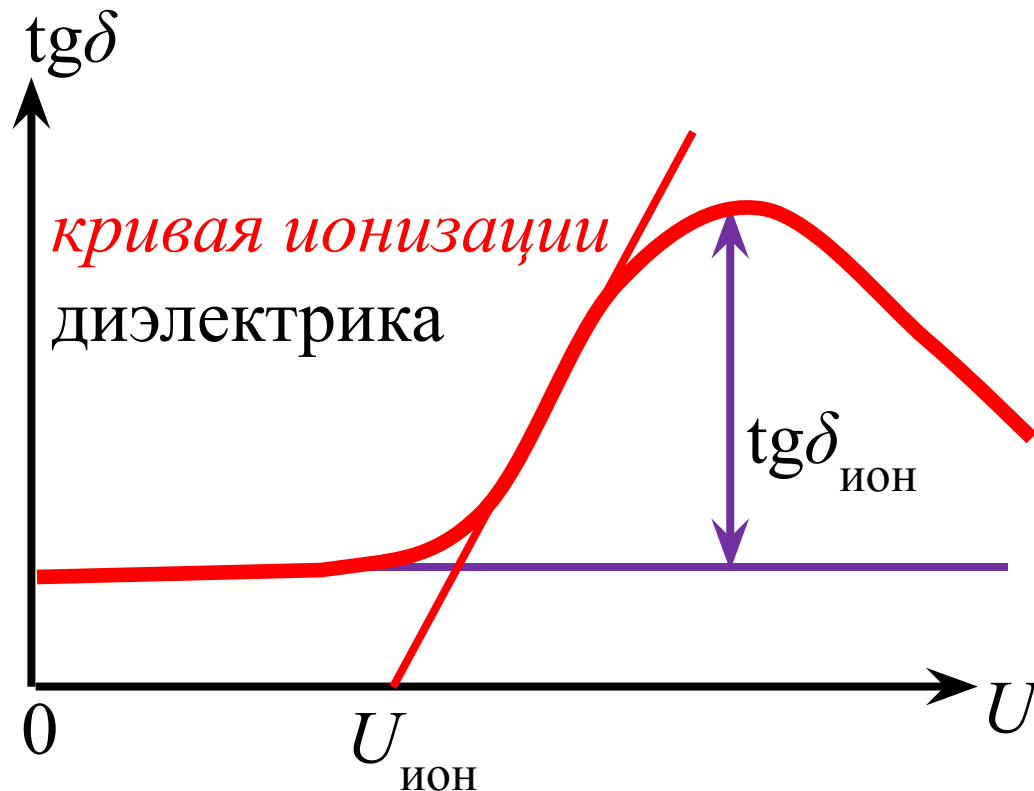
$$P_{\text{ион}} = Af(U - U_{\text{ион}})^3,$$

A – постоянная зависящая от свойств газа в порах;

f – частота приложенного электрического поля;

U – приложенное напряжение.

чем меньше приращение $\operatorname{tg}\delta$ из-за ионизационных потерь ($\operatorname{tg}\delta_{\text{ион}}$) и чем при более высоких напряжениях $U_{\text{ион}}$ начинается рост $\operatorname{tg}\delta$, тем выше качество изоляции высокого напряжения



Резонансные диэлектрические потери

Наблюдаются во всех диэлектриках.

Происходят при дисперсии резонансного характера, когда частота электрического поля приближается к частотам собственных колебаний электронов или ионов.

Резонансные потери электронной поляризации имеют максимумы в оптическом диапазоне: инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра (на частотах 10^{14} – 10^{17} Гц).

С ними связано поглощение света веществом.

Потери сопровождаются частотной зависимостью показателя преломления и максимальны в области т.н. «аномальной» дисперсии, где ε снижается с ростом ω .

Максимумы резонансных потерь ионной поляризации наблюдаются в инфракрасном диапазоне на частотах $10^{13} - 10^{14}$ Гц.

В веществах с высокой ε , а также в стеклах и ситаллах, где есть слабо связанные ионы, частоты ионного резонанса могут быть ниже ($\sim 10^{12}$ Гц).

В этом случае начало резонансного максимума потерь захватывает диапазон СВЧ ($10^9 - 10^{10}$ Гц).

Полный диэлектрический спектр

$$\rho = \rho_{\text{скв}} + \rho_{\text{д}} + \rho_{\text{ион}} + \rho_{\text{рез}} + \rho_{\text{миг}}$$

