

A decorative graphic on the left side of the slide consists of several overlapping squares in various shades of blue and purple, arranged in a stepped pattern. A horizontal bar at the top of the slide transitions from a light blue gradient on the left to white on the right.

ФИЗИКА ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ЛЕКЦИЯ № 14

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

- Связь между диэлектрической проницаемостью и поляризуемостью.
- Частотная зависимость диэлектрической проницаемости (ϵ).
- Зависимость ϵ температуры, давления, влажности, напряжения.
- Влияние агрегатного состояния на ϵ .
- Диэлектрические потери, угол, фактор диэлектрических потерь.
- Виды диэлектрических потерь

СВЯЗЬ МЕЖДУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ И ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬЮ

Диэлектрическая проницаемость ϵ связана с вектором поляризации \vec{P} и полем \vec{E} соотношением

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon - 1) \vec{E}$$

Электрическое поле, действующее на атом или молекулу внутри диэлектрика (локальное – $\vec{E}_{\text{лок}}$), не совпадает со средним макроскопическим полем \vec{E} в диэлектрике. Каждая молекула (или атом) находится в поле действия окружающих молекул. Это поле изменяется при наложении внешнего поля, т. к. молекулы поляризуются.

Действующее на какую-либо молекулу внутри кристалла поле $\vec{E}_{\text{лок}}$ можно представить в виде суммы:

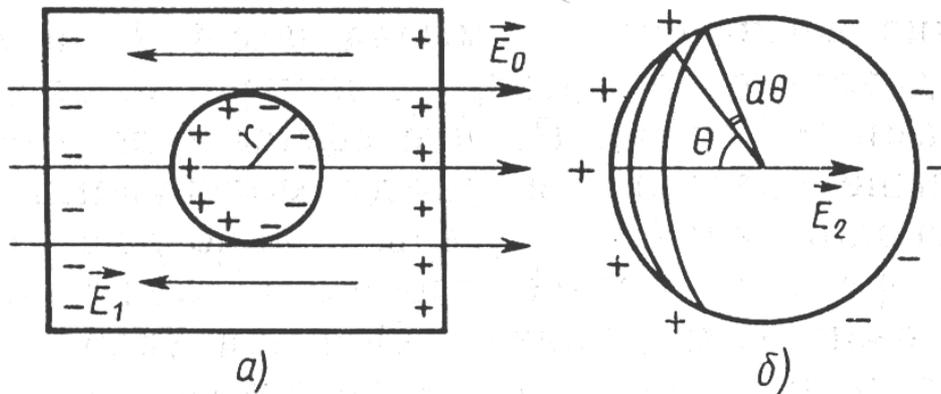
$$\vec{E}_{\text{лок}} = \vec{E}_0 + \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

\vec{E}_0 – внешнее поле

\vec{E}_1 – деполяризирующее поле, обусловленное зарядами, появившимися на поверхности диэлектрика в результате поляризации образца

$\vec{E}_0 + \vec{E}_1$ представляет собой макроскопическое поле в диэлектрике \vec{E} , создаваемое зарядами, расположенными вне диэлектрика \vec{E}_0 и поляризацией диэлектрика \vec{E}_1 .

$$E = \frac{P}{\epsilon_0(\epsilon - 1)}$$



Действие молекул, находящихся вне сферы, на рассматриваемую молекулу, описывается полем E_2 , а действие молекул, расположенных внутри сферы – полем E_3 .

К расчету локального поля методом Лорентца

Выделим на сфере элементарную поверхность dS в виде кольца, расположенного под углом θ к направлению внешнего поля. Заряд на поверхности dS обозначим через dq .

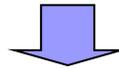
Напряженность поля, созданного зарядом dq , в центре сферы

$$dE_2 = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\theta$$

Заряд dq равен произведению плотности заряда ρ_n на площадь кольца, т. е. $dq = \rho_n dS$. Плотность заряда на сфере зависит как от величины поляризации диэлектрика, так и от угла θ :

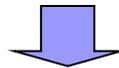
$$\rho_n = P \cos \theta$$

Учитывая, что $dS = 2\pi r^2 \sin \theta d\theta$: $dq = P \cos \theta 2\pi r^2 \sin \theta d\theta$

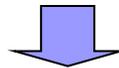


$$E_2 = \frac{P}{2\epsilon_0} \int_0^\pi \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = \frac{P}{3\epsilon_0}$$

В случае газов, неполярных жидкостей или кубических кристаллов можно считать $E_3 = 0$.



$$E_{\text{лок}} = \frac{P}{\epsilon_0(\epsilon - 1)} + \frac{P}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon + 2}{\epsilon - 1} \cdot \frac{P}{3\epsilon_0}$$



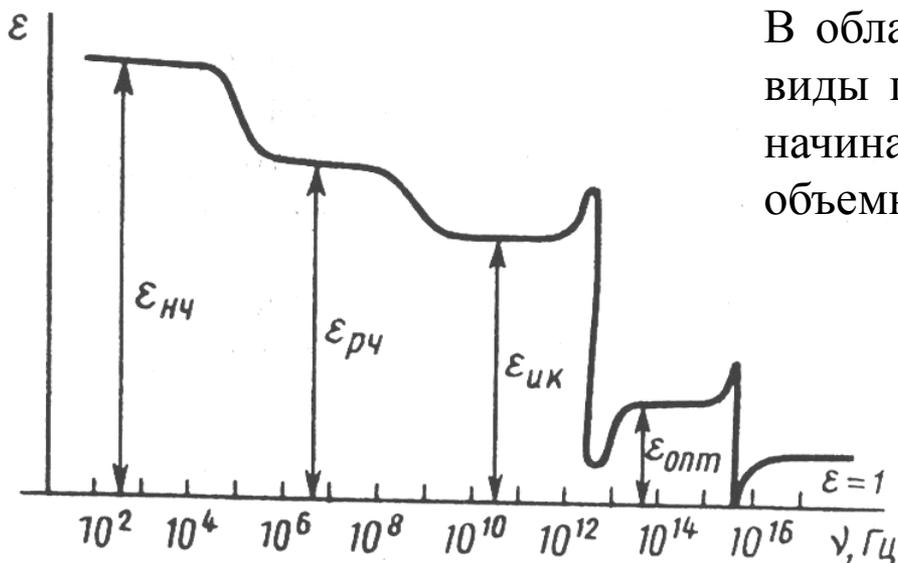
$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} \sum_m n_m \alpha_m$$

Уравнение Клаузиуса—Мосотти

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Если диэлектрик помещен в постоянное электрическое поле, то все виды поляризации, присущие данному веществу, успевают установиться.

В переменном электрическом поле с увеличением частоты начинают запаздывать сначала наиболее медленные, а затем другие виды поляризации.



Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты

В области низких частот вклад в ϵ вносят все виды поляризации, однако при $\nu = 10^4 - 10^5$ Гц начинают «выключаться» различные виды объемно-зарядной поляризации

В диапазоне радиочастот ($10^4 - 10^{11}$ Гц) перестают вносить вклад в ϵ тепловые механизмы поляризации (электронная, ионная и дипольная).

При частотах, соответствующих инфракрасной области спектра ($10^{11} - 10^{15}$ Гц) – запаздывание ионной упругой и дипольной упругой поляризации.

В области оптических частот (10^{15} – 10^{17} Гц) диэлектрическая проницаемость обусловлена только электронной упругой поляризуемостью.

Вклад электронной упругой поляризации может быть найден путем измерения ϵ на оптических частотах ($\epsilon_{\text{опт}}$).

Оптический показатель преломления вещества

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

где μ – относительная магнитная проницаемость.

На оптических частотах $\mu \approx 1$, поэтому $\epsilon_{\text{опт}} = n^2$.

Таким образом, в оптическом диапазоне частот:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{n_e \alpha_e}{3\epsilon_0}$$

ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ, ВЛАЖНОСТИ, НАПРЯЖЕНИЯ

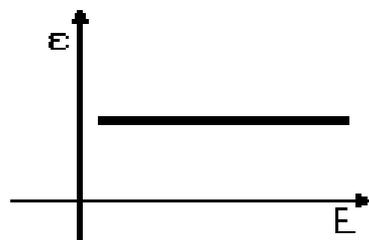
Характер температурной зависимости ϵ диэлектриков с различными видами поляризации определяют с помощью **температурного коэффициента диэлектрической проницаемости**

$$T_{k\epsilon} = 1/\epsilon \cdot d\epsilon/dT, K^{-1}$$

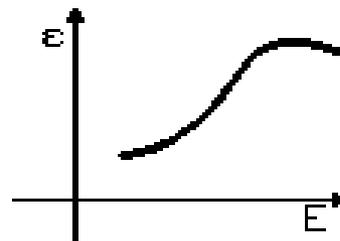
Влияние давления на ϵ учитывается **барическим коэффициентом**

$$B_{k\epsilon} = 1/\epsilon \cdot d\epsilon/dP, Pa^{-1}$$

Для линейных диэлектриков $B_{k\epsilon}$, как правило, положителен, так как при всестороннем сжатии диэлектрика увеличивается число способных поляризоваться молекул в единице объема. В некоторых полярных жидкостях в зависимости ϵ от давления наблюдается максимум.



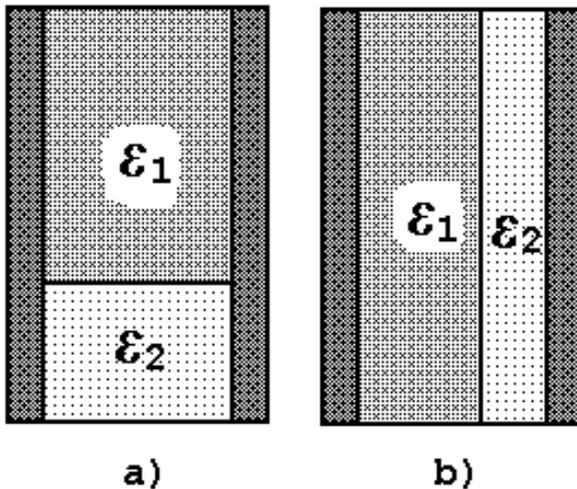
Линейные диэлектрики



Сегнетоэлектрики

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ СМЕСЕЙ

Для расчета эффективной ε^* смеси положим, что отдельные компоненты не вступают друг с другом в химические реакции, т. е. смесь чисто физическая.



Обозначая через y_1 и y_2 доли объемного содержания (объемные концентрации) первого и второго компонента для рассмотренного случая будем иметь для параллельного соединения:

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

для последовательного соединения

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

Для общего случая смеси, состоящей из m компонентов для **параллельного** соединения:

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

Для **последовательного** соединения:

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

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ СМЕСЕЙ

Для "**вспененных**" материалов (пенопластов, пенокерамики и др.), заполненных большим количеством мелких пор (считая, что для газов $\epsilon=1$, а плотность равна нулю) :

$$\lg \epsilon^* = D^* / D_T \lg \epsilon_T$$

ϵ_T , D_T – диэлектрическая проницаемость и плотность сплошного, твердого диэлектрика

ϵ^* , D^* – диэлектрическая проницаемость и плотность вспененного материала

Основные виды поляризации в некоторых газообразных, жидких и твердых диэлектриках

| Материал | диэлектрическая проницаемость | полярность | виды поляризации |
|-----------------------------|-------------------------------|------------|--|
| ГАЗЫ | | | |
| Воздух | 1.00058 | неполярный | электронная |
| Элегаз | 1.00191 | неполярный | электронная |
| Аммиак | 1.0066 | полярный | электронная, дипольная |
| ЖИДКОСТИ | | | |
| Кабельное масло МН-4 | 2.2 | неполярный | электронная |
| Бензол | 2.218 | Неполярный | электронная |
| Трихлордифенил | 5.9 | полярный | электронная, дипольная |
| ТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ | | | |
| Парафин | 1.9 - 2.2 | неполярный | электронная |
| Полистирол | 2.2 - 2.6 | неполярный | электронная |
| Орг.стекло | 4.0 | полярное | электронная, дипольно-релаксационная |
| Фенолоформальдегидная смола | 4.5 | полярная | электронная, дипольно-релаксационная |
| Каменная соль | 6.0 | неполярная | электронная, ионная |
| Титанат кальция | 150 | полярный | электронная, ионная, электронно-релаксационная |
| Сегнетокерамика ВК-3 | 20000 | полярная | электронная, ионная, спонтанная |
| Бариевое стекло | 10 | полярное | электронная, ионная, ионно-релаксационная |

ВЛИЯНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Диэлектрическая проницаемость газов

Поляризация газа может быть чисто электронной или дипольной, если молекулы газа полярны, однако и в этом случае основное значение имеет электронная поляризация.

Диэлектрическая проницаемость различных газов тем больше, чем больше радиус молекулы газа, и численно близка к квадрату коэффициента преломления света для этого газа.

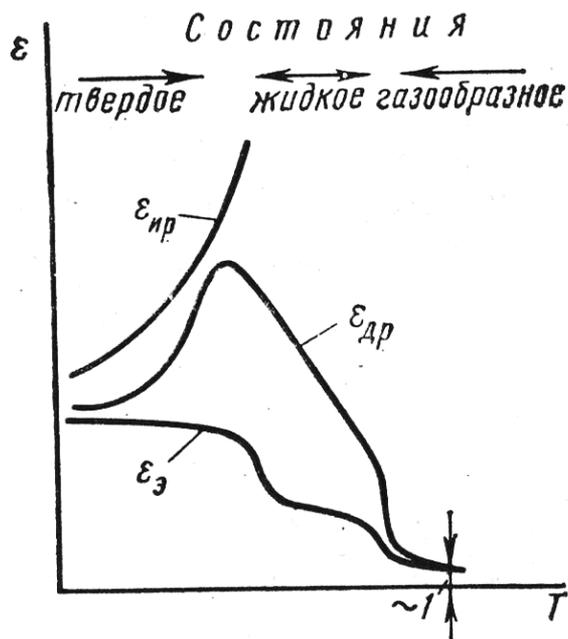
Зависимость диэлектрической проницаемости газа от температуры и давления определяется числом молекул в единице объема газа, которое пропорционально давлению и обратно пропорционально абсолютной температуре.

У воздуха в нормальных условиях **относительная диэлектрическая проницаемость** равна 1,0006, а ее **температурный коэффициент** имеет значение около $-2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

Значение относительной диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей определяется электронной поляризацией, поэтому оно невелико, близко к значению квадрата показателя преломления света $\epsilon \approx n^2$ и обычно не превышает 2,5.

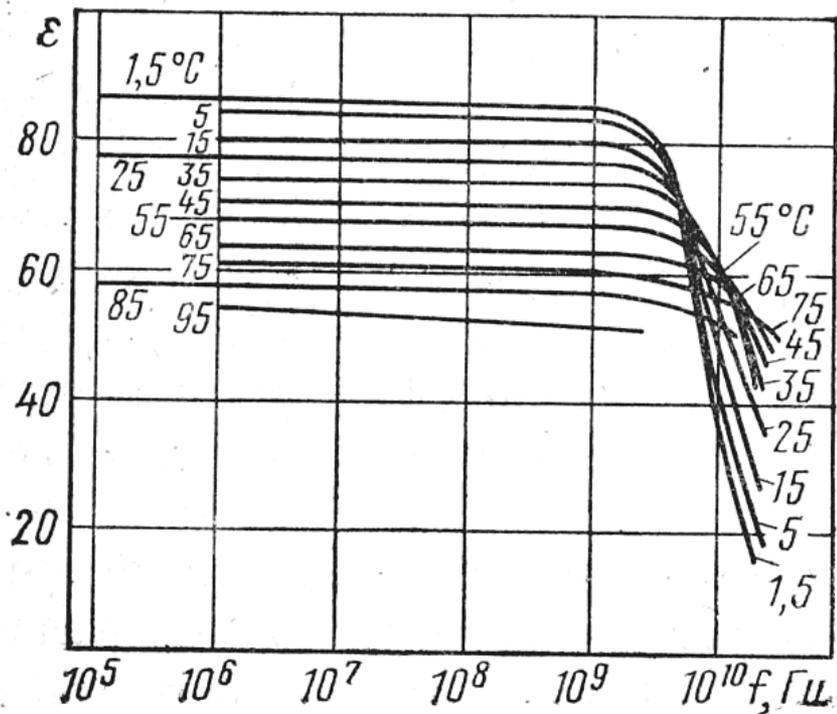
Зависимость диэлектрической проницаемости неполярной жидкости от температуры связана с уменьшением числа молекул в единице объема, т. е. с уменьшением плотности, по абсолютному значению температурный коэффициент $\epsilon (T_{к\epsilon})$ близок к температурному коэффициенту объемного расширения жидкости.



Поляризация жидкостей, содержащих дипольные молекулы, определяется одновременно электронной и дипольно-релаксационной составляющими.

Кривые температурной зависимости диэлектрической проницаемости при электронной, дипольно-релаксационной и ионно-релаксационной поляризациях.

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

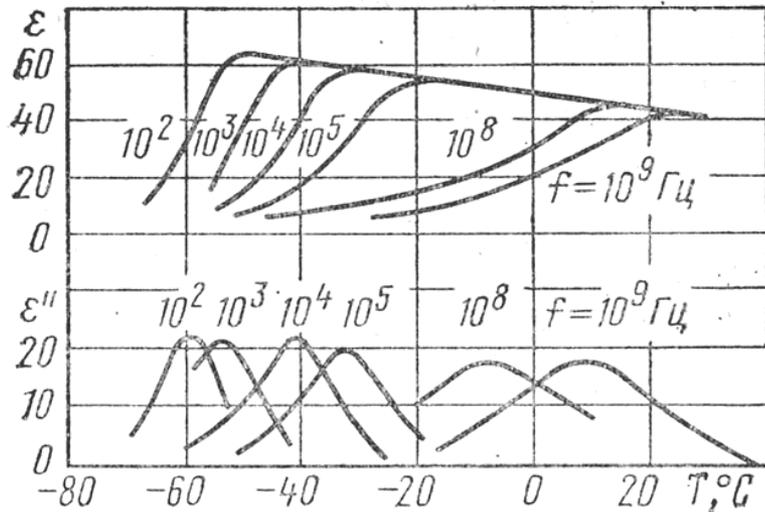


Частотные характеристики ϵ воды при различной температуре

Пока частота настолько мала, что диполи успевают следовать за изменением поля, ϵ велика и близка к значению, определенному при постоянном напряжении.

Когда частота становится настолько большой, что молекулы уже не успевают следовать за изменением поля, диэлектрическая проницаемость уменьшается и ее значение приближается к величине, обусловленной электронной.

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков



Составляющие комплексной диэлектрической проницаемости для глицерина при различных частотах и температурах

С увеличением частоты максимум зависимости ϵ смещается в область более высоких температур.

Это объясняется тем, что максимум наблюдается, когда время релаксации становится одного порядка с полупериодом действия поля.

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость неполярных твердых диэлектриков

| Материал | n | n ² | ε | Материал | n | n ² | ε |
|------------|------|----------------|-----------|----------|------|----------------|-----------|
| Парафин | 1.43 | 2.06 | 1.9 – 2.2 | Сера | 1.92 | 3.69 | 3.6 – 4.0 |
| Полистирол | 1.55 | 2.40 | 2.4 – 2.6 | Алмаз | 2.40 | 5.76 | 5.6 – 5.8 |

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с плотной упаковкой частиц, обладают электронной и ионной поляризациями и имеют значение диэлектрической проницаемости, лежащее в широких пределах.

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

Значения диэлектрической проницаемости и ее температурного коэффициента для некоторых ионных кристаллов (при $T = 20^\circ\text{C}$).

| Кристалл | ϵ | $T_{k\epsilon} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ | Кристалл | ϵ | $T_{k\epsilon} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ |
|------------------------------------|------------|---|--------------------------------------|------------|---|
| Каменная соль (NaCl) | 6 | +150 | Рутил (TiO_2) | 110 | -750 |
| Корунд (Al_2O_3) | 10 | +100 | Титанат кальция (CaTiO_3) | 150 | -1500 |

Диэлектрическая проницаемость различных неорганических стекол, приближающихся по строению к аморфным диэлектрикам, лежит в сравнительно узких пределах – примерно от 4 до 20; причем $T_{k\epsilon}$ стекол, как правило, положителен.

Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков

Диэлектрическую проницаемость сложных диэлектриков, представляющих собой смесь химически невзаимодействующих друг с другом компонентов с различными диэлектрическими проницаемостями, можно в первом приближении определить на основании [уравнения Лихтенеккера](#):

$$\varepsilon^x = \theta_1 \varepsilon_1^x + \theta_2 \varepsilon_2^x$$

Здесь ε , ε_1 , ε_2 — соответственно относительные диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонентов; θ_1 и θ_2 — объемные концентрации компонентов, $\theta_1 + \theta_2 = 1$; x — величина, характеризующая распределение компонентов и принимающая значения от +1 до -1.

При параллельном включении компонентов $x = +1$:

$$\varepsilon = \theta_1 \varepsilon_1 + \theta_2 \varepsilon_2$$

При последовательном включении компонентов $x = -1$:

$$1/\varepsilon = \theta_1 / \varepsilon_1 + \theta_2 / \varepsilon_2$$

Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков

Если оба компонента распределены хаотически (что имеет место в ряде технических диэлектриков, например, в керамике), то после преобразования уравнения Лихтенеккера и подстановки $x=0$, получим

$$\ln \varepsilon = \theta_1 \ln \varepsilon_1 + \theta_2 \ln \varepsilon_2$$

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости сложного диэлектрика определяют дифференцированием уравнения по температуре:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{\theta_1}{\varepsilon_1} \frac{d\varepsilon_1}{dT} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_2} \frac{d\varepsilon_2}{dT}$$

$$T_{k\varepsilon} = \theta_1 T_{k\varepsilon 1} + \theta_2 T_{k\varepsilon 2}$$

Значение относительной диэлектрической проницаемости вещества, характеризующее степень его поляризуемости, определяется механизмами поляризации. Однако величина в большой мере зависит и от агрегатного состояния вещества, так как при переходах из одного состояния в другое существенно меняется плотность вещества, его вязкость и изотропность.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Диэлектрические потери – электрическая мощность, затрачиваемая на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле.

Потери энергии в диэлектриках наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжении, поскольку в технических материалах обнаруживается сквозной ток утечки, обусловленный электропроводностью.

Нагрев диэлектрика в **постоянном** электрическом поле зависит от значений удельных объемного и поверхностного сопротивлений (или удельной проводимости).

$$P = U^2/R$$

Удельные потери мощности для единичного объема диэлектрика в виде куба со стороной 1 м:

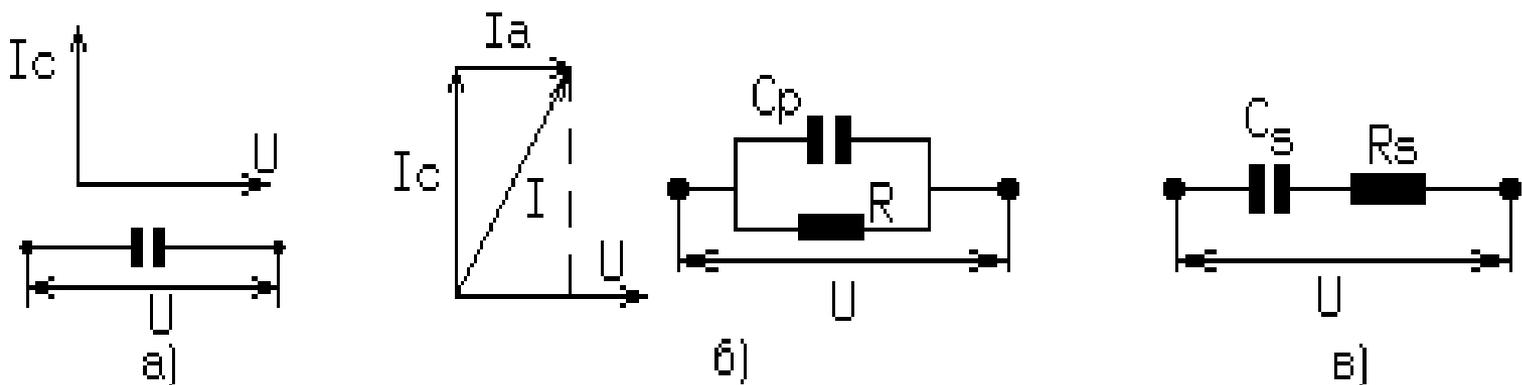
$$P_{уд} = E^2/\rho$$

В **переменном** электрическом поле диэлектрические потери (диэлектрическое поглощение) связаны в основном с процессами установления поляризации.

Упругие, быстропротекающие виды поляризации – электронная и ионная вызывают поглощение энергии электрического поля на частотах инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов, когда частоты собственных колебаний ионов и электронов совпадают с частотой электрического поля.

Основным источником диэлектрических потерь в широкой области радиочастот в большинстве случаев являются **релаксационные виды поляризаций**, связанные с тепловым движением ионов, электронов и полярных молекул, радикалов, доменов или объемных зарядов, локализованных на неоднородностях.

Угол диэлектрических потерь δ – угол, дополняющий до 90° угол сдвига ϕ .



Схемы замещения и векторные диаграммы:

- идеального диэлектрика а);

- диэлектрика с потерями б), в):

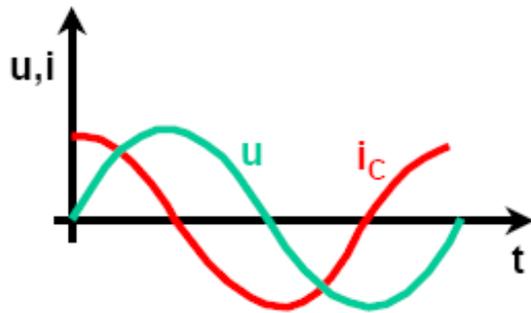
б) параллельная схема; в) последовательная схема.

Dielectrics

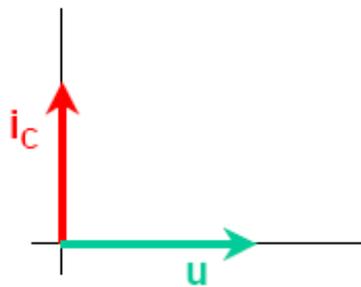
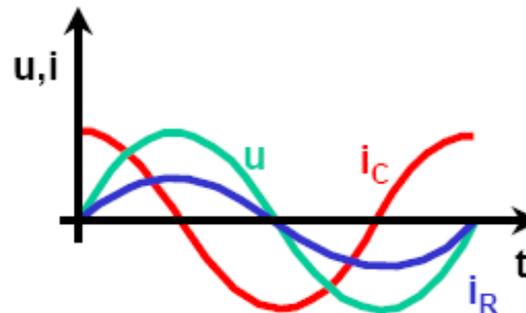
Dielectric Losses

alternating voltage u and current i :

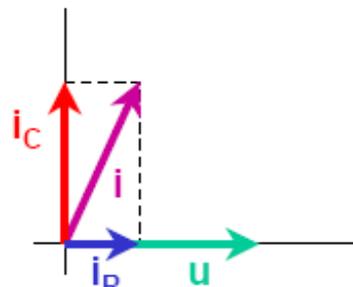
• ideal capacitor



• real capacitor



phase shift = 90°



phase shift $< 90^\circ$

• alternating current i

capacitive imaginary part

$$i = i_C + i_R = j\omega C \cdot u + \frac{1}{R} \cdot u$$

ohmic real part

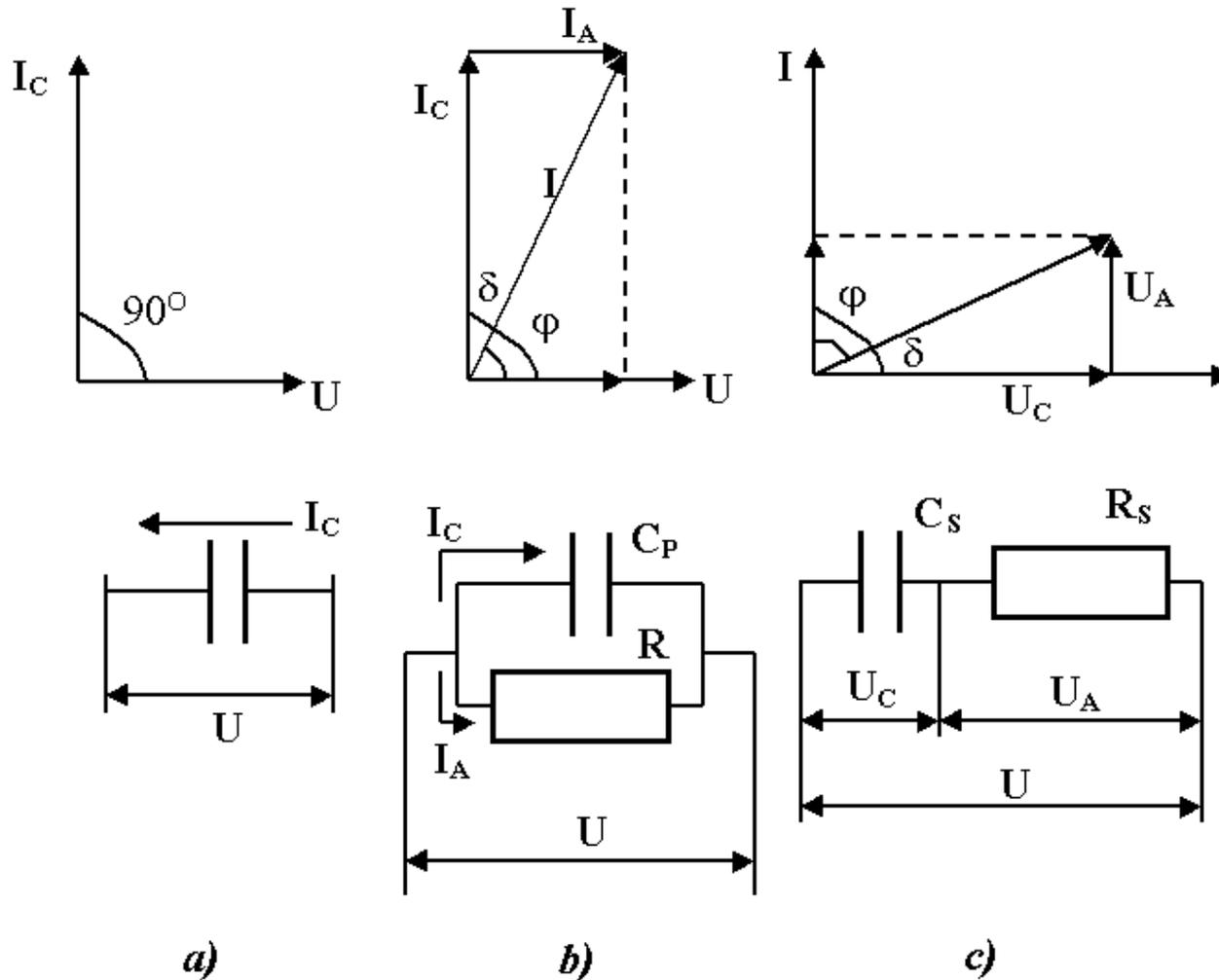
• dielectric loss factor $\tan \delta$

$$\tan \delta = \frac{|i_R|}{|i_C|} = \frac{1}{\omega RC}$$

• quality factor Q

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \omega RC$$

Векторные диаграммы для идеального диэлектрика, упрощенная векторная диаграмма диэлектрика с потерями и схемы замещения диэлектрика без потерь и с потерями



Для параллельной схемы из векторной диаграммы

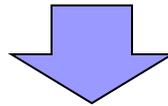
$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_c = 1 / (\omega C_p R)$$

$$P_a = UI_a = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta$$

Для последовательной схемы

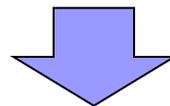
$$\operatorname{tg} \delta = U_a / U_c = \omega C_s r$$

$$P_a = IU_a = I^2 r = \frac{U^2 C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$



$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

$$R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right)$$



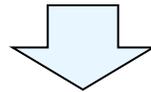
$$C_p \approx C_s = C$$

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

Для большинства диэлектриков параметры эквивалентной схемы зависят от частоты.

Если же потери в конденсаторе обусловлены главным образом сопротивлением подводящих и соединительных проводов, а также сопротивлением самих электродов (обкладок), например, тонким слоем серебра в слюдяном или керамическом конденсаторе, то рассеиваемая мощность в нем возрастет с частотой пропорционально квадрату частоты:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega^2 C^2 r$$



Конденсаторы, предназначенные для работы на высокой частоте, должны иметь по возможности малое сопротивление как электродов, так и соединительных проводов и переходных контактов.

Диэлектрические потери, отнесенные к единице объема диэлектрика, называют **удельными потерями**.

$$p = \frac{P_a}{V} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{Sh} = \frac{U^2 \omega \varepsilon \varepsilon_0 S \operatorname{tg} \delta}{Shh} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2$$

$$p = E^2 \cdot \gamma_a$$

где γ_a - активная удельная электрическая проводимость на переменном напряжении, которая определяется выражением

$$\gamma_a = \varepsilon \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta / 1,8 \cdot 10^{10}, \text{ См/м.}$$

Диэлектрические потери и активная удельная проводимость на переменном напряжении больше соответствующих параметров на постоянном напряжении

В электродинамике при описании взаимодействия электромагнитного поля с веществом часто используют величину, называемую **комплексной диэлектрической проницаемостью**:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

где действительная часть ε' имеет физический смысл **относительной диэлектрической проницаемости** ε , а ε'' характеризует потери $\varepsilon'' = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ и называется **коэффициентом диэлектрических потерь**.

Произведение $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \varepsilon''$ – фактор диэлектрических потерь.

При заданных частоте и напряженности электрического поля **удельные диэлектрические потери в материале пропорциональны коэффициенту потерь**.

Фундаментальное уравнение электродинамики (первое уравнение Максвелла), устанавливающее связь между изменениями электрического и магнитного полей:

$$\operatorname{rot} H = J + J_{cm} = \gamma E + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

В однородных идеальных диэлектриках сквозной ток отсутствует, т. е. $\gamma=0$. Для случая гармонического изменения поля уравнения (*) можно записать в комплексной форме:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = j\omega \epsilon \epsilon_0 \dot{E}$$

Если же имеем дело с несовершенным диэлектриком, обладающим заметными диэлектрическими потерями, то уравнение полного тока приобретает более сложный вид:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = (\gamma_f + j\omega \epsilon_0 \epsilon) \dot{E}$$

γ_f — полная удельная активная проводимость на данной частоте, учитывающая как сквозную электропроводность, так и активные составляющие поляризационных токов.

Задачу о распространении электромагнитного поля в частично проводящей среде можно свести к случаю идеального диэлектрика, если в уравнение ввести комплексную диэлектрическую проницаемость:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = j\omega \epsilon_0 \tilde{\epsilon} \dot{E}$$

где $\tilde{\epsilon}^* = \epsilon - j\gamma_f / (\omega \epsilon_0)$

Действительная составляющая комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon' = \varepsilon$, а мнимая $\varepsilon'' = \gamma_f / (\omega \varepsilon_0)$.

Ранее было показано, что $\operatorname{tg} \delta$ есть отношение активной составляющей проводимости к емкостной составляющей. Поэтому для плоского конденсатора при данной частоте справедливо соотношение

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma_f S / h}{\omega \varepsilon \varepsilon_0 S / h} = \frac{\gamma_f}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению.

Если диэлектрик используется в колебательном контуре, то диэлектрические потери препятствуют достижению высокой добротности (острой настройки на резонанс), так как с увеличением эквивалентного сопротивления потерь усиливается затухание колебаний в контуре.

Добротность обратно пропорциональна скорости затухания собственных колебаний в системе. То есть, чем выше добротность колебательной системы, тем меньше потери энергии за каждый период и тем медленнее затухают колебания.

Иногда для характеристики устройства с диэлектриком определяют **ДОБРОТНОСТЬ**, параметр обратный тангенсу угла диэлектрических потерь: $Q = 1/\operatorname{tg}\delta = \operatorname{ctg} \delta$

У материалов, применяемых на повышенных частотах и при высоких напряжениях, $\operatorname{tg}\delta$ лежит в пределах $10^{-3} - 10^{-4}$; для низкочастотных диэлектрических материалов - **полярных диэлектриков** значения $\operatorname{tg}\delta$ обычно $10^{-1} - 10^{-2}$, для **слабополярных** - до 10^{-3} . Для **хорошо осушенных газов**, не содержащих влаги, значения могут достигать $10^{-5} - 10^{-8}$.

ВИДЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Потери на электропроводность – характерны для всех без исключения диэлектриков. Наблюдаются при постоянном и переменном напряжении. В однородных неполярных диэлектриках являются единственным видом потерь.

Релаксационные потери – обуславливаются поляризацией диэлектриков. Вызываются активными составляющими абсорбционных токов замедленных поляризаций.

Потери, обусловленные неоднородностью – проводящими и газовыми включениями, слоистостью и т. п. Эти потери являются дополнительными релаксационными потерями. Наиболее часто они проявляются в виде потерь, обусловленных миграционной поляризацией, характерной в основном для композиционных и слоистых диэлектриков.

Ионизационные потери, возникающие в диэлектриках, содержащих поры или газовые включения.

Резонансные потери, возникающие на частотах, совпадающих с собственными частотами колебаний электронов или ионов.

ПОТЕРИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

Протекание сквозного тока через диэлектрик как в постоянном, так и в переменном электрическом поле приводит к диэлектрическим потерям на электропроводность.

Потери сквозной проводимости будут единственным видом потерь в однородном неполярном диэлектрике, для которого можно использовать простейшую параллельную схему замещения. Для такой схемы замещения по определению

$$\operatorname{tg}\delta = I_a / I_c = U/R \cdot (1/U\omega C) = 1/R\omega C$$

Для неширокого диапазона температур можно написать

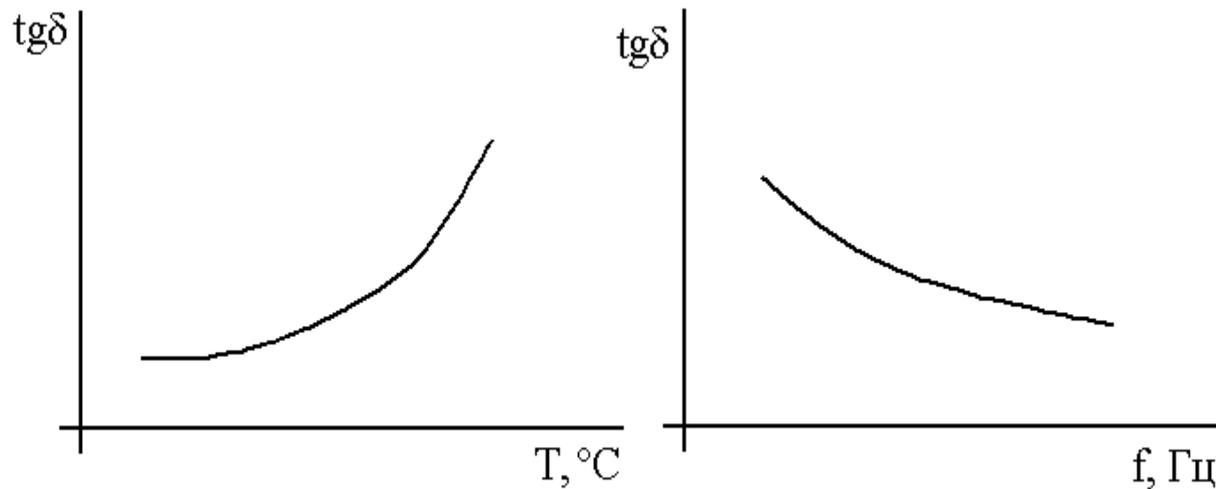
$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0 e^{aT}$$

где a и T - постоянные, характерные для данного диэлектрика.

Для ионных кристаллов

$$\operatorname{tg}\delta = (1,8 \cdot 10^{10} \cdot \gamma_0 / \varepsilon \cdot f) \cdot \exp(-W_a/kT)$$

Значения $\operatorname{tg}\delta$ неполярных полимеров (полиэтилена, политетрафторэтилена) ничтожно малы и лежат в диапазоне $(2-5) \cdot 10^{-4}$



На высоких частотах $\operatorname{tg}\delta$, обусловленный сквозным током, менее 10^{-4} . Следует иметь в виду, что $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора с неполярным диэлектриком с ростом частоты уменьшается не беспредельно, а, начиная с некоторой частоты, начинает линейно возрастать.

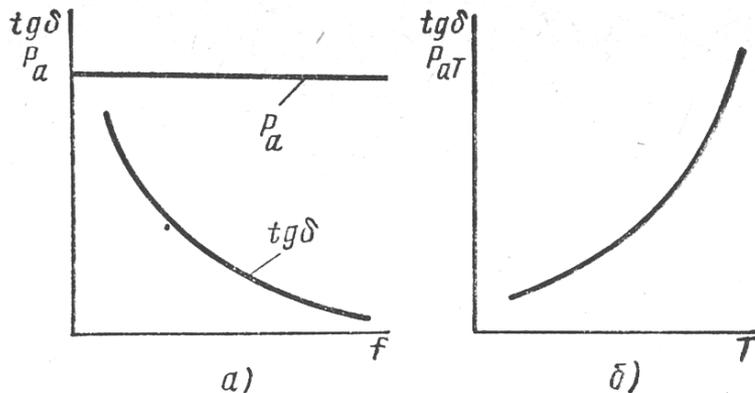
Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты приложенного напряжения; $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону. Значение тангенса угла диэлектрических потерь при данной частоте может быть вычислено по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1.8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon f \rho}$$

если известно ρ , измеренное на постоянном токе, и ε , измеренная при данной частоте. Потери сквозной электропроводности возрастают с ростом температуры по экспоненциальному закону:

$$P_{aT} = A \exp(-b/T)$$

где A , b – постоянные материала.



Частотные (а) и температурные (б) зависимости потерь на электропроводность

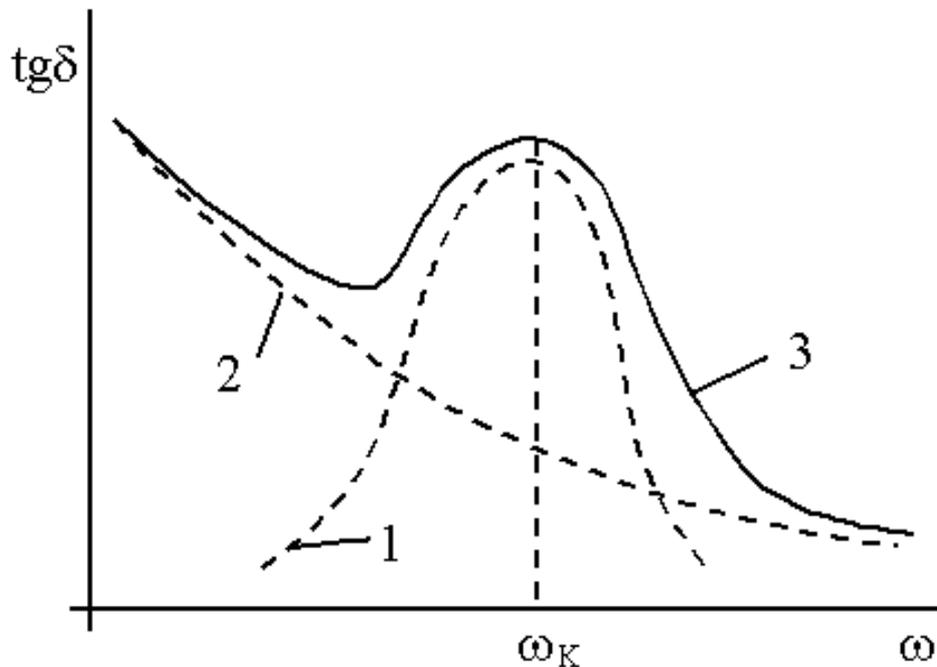
РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ

Релаксационные потери обусловлены активными составляющими поляризационных токов. Они характерны для диэлектриков, обладающих замедленными видами поляризации, и проявляются в области достаточно высоких частот, когда сказывается отставание поляризации от изменения поля.

В вязких жидкостях полярные молекулы - диполи, ориентируясь во внешнем поле преодолевают силы внутреннего трения (вязкость) в результате чего часть электрической энергии превращается в тепло. В твердых диэлектриках релаксационные потери вызываются как процессами установления дипольной поляризации, так и поляризацией, определяемой слабосвязанными ионами.

Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты для релаксационных поляризаций имеет наибольшую физическую ясность для полярных жидкостей, в которых дипольные молекулы могут сравнительно легко вращаться друг относительно друга, преодолевая силы вязкого трения.

Если пренебречь потерями сквозной проводимости, то для чисто дипольного механизма потерь при частоте ω_d будет наблюдаться максимум (кривая 1).

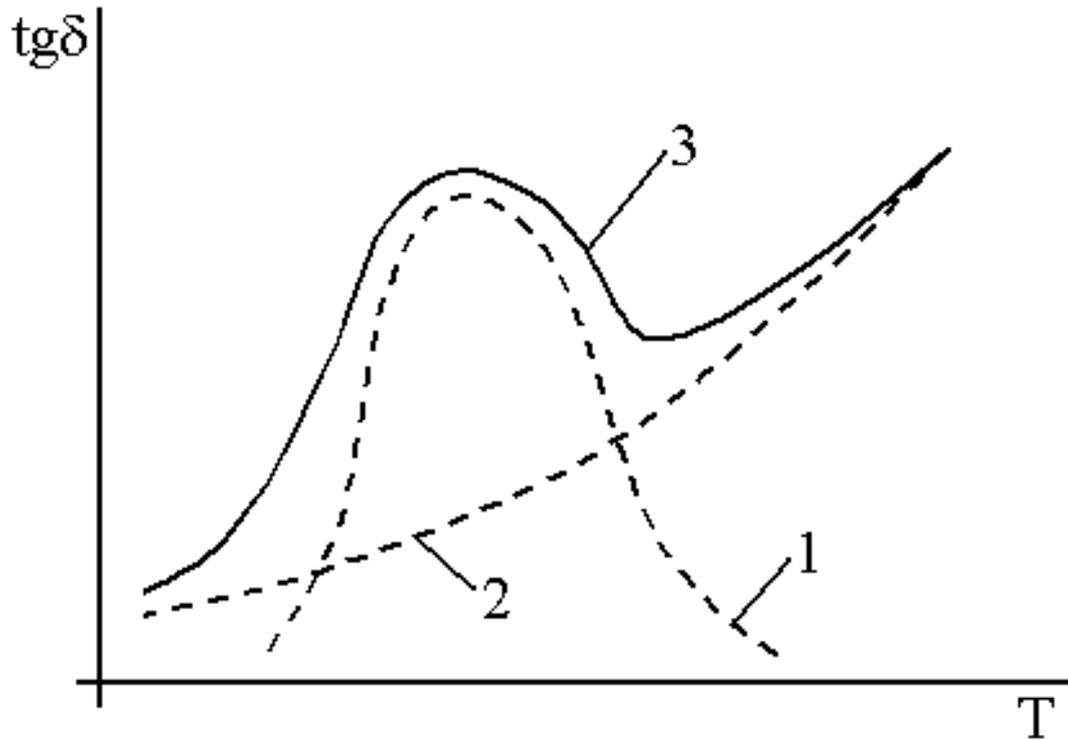


Условие максимума $\omega_d \tau = 1$

Зависимость $\text{tg} \delta$ от частоты для полярного диэлектрика: 1 – потери за счет дипольной поляризации, 2 – потери за счет сквозной проводимости, 3 – суммарные потери

Увеличение $\text{tg}\delta$ происходит до тех пор, пока время релаксаций дипольных молекул $\tau \ll 1/2f$, т. е. с ростом частоты диполям не хватает времени для ориентации $1/2f \ll \tau$ и $\text{tg}\delta$ уменьшается. Если в диэлектрике заметные потери сквозной проводимости, то они, в соответствии с выражением $\text{tg}\delta = 1/R\omega C_s$ уменьшаются с ростом частоты (кривая 2). В этом случае суммарная зависимость имеет вид кривой 3.

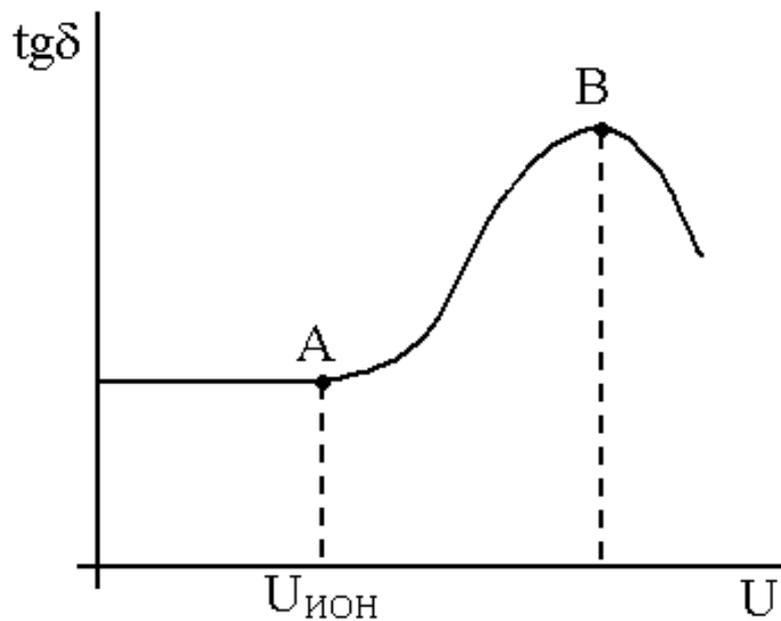
Зависимость $\text{tg}\delta$ полярных диэлектриков от температуры



Применительно к полярным жидкостям максимум можно объяснить тем, что начальное возрастание $\text{tg}\delta$ связано со снижением вязкости, уменьшением сил трения между диполями и, вследствие этого, их более легкой ориентации в электрическом поле, что приводит к росту $\text{tg}\delta$.

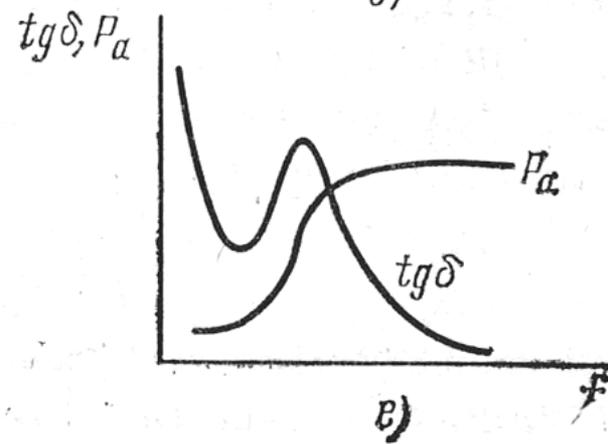
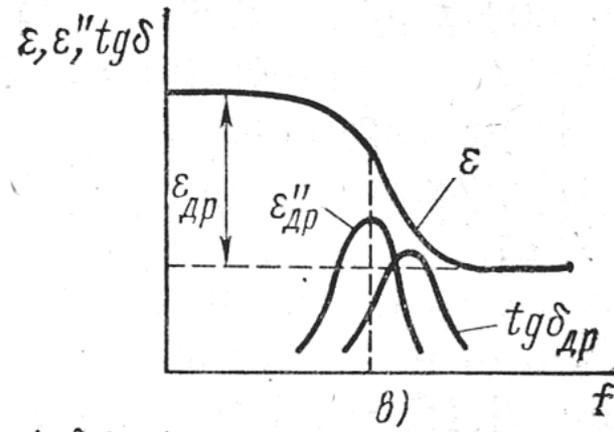
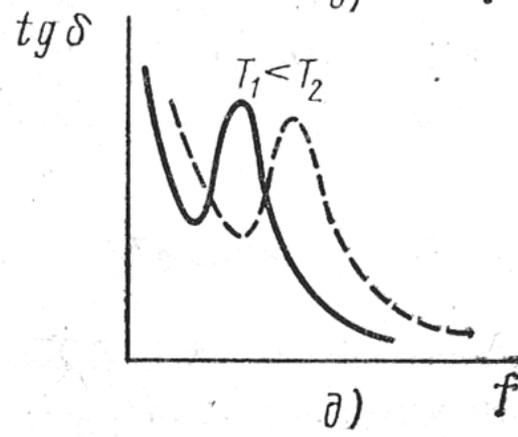
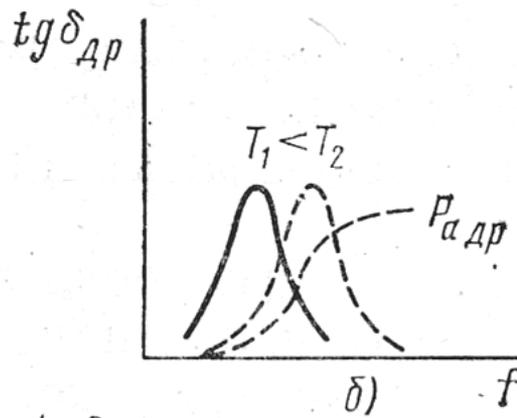
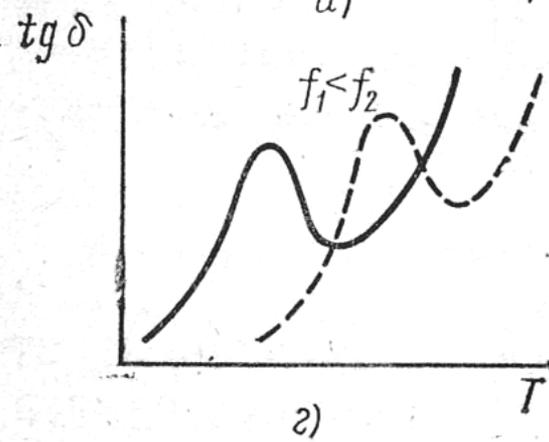
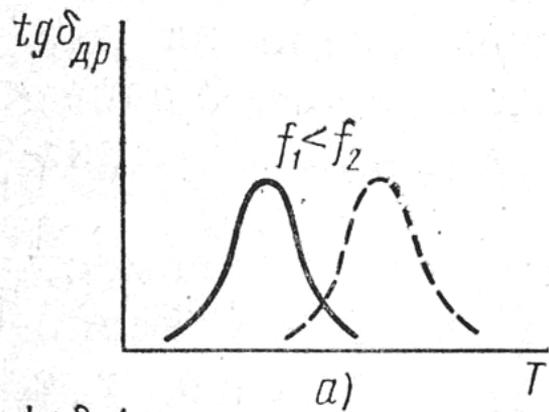
С другой стороны, с увеличением температуры нарастает тепловое хаотическое движение молекул дезориентирующее ориентацию диполей, что и приводит к уменьшению $\text{tg}\delta$ при достаточно высоких температурах, $\text{tg}\delta$, обусловленный сквозной проводимостью (кривая 2), суммируется с кривой 1, давая кривую 3.

Зависимость $\text{tg}\delta$ от напряжения имеет нелинейный характер в диэлектриках с пористой структурой, в волокнистой или прессованной изоляции, пористой керамике и пластмассах и т. д. Зависимость $\text{tg}\delta$ от напряжения (напряженности поля) в этом случае носит название кривой ионизации.



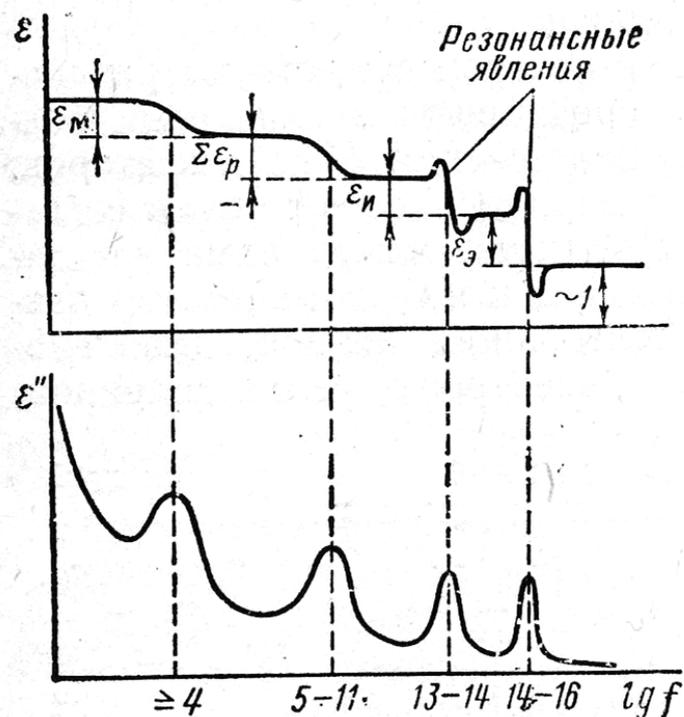
Кривая ионизации

Зависимость от влажности проявляется для гигроскопических диэлектриков, материалов волокнистых и с открытой пористостью, стекол, некоторых керамических материалов, ряда полярных диэлектриков. Увеличение влажности приводит у таких материалов к росту активных составляющих абсорбционных токов и токов сквозной проводимости, что приводит к увеличению $\text{tg}\delta$ и вызывает нагрев электрической изоляции.



Особенности релаксационных потерь в диэлектриках

Резонансные потери наблюдаются в некоторых газах при строго определенной частоте и выражаются в интенсивном поглощении энергии электромагнитного поля.



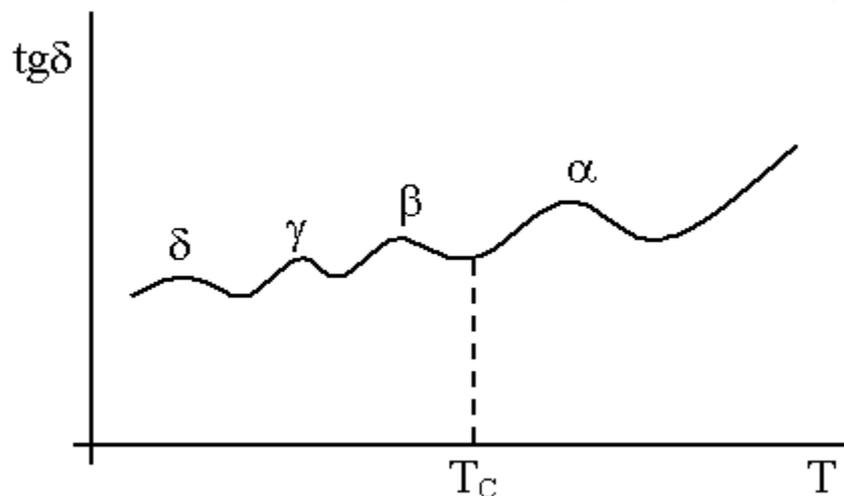
Резонансные потери возможны и в твердых телах, если частота вынужденных колебаний, вызываемая электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества.

Наличие максимума в частотной зависимости $\text{tg} \delta$ характерно и для резонансного механизма потерь, однако при изменении температуры максимум не смещается.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПОЛИМЕРОВ

Диэлектрические потери неполярных полимеров при тщательной очистке их от остатков мономеров, катализаторов, стабилизаторов невелики, поэтому они находят применение в качестве высокочастотных диэлектриков. В этом случае часто $\text{tg}\delta=2\cdot 10^{-4}$.

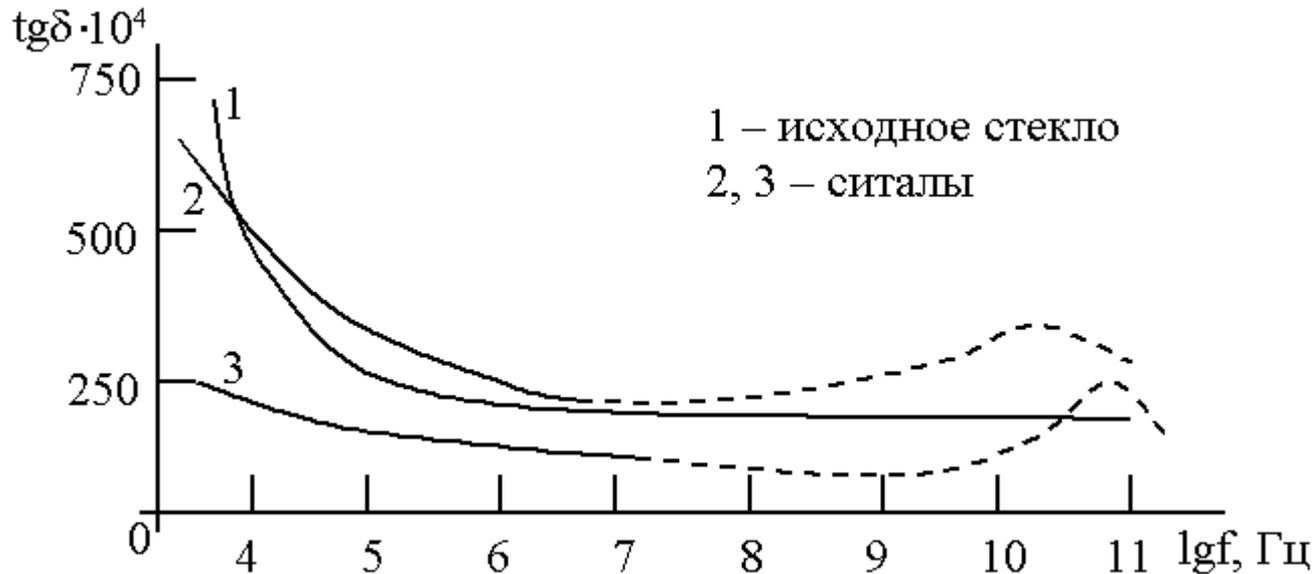
В температурной зависимости $\text{tg}\delta$ полярных полимеров может наблюдаться несколько максимумов β , γ , δ , когда у полимера имеются полярные группы, обладающие различной подвижностью (дипольно-групповые потери).



Характерная зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры для полимерного диэлектрика с дипольно-групповыми (β , γ , δ) и дипольно-сегментальными потерями (α)

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

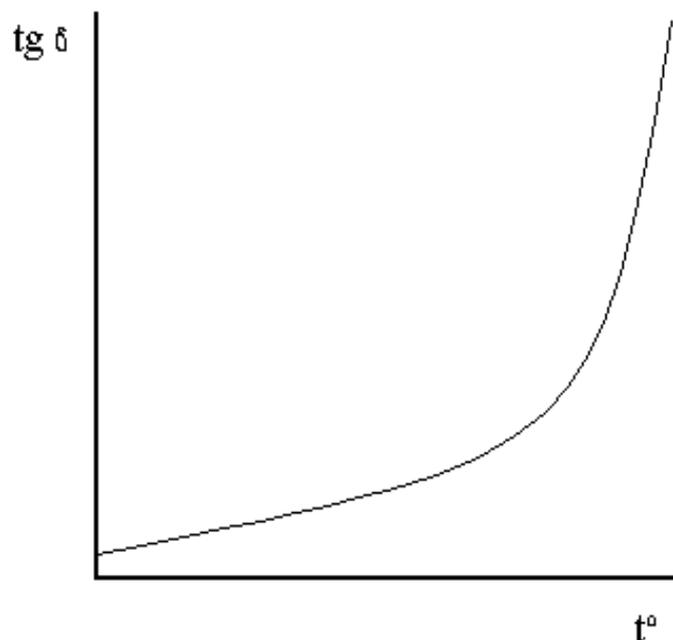
Рост $\text{tg}\delta$ при СВЧ у ситаллов обусловлен релаксационными процессами в кристаллических фазах



В области СВЧ наиболее слабо поглощают лишь чисто кварцевое и боросиликатное стекла.

ЗАВИСИМОСТЬ $\text{tg}\delta$ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

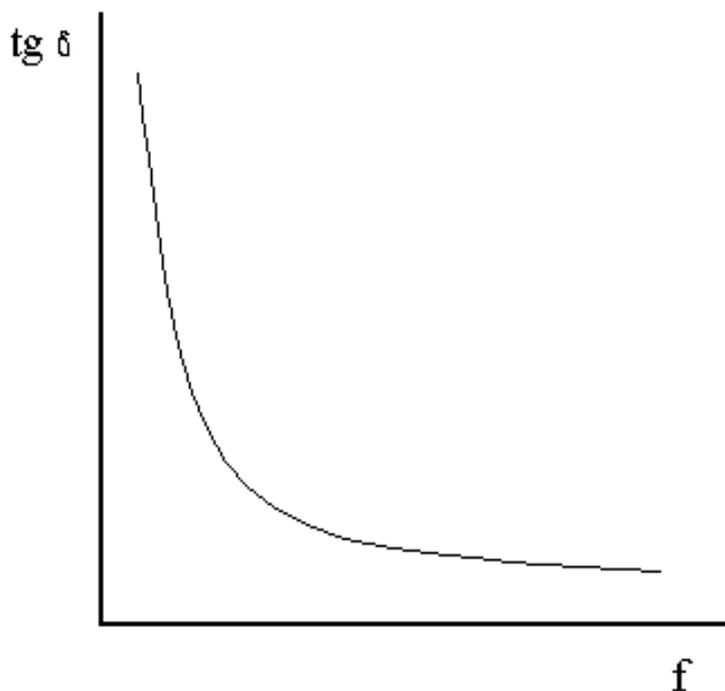
При увеличении температуры потери на сквозную электропроводность возрастают



Зависимость тангенса угла потерь от температуры в неполярных диэлектриках.

В неполярных диэлектриках реализуется упругая электронная или упругая ионная поляризация. Как известно, при развитии упругих процессов потерь энергии нет, поэтому в неполярных диэлектриках основной вид потерь - потери за счет сквозной электропроводности.

Влияние частоты электрического поля на тангенс угла потерь неполярных диэлектриков.



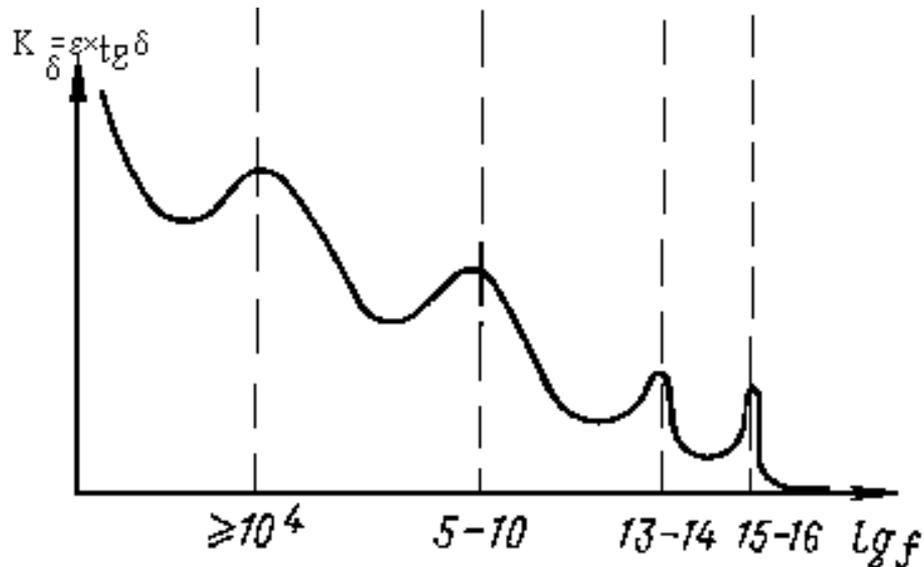
Зависимость тангенса угла потерь от частоты электрического поля в неполярных диэлектриках

С увеличением частоты электрического поля длина пробега ионов за время полупериода колебаний уменьшается, а следовательно, уменьшается запасенная ими кинетическая энергия.

Кроме того, снижается вероятность столкновения иона со структурными единицами материала. В силу этих причин при росте частоты электрического поля диэлектрические потери снижаются

Влияние частоты электрического поля на тангенс угла потерь полярных диэлектриков.

При нахождении диэлектрика в электрическом поле в нем развиваются два процесса: электропроводность и поляризация. Оба процесса сопровождаются потерями энергии электрического поля. Потери на электропроводность при росте частоты снижаются. Однако на определенных частотах резко возрастает резонансная поляризация, поэтому коэффициент диэлектрических потерь K_d на этих частотах резко возрастает.



На определенных частотах начинается резонансная поляризация полярных молекул различных компонентов диэлектрика, а следовательно, возрастают потери.

Dielectrics

Values of Permittivity and Dielectric Losses

| | relative permittivity ϵ_r | loss factor $\tan \delta \cdot 10^3$ | |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| synthetic resin | 4...10 | 200...500 | polymers organic materials |
| nonpolar polymers | 2...2,5 | < 0,5 | |
| polar polymers | 2,5...6 | 1...20 | |
| technical glasses | 3,5...12 | 0,5...10 | ceramics/glasses inorganic materials |
| silicon ceramic | 4...6,5 | 1...20 | |
| NDK-capacitor ceramic | 6...200 | < 0,6 | |
| HDK-capacitor ceramic | 200...10 ⁴ | 2...20 | |

NDK: Niedrige Dielektrizitätskonstante = low permittivity / HDK: Hohe Dielektrizitätskonstante = high permittivity

Dielectrics

Frequency Dependence of Dielectric Losses

relaxation losses
due to
localized dipoles

ohmic losses
due to
mobile charge carriers

complex permittivity

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega)$$

electrical conductivity

σ

$$i(t) = \frac{dD(t)}{dt} + \sigma \cdot E(t)$$

$$D = \epsilon_r^*(\omega) \cdot \epsilon_0 \cdot E \quad \text{mit} \quad E = E_0 \cdot e^{j\omega t}$$

$$i = j\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r^*(\omega) \cdot E_0 \cdot e^{j\omega t} + \sigma \cdot E_0 \cdot e^{j\omega t}$$

$$i = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \left(\epsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \cdot E_0 \cdot e^{j\omega t} + j\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'(\omega) \cdot E_0 \cdot e^{j\omega t}$$

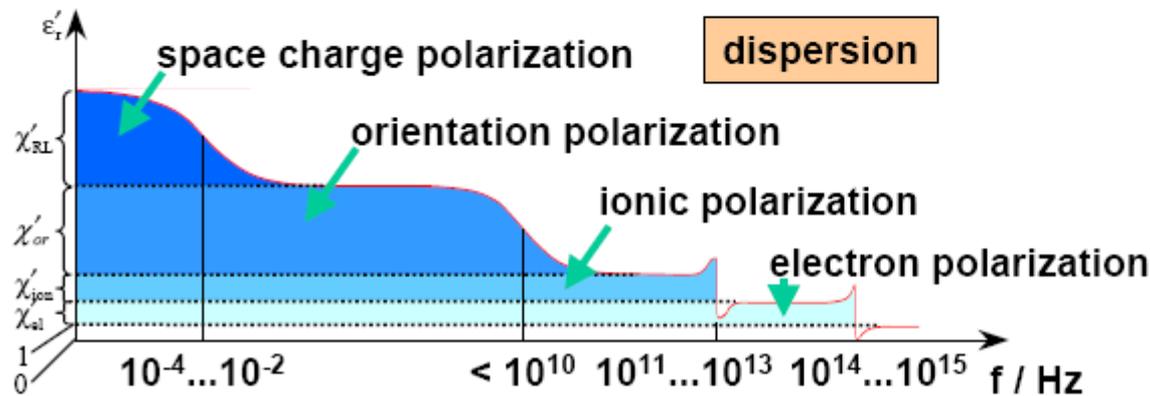
dielectric loss factor:

$$\tan \delta = \frac{|i_R|}{|i_C|} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r'}$$

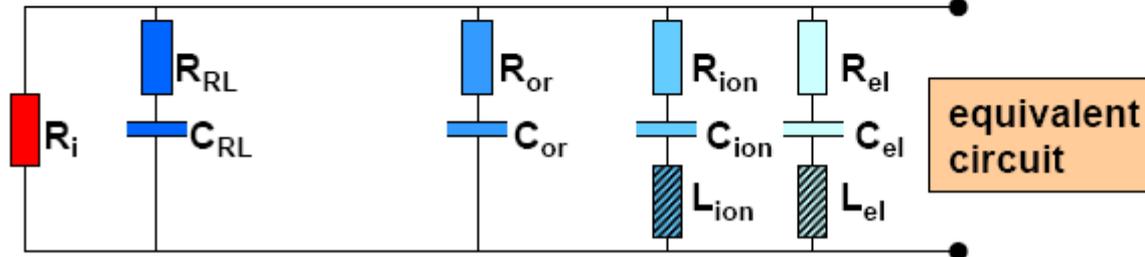
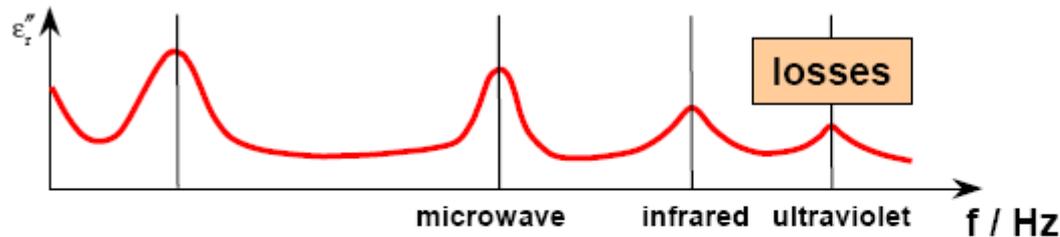
for technical
frequencies $< 10^{12}$ Hz

Dielectrics

Frequency Dependence of Relative Permittivity



- drop out of polarization mechanism
- relaxation:
 - space charge polarization
 - orientation polarization
 - resonance:
 - ionic polarization
 - electronic polarization



Задача № 1

- Рассчитать тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическую проницаемость материала диэлектрика плоского конденсатора, состоящего из двух последовательно соединенных подклеивающих фольгу слоев вазелина ($\operatorname{tg}\delta_2=2\cdot 10^{-2}$, $\varepsilon_2=2$, $h_2=2\cdot 10^{-3}$ см) и слоя диэлектрика ($\operatorname{tg}\delta_1=5\cdot 10^{-4}$; $\varepsilon_1=2,5$; $h_1=0,2$ см), рис.1.

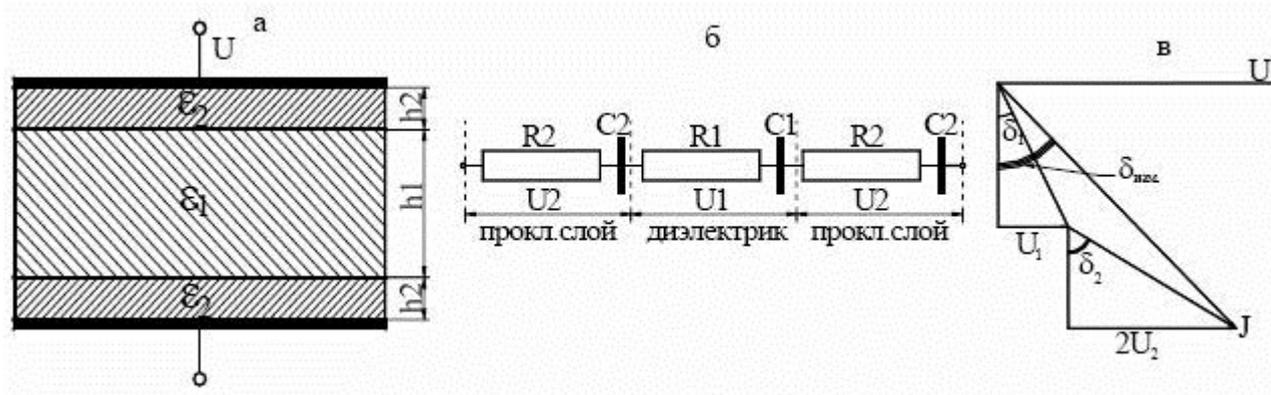


Рисунок 1. Конструкция образца с наклеенными фольговыми электродами (а), его эквивалентная последовательная схема замещения (б) и векторная диаграмма (в)

Задача № 2

- Смесь состоит из тиконда ($\epsilon=2,5$; $\text{TK}\epsilon=-0,5 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$) и ультрафарфора ($\epsilon=8$; $\text{TK}\epsilon=1,5 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$, град $^{-1}$). Какими должны быть объемные концентрации компонентов, чтобы смеси был равен нулю? Рассчитайте диэлектрическую проницаемость неоднородного диэлектрика.