

# Высокорезистивные материалы

Раджабов Евгений Александрович

# Диэлектрические потери

## Лекция 4

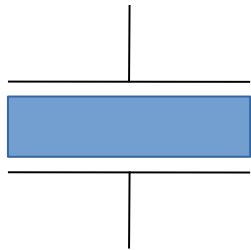
- Потери как физический и технический параметр диэлектриков
- Тангенс угла диэлектрических потерь
- Комплексная диэлектрическая проницаемость
- Потери электрической энергии, обусловленные электропроводностью диэлектриков
- Диэлектрические потери при тепловой поляризации
- Диэлектрические потери при упругой поляризации

### Литература

Поплавко Ю . М. Физика диэлектриков: учеб. пособие для вузов.— Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1980, 400 с.

Иванов-Шиц А.К., Мурин И.В. Ионика твердого тела: В 2 т. Т. I. — СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2000. — 616 с.

# Емкость конденсатора



Емкость конденсатора в вакууме

$C_0 = \epsilon_0 * S/d$ ;  $S$ - площадь пластин,  $d$ - расстояние между ними

$\epsilon_0$  – диэлектрическая прониц. вакуума =  $8.854 \cdot 10^{-12}$  (а сек)/(в м)

Емкость конденсатора с диэлектриком с

$$C = C_0 \epsilon$$

# Потери как физический и технический параметр диэлектриков

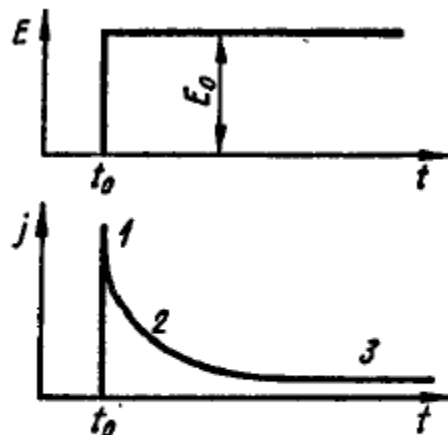


Рис. 8.1. Временная зависимость плотности тока через диэлектрик.

На рис. 8.1 приведена зависимость плотности тока  $I$ , протекающего через такой диэлектрик, от времени. В общем случае на такой осциллограмме можно выделить три характерных участка. В момент приложения напряжения происходит резкий скачок электрического тока, обусловленный установлением «быстрых» видов поляризации и зарядкой «геометрической» емкости. Этот пик тока, занимающий очень малый промежуток времени, соответствует участку 1 на кривой  $I(t)$ .

Затем во многих диэлектриках можно наблюдать плавное спадание тока со временем (участок 2). При этом происходит установление более «медленных» видов поляризации. В большинстве случаев можно предполагать, что «быстрые» процессы поляризации представляют собой различные виды упругой, а более «медленные» описываются различными механизмами тепловой поляризации.

Через некоторое время протекающий через диэлектрик ток снижается до неизменной величины, называемой током насыщения. Соответствующий участок обозначен цифрой 3 и характеризует электропроводность, которая в диэлектриках обычно очень мала, но всегда имеет конечную величину.

# ТАНГЕНС УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

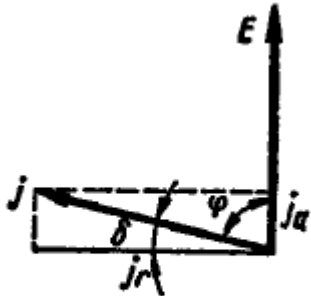


Рис. 8.2. Диаграмма, характеризующая  $\operatorname{tg} \delta$ .

Как известно, потери энергии в электротехнике обычно описываются углом  $\phi$ . На векторной круговой диаграмме — это угол между векторами напряжения и тока (рис. 8.2). Но при описании потерь диэлектриков эта характеристика неудобна, так как угол  $\phi$  обычно мало отличается от  $\pi/2$ .

Поэтому диэлектрические потери принято характеризовать углом  $\delta$ , дополняющим  $\phi$  до  $\pi/2$ . Для описания потерь диэлектрика, как правило, используется тангенс угла потерь, который численно равен отношению тока проводимости к току смещения. Так же, как и  $\epsilon$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  является макроскопической характеристикой диэлектрика.

Реактивная составляющая плотности электрического тока  $j_r$  характеризует ток смещения, обусловленный поляризацией;  $j_r$  опережает по фазе напряженность электрического поля  $E$  на  $\pi/2$ .

Активная составляющая плотности электрического тока  $j_a$  изменяется синфазно с  $E$  и характеризует как электропроводность диэлектрика, так и потери при поляризационных процессах.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{j_a}{j_r} .$$

# Что характеризует $\operatorname{tg} \delta$

В случае параллельного соединения  $C_R$  и  $R$  (рис. 8.3, а) при расчетах удобно использовать «треугольник проводимостей»:

$$Y^* = g + ib.$$

Необходимо рассчитать диэлектрическую проницаемость, тангенс угла потерь и удельную мощность потерь  $\rho$ . Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = C_R/C_0$ , где  $C_0$  — геометрический фактор.

Тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{1}{\omega C_R R}, \quad (8.2)$$

а удельная мощность потерь  $\rho = P_a/V$ , где  $V$  — объем диэлектрика.

Активная мощность

$$P_a = UI \cos \varphi = U^2/R.$$

Выразив  $R$  через  $\operatorname{tg} \delta$ , из (8.2) получим

$$P_a = U^2 \omega C_R \operatorname{tg} \delta. \quad (8.3)$$

Это важное соотношение характеризует количество тепла, выделяемое за секунду в электрическом конденсаторе с потерями. Мощность потерь пропорциональна квадрату напряжения и частоте. Учитывая, что для плоского конденсатора  $U = Ed$ ,  $V = Sd$  и  $C = \varepsilon_b \varepsilon S/d$ , для удельной мощности потерь получим

$$\rho = E^2 \omega \varepsilon_b \varepsilon \operatorname{tg} \delta. \quad (8.4)$$

Удельная мощность потерь, как видно из полученной формулы, пропорциональна произведению  $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ .

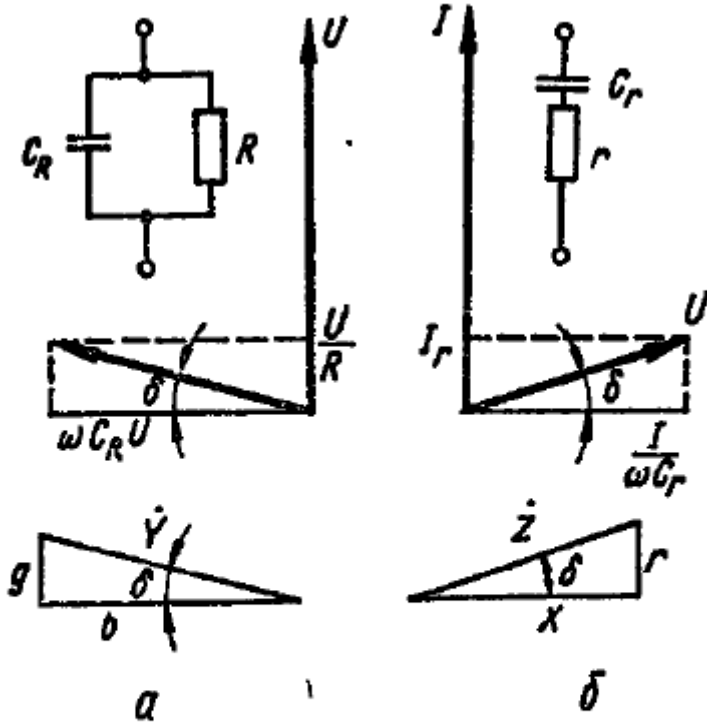


Рис. 8.3. Параллельная (а) и последовательная (б) схемы замещения электрического конденсатора с потерями.

# КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Предположим, что электрический конденсатор, заряд которого  $Q = CU$ , подключен к источнику переменного напряжения  $U_0 \exp(i\omega t)$  (имеется в виду лишь действительная часть комплексной функции, т. е.  $\operatorname{Re} U = U_0 \cos \omega t$ ). Реактивный ток, протекающий через конденсатор, как известно, опережает напряжение по фазе на  $\pi/2$ :  $I_c = dQ/dt = I_0 \exp[i(\omega t + \pi/2)]$ . Через конденсатор может протекать также ток потерь, изменяющийся в фазе с переменным напряжением:  $I_g = gU$ , где  $g$  — активная проводимость. Полный ток

$$I = I_c + I_g = (i\omega C + g)U. \quad (8.8)$$

Вследствие сдвига фаз между емкостным током и током потерь целесообразно ввести *комплексную* диэлектрическую проницаемость  $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ . Иногда в литературе можно

# Физический смысл $\varepsilon'$ и $\varepsilon''$

Полный ток, протекающий через электрический конденсатор с потерями, с учетом  $C^* = C_0\varepsilon^*$ , определяется следующим образом:

$$I = i\omega C^*U = (i\omega\varepsilon' + \omega\varepsilon'')C_0U. \quad (8.9)$$

Отношение активного тока к реактивному определяет тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'.$$

Из сравнения формул (8.8) и (8.9) следует, что  $\varepsilon'$  характеризует емкостную составляющую тока, а  $\varepsilon''$  — активную.

В качестве примера определим  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  для параллельной схемы замещения диэлектрика с потерями, приведенной на рис. 8.3, а. Полная проводимость

$$Y^* = i\omega\varepsilon^*C_0 = (\varepsilon'' + i\varepsilon')\omega C_0 = \frac{1}{R} + i\omega C_R,$$

отсюда

$$\varepsilon' = C_R/C_0 \text{ и } \varepsilon'' = 1/\omega C_0 R.$$

величина  $\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta$  характеризует мощность потерь — количество теплоты, выделяемое в единице объема диэлектрика за единицу времени. Изменение с частотой двух составляющих диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  не может быть независимым друг от друга, поскольку они описывают один и тот же физический процесс — электрическую поляризацию.



# Потери на электропроводность

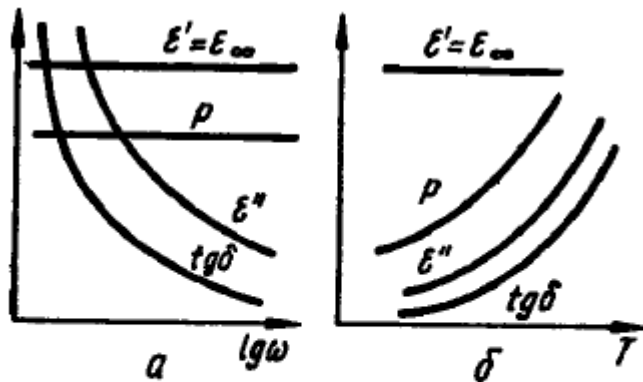


Рис. 8.5. Частотная и температурная зависимость основных параметров диэлектрика, в котором преобладают потери проводимости.

Температурная зависимость  $\text{tg} \delta$ ,  $\epsilon''$  и  $\rho$  характеризуется экспоненциальным возрастанием, обусловленным ростом проводимости. Следовательно, электропроводность дает значительный вклад в  $\text{tg} \delta$  и  $\epsilon''$  при высоких температурах и низких частотах.

Одним из механизмов превращения электрической энергии в тепловую в диэлектриках является электропроводность. Электрический ток обусловлен направленным перемещением свободных (или слабосвязанных) электронов, ионов и молекул, которые приобретают энергию от электрического поля на пути своего свободного пробега и теряют ее (рассеивают) при взаимодействиях с молекулами и атомами диэлектрика, повышая интенсивность их теплового хаотического движения. Очевидно, что электропроводность увеличивает параметры  $\text{tg} \delta$ ,  $\epsilon''$  и  $\rho$ , которые зависят от плотности протекающего через диэлектрик активного тока. Выясним зависимость потерь от частоты. Предположим, что «медленные» процессы поляризации, которые описываются плавным снижением тока отсутствуют. Тогда плотность тока будет практически мгновенно понижаться до тока насыщения и потери будут зависеть только от электропроводности, а величина диэлектрической проницаемости определяется только «быстрыми» процессами поляризации:  $\epsilon = \epsilon'$

$$\text{tg} \delta = \frac{j_a}{j_r} = \frac{\sigma}{\epsilon_B \epsilon_\infty \omega}; \quad \epsilon'' = \frac{\sigma}{\epsilon_B \omega}.$$

# Диэлектрические потери при тепловой поляризации

Обусловленная тепловым движением поляризация устанавливается со временем сравнительно медленно. Время релаксации зависит от температуры и в нормальных условиях (при 300 К) обычно находится в пределах  $10^{-10}$  с. Отметим, что диэлектрики используются в технике, как правило, в диапазоне частот  $50 \dots 10^{10}$  Гц. Как раз в этом диапазоне находится собственная частота молекулярных релаксационных процессов.

Формально под тепловой поляризацией понимается поляризация, для которой требуется переход через потенциальный барьер. Тепловой может быть поляризация связанная с движением как электронов так и ионов или вращением диполей.

Если к диэлектрику в момент времени  $t_0$  приложить постоянное электрическое поле  $E_0$ , то изменение поляризации со временем будет описываться выражением

$$P(t) = n_0 \alpha_\tau E_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

а время релаксации  $\tau$  определяется как

$$\tau = \frac{1}{2\nu} \exp\left(\frac{U}{kT}\right)$$

# тепловая поляризация

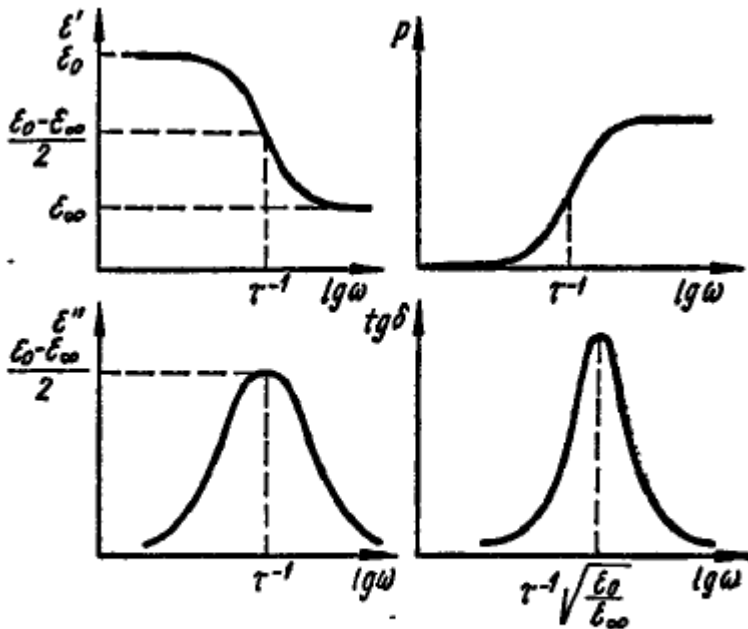


Рис. 8.6. Дисперсия диэлектрической проницаемости в диэлектриках с тепловыми механизмами поляризации.

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \varepsilon$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \omega \tau}{\varepsilon_0 + \varepsilon_{\infty} \omega^2 \tau^2}$$

здесь  $\varepsilon_0$  — низкочастотная диэл.

проницаемость а  $\varepsilon_{\infty}$  — высокочастотная (теория П. Дебая)

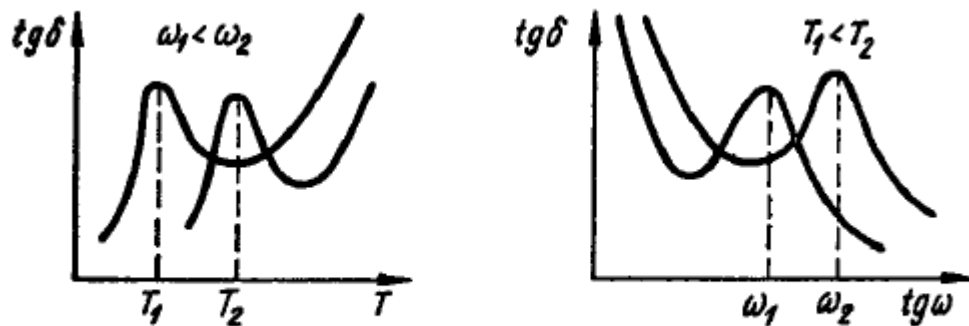
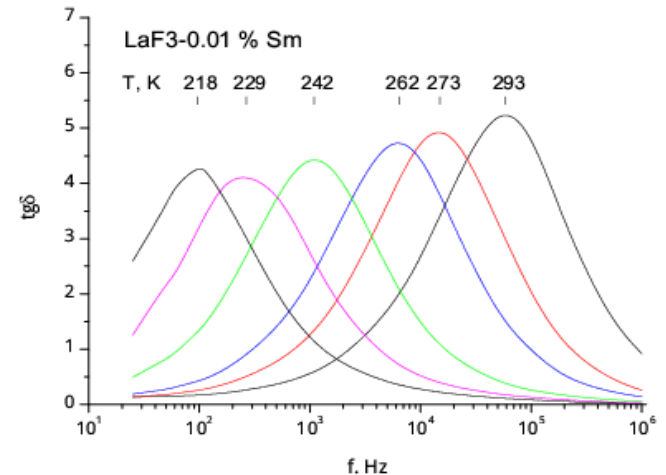
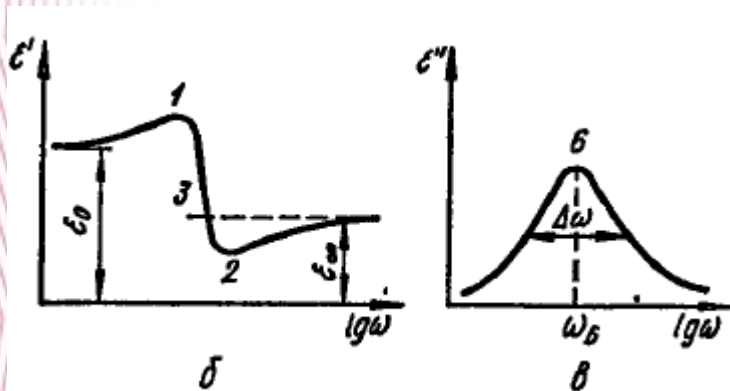


Рис. 8.8. Зависимость  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  от температуры и частоты в диэлектриках с тепловой поляризацией и электропроводностью.



# Диэлектрические потери при упругой поляризации



Максимальная величина диэлектрических потерь, обусловленных упругой поляризацией, наблюдается при гораздо более высоких частотах — в инфракрасном или ультрафиолетовом диапазоне электромагнитных волн. В случае упругой поляризации, когда электрическое поле, воздействует на электроны в атоме, ионы в кристалле или жестко связанные диполи, появляется возвращающая сила, пропорциональная смещению частиц из равновесного положения. Очевидно, что экспоненциальный закон установления поляризации, справедливый для рассмотренных выше релаксационных процессов, здесь неприменим. Напротив, следует ожидать появления затухающих колебаний частиц, отклонившихся от положения равновесия. Очевидно, что диэлектрические потери, обусловленные упругой поляризацией, от температуры зависят. В ионных кристаллах, например, такая зависимость обусловлена рассеянием поляризационных фононов на дефектах структуры или на других фононах.

# Выводы

- Диэлектрические потери представляют собой ту часть электрической энергии, которая переходит в теплоту. Для количественного описания диэлектрических потерь используются следующие параметры: тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$ , коэффициент потерь  $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$  и удельная мощность потерь  $p$ .
- Диэлектрик с потерями можно описать идеализированной электрической схемой замещения, состоящей из постоянных параметров  $C$ ,  $R$  и  $L$ . При этом важнейшим условием является согласование частотных характеристик схемы замещения с частотной зависимостью параметров реального диэлектрика.
- Частотная и температурная зависимость диэлектрических потерь определяется особенностями физических механизмов, обуславливающих диссипацию электрической энергии в диэлектрике. Основными из этих механизмов являются проводимость, а также запаздывание тепловой и упругой поляризации.
- Частотную зависимость диэлектрического поглощения удобно описывать комплексной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$ . В соответствии с соотношениями Крамерса — Кронига, запаздывание поляризации приводит не только к частотному максимуму потерь, но и к дисперсии  $\varepsilon$ . В случае тепловой поляризации частотная зависимость  $\varepsilon^*$  описывается релаксационным уравнением Дебая, а для упругой поляризации — резонансным уравнением дисперсии Друде - Лорентца.