



Омский государственный технический университет
каф. Технология электронной аппаратуры

Дисциплина
Радиоматериалы и радиокомпоненты

Лекция 8. 1.
Диэлектрические материалы
Основные свойства

Ст. преп. Пономарёв Д.Б.



Диэлектрические материалы

Это самая обширная группа радиоматериалов.
Это материалы, используемые

Пассивные

- для изоляции токоведущих частей друг от друга, изоляторов для других целей;
- для создания электрических емкостей (конденсаторов) – накопителей заряда.

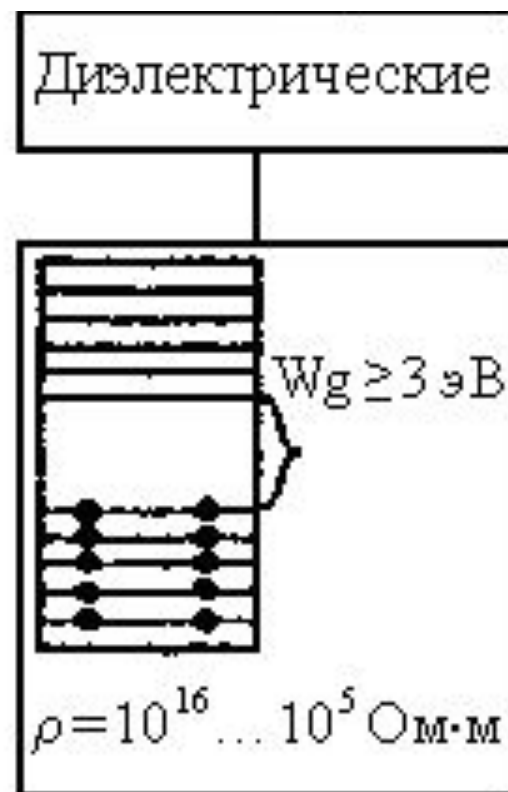
Активные

- для преобразования неэлектрических полей.

Диэлектрики – материалы, имеющие большое удельное электрическое сопротивление

$\rho \approx 10^5 \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и большую запрещенную зону

$W_g \geq 3 \text{ эВ}$.



В электрическом поле в диэлектрике происходят следующие основные процессы:

поляризация, характеризуемая относительной диэлектрической проницаемостью ϵ ;

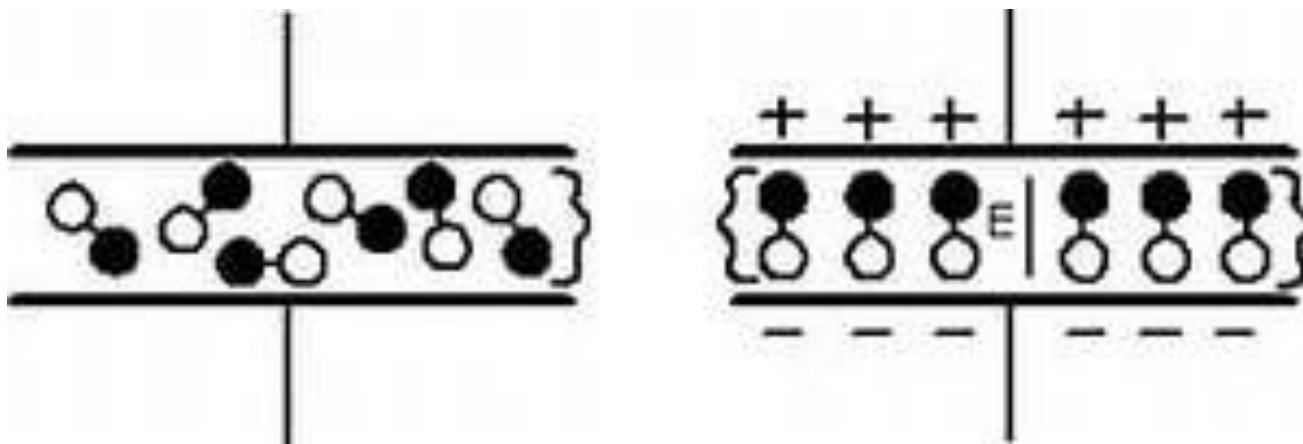
электропроводность γ
(объемная γ_v и поверхностная γ_s)

диэлектрические потери, характеризуемые тангенсом угла диэлектрических потерь – $\text{tg } \delta$;

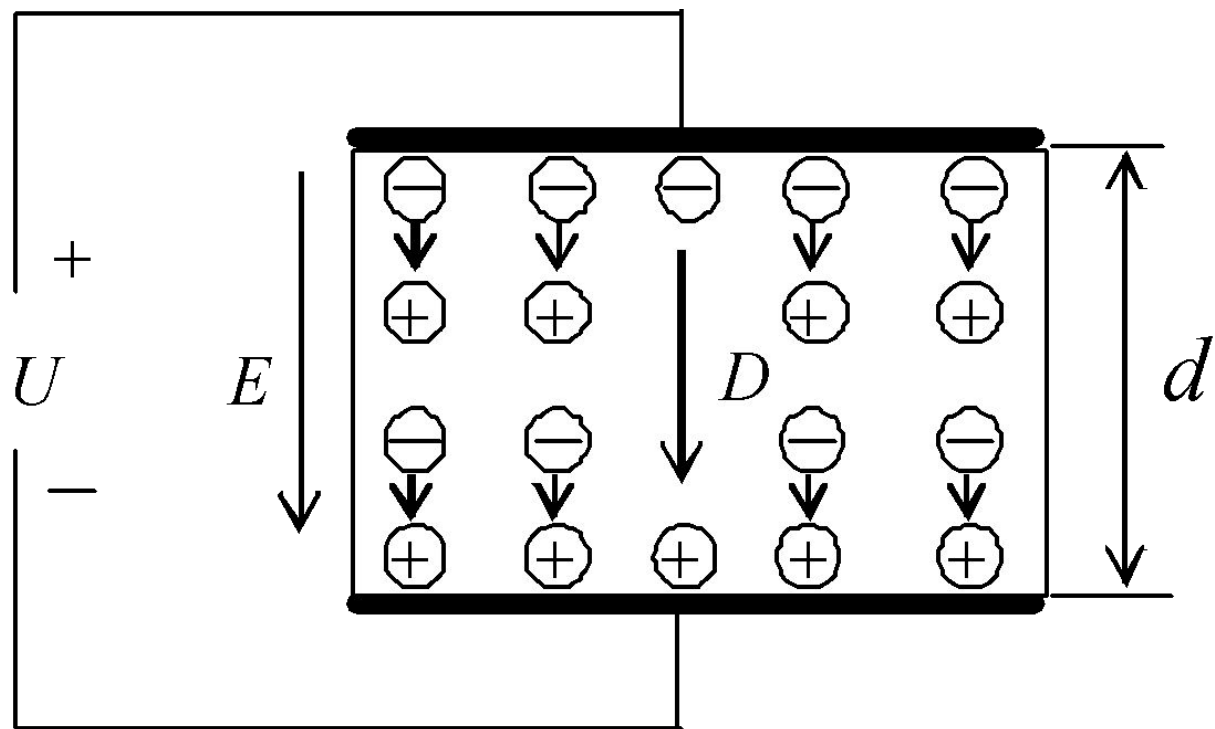
пробой в электрическом поле, характеризуемый пробивной напряженностью $E_{\text{пр}}$.

1. Поляризация диэлектриков

Поляризацией диэлектриков называется упорядоченное смещение связанных противоположных зарядов, находящихся в диэлектриках, происходящее под воздействием внешнего электрического поля.



Поляризация диэлектрика во внешнем электрическом поле E



$$D = D_0 + P$$

Поляризация характеризуется величиной поляризованности диэлектрика P_D , которая является пределом отношения суммы электрических моментов всех связанных противоположных зарядов m_i , отнесенных к объему диэлектрика V , когда он стремится к нулю:

$$P_D = \lim \frac{\sum m_i}{V} \Big|_{V \rightarrow 0}$$

Поляризованность - плотность
поверхностного заряда диэлектрика:

$$P = \varepsilon_0 \chi E, \text{ Кл/м}^2,$$

где χ - диэлектрическая восприимчивость,
причем всегда $\chi > 0$.

Напряженность электрического поля E

$$E = U/d, \text{ В/м},$$

где U - разность потенциалов, d - толщина
диэлектрика.

Индукция D_0 электрического поля E

$$D_0 = \varepsilon_0 E, \text{ Кл/м}^2,$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м - электрическая
постоянная.

Значение индукции электрического поля D внутри диэлектрика

$$D = D_0 + P.$$

$$D = \varepsilon_0(1 + \chi)E = \varepsilon_0 \varepsilon E, \quad \text{Кл/м}^2,$$

где $\varepsilon = 1 + \chi$ - диэлектрическая проницаемость диэлектрического материала, причем $\varepsilon > 1$.

$$\varepsilon = 1 + \frac{P_D}{E}.$$

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_0} = \frac{C_D'' + C_0}{C_0}, \quad C_D'' + C_0 = C_D.$$

Связь между величиной заряда на поверхности диэлектрика Q , его параметрами и приложенным электрическим полем U

$$Q = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} U, \text{ Кл},$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума.

Емкость диэлектрика

$$C_D = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \text{ Ф},$$

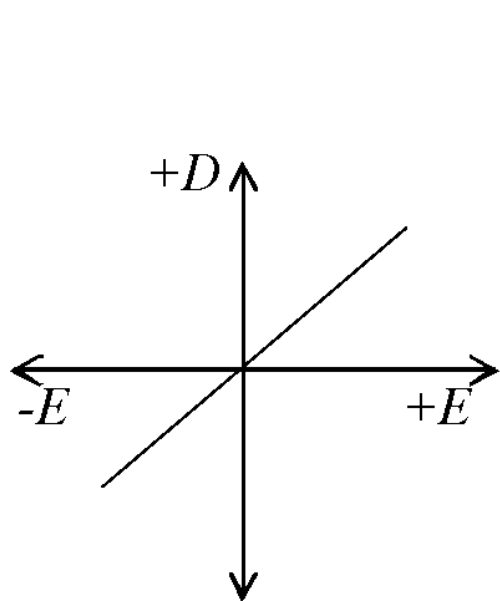
где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

S – площадь меньшего электрода, приложенного к диэлектрику, м²;

d – толщина диэлектрика, м;

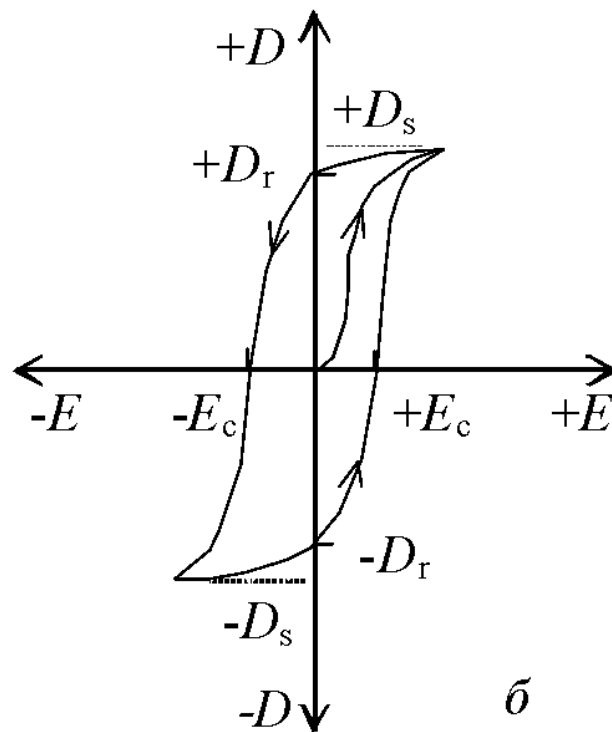
В переменном электрическом поле E различают *линейные и нелинейные диэлектрики*.

Кривые поляризации диэлектрических материалов при циклической переполяризации:



a

a - параэлектрики;



б

б - сегнетоэлектрики

Полярные и неполярные диэлектрики

Молекула диэлектрика со смещенными в результате поляризации электрическими зарядами является элементарным электрическим диполем. Для характеристики величины смещения зарядов в молекуле диэлектрика пользуются понятием *поляризуемости* частицы, которая определяется из соотношения

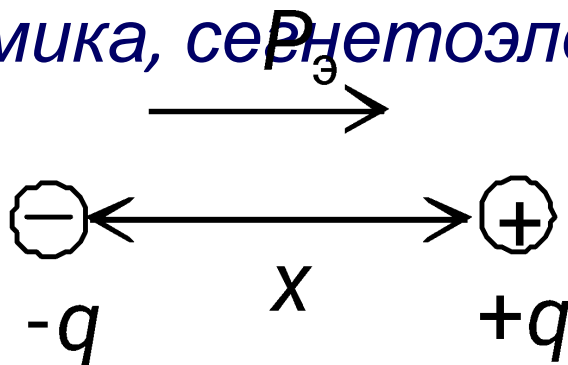
$$A = P_3 / E, \quad \text{Ф} \times \text{м}^2,$$

где $P_3 = qx$ - электрический момент диполя, направленный от отрицательного элементарного заряда $-q$ диполя к положительному $+q$, Кл \times м; x - расстояние между элементарными зарядами, около 10^{-10} м; E - напряженность возбуждающего электрического поля, В/м.

Полярные и неполярные диэлектрики

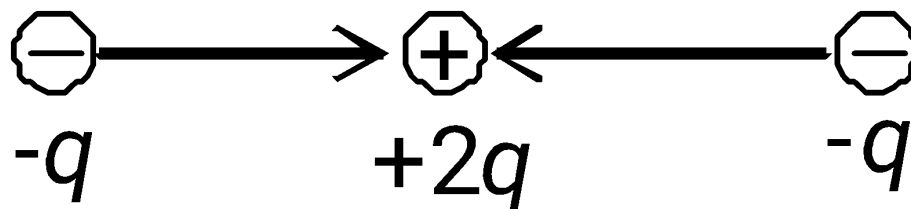
Полярные диэлектрики - это диэлектрики, молекулы которых даже в отсутствие внешнего электрического поля будут представлять собой электрические диполи с отличным от нуля постоянным электрическим моментом. Молекулы полярного диэлектрика способны к переориентации в электрическом поле.

Полярными диэлектриками являются диэлектрические материалы с несимметричным строением молекул. К ним относятся часть полимеров, керамика, сегнетоэлектрики.



Полярные и неполярные диэлектрики

Неполярные диэлектрики - это диэлектрики, которые не содержат электрических диполей. Для данных материалов суммарный электрический момент молекулы p_{Σ} равен нулю. Молекулы неполярного диэлектрика имеют симметричное строение и обладают центром симметрии (рис. 4.4). *К таким диэлектрикам относятся двухатомные газы, углекислый газ (CO_2), ряд полимеров (полиэтилен, полистирол), поваренная соль (NaCl), керамика и др.*



Существует много видов поляризации: дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, спонтанная, электронная, высоковольтная, резонансная и др.

Три основных типа поляризаций:

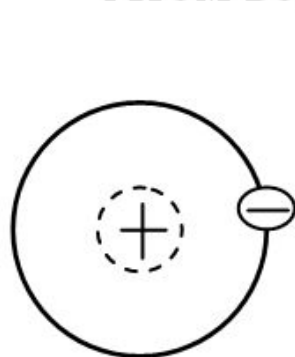
электронный (безынерционный);

дипольно-релаксационный (инерционный);

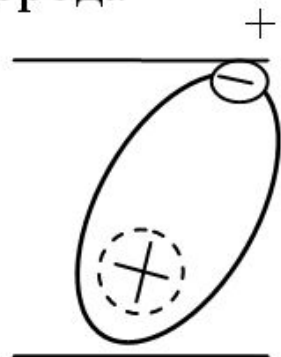
спонтанный (самопроизвольный).

Электронный тип поляризации происходит мгновенно ($\tau \approx 10^{-13} \dots 10^{-15} \text{с}$), упруго, без потерь и линейно.

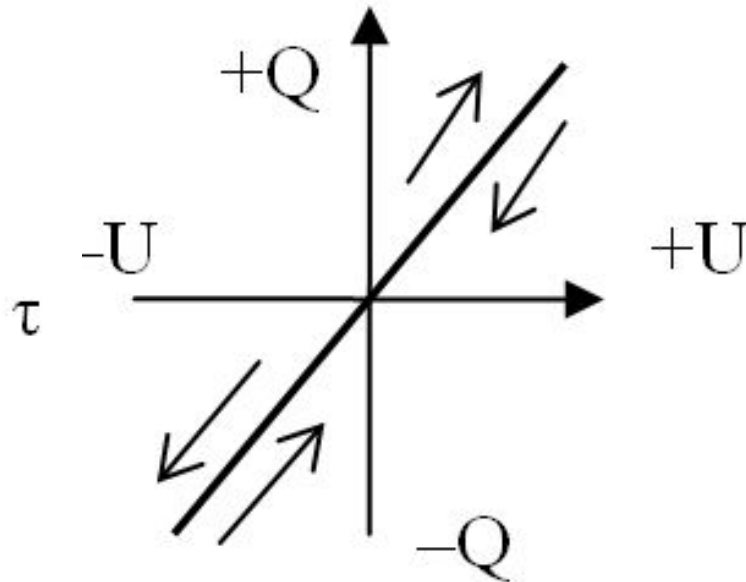
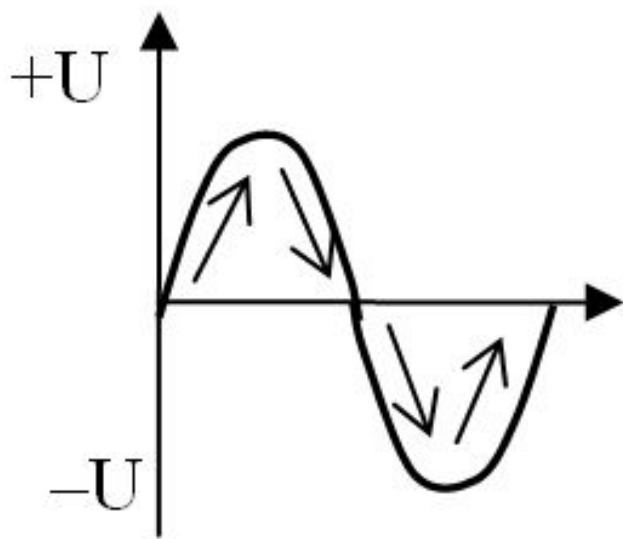
Атом водорода



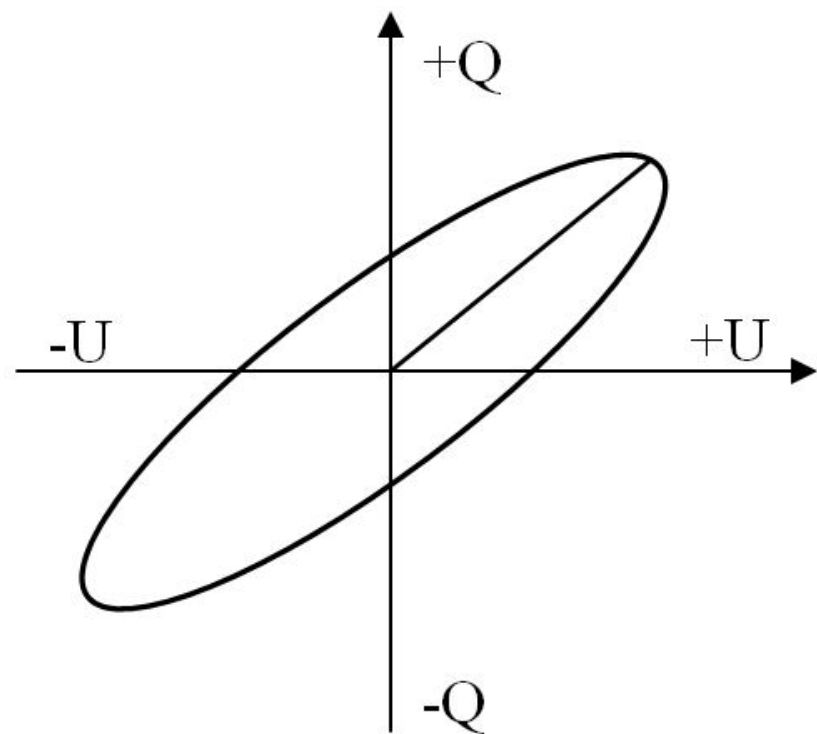
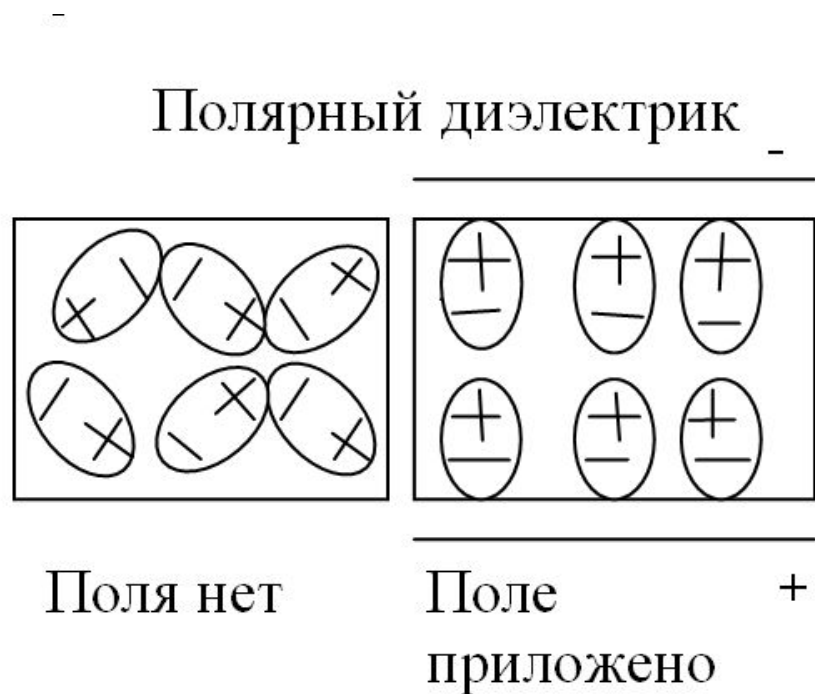
Без поля



Приложено поле

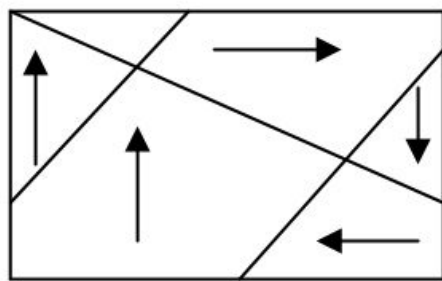


Дипольно-релаксационный тип поляризации связан с разворотом (смещением) диполей (молекул, ионов) рис. 5.4, а, и характерен для полярных диэлектриков. При этом поляризация происходит не мгновенно, с потерями, не упруго, но линейно. $\tau = 10^{-6} \dots 10^{-10}$ с.

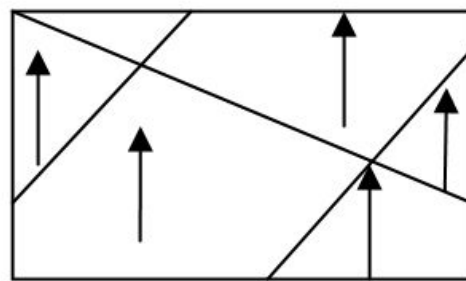


Спонтанный или самопроизвольный тип поляризации характерен для диэлектриков, имеющих доменную структуру, например, сегнетоэлектрики и нелинейно, т. е. имеет место явление насыщения, когда все моменты доменов развернутся по полю.

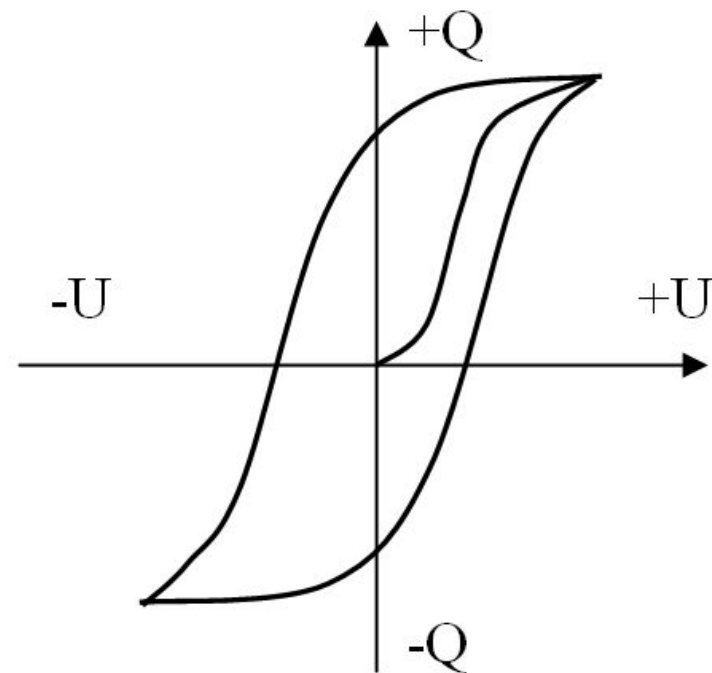
(Явление гистерезиса. Температура Кюри)



Поля нет



Поле
приложено



Ионная поляризация наблюдается в кристаллических диэлектриках с ионной связью. Она заключается во взаимном смещении разноименно заряженных ионов поляризуемого материала.

Время релаксации $\tau \approx 10^{-13}$ с

Дипольная поляризация характерна для полярных диэлектриков. Она отличается от электронной и ионной тем, что дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, ориентируются в направлении внешнего электрического поля E .

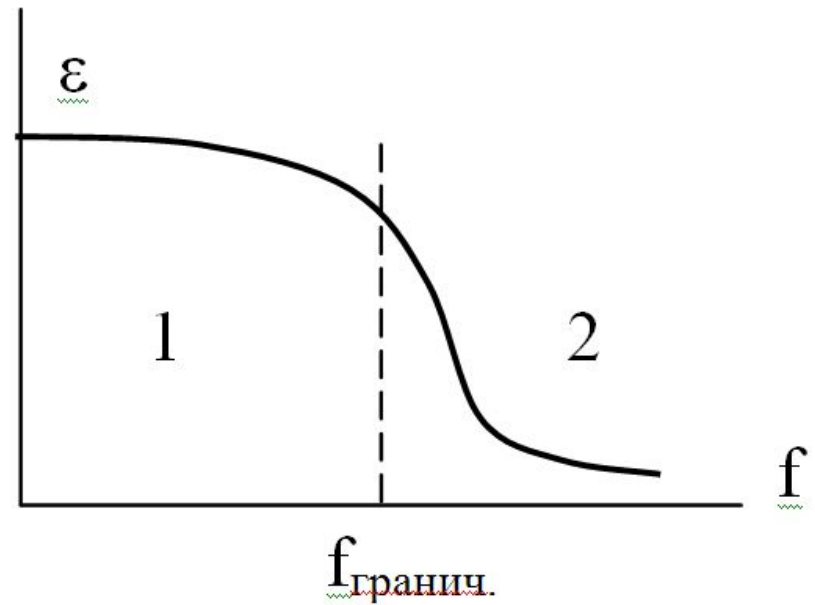
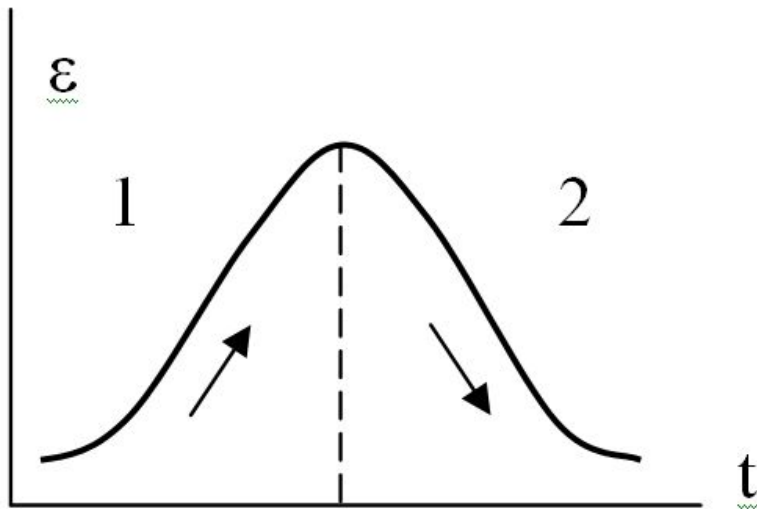
Время релаксации $\tau = 10^{-6} \dots 10^{-10}$ с.

Миграционная поляризация наблюдается в неоднородных диэлектриках, содержащих примеси.

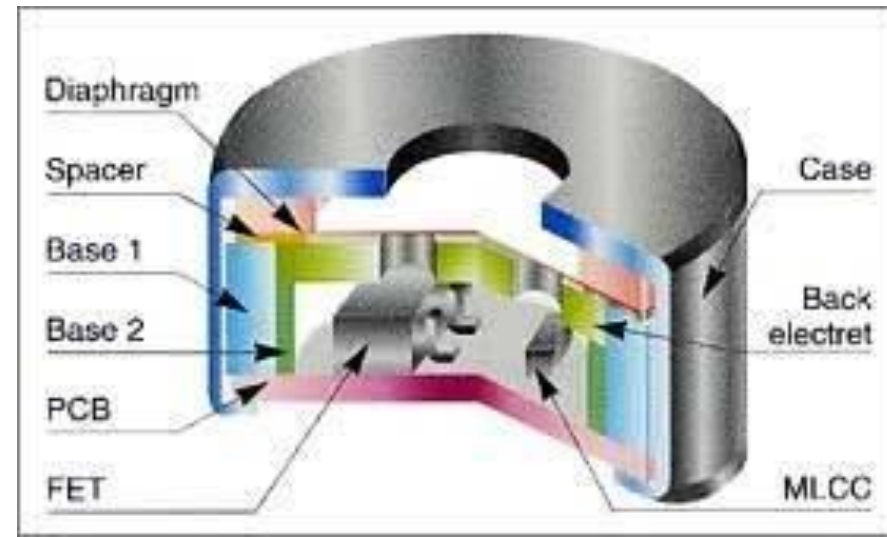
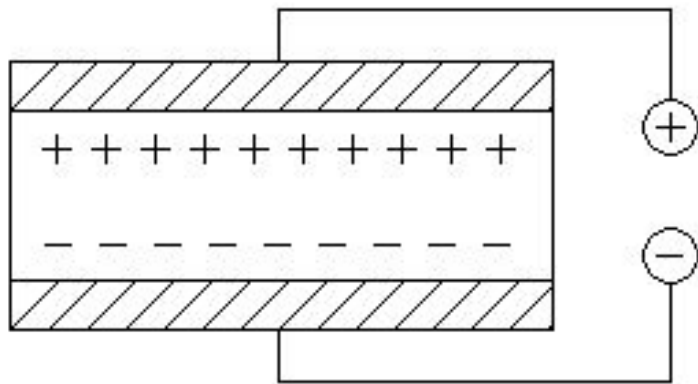
Время релаксации $\tau = 1 \dots 10^4$ с.

Влияние различных факторов на поляризуемость диэлектрика

Зависимости ϵ от температуры и частоты поля



Электрёт — диэлектрик, длительное время сохраняющий поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, которое привело к поляризации (или зарядению) этого диэлектрика, и создающий в окружающем пространстве квазипостоянное электрическое поле.



2. Электропроводность диэлектриков

$$\gamma = q \cdot N \cdot U.$$

где q - заряд частицы, Кл; количество заряженных частиц, приходящихся на 1 м , через N , $1/\text{м}^3$; подвижность частиц - u через их скорость v , м/с, а поле, напряженностью 1 В/м.

2. Электропроводность диэлектриков

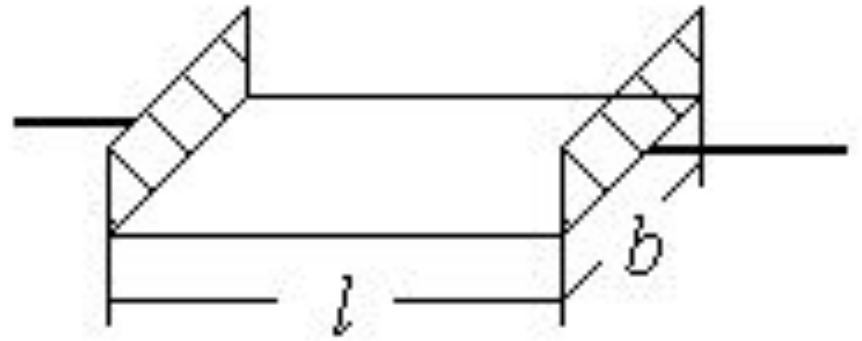
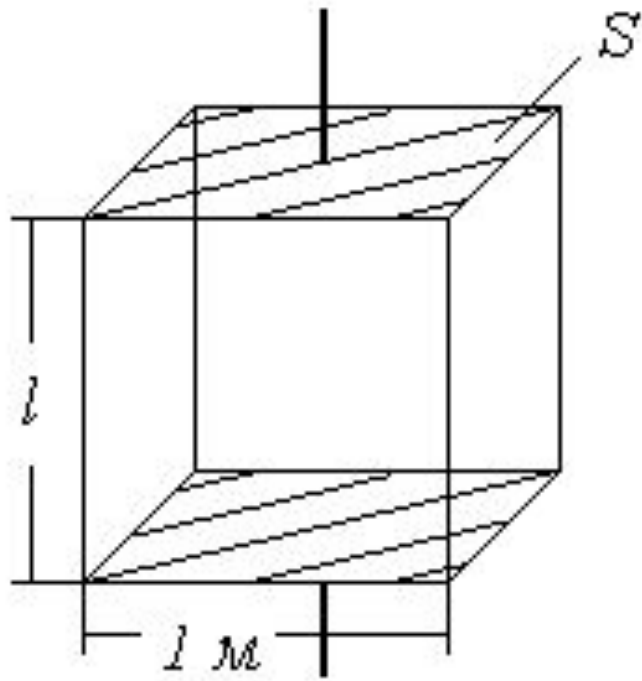
Различают несколько видов электропроводности в зависимости, от вида заряженных частиц, осуществляющих её:

- а) **электронная** – носители электроны;
- б) **ионная** (или электролитическая) – носители ионы;
- в) **молионная** (или электрофоретическая) – носители группы молекул;
- г) **смешанная** – носители разные (электроны, ионы, молионы).

2. Электропроводность диэлектриков

В твердых диэлектриках ток может проходить как по их объему, так и по поверхности, поэтому различают удельную объемную проводимость γ_v и удельную поверхностную проводимость γ_s

$$\rho_v = \frac{1}{\gamma_v} \quad \rho_s = \frac{1}{\gamma_s}$$



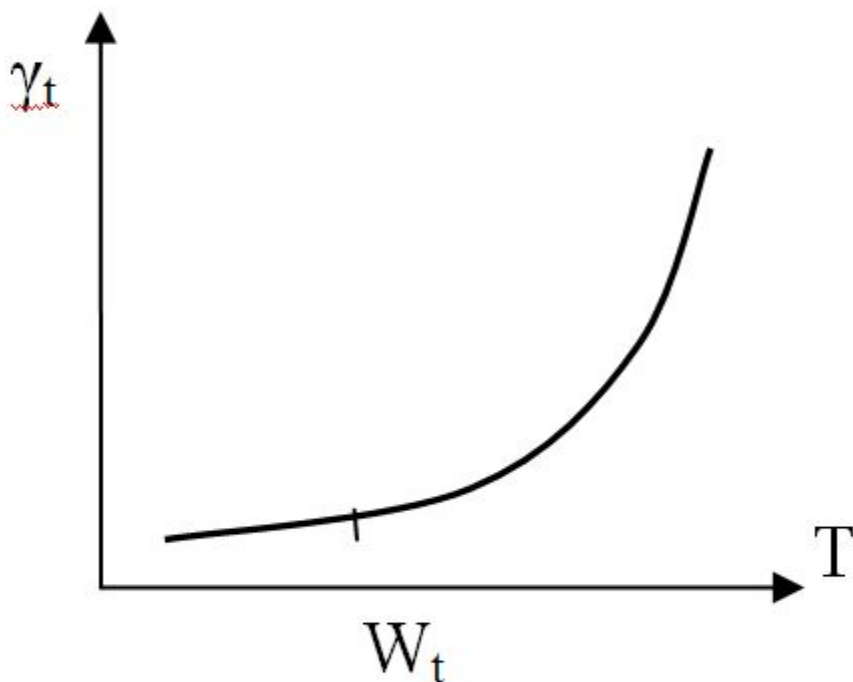
$$\rho_V = R_V \frac{S}{l}, \quad \rho_S = R_S \frac{b}{l},$$

$$R = \frac{R_V \cdot R_S}{R_V + R_S},$$

Зависимость электропроводности диэлектриков от температуры

$$\gamma_t = A \cdot e^{-\frac{W_t}{kT}},$$

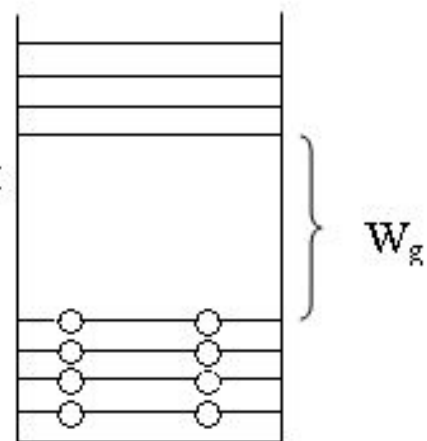
A – постоянная для данного диэлектрика, Ом⁻¹;
 e – основание натурального логарифма;
 k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град;
 T – абсолютная температура, К;
 W_t – термическая энергия активации, эВ.



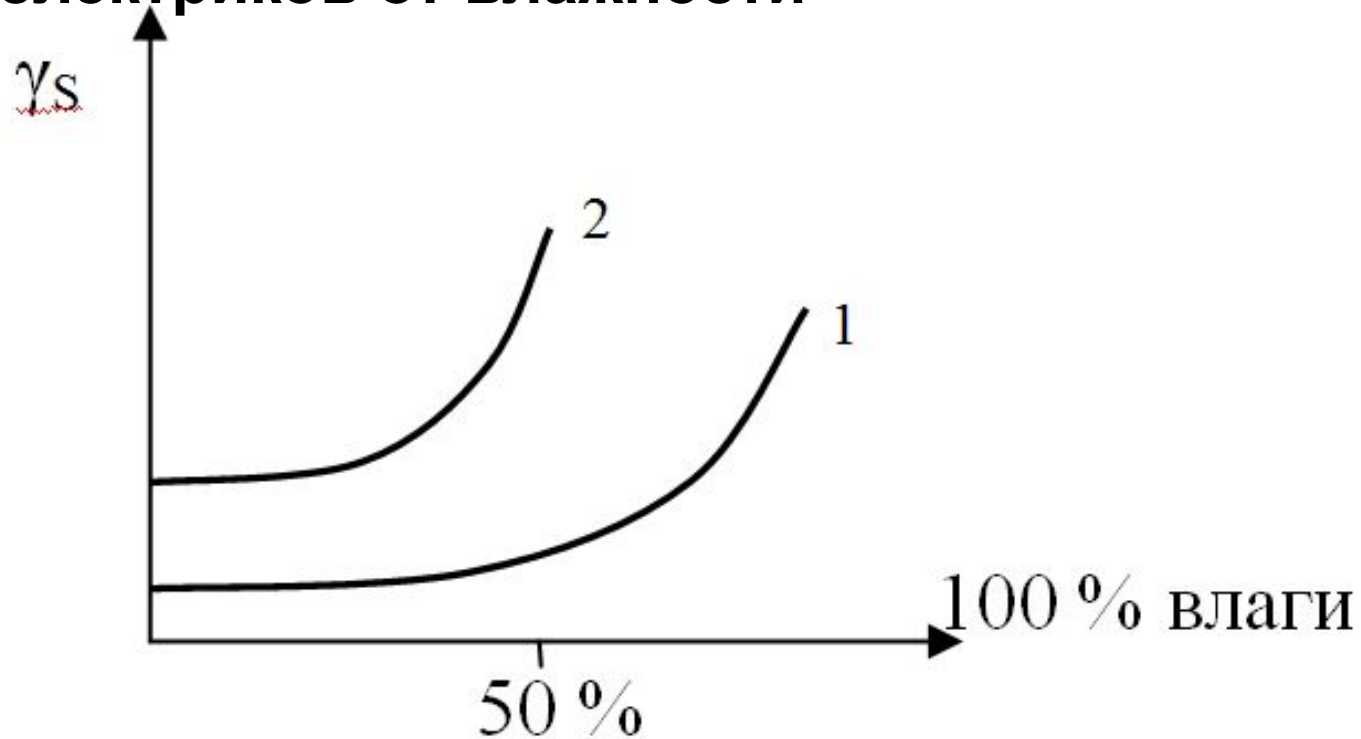
Зона проводимости

Запрещенная зона

Валентная зона



Зависимость поверхностной электропроводности диэлектриков от влажности



зависимости γ_s от процентного содержания влаги в окружающей среде для фторопласта -4 (1) – гидрофобного, и плавленого кварца (2) – гидрофильного.

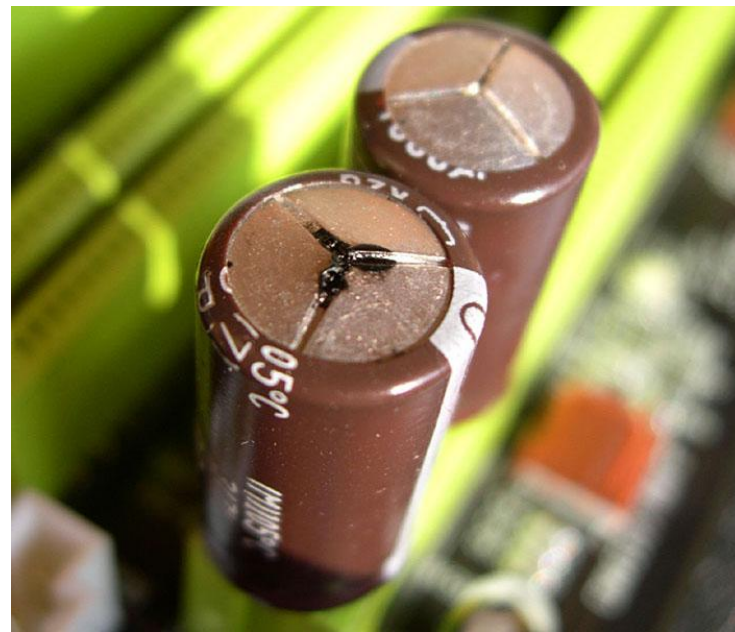
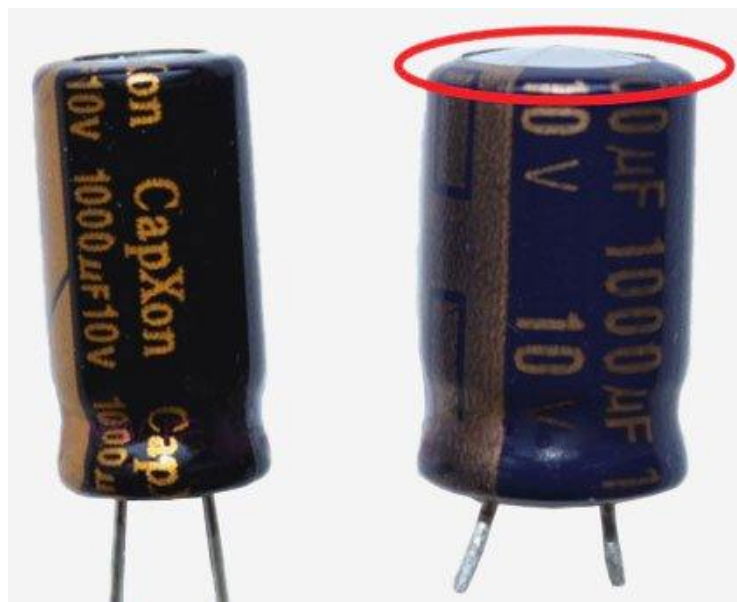
Зависимость поверхностной электропроводности



$$\gamma_E = \gamma_0 e^{\alpha E}$$

где γ_0 – электропроводность в слабом поле;
 α – коэффициент материала (обычно $1 < \alpha < 2$);
 E – напряженность в области сильных полей. ($> 10^6 \text{ В/м}$)

3. Диэлектрическими потерями называется активная мощность P_a , рассеиваемая в диэлектрике при приложении к нему электрического напряжения и вызывающая его нагрев.



$$P_a = UI$$

в постоянном электрическом поле;

$$P_a = UI \cos \varphi$$

переменном электрическом поле,

где

P_a – активная мощность – диэлектрические потери, Вт;

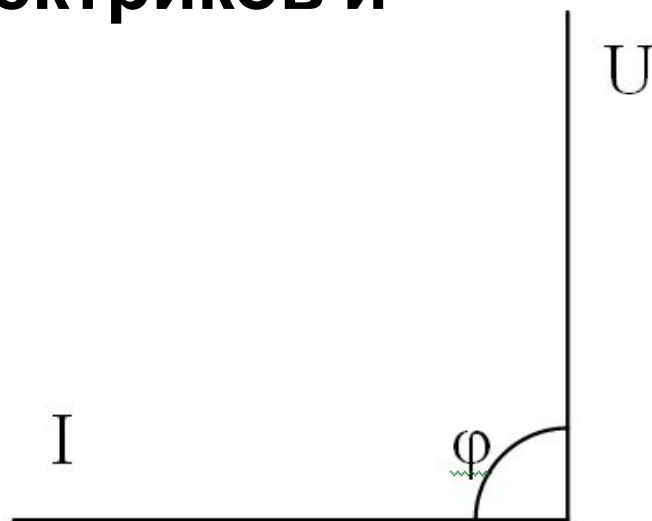
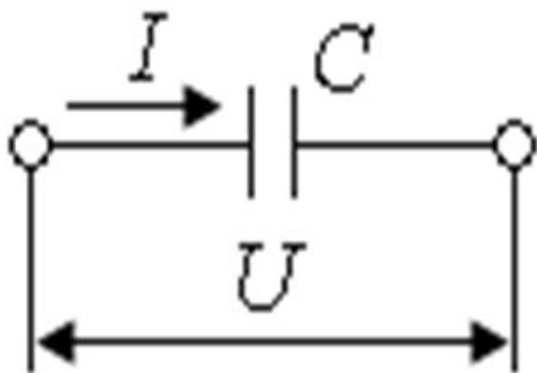
U – приложенное напряжение, В;

I – протекающий ток, А;

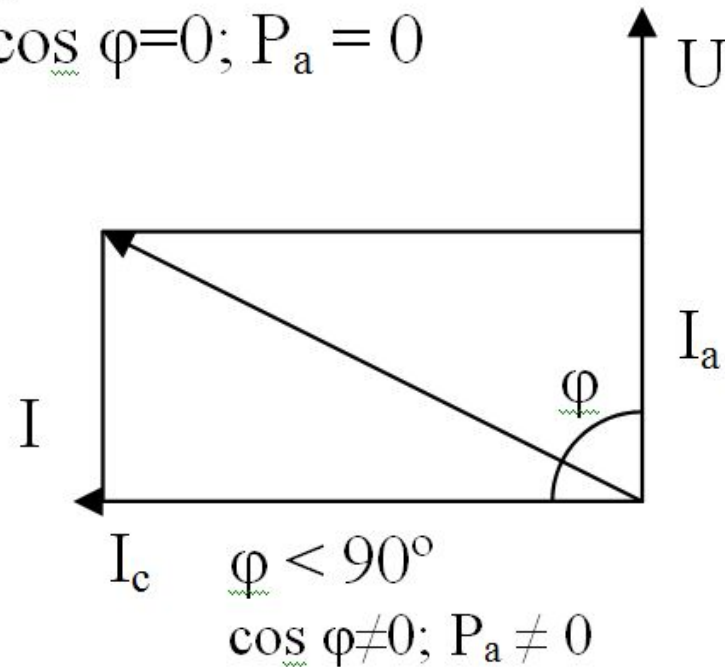
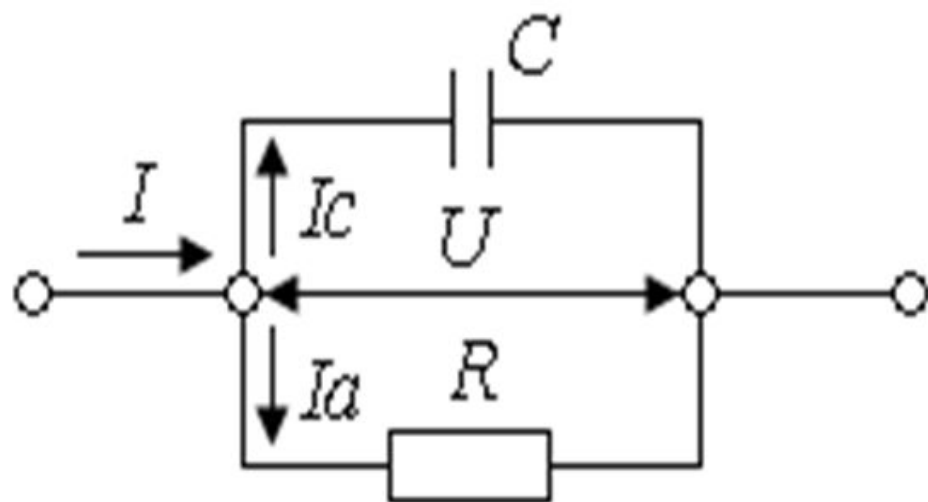
φ – угол сдвига фаз между током и напряжением.

1. Потери на замедленные виды поляризации (релаксационные, $\tau = 10^{-10} \dots 10^{-6}$ с);
2. Резонансные потери характерны для неполярных диэлектриков и обусловлены процессами электронной и ионной поляризации.
3. потери на сквозную электропроводность (токи утечки):
4. потери на ионизацию (в газообразных или твердых пористых диэлектриках);
5. потери на структурную неоднородность (в неоднородных диэлектриках).

Схемы замещения диэлектриков и векторные диаграммы



$$\varphi = 90^\circ$$
$$\cos \varphi = 0; P_a = 0$$



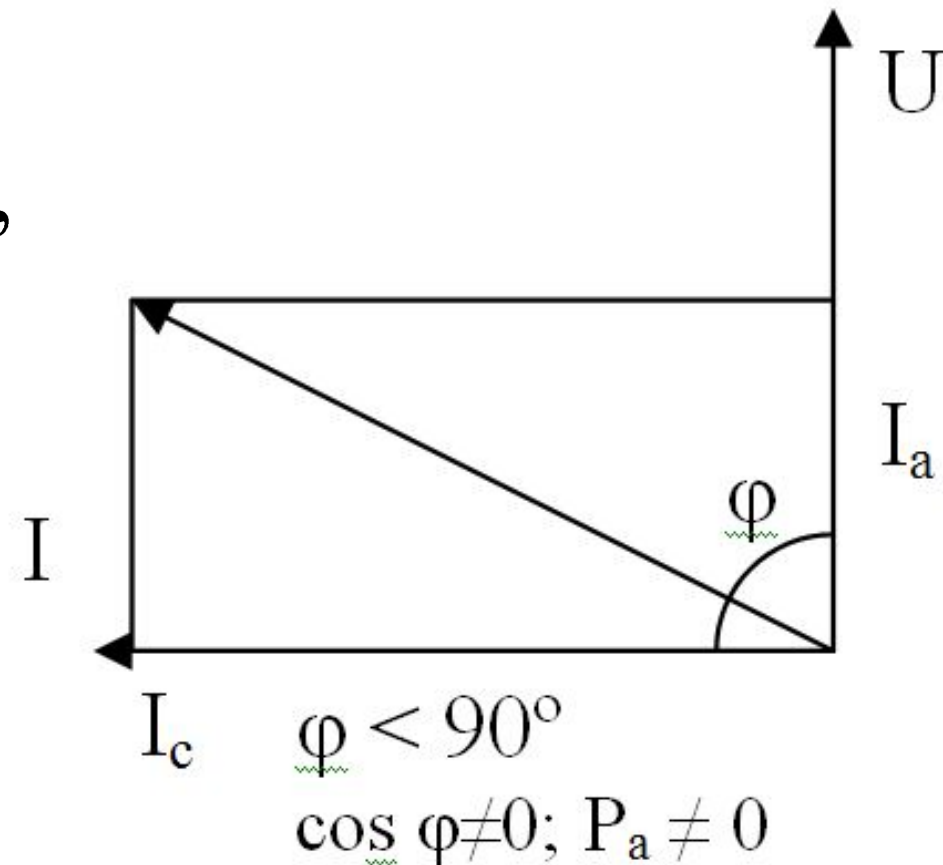
$$\varphi < 90^\circ$$
$$\cos \varphi \neq 0; P_a \neq 0$$

Мощность активных потерь P_a

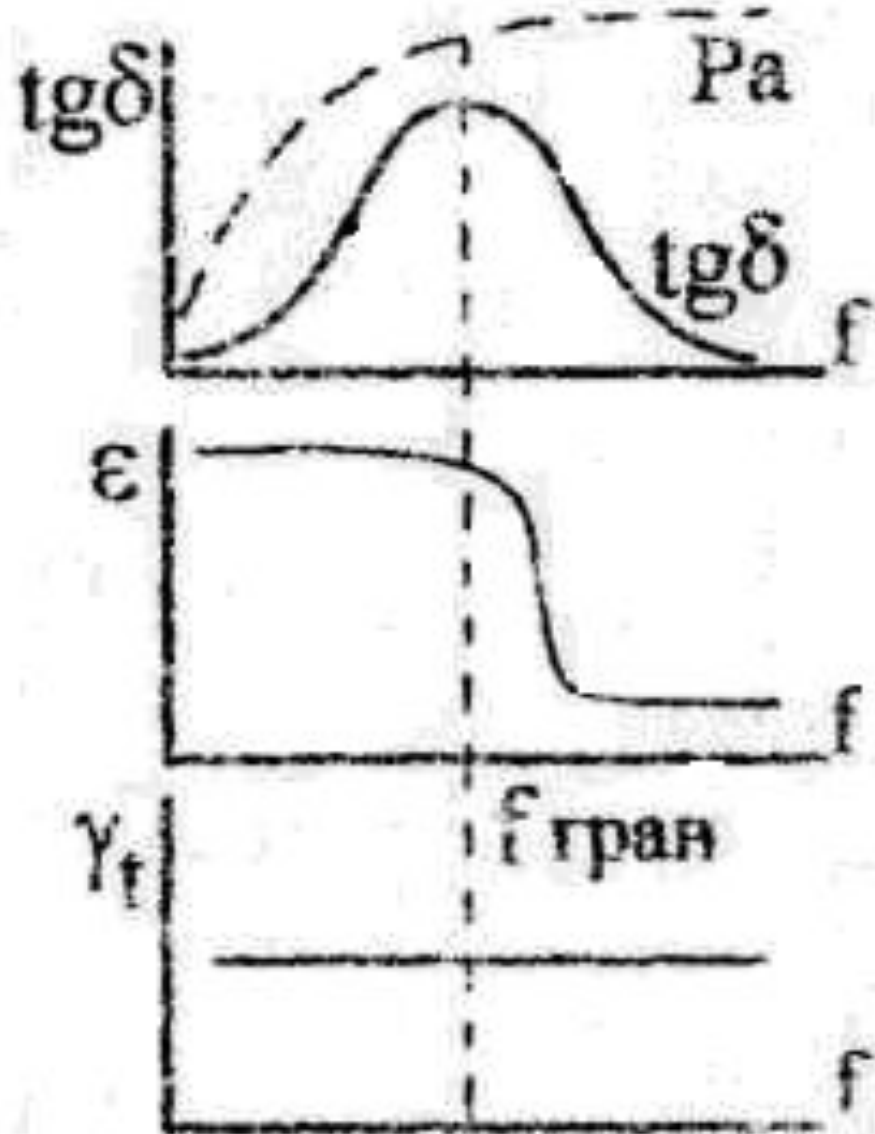
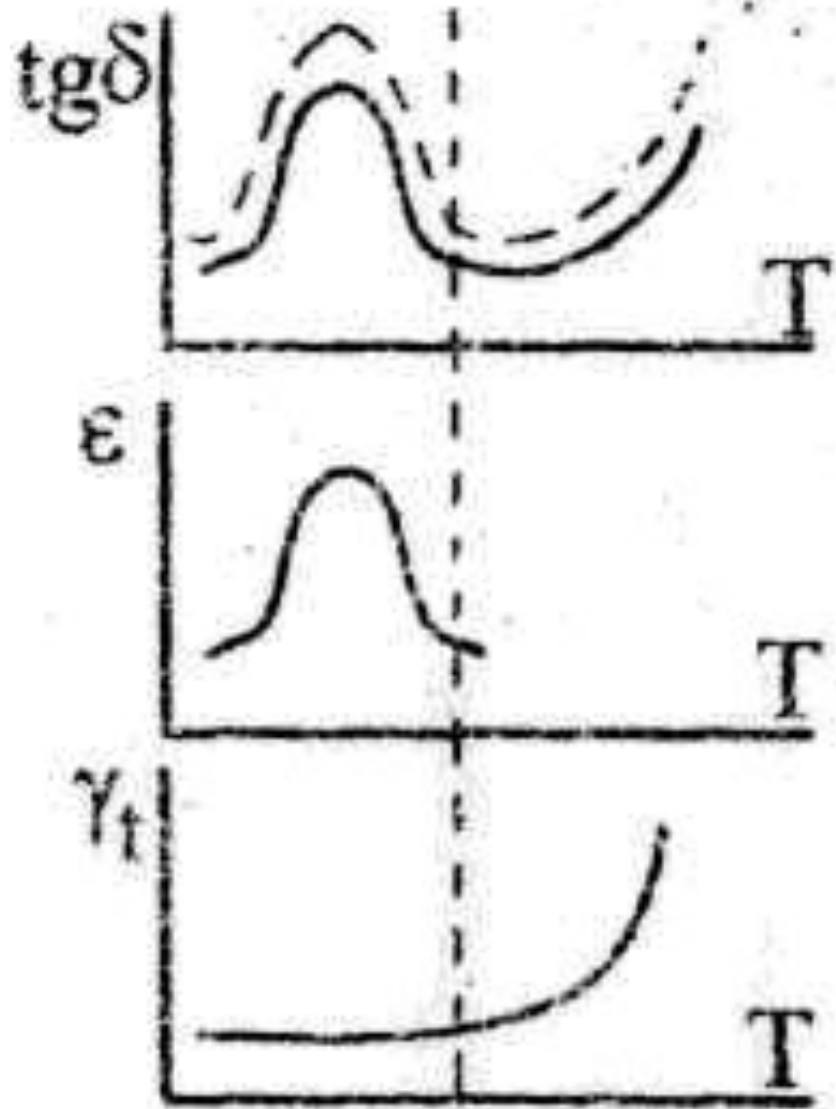
$$P_a = UI_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R},$$

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \Phi$$



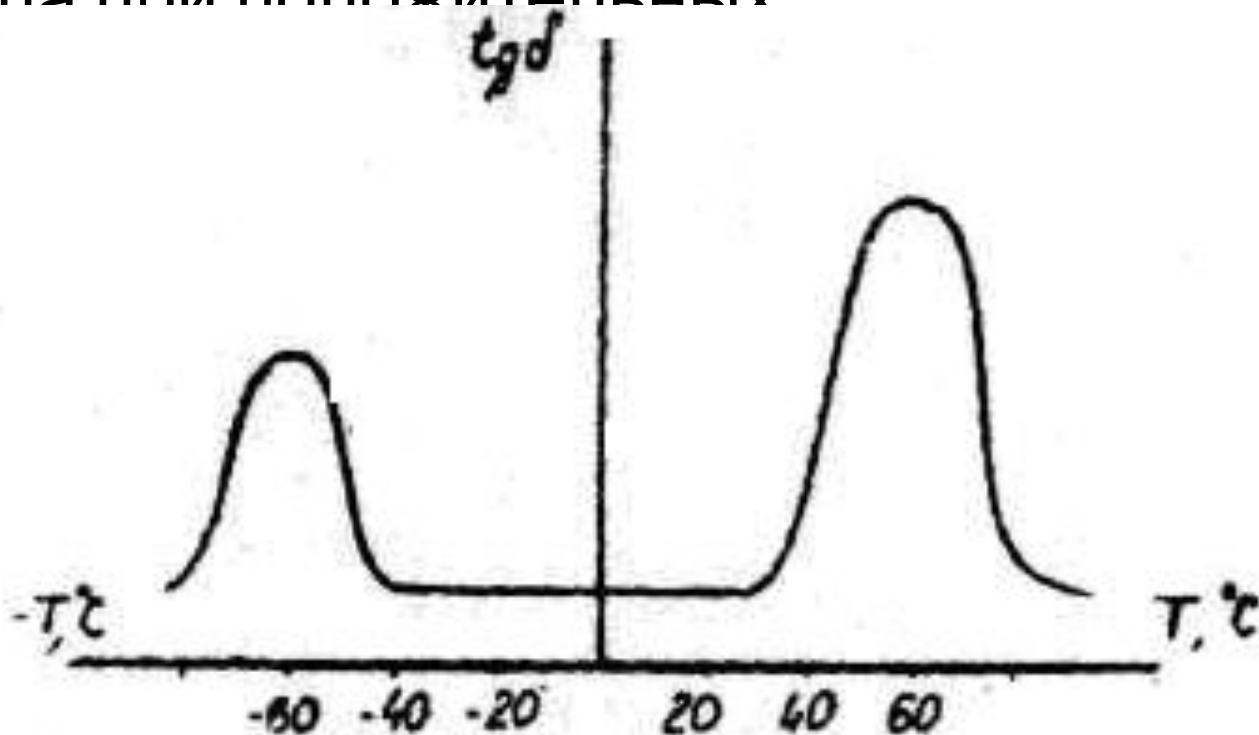
Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ и P_a от внешних факторов



Зависимость $\operatorname{tg} \delta$

Если диэлектрик неоднородный, в нем проявляются особенности каждого входящего в него компонента.

У целлюлозы максимальные потери наблюдаются при отрицательных температурах, а у масла при положительных



Величина $\text{tg}\delta$ приводится в справочных таблицах и характеризует потери в материале.

полиуретан (полярный) — $\text{tg}\delta \approx 0,02$ -

изоляционные платы, каркасы катушек, панели;

винипласт (полярный) — $\text{tg}\delta \approx 0,01$ -

изоляционные пленки;

полистирол (нейтральный) — $\text{tg}\delta \approx 0,0001$ -

материал для конденсаторов и изоляции;

фторопласт-4 (нейтральный) — $\text{tg}\delta \approx 0,0002$ -

изоляционные платы;

керамика КМ-1 — $\text{tg}\delta \approx 0,002$ - платы для

микросхем.

4. Пробой диэлектриков

это потеря свойства электроизоляционного материала, если напряженность поля, превысит некоторое критическое значение.

Пробоем называется образование в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля.



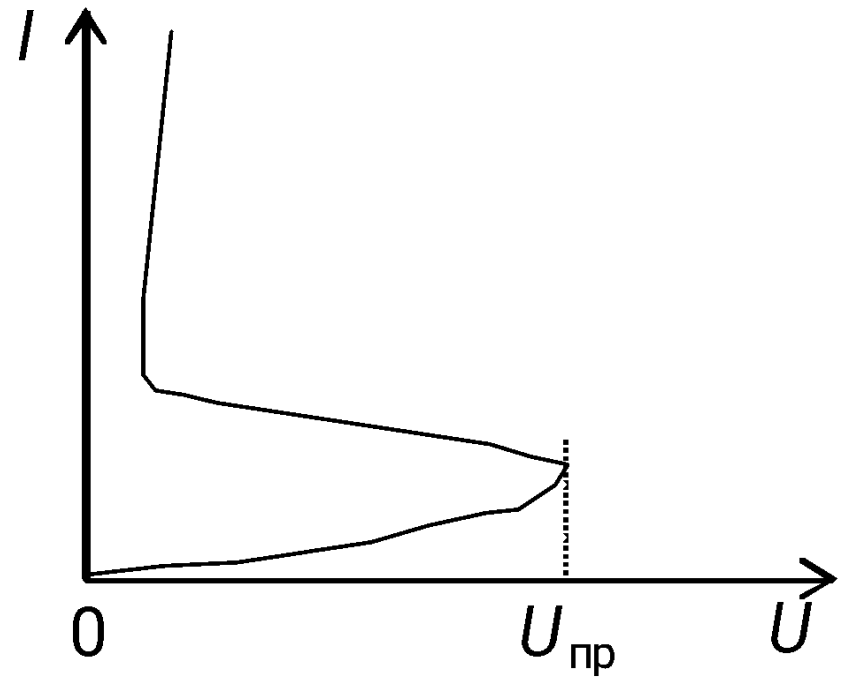
Электрическая прочность - это напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробойю.

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}, \text{ В / м,}$$

где d – толщина диэлектрика, м.

Минимальное напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называется *пробивным напряжением* – $U_{пр}$, а соответствующее ему значение напряженности поля – $E_{пр}$

Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ - это минимальное, приложенное к образцу диэлектрика напряжение, приводящее к его пробое. Различают статическое и импульсное напряжение пробоя.



ВАХ диэлектрика при пробое

Виды пробоя.

Для газообразных, жидких и твердых диэлектриков различают несколько видов пробоя:

Ионизационной, ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с).

Чисто электрический ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ с)

Электрохимический пробой (минуты, часы, дни и более).

Электротепловой пробой.

Поверхностный пробой.

Виды пробоя.

Для газообразных, жидких и твердых диэлектриков различают несколько видов пробоя:

Ионизационной, ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с).

Чисто электрический ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ с)

Электрохимический пробой (минуты, часы, дни и более).

Электротепловой пробой.

Поверхностный пробой.

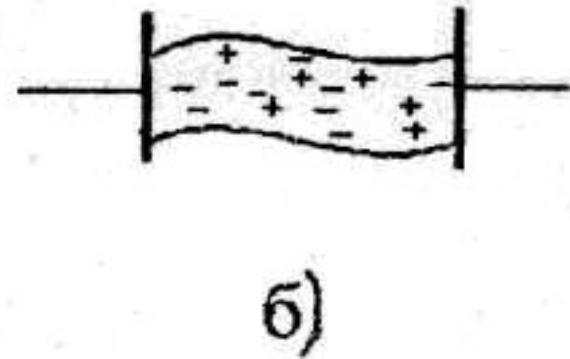
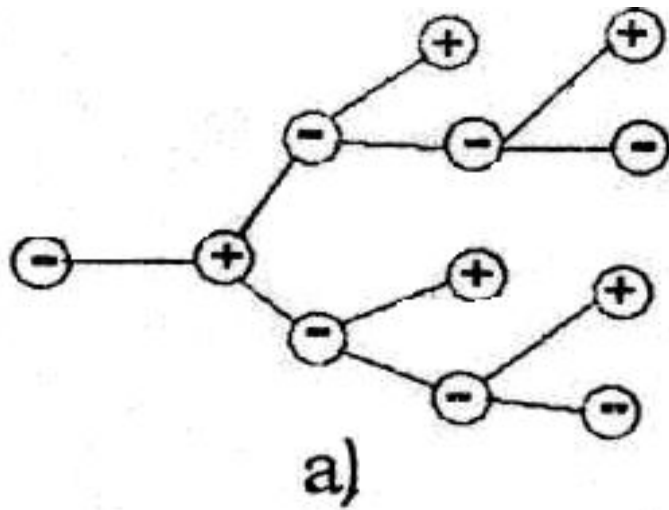
Ионизационной, связанной с ударной и фотоионизацией. Он характерен для газообразных и очень чистых жидких диэлектриков. Развивается мгновенно ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с). После снятия напряжения прочность таких диэлектриков восстанавливается.

$$W_{\text{част}} = q \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot E.$$

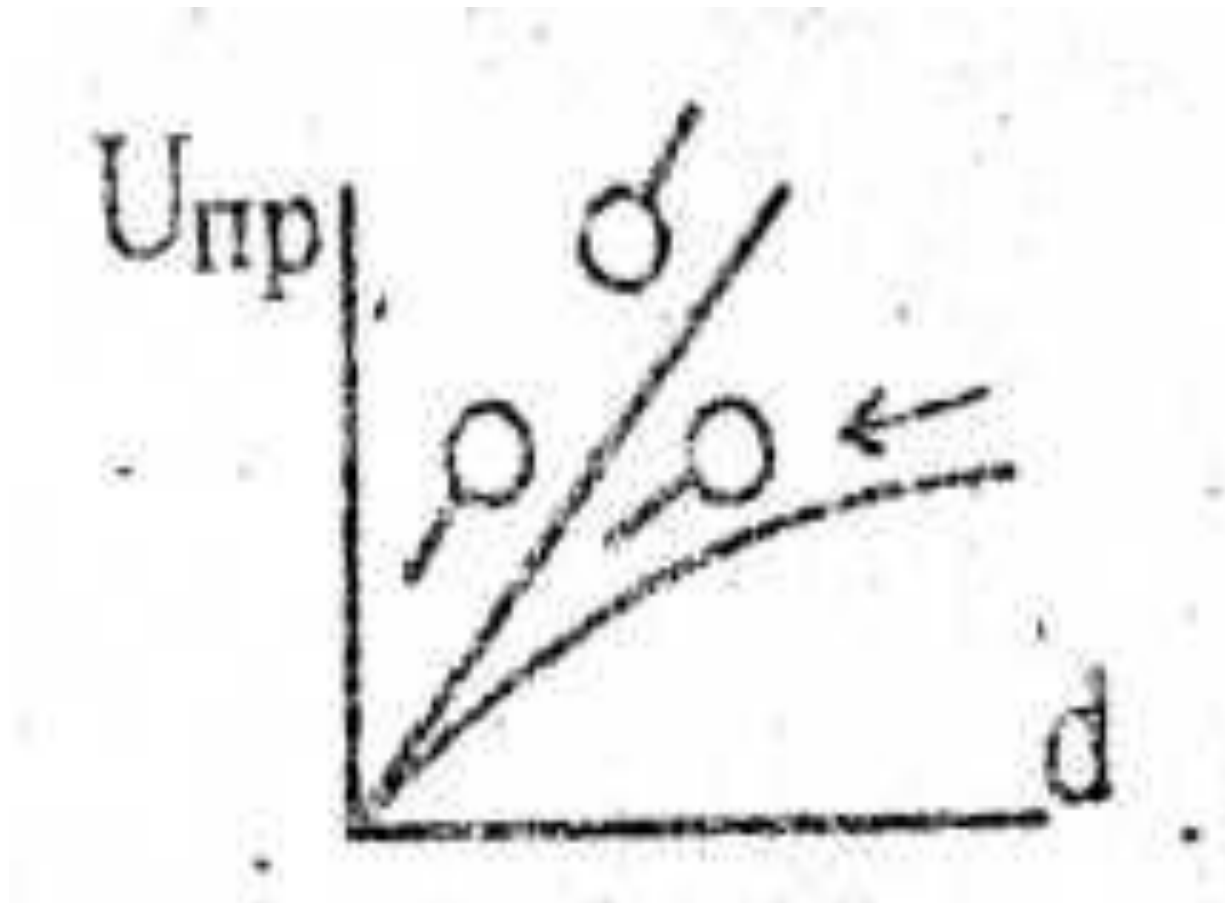
$$W_{\text{част}} = W_{\text{ион}},$$

$$W_{\text{част}} = q \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot E_{\text{пр}} = \text{const.}$$

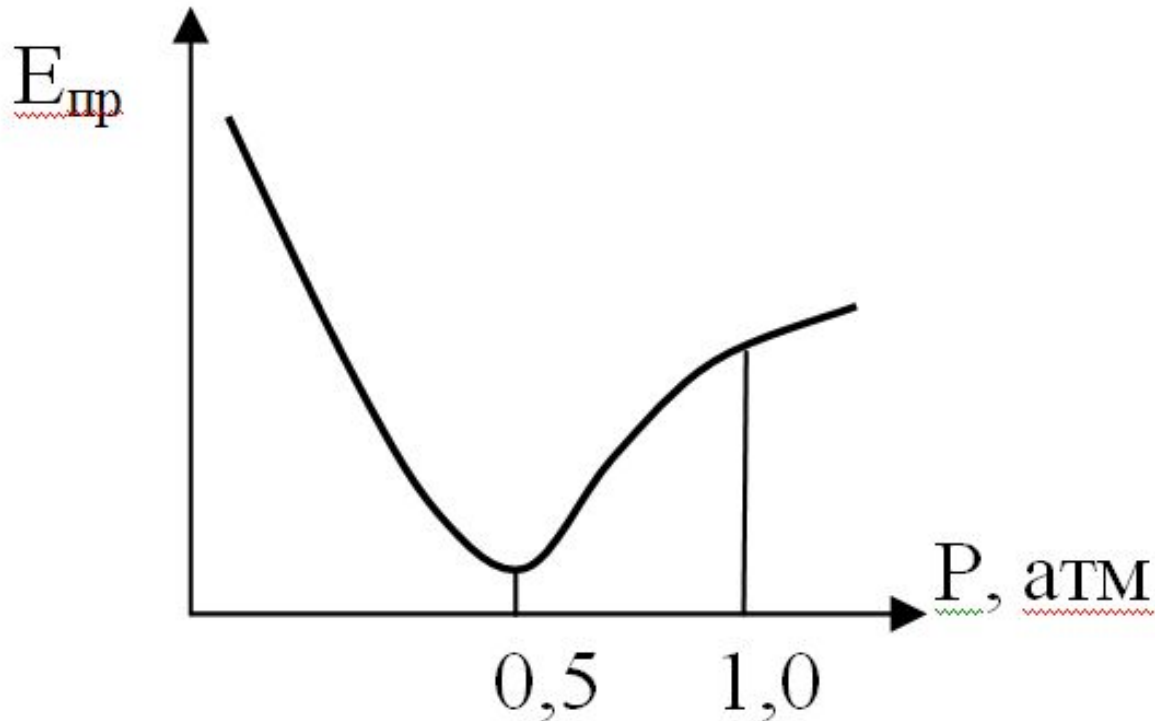
Освободившиеся электроны, ускоряться в поле, создают новые заряженные частицы (а) Возникает лавина, состоящая из отрицательно и положительно заряженных частиц, которые, и образуют проводящий канал (б)



Электрическая прочность газов сильно зависит от однородности поля



Электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от давления



Электрическая прочность воздуха – 3,2 МВ/м.
Шестифтористая сера – SF_6 (элегаз) - ~ 8 МВ/м.
Очищенные жидкости - 30 ... 80 МВ/м

Чисто электрический пробой – за счет возникающей лавины электронов. Он характерен для беспримесных твердых однородных и неоднородных материалов с малыми диэлектрическими потерями. Развивается мгновенно ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ с), когда скорость электронов $v \geq 100$ км/с.

Величина электрической прочности при этом виде пробоя зависит от однородности структуры, от толщины диэлектрика, от площади приложенных электродов.

Материал диэлектрика	Особенности структуры, толщина	$E_{пр}$, МВ/м
Стекло	Однородный диэлектрик	~ 300
Плотная керамика	Неоднородный диэлектрик	~ (10...30)
Пористая керамика	Очень неоднородный диэлектрик	~ (1,5...2,5)
Фторопласт-4	Толщина	~ 30
Фторопласт-4	Пленка \approx 30 мкм	~ 200

Электрохимический пробой. Он связан с возникновением химических процессов в диэлектрике (жидком или твердом) под действием электрического поля – химическое разложение, электролиз и т.п. Развивается медленно (минуты, часы, дни и более).

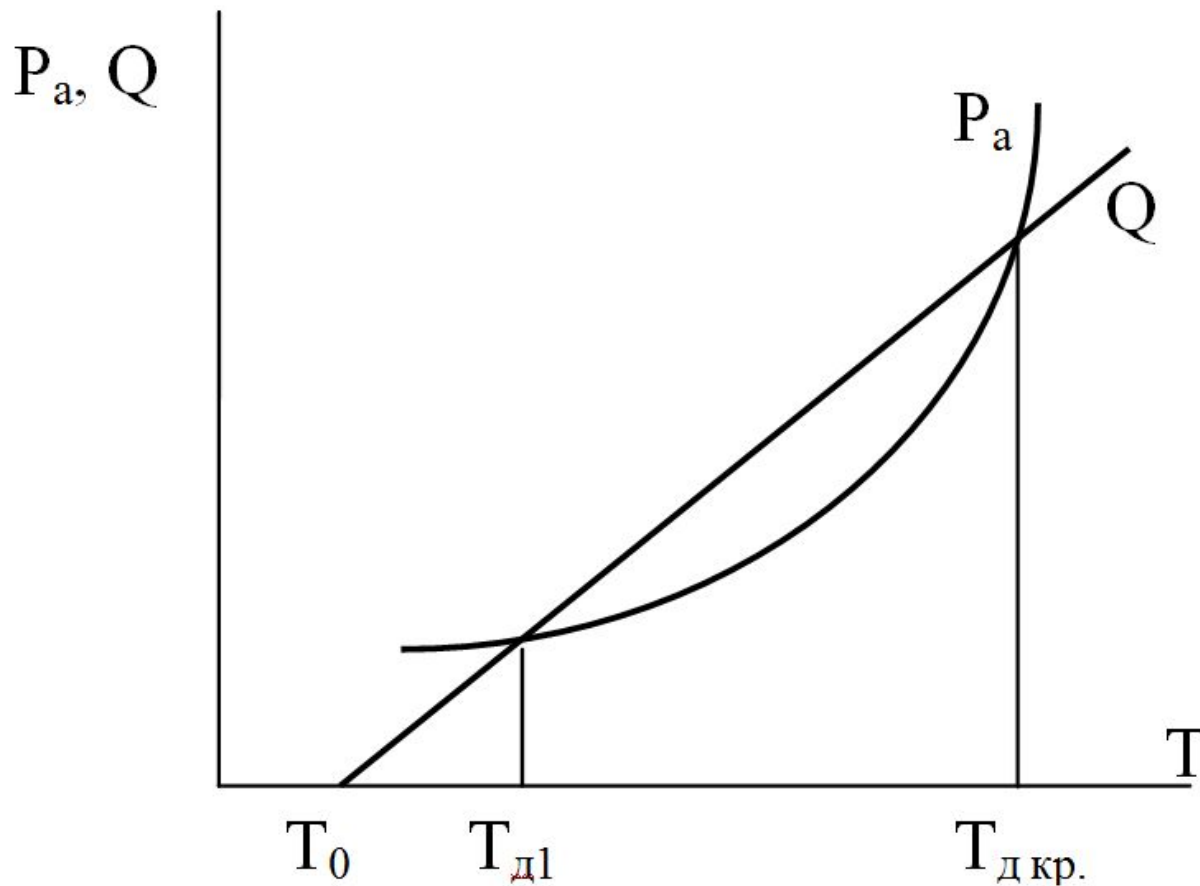
Наиболее часто электрохимический, пробой имеет место в органических пропитанных диэлектриках (пропитанный картон), а также в керамике, содержащей окислы металлов переменной валентности (например, TiO_2), или щелочных окислов. Электрохимический пробой наблюдается в постоянных или низкочастотных переменных полях при повышенных температурах и высокой влажности.

Электротепловой пробой. Наблюдается в твердых (или жидких) диэлектриках. Обусловлен нарушением теплового равновесия вследствие больших диэлектрических потерь и недостаточности теплоотдачи.

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ — тепловыделение}$$

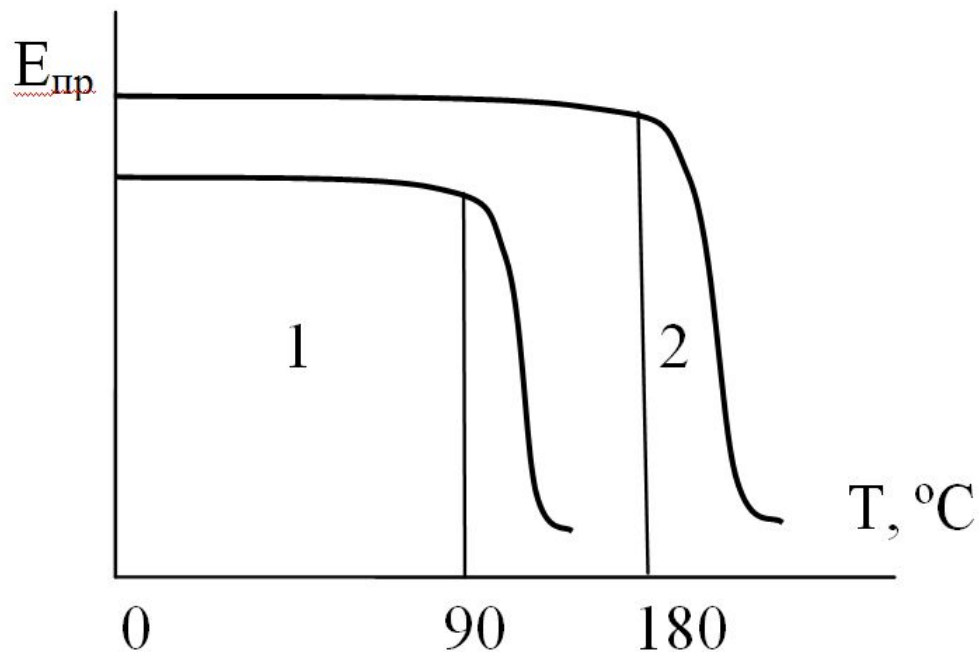
$$Q = \sigma \cdot S \cdot (T_{\partial} - T_0) \text{ — теплоотвод (теплоотдача)}$$

Электротепловой пробой.



$$U_{раб} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot S \cdot (T_{д1} - T_0)}{\omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}}; \quad U_{д.кр} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot S \cdot (T_{д.кр} - T_0)}{\omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}}.$$

Электротепловой пробой диэлектриков зависит от нагревостойкости материала.



1^{ая} — зависимость принадлежит органическому диэлектрику (класс нагревостойкости У — 90° С);

2^{ая} — неорганическому диэлектрику (класс нагревостойкости С \geq 180° С)

Поверхностный пробой. Это пробой в газообразном или жидком диэлектрике прилегающем к поверхности, твердой изоляции. Он связан с появлением короны, искры, проводящего канала по поверхности.

Повреждение поверхности вследствие поверхностного пробоя называется *трекингом диэлектриков*.

ПОВЕРХНОСТНЫЙ РАЗРЯД

- ***Увлажнение*** слоя ***загрязнения*** дождем или росой ***приводит*** к уменьшению сопротивления слоя ***загрязнения***, существенному изменению распределения напряжения по поверхности изолятора и в результате – ***к значительному снижению разрядного напряжения.***



Спасибо за внимание!

