



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*

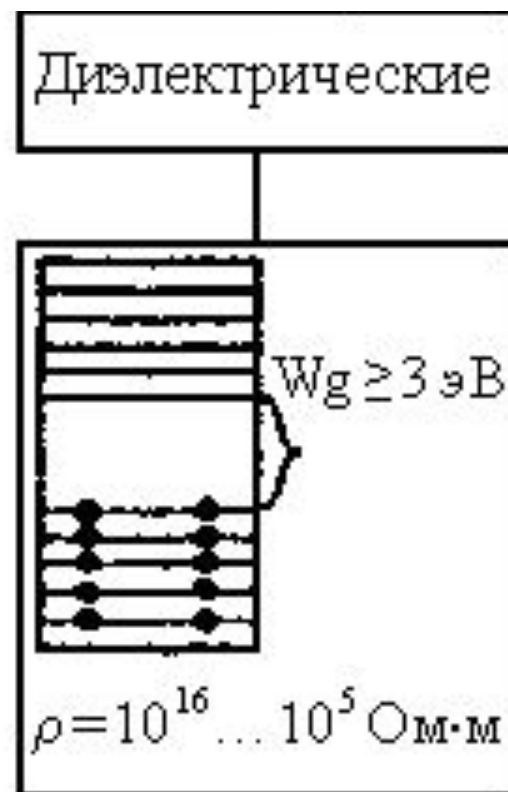
- для изоляции токоведущих частей друг от друга, изоляторов для других целей;
- для создания электрических емкостей (конденсаторов) – накопителей заряда.

## *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  $\epsilon$ ;

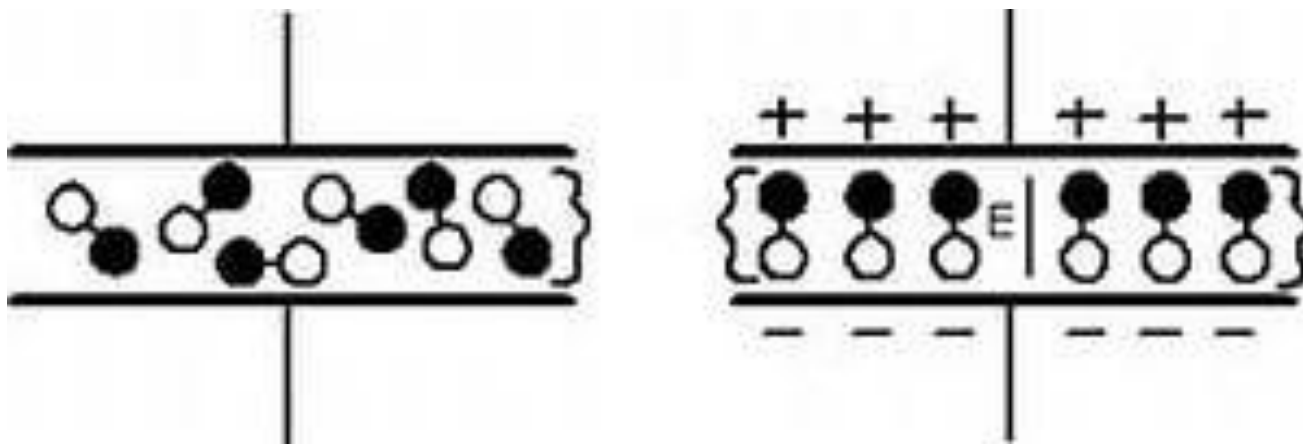
электропроводность  $\gamma$   
(объемная  $\gamma_v$  и поверхностная  $\gamma_s$ )

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

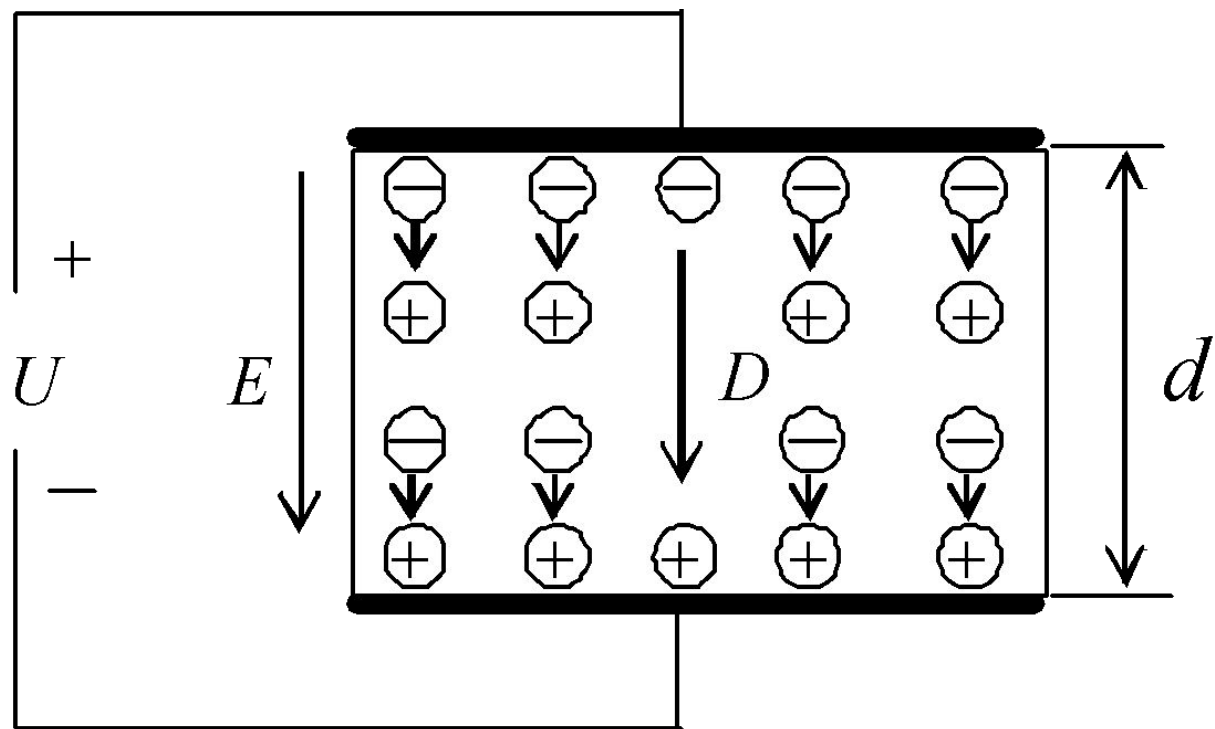
пробой в электрическом поле, характеризуемый пробивной напряженностью  $E_{\text{пр}}$ .

# 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  $\chi$  - 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

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

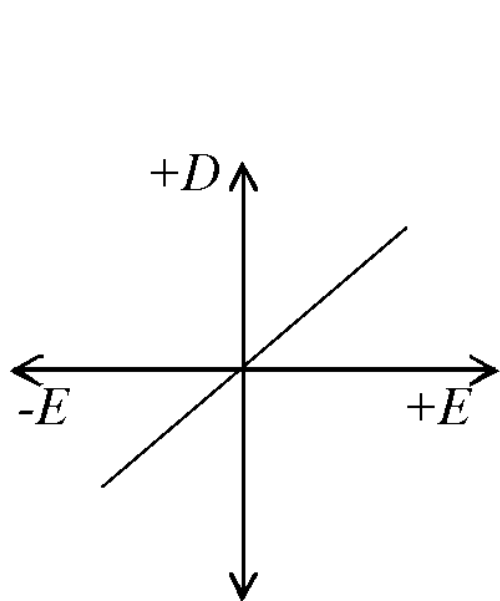
где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$S$  – площадь меньшего электрода, приложенного к диэлектрику, м<sup>2</sup>;

$d$  – толщина диэлектрика, м;

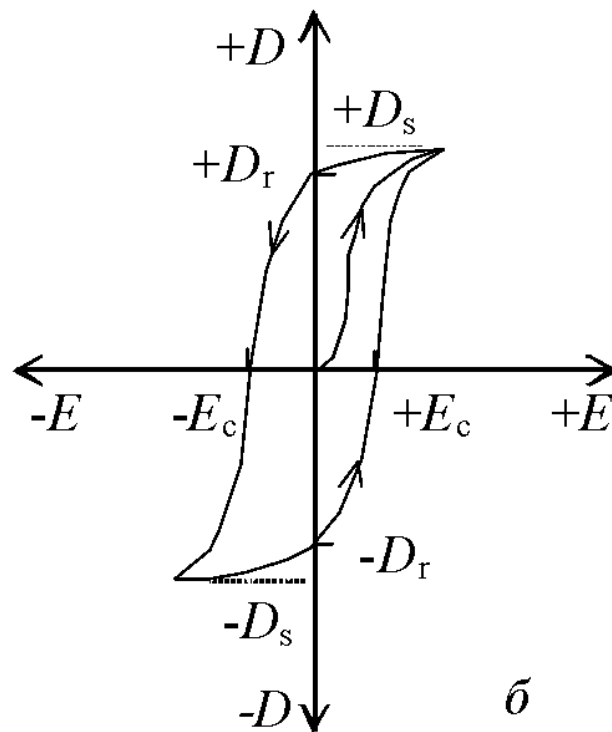
В переменном электрическом поле  $E$  различают *линейные и нелинейные диэлектрики.*

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

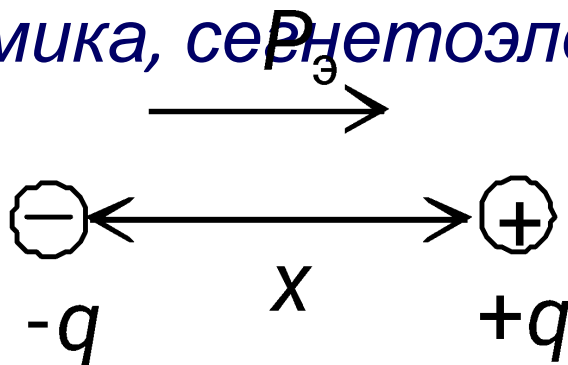
$$A = P_3 / E, \quad \text{Ф} \times \text{м}^2,$$

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

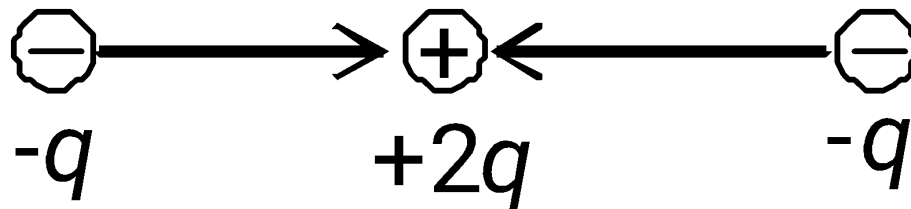
**Полярные диэлектрики** - это диэлектрики, молекулы которых даже в отсутствие внешнего электрического поля будут представлять собой электрические диполи с отличным от нуля постоянным электрическим моментом. Молекулы полярного диэлектрика способны к переориентации в электрическом поле.

*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  $p_{\Sigma}$  равен нулю. Молекулы неполярного диэлектрика имеют симметричное строение и обладают центром симметрии (рис. 4.4). *К таким диэлектрикам относятся двухатомные газы, углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), ряд полимеров (полиэтилен, полистирол), поваренная соль ( $\text{NaCl}$ ), керамика и др.*



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

Три основных типа поляризаций:

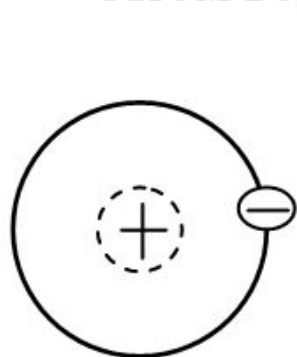
**электронный (безынерционный);**

**дипольно-релаксационный (инерционный);**

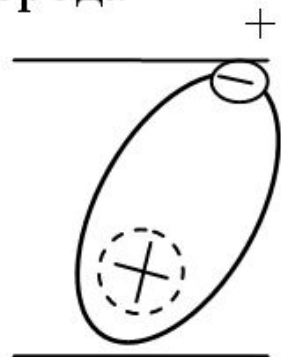
**спонтанный (самопроизвольный).**

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

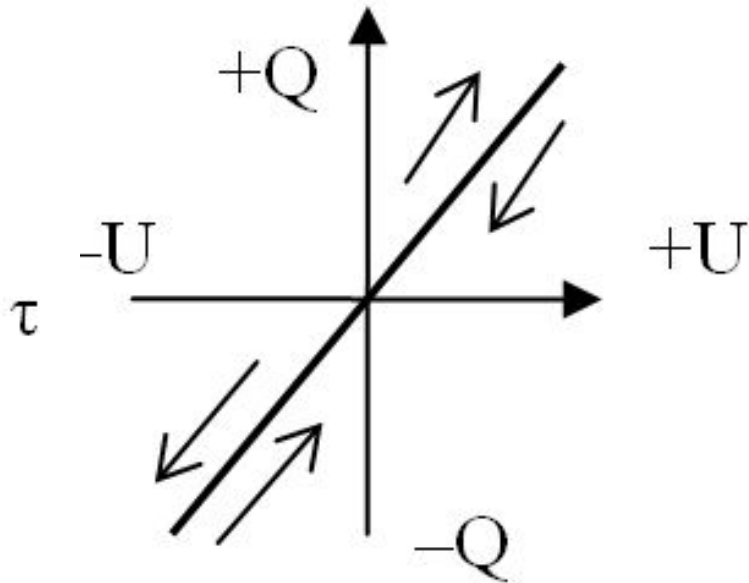
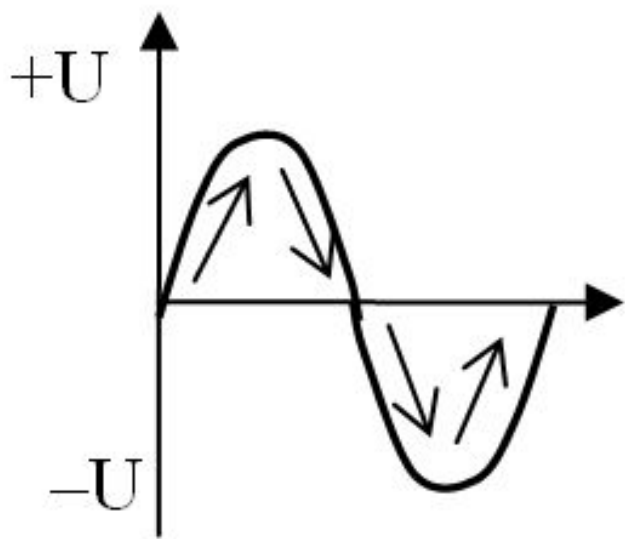
Атом водорода



Без поля



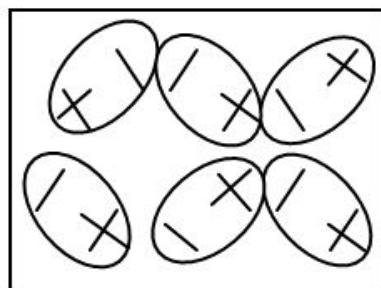
Приложено поле



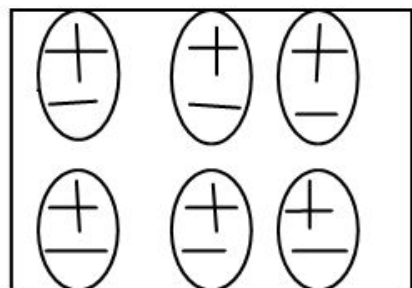


Дипольно-релаксационный тип поляризации связан с разворотом (смещением) диполей (молекул, ионов) рис. 5.4, а, и характерен для полярных диэлектриков. При этом поляризация происходит не мгновенно, с потерями, не упруго, но линейно.  $\tau = 10^{-6} \dots 10^{-10}$  с.

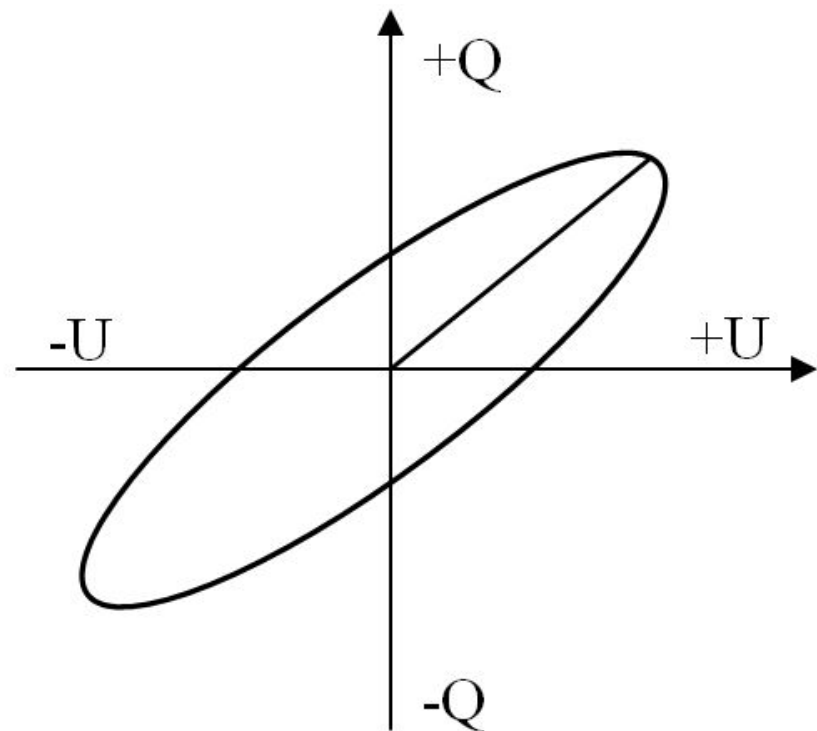
Полярный диэлектрик



Поля нет

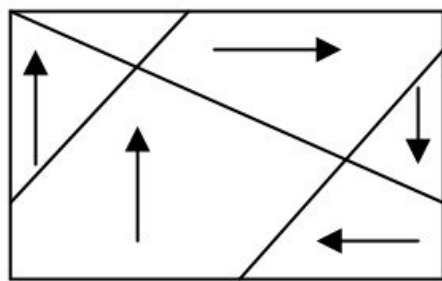


Поле  
приложено

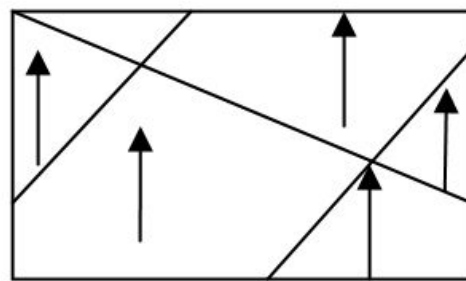


Спонтанный или самопроизвольный тип поляризации характерен для диэлектриков, имеющих доменную структуру, например, сегнетоэлектрики и нелинейно, т. е. имеет место явление насыщения, когда все моменты доменов развернутся по полю.

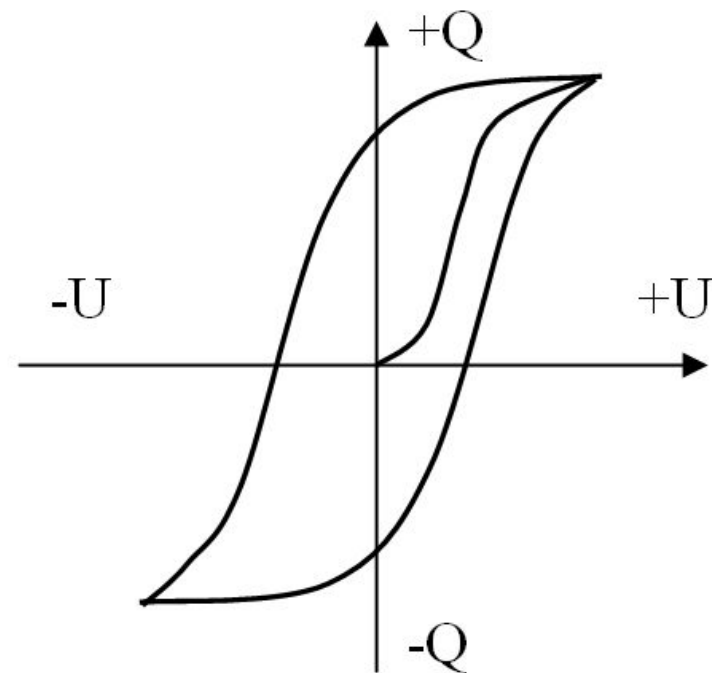
(Явление гистерезиса. Температура Кюри)



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  $E$ .

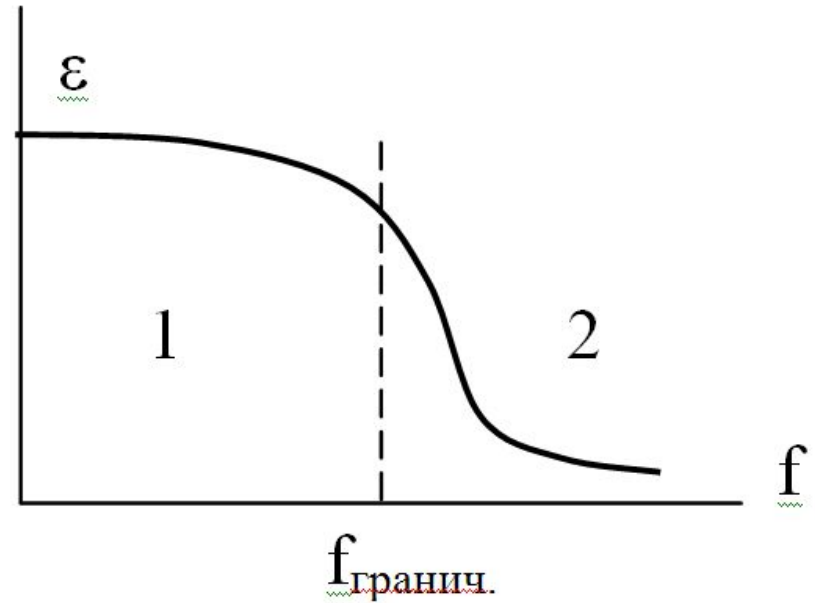
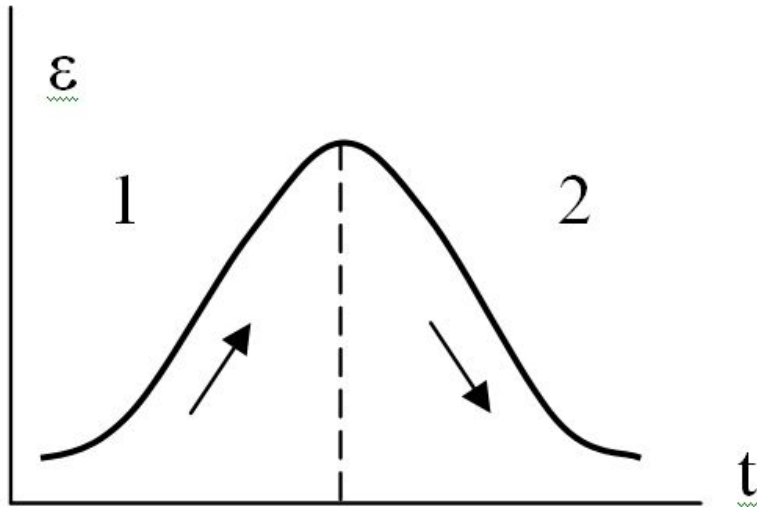
*Время релаксации*  $\tau = 10^{-6} \dots 10^{-10}$  с.

**Миграционная поляризация** наблюдается в неоднородных диэлектриках, содержащих примеси.

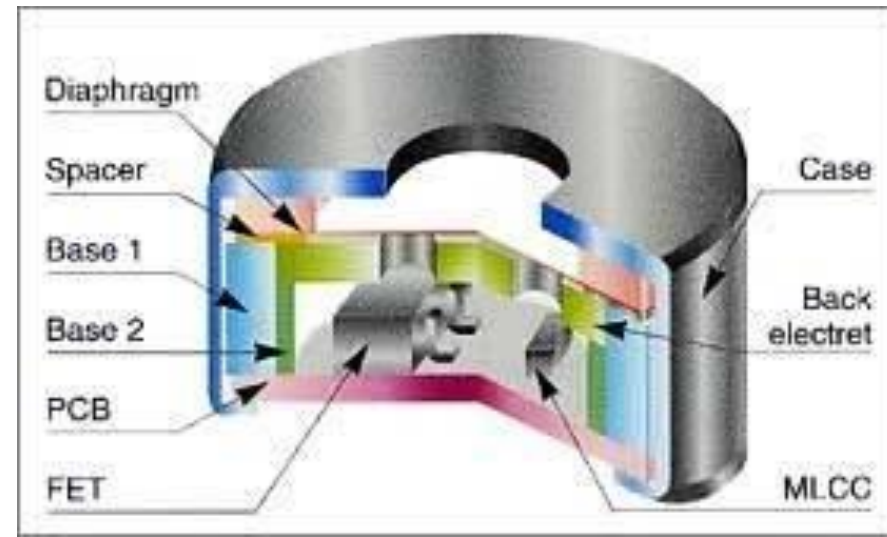
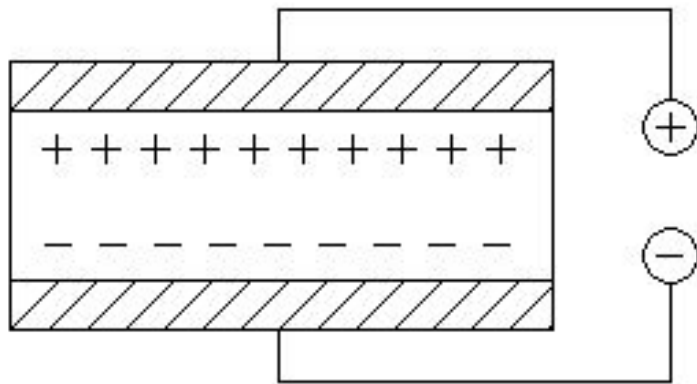
*Время релаксации*  $\tau = 1 \dots 10^4$  с.

# Влияние различных факторов на поляризуемость диэлектрика

Зависимости  $\epsilon$  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  $1 \text{ В/м}$ .

## 2. Электропроводность диэлектриков

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

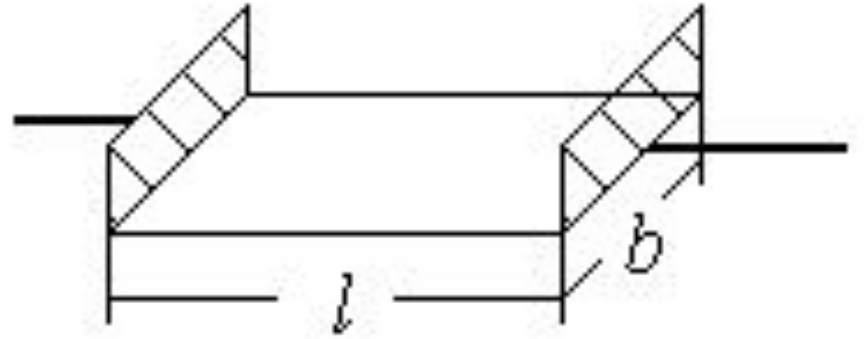
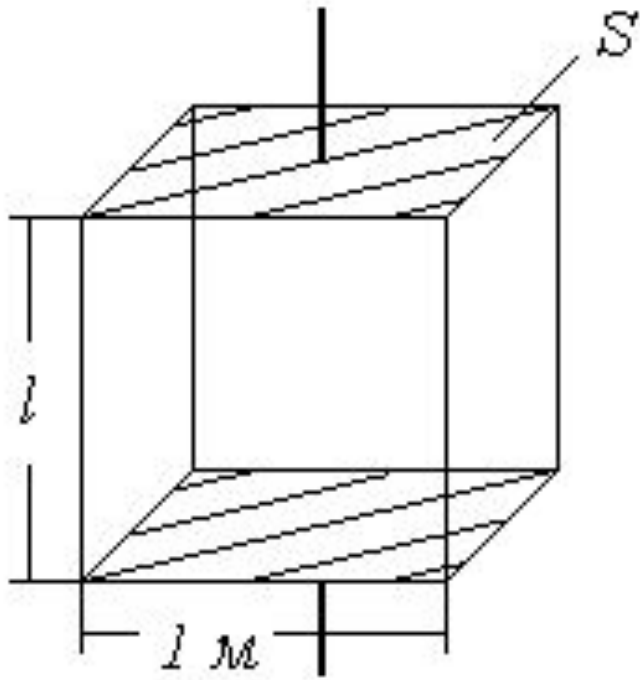
- а) **электронная** – носители электроны;
- б) **ионная** (или электролитическая) – носители ионы;
- в) **молионная** (или электрофоретическая) – носители группы молекул;
- г) **смешанная** – носители разные (электроны, ионы, молионы).

## 2. Электропроводность диэлектриков

В твердых диэлектриках ток может проходить как по их объему, так и по поверхности, поэтому различают удельную объемную проводимость  $\gamma_v$  и удельную поверхностную проводимость  $\gamma_s$

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





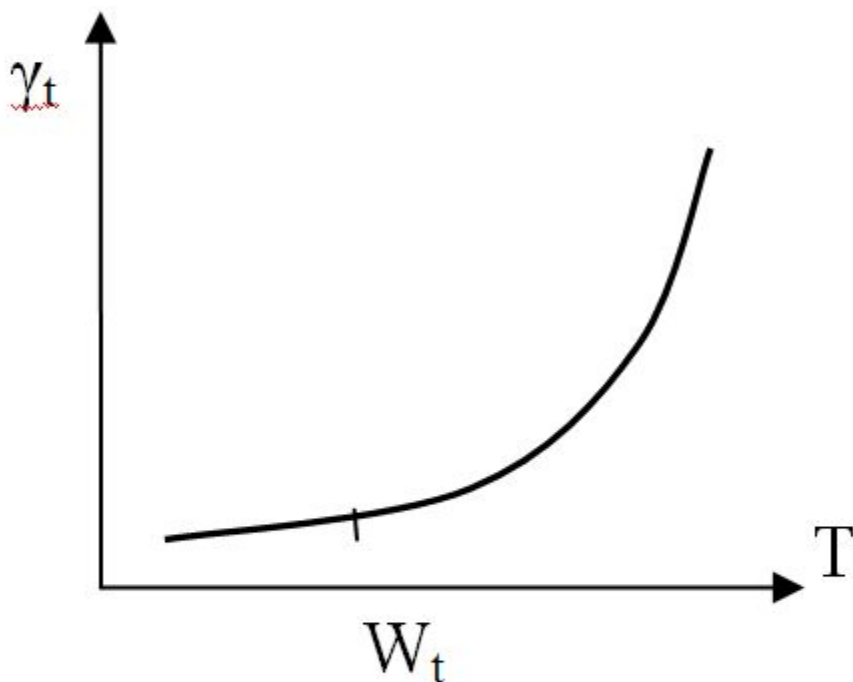
$$\rho_V = R_V \frac{S}{l}, \quad \rho_S = R_S \frac{b}{l},$$

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

# Зависимость электропроводности диэлектриков от температуры

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

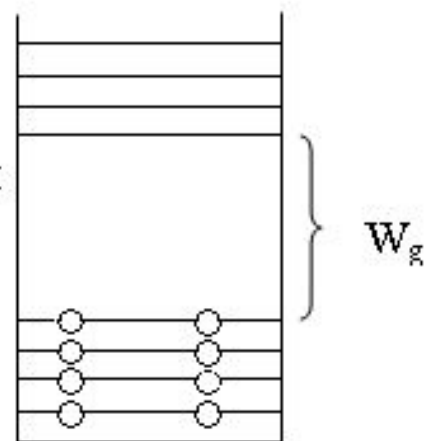
$A$  – постоянная для данного диэлектрика, Ом<sup>-1</sup>;  
 $e$  – основание натурального логарифма;  
 $k$  – постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/град;  
 $T$  – абсолютная температура, К;  
 $W_t$  – термическая энергия активации, эВ.



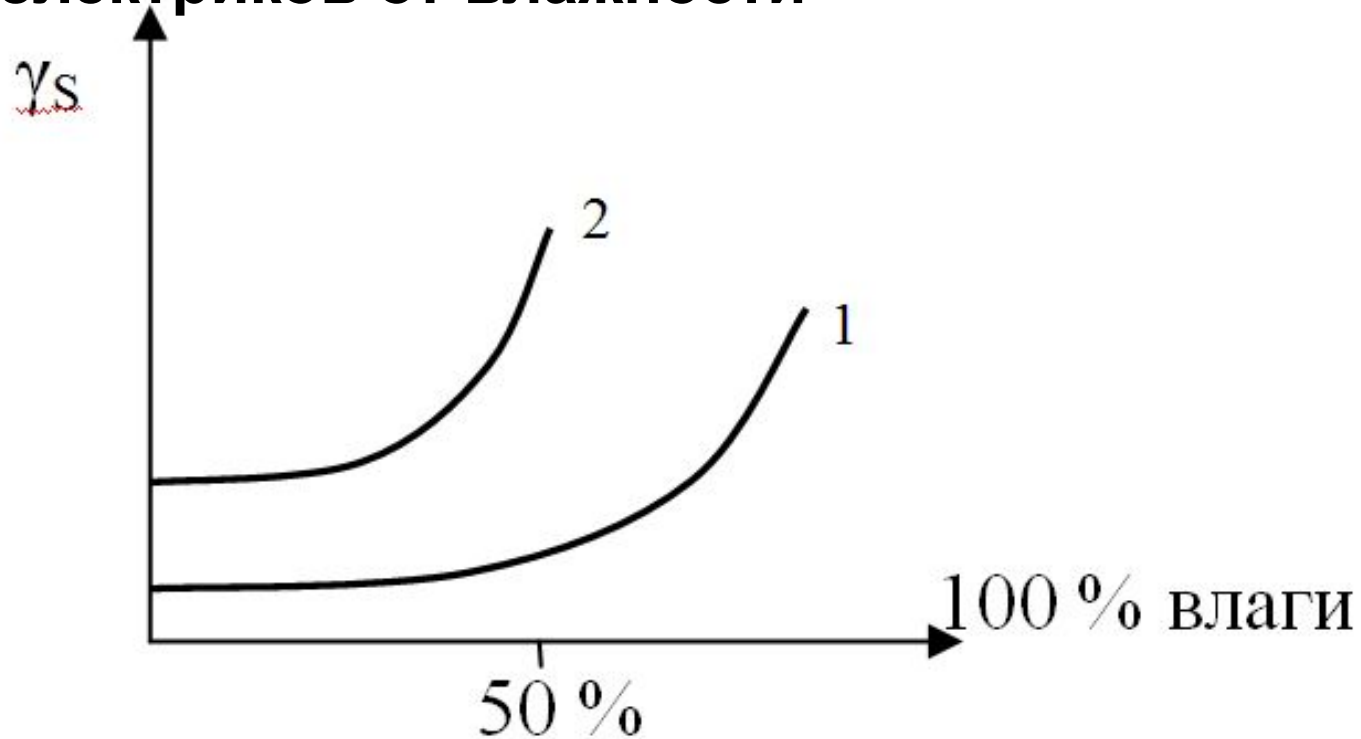
Зона проводимости

Запрещенная зона

Валентная зона

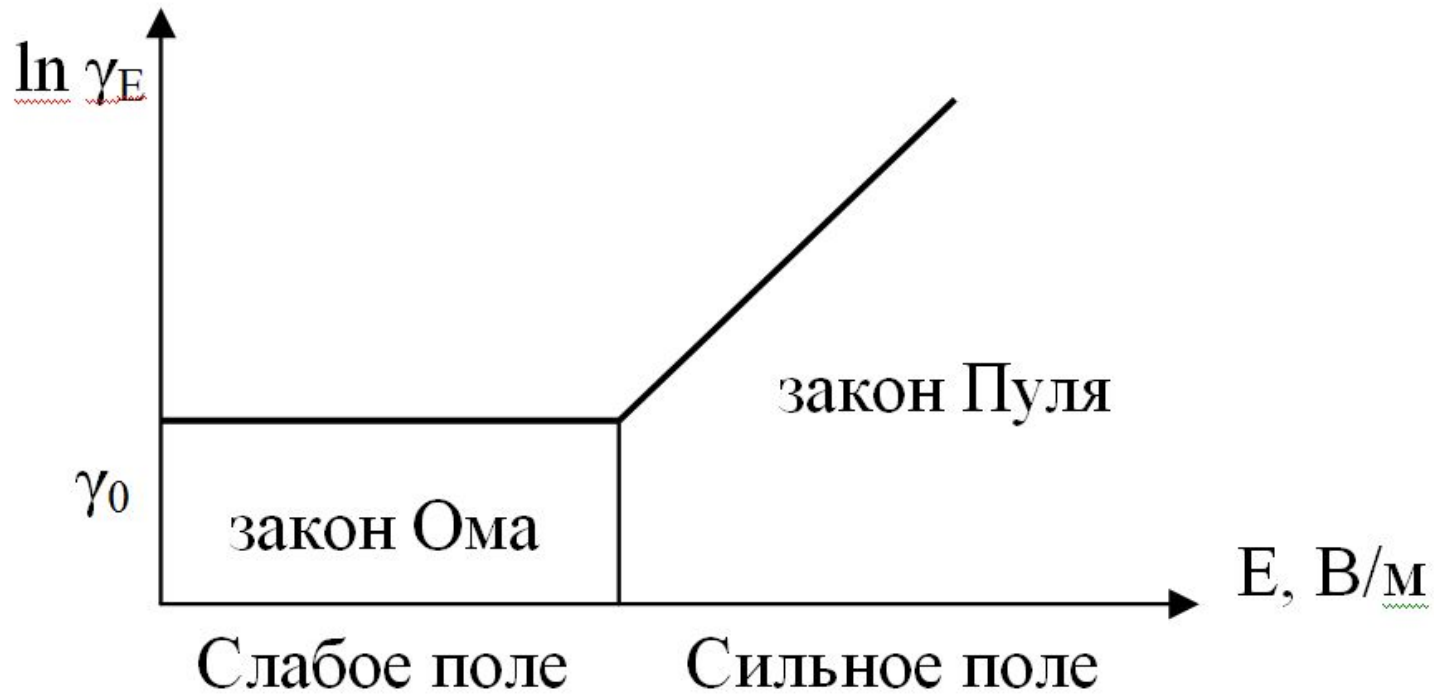


# Зависимость поверхностной электропроводности диэлектриков от влажности



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

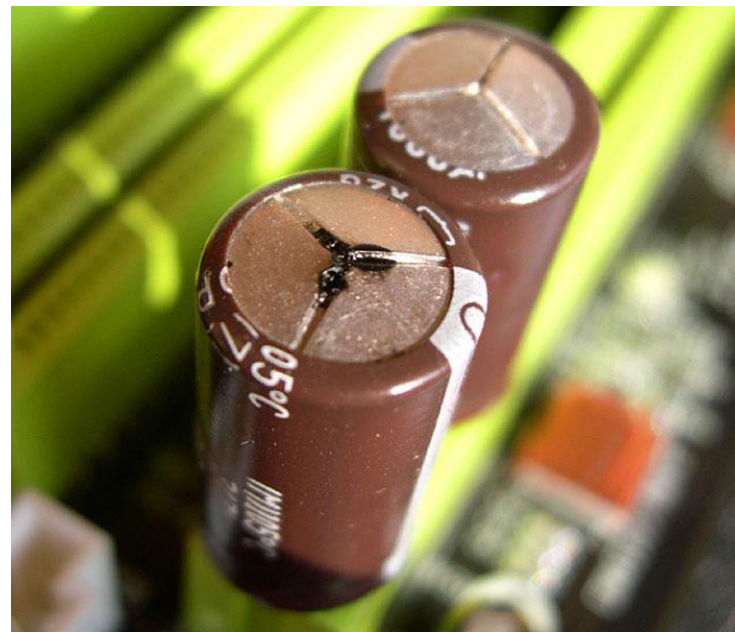
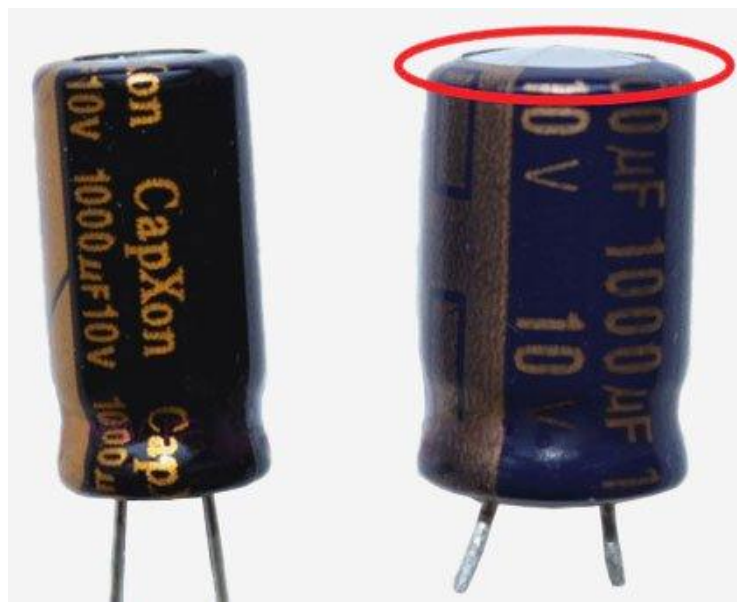
# Зависимость поверхностной электропроводности



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

где  $\gamma_0$  – электропроводность в слабом поле;  
 $\alpha$  – 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;

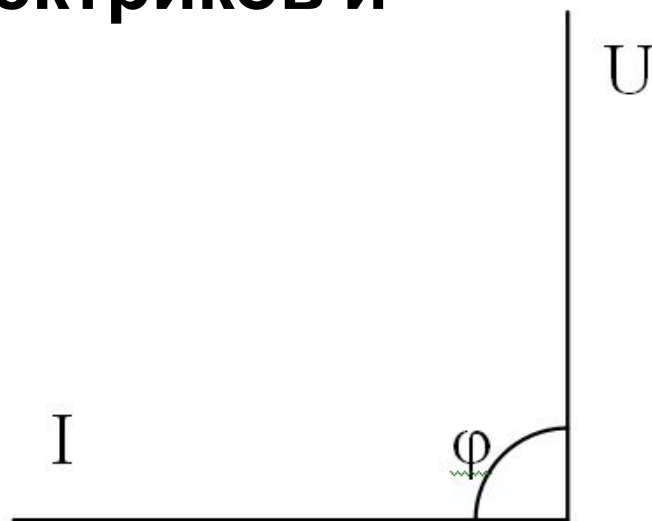
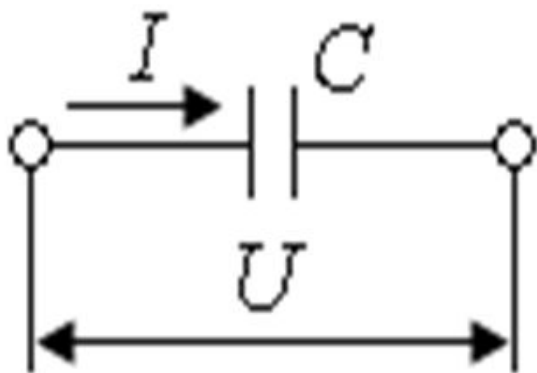
$U$  – приложенное напряжение, В;

$I$  – протекающий ток, А;

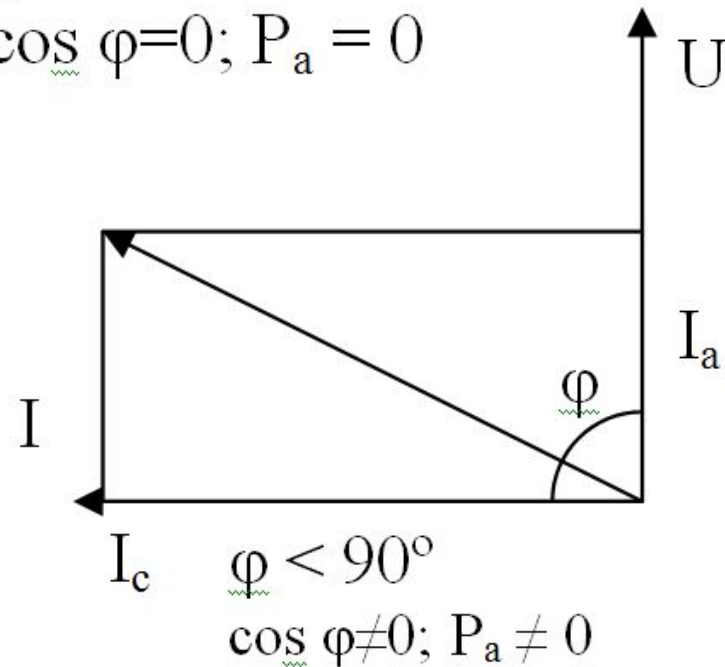
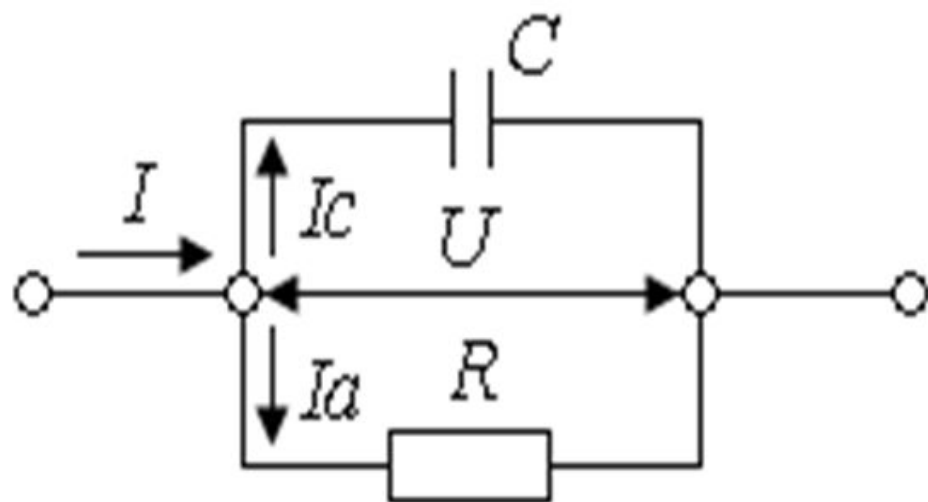
$\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением.

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



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



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

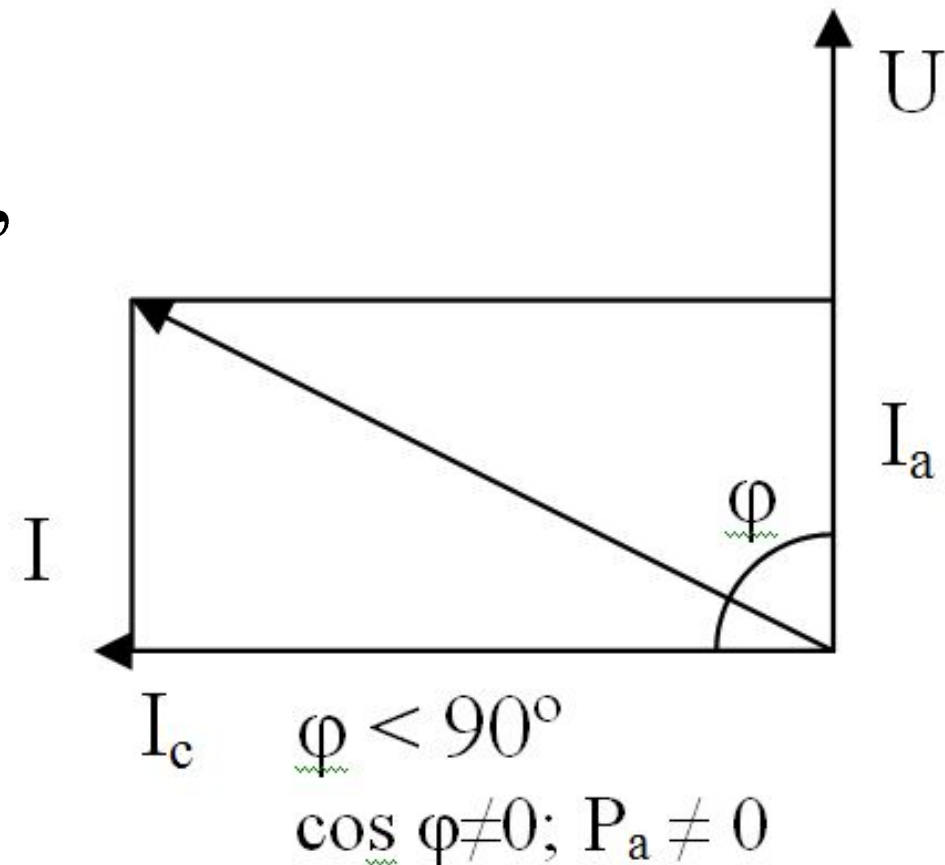


# Мощность активных потерь $P_a$

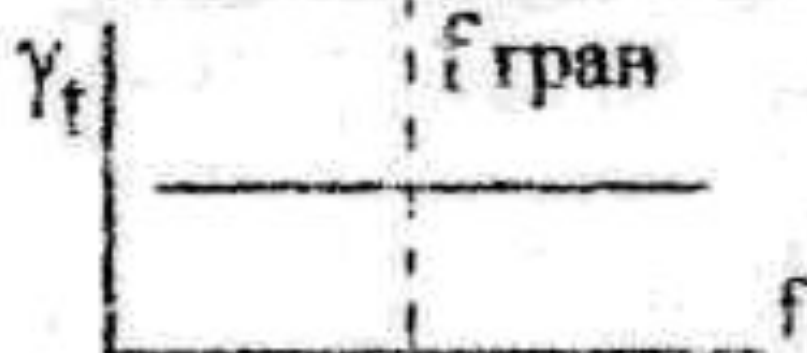
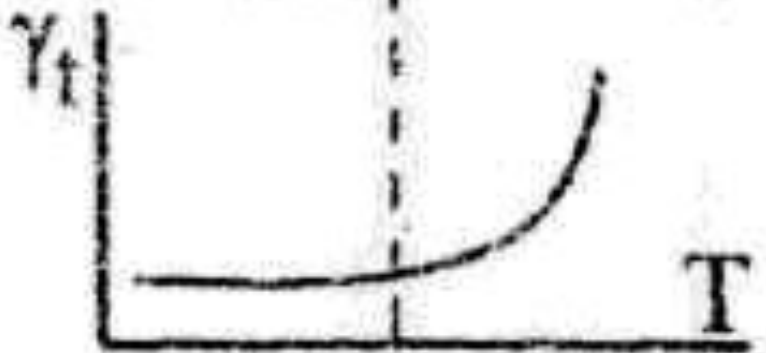
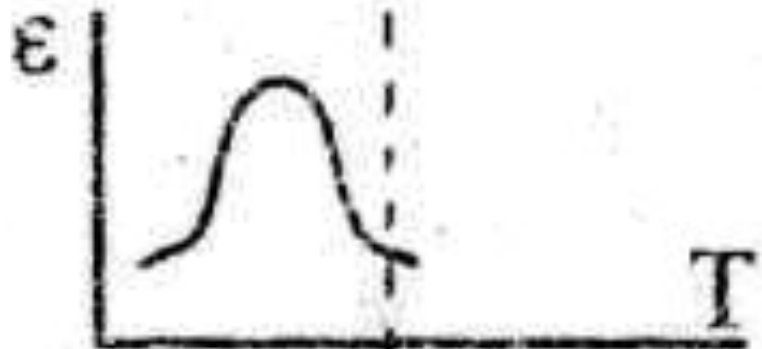
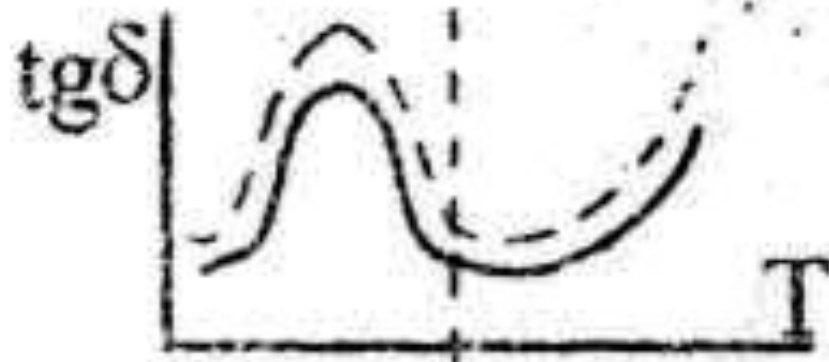
$$P_a = UI_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

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

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



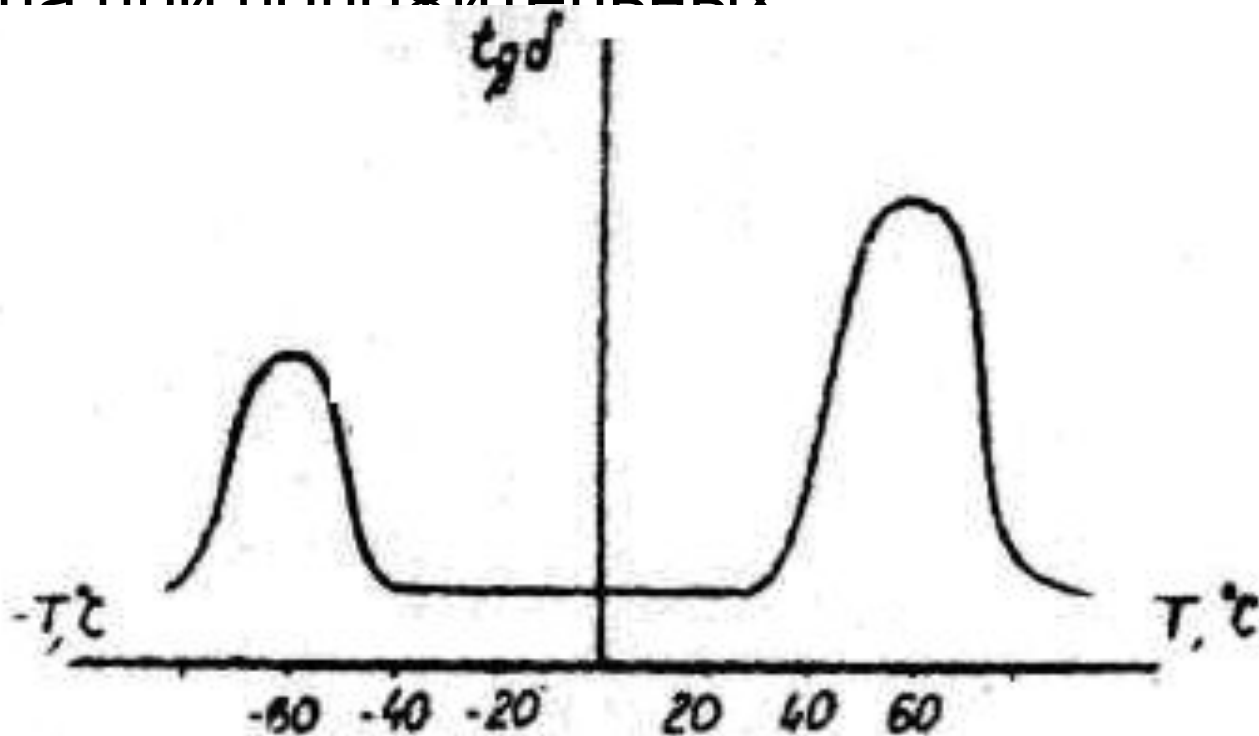
# Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ и $P_a$ от внешних факторов



# 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.*



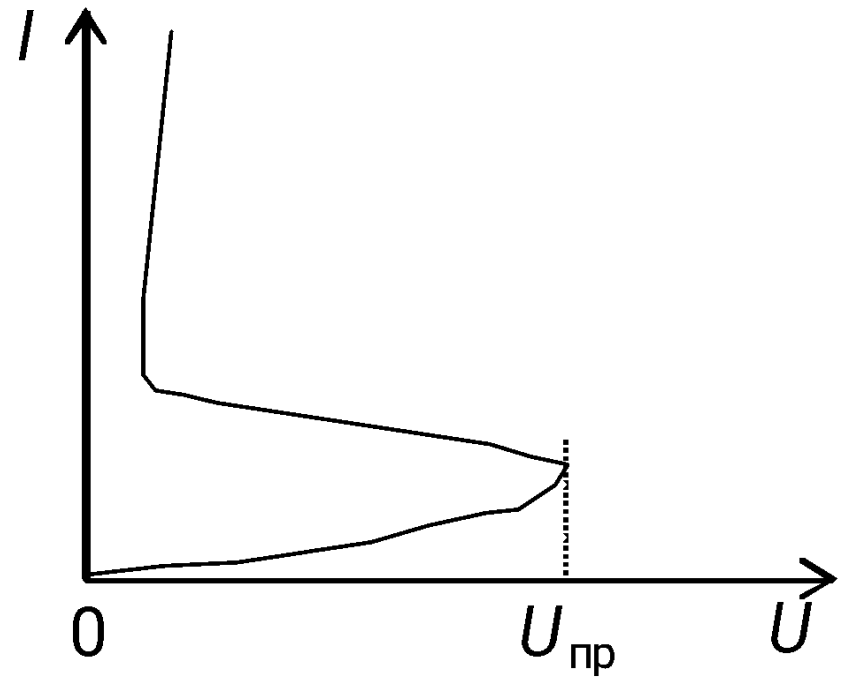
*Электрическая прочность* - это напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробойю.

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

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 пробоею. 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.

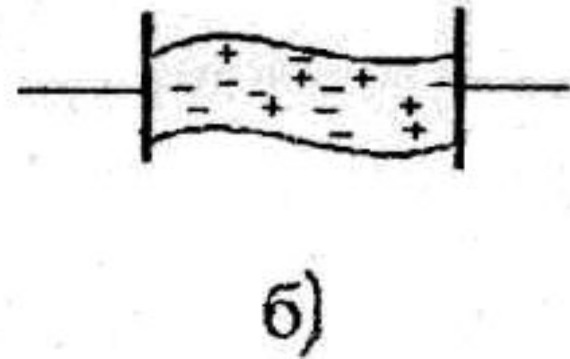
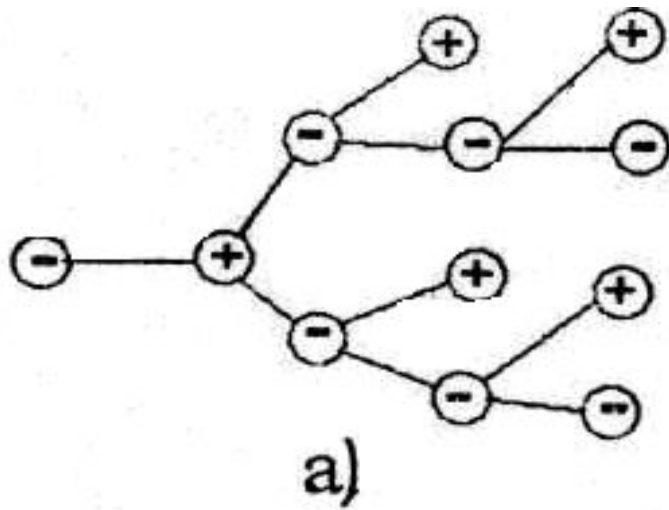
Ионизационной, связанной с ударной и фотоионизацией. Он характерен для газообразных и очень чистых жидких диэлектриков. Развивается мгновенно ( $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с). После снятия напряжения прочность таких диэлектриков восстанавливается.

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

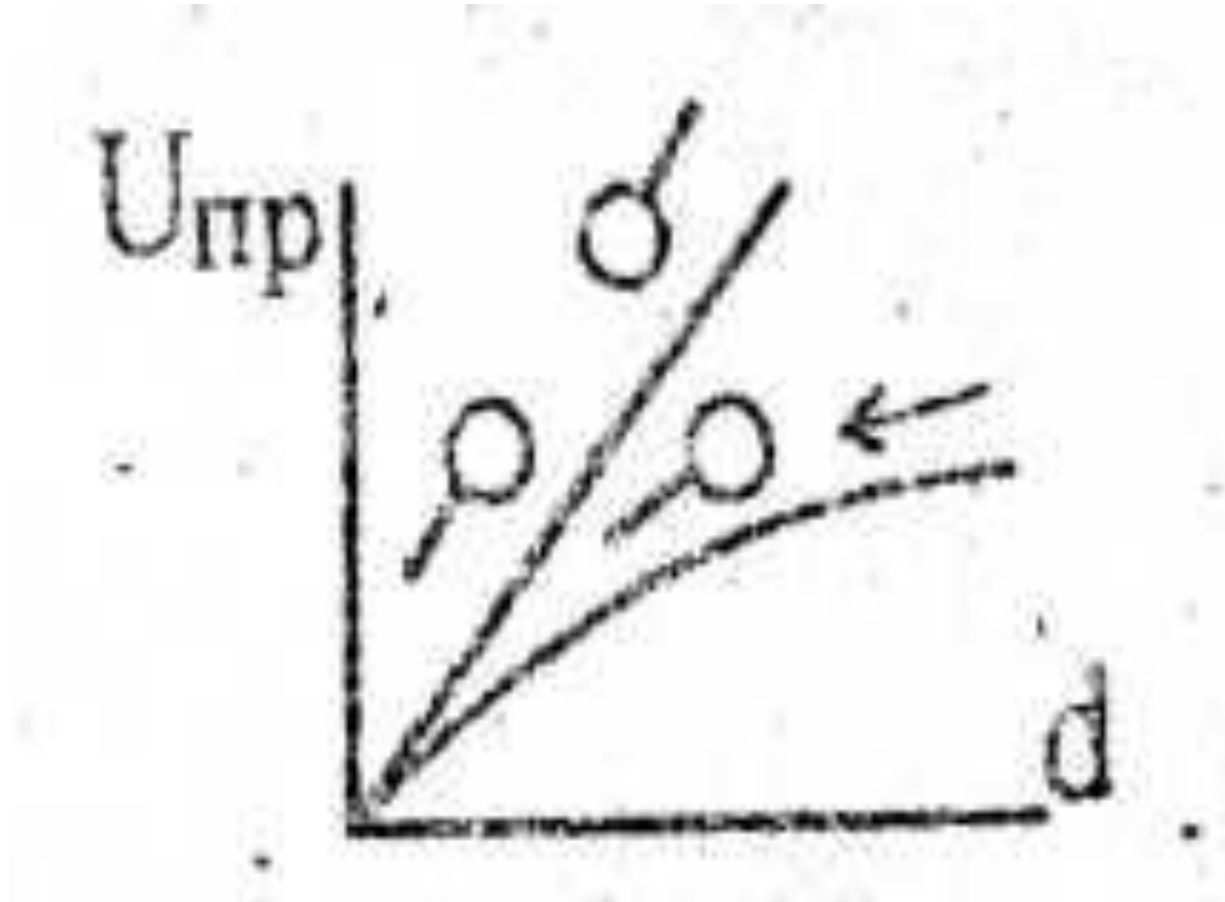
$$W_{\text{част}} = W_{\text{ион}},$$

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

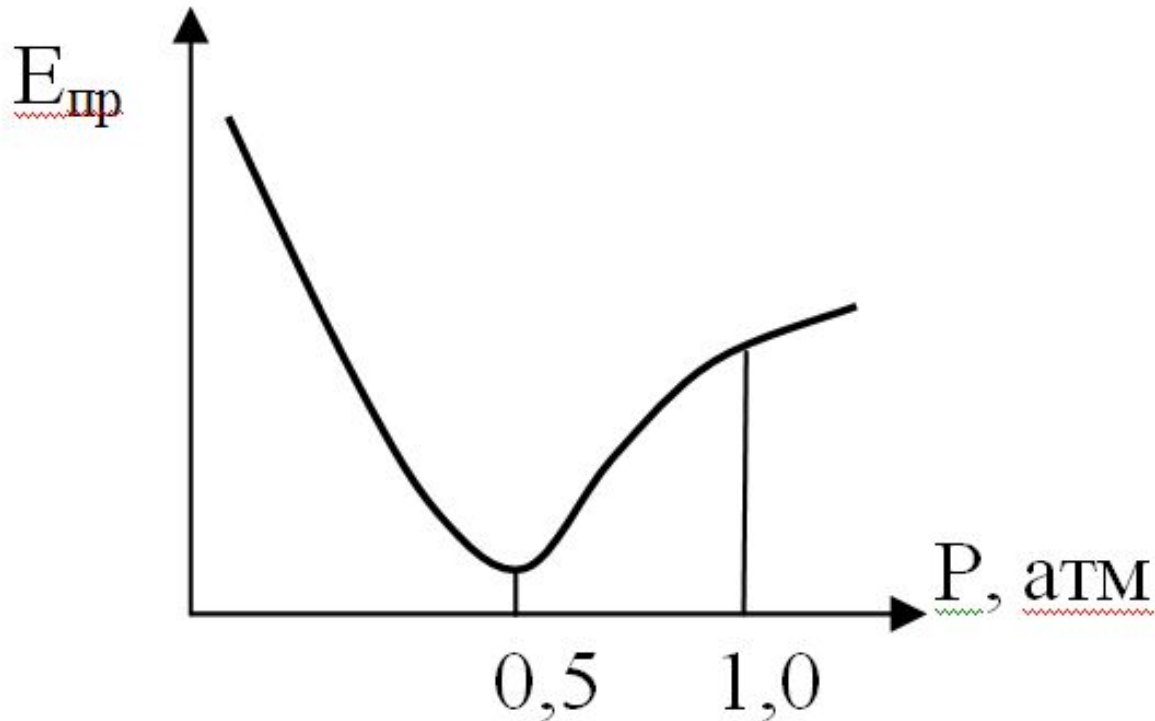
Освободившиеся электроны, ускорясь в поле, создают новые заряженные частицы (а) Возникает лавина, состоящая из отрицательно и положительно заряженных частиц, которые, и образуют проводящий канал (б)



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.

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

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.

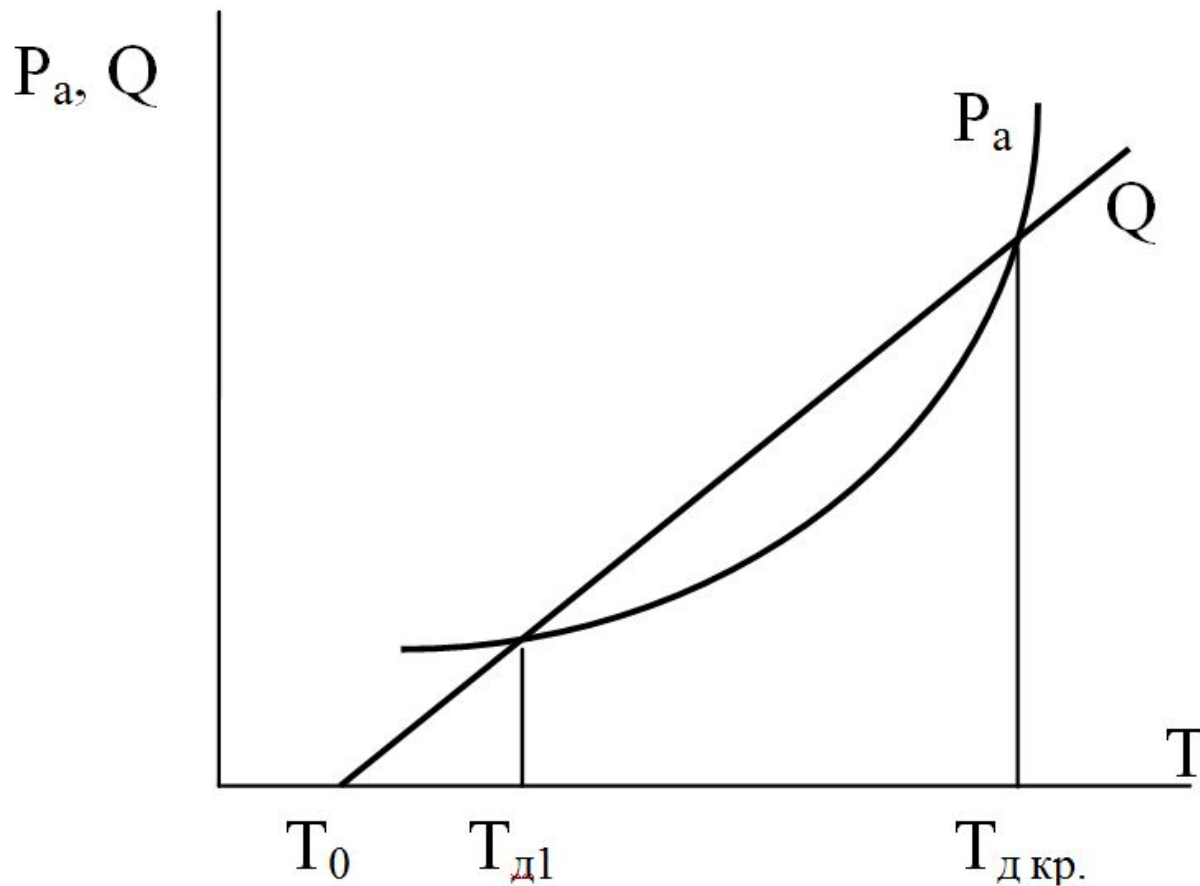


Электротепловой пробой. Наблюдается в твердых (или жидких) диэлектриках. Обусловлен нарушением теплового равновесия вследствие больших диэлектрических потерь и недостаточности теплоотдачи.

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

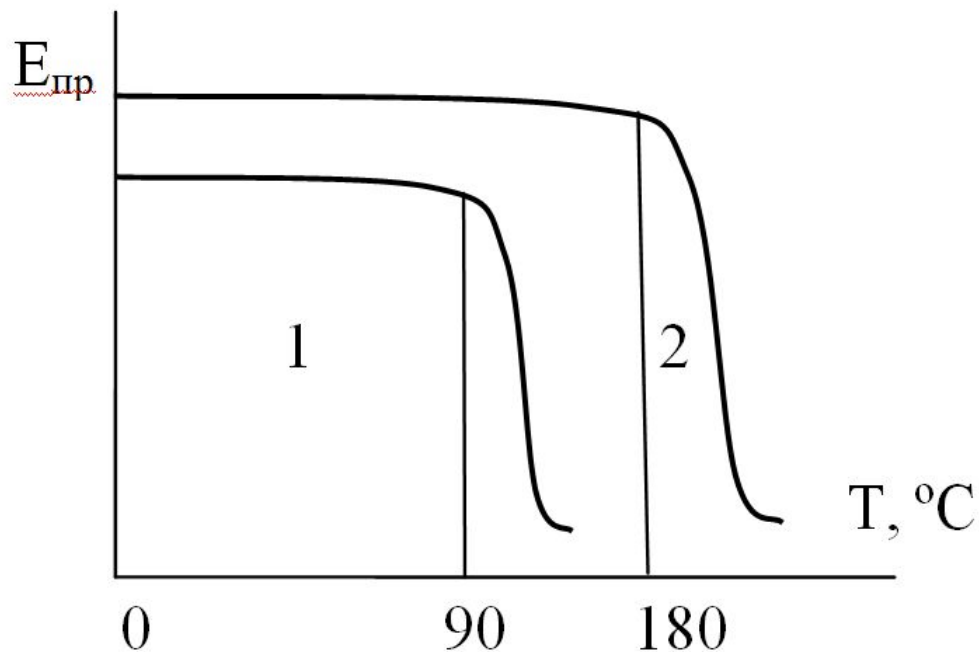
$$Q = \sigma \cdot S \cdot (T_{\partial} - T_0) \text{ — теплоотвод (теплоотдача)}$$

# 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<sup>ая</sup> — зависимость принадлежит органическому диэлектрику (класс нагревостойкости У —  $90^\circ\text{C}$ );

2<sup>ая</sup> — неорганическому диэлектрику (класс нагревостойкости С  $\geq 180^\circ\text{C}$ )

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!

