ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Часть 3. Диэлектрики

Доцент кафедры АТПП
Прахова Марина Юрьевна

Диэлектрик – вещество, основным свойством которого является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Поляризация – состояние вещества, при котором электрический момент некоторого его объема имеет ненулевое значение.

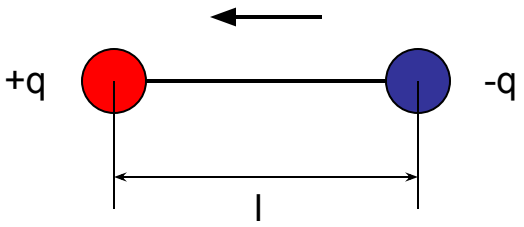
Поляризация – процесс смещения и упорядочения зарядов в диэлектрике под действием электрического поля.

Диэлектрики — **Пространственное расположение положительного и отрицательного зарядов в молекуле**

Неполярные (условные суммарные положительные и отрицательные заряды совпадают в пространстве)

Полярные (условные суммарные положительные и отрицательные заряды не совпадают в пространстве и даже при отсутствии внешнего поля молекула имеет постоянный электрический момент) → наличие диполей

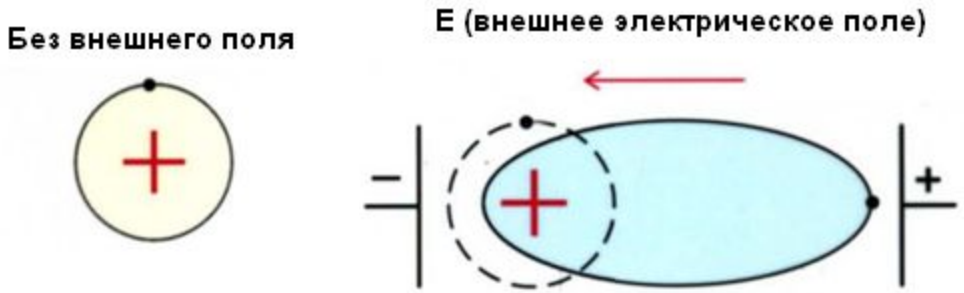
$P_П = q*l$



l – плечо диполя

$P_П$ – **дипольный (индуцированный, или наведенный) момент** (векторная величина, направлена от «–» к «+»)

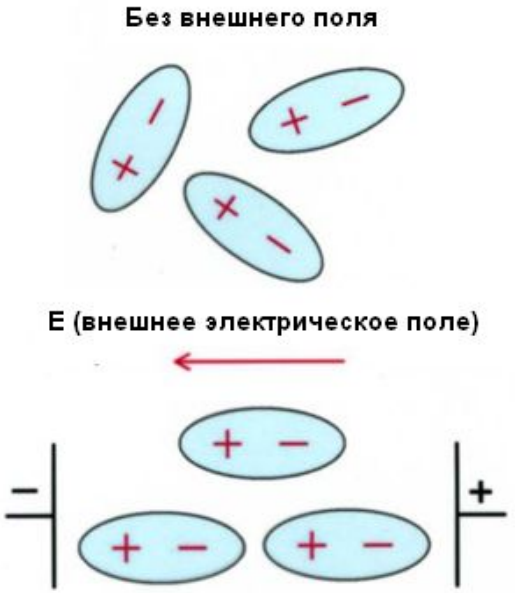
Неполярные диэлектрики



Молекулы, имеющие симметричное строение и центр симметрии:

- **Одноатомные молекулы инертных газов (He, Ne и др.);**
- **Молекулы из 2 одинаковых атомов (H_2, N_2, Cl_2 и др.);**
- **Углеводороды и электроизоляционные материалы УГВ-состава (масла, полиэтилен, полипропилен и др.)**

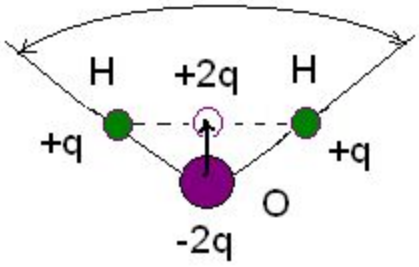
Полярные диэлектрики



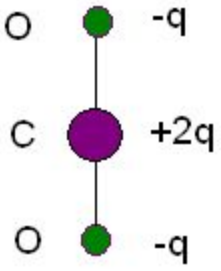
Углеводороды, в которых часть атомов H замещена другими

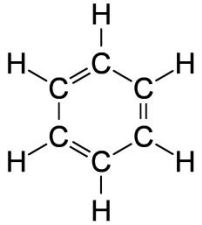
Пространственное расположение зарядов

H_2O

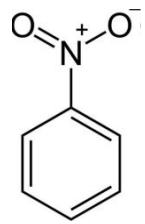


CO_2





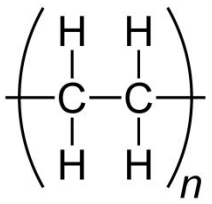
Бензол



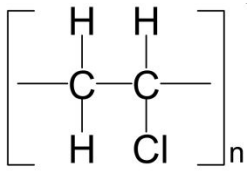
Нитробензол

Полимерные материалы → полярность отдельных звеньев полимолекулы

Ионные кристаллы → неполярны, хотя отдельная молекула является диполем (в кристалле они уложены антипараллельно, а переориентация невозможна из-за кристаллической решетки)



Полиэтилен



Поливинилхлорид

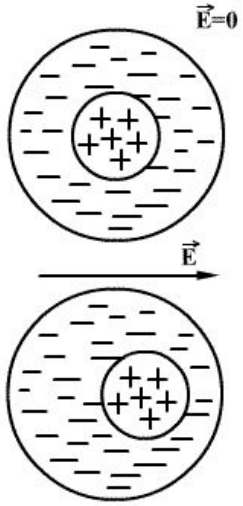
ВИДЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ

- **упругая** поляризация, протекающая практически мгновенно под действием электрического поля, не сопровождающаяся рассеянием (потерями) энергии в диэлектрике (выделением теплоты);

- **релаксационная** поляризация, нарастающая и убывающая в течение некоторого промежутка времени и сопровождающаяся рассеянием энергии в диэлектрике, т.е. его нагреванием.

Электронная поляризация

Это процесс смещения электронных орбит относительно положительного заряженного ядра. При этом образуются **упругие диполи** - пары связанных друг с другом электрических зарядов (смещенные электроны и положительные заряды ядер атомов). Устанавливается мгновенно (10^{-15} с). Проявляется при всех частотах. Исчезает, если с диэлектрика снято напряжение.



Происходит во всех атомах любого вещества, независимо от наличия в них других видов поляризации.

Степень поляризации пропорциональна размеру атомов ↔ становится слабее связь внешних электронов с ядром и возрастает заряд ядра

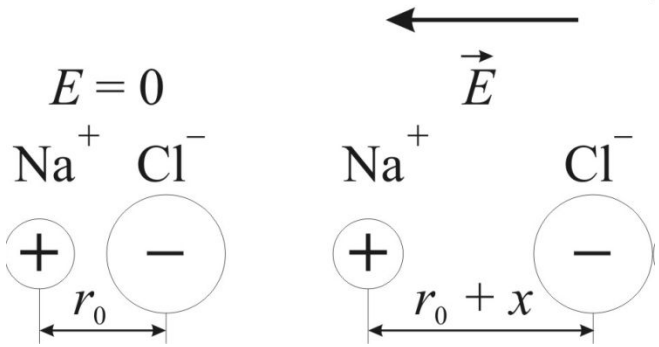
Ионная поляризация

Это смещение относительно друг друга разноименно заряженных ионов в твердых веществах с ионными связями, т.е. для кристаллических диэлектриков (например, NaCl).

Под действием электрического поля разноименные заряженные ионы смещаются в противоположных направлениях → появляется плечо диполя *X* → возникает момент поляризации $P_и = q*x$

Время установления $10^{-13} – 10^{-14}$ с

Степень поляризации пропорциональна валентности ионов



Дипольная поляризация

Характерна для полярных диэлектриков (жидкостей, аморфных вязких веществ). Заключается в повороте (ориентации) в направлении поля молекул, имеющих постоянный электрический момент

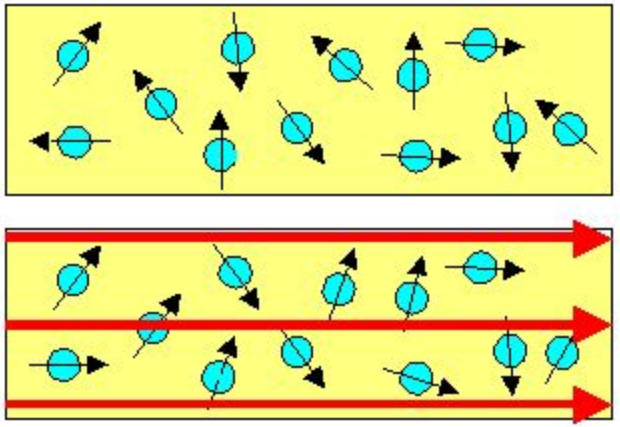
Непосредственный поворот молекул не совершается, внешнее поле вносит **упорядоченность** в положения полярных молекул

Время установления $10^{-6} – 10^{-10}$ с

С течением времени поляризованность убывает по закону

$$P_D(t) = P_{D_0} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

τ – время релаксации дипольной поляризации



Если период внешнего поля T < τ, диполи не успевают переориентироваться

Время релаксации – это промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных полем диполей после снятия поля уменьшается вследствие наличия теплового движения в 2,7 раза от первоначального значения

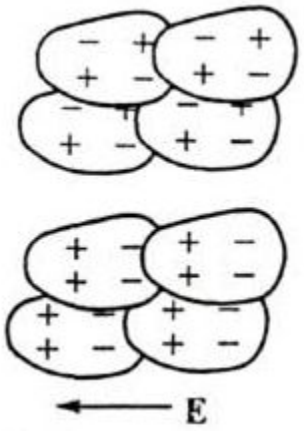
Влияние температуры: **T**↑ → силы молекулярного сопротивления повороту диполей↓→ **τ**↓

Миграционная поляризация

Характерна для диэлектриков с неоднородной структурой и примесями (полупроводящими включениями) и заключается в перемещении (миграции) зарядов в этих включениях до их границ и накоплении объемного заряда на границах раздела

Устанавливается и снимается длительное время (до нескольких часов) → проявляется только на низких частотах

Связана со значительным рассеянием электрической энергии



КЛАССИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПО МЕХАНИЗМАМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Неполярные диэлектрики

- Газы, жидкости и твердые вещества в аморфном состоянии, обладающие только электронной поляризацией
- Водород, бензол, парафин, сера, полиэтилен и др.

Полярные (дипольные) диэлектрики

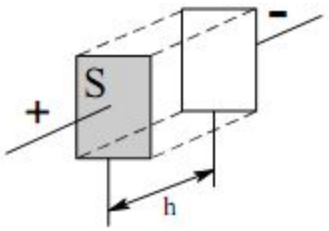
- Органические жидкие, полужидкие и твердые вещества, имеющие одновременно электронную и дипольную поляризацию
- Нитробензол, кремнийорганические соединения, эпоксидные компаунды и др.

Ионные соединения

- Твердые неорганические диэлектрики с ионной и электронной поляризацией
- Кварц, слюда, корунд, неорганические стекала, керамика и др.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОЛЯРИЗАЦИИ

Участок изоляции



Количественной оценкой величины поляризации диэлектрика является *поляризованность*:

$$P = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\sum_{i=1}^{N} M_i}{\Delta V} \quad [\text{Кл/м}^2]$$

M_i – электрический момент i-ой частицы в ΔV;
N – количество частиц в ΔV.
ΔV – элементарный объем диэлектрика.

σ – плотность зарядов на обкладках

M = σ*S*h; V = S*h

P = σ*S*h/(S*h) = σ

Поляризованность численно равна поверхностной плотности связанных зарядов, появившихся в результате поляризации диэлектрика

$P = \varepsilon_0 \chi E$ χ – ýëåêòðè÷åñêàÿ âîñïðèèì÷è âîñòü âåùåñòâà

$\varepsilon = 1 + \chi$ ε - îòíîñèòåëü íàÿ äèýëåêòðè÷åñêàÿ ïðîíèöàåìîñòü

Äëÿ ëþáîãî âåùåñòâà $\chi > 0;$ $\varepsilon > 1$

Äëÿ ãàçîâ ε áëèçêà ê 1 (íàïðèìåð, äëÿ âîçäóõà $\varepsilon = 1{,}00058$), æèäêîñòè è òâåðäûå âåùåñòâà äî 100

Значение ε определяет интенсивность процесса поляризации

$C = \varepsilon\varepsilon_0\Lambda$ Λ – ïðèâåäåííà ÿ äëèíà ó÷àñòêà èçîëÿöèè

$\Lambda = \frac{S}{h}$ – òåëî ñ ïîñòîÿííûì ïî âñåé äëèíå h ñå÷åíèåì S (ïðîâîä)

$\Lambda = \frac{2\pi l}{\ln(D/d)}$ – öèëèíäð ñ âíåøíèì è âíóòðåííèì äèàìåòðîì D, d è îñåâîé äëèíîé l

(èçîëÿöèÿ êîàêñèàëüí îãî êàáåëÿ)

$\varepsilon_à = \varepsilon_0\varepsilon$ - àáñîëþòíàÿ äèýëåêòðè÷ åñêàÿ ïðîíèöàåìîñòü

(óäåëüíàÿ åìêîñòü äèýëåêòðèêà)

$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon\Lambda U^2}{2}$ $\varepsilon = \frac{\tilde{N}_Ä}{\tilde{N}_0}$

ε – число, показывающее, во сколько раз возрастает емкость вакуумного конденсатора при его заполнении диэлектриком, т.е. **характеристика способности вещества накапливать электростатическую энергию**

Для отдельной молекулы $P_И = \alpha E$ (α – поляризуемость частицы) → $P = N*P_И = N*\alpha*E$ (N – количество молекул в единице объема) →

$$\varepsilon = 1 + \frac{\alpha N}{\varepsilon_0}$$

Диэлектрическая проницаемость газов

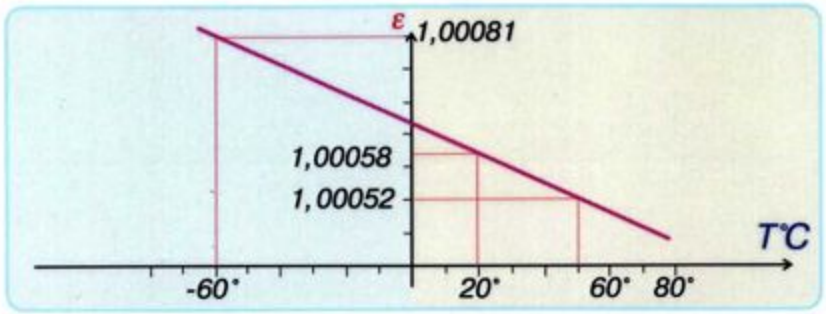
ε водорода = 1.00027

строение молекул

Неполярная молекула → Электронная поляризация

Полярная молекула → Дипольная поляризация

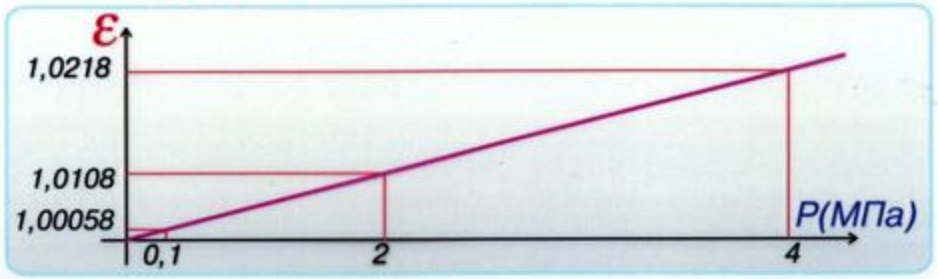
Зависимость $\varepsilon = f(T)$ для воздуха при постоянном давлении



Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости

$$TK_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dt}$$

Зависимость $\varepsilon = f(P)$ для воздуха при нормальной температуре



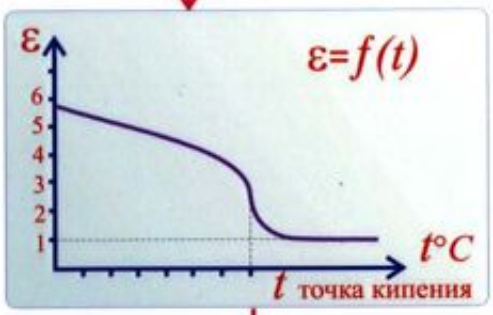
Диэлектрическая проницаемость жидкостей

$\varepsilon \gg 1$, т.к. плотность жидкости большая величина.

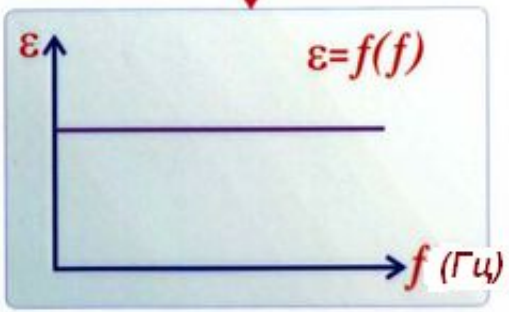
строение молекул

неполярные молекулы (трансформаторное масло)

$\varepsilon = 2{,}1 \div 2{,}5$



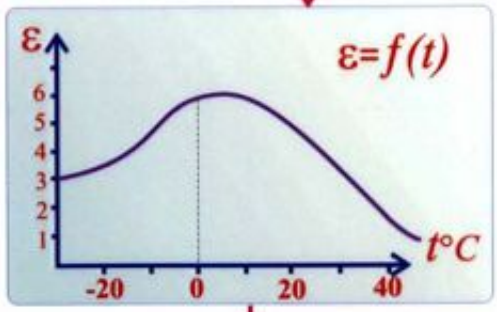
Поляризация – электронная



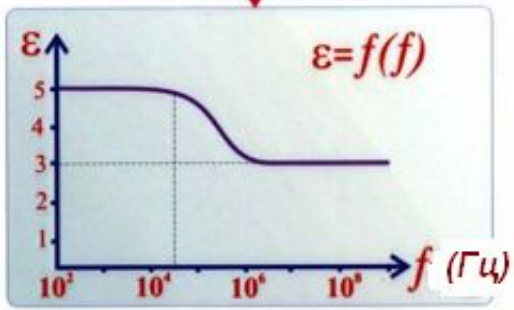
Эти диэлектрики применяются на всех частотах

полярные молекулы (совол)

$\varepsilon = 3{,}5 \div 5$



Поляризации – электронная и дипольная



Эти диэлектрики применяются на низких частотах

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

ε – имеет самые различные значения

В твёрдых диэлектриках возможны все виды поляризации

строение молекул

неполярные молекулы
$\varepsilon = 1{,}9 \div 6$
(полистирол, парафин, алмаз)

полярные молекулы
$\varepsilon = 4 \div 10$
(целлюлоза, полимеры)

строение молекул

ионные кристаллы с плотной упаковкой частиц $\varepsilon = 6 \div 150$
(кварц, слюда, корунд)

↓

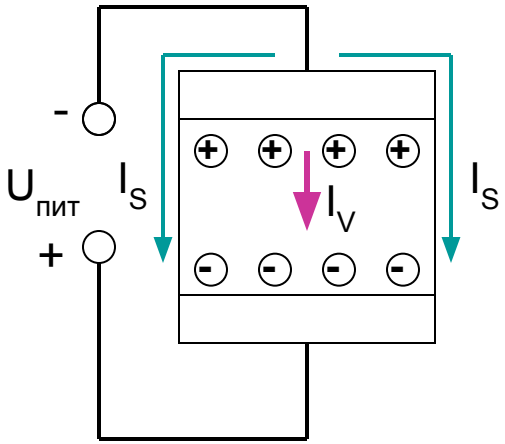
электронная и ионная поляризации

ионные кристаллы с неплотной упаковкой частиц $\varepsilon = 4 \div 10$
(электротехнический фарфор)

↓

электронная, ионная и ионно - релаксационная поляризации

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ



I_V – объемный сквозной ток
I_S – поверхностный сквозной ток

$$I = I_V + I_S$$

$$G = \frac{I}{U} = G_V + G_S = \frac{I_V}{U} + \frac{I_S}{U}$$

$$\frac{1}{G_V} = R_V;\ \frac{1}{G_S} = R_S$$

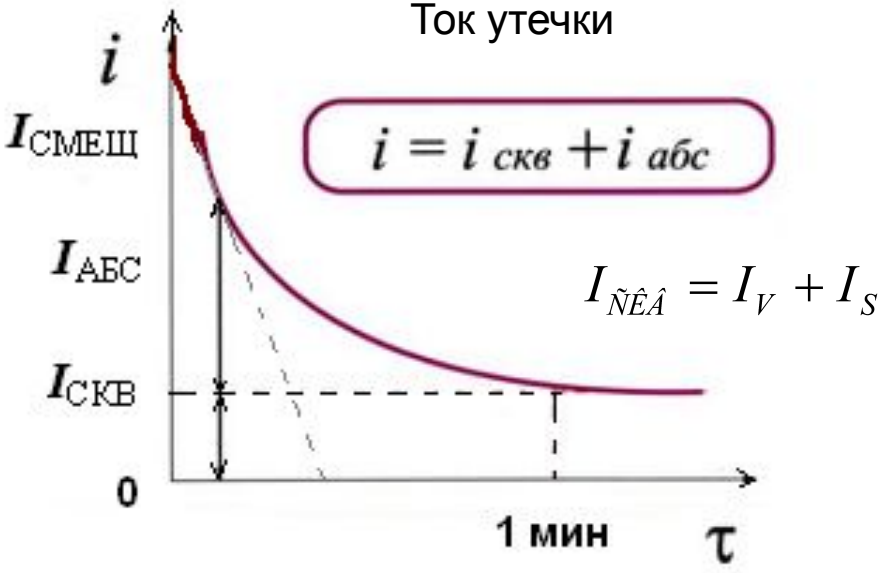
$$R = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S};\ \rho \Leftrightarrow \rho_V;$$

ρ_S – äîïîëíèòåë üíàÿ õàðàêòåðèñòèêà

Особенности

- Из-за большого удельного сопротивления объемный ток очень мал и сравним со сквозным
- После подачи постоянного напряжения ток со временем постепенно уменьшается

Ток утечки



Ток абсорбции – ловушечный ток (поглощение свободных носителей ловушками захвата)

При постоянном напряжении проходит только в периоды включения и выключения (меняя направление)

Характер проводимости – **ионный**. Носители заряда – ионы малых размеров (H^+, Na^+). Например, $\gamma_{NaCl} >> \gamma_{MgO}$

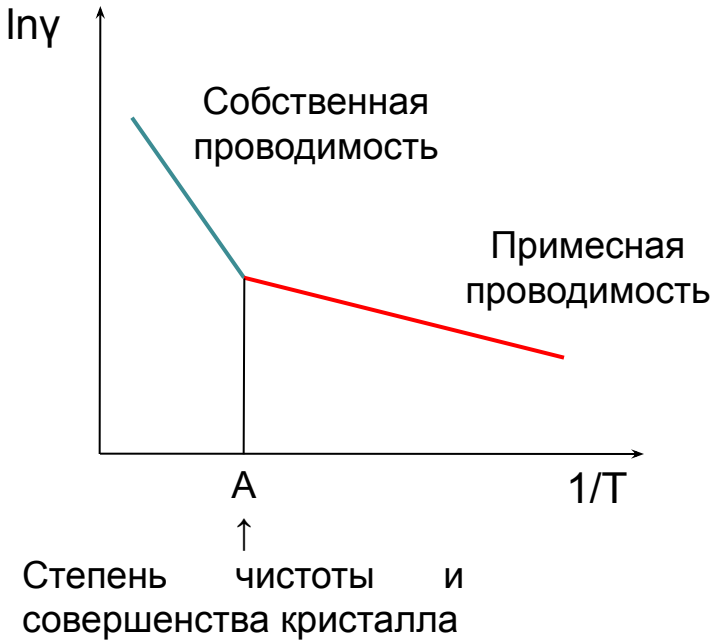
$\mu_{èîí} < \mu_{ýë}; n_{èîí} >> n_{ýë};$

$n_{èîí} * q * \mu_{èîí} >> n_{ýë} * \bar{e} * \mu_{ýë}$

$\gamma = n * q * \mu$

$\gamma_t = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$

Дрейф ионов происходит путем «перескока» с ловушки на ловушку, разделенные барьером W; вероятность перескока ~ $e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$



При увеличении концентрации примесей и дефектов т. А смещается влево.

Гидрофобные диэлектрики

- Неполярные диэлектрики, чистая поверхность которых не смачивается водой
- Поверхностные загрязнения мало сказываются на γ_S

Гидрофильные диэлектрики

- Полярные и ионные диэлектрики со смачиваемой поверхностью
- Максимальное увеличение γ_S – у частично растворимых в воде и объемно-пористых материалов
- Поверхностные загрязнения сказываются очень сильно

Особенности:

Ионная проводимость ↔ перенос вещества: «+» - ионы уходят к катоду, а «-» - ионы – к аноду ↔ **Электролиз**

Закон Фарадея $m = k*I*t$ (k – электрохимический эквивалент вещества)

$$k = \frac{1}{F} * \frac{A}{n}$$

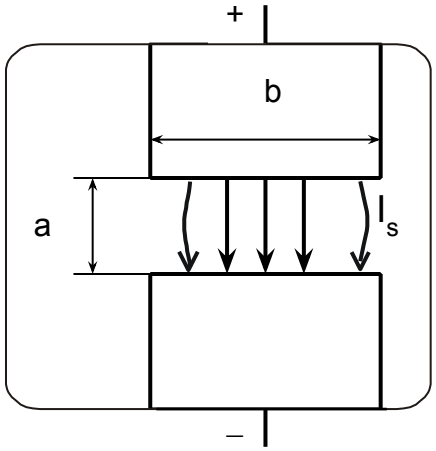
A – атомная масса; n – валентность; A/n – химический эквивалент

В **кристаллах** проводимость **неодинакова** по разным осям (например, у кристалла кварца $\rho = 10^{12}$ Ом*м вдоль главной (оптической) оси и $\rho > 2*10^{14}$ Ом*м перпендикулярно ей)

В **аморфных телах** проводимость **одинакова во всех направлениях** и зависит от состава материала и наличия примесей; для высокомолекулярных полимеров также зависит от степени полимеризации

Наличие **поверхностной** электропроводности

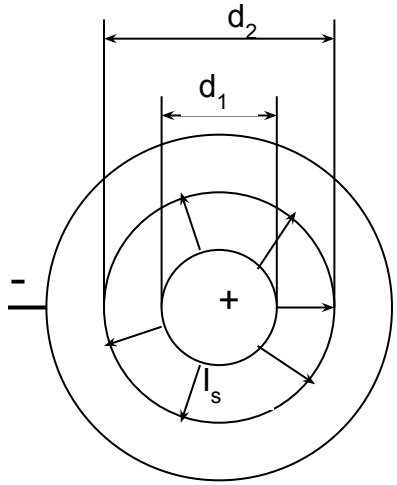
Поверхностная электропроводность



Поверхностное сопротивление участка поверхности твердого диэлектрика между 2 параллельными друг другу кромками электродов длиной ***b***, отстоящими друг от друга на расстояние ***a***

$$R_S = \rho_S * \frac{a}{b} \Rightarrow \rho_S = R_S * \frac{b}{a} \Rightarrow [\rho_S] = \text{Îì}$$

Удельное поверхностное сопротивление – это сопротивление квадрата любого размера на поверхности диэлектрика, ток через который идет от одной стороны до противоположной (при a = b ρ_S = R_S)



Характер зависимости ρ_s диэлектриков от различных факторов (температуры, влажности, величины приложенного напряжения) сходен с характером изменения ρ. Однако при изменениях влажности окружающей среды значения ρ_s изменяются быстрее, чем ρ.

Рост поверхностной проводимости для растворимых диэлектриков объясняется наличием на их поверхности ионов, а для пористых – влаги. Кроме того, ρ_s падает при загрязнении поверхности диэлектрика.

$$R_S = \frac{\rho_S}{2\pi} * \ln\frac{d_2}{d_1}$$

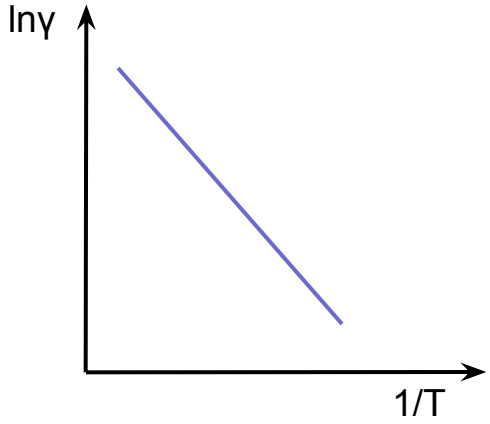
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Причина возникновения

- В неполярных диэлектриках – наличие диссоциированных примесей, в т.ч. влаги
- В полярных диэлектриках добавляется диссоциация молекул самой жидкости

Носители заряда → Ионы или крупные заряженные коллоидные частицы

Влияющие факторы → Температура → С увеличением Т степень диссоциации и концентрация ионов возрастают



$$n = n_0 * e^{-\frac{W_d}{kT}} \rightarrow \gamma = n * q * (\mu_+ + \mu_-) = A * e^{-\frac{\alpha}{T}}$$

$$\alpha = \frac{W_d}{k}$$

Полярные жидкости (дистиллированная вода, ацетон, этиловый спирт)		10^3 … 10^5
Слабо полярные (касторовое масло)	ρ, Ом*м	10^8 … 10^{10}
Неполярные (бензол, трансформаторное масло)		10^{10} … 10^{14}

Коллоидная система – это смесь двух веществ (фаз), причем 1 фаза в виде мелких частиц (капель, зерен, пылинок) равномерно взвешена в другой

Эмульсии (обе фазы жидкости)	Суспензии (твердые частицы в жидкости)	Аэрозоли (твердые и жидкие частицы в газе)

Среда, в которой находятся мелкие частицы, - **дисперсная** (внешняя) **среда (ДС)**
Сами частицы – **дисперсная** (внутренняя) **фаза** (ДФ)

Молион – частица ДФ, имеющая на поверхности электрический заряд → проводимость в коллоидных системах называется **молионной**

Электрофорез → движение молионов во внешнем поле (новые вещества не образуются, меняется относительная концентрация ДФ в различных частях объема ДС

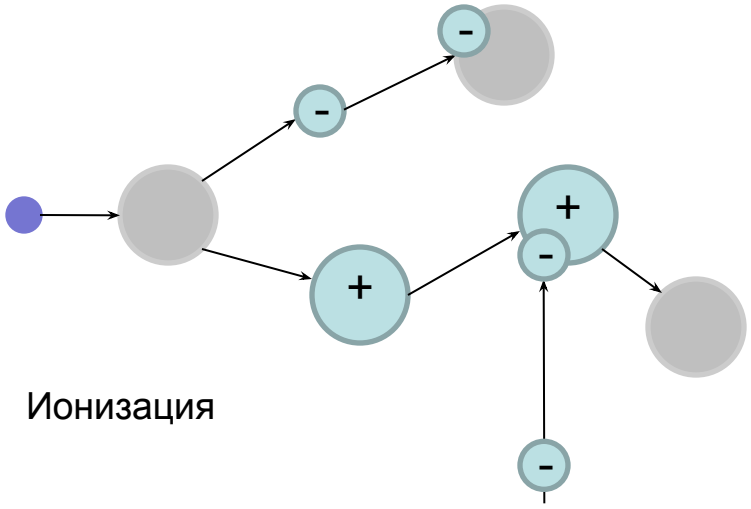
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

Причина возникновения → Ионизация нейтральных молекул ↔ Действие внешних факторов (рентгеновское, ультрафиолетовое, радиоактивное излучение, сильный нагрев)

Ионизация нейтральных молекул ↕ Соударения заряженных частиц самого газа с молекулами (ударная ионизация)

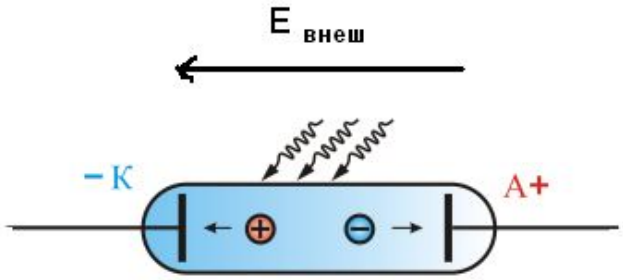
Соударения заряженных частиц самого газа с молекулами (ударная ионизация) → **Самостоятельная** электропроводность

Действие внешних факторов (рентгеновское, ультрафиолетовое, радиоактивное излучение, сильный нагрев) → **Несамостоятельная** электропроводность → Исчезает после исчезновения внешнего фактора



Ионизация

Рекомбинация



$$v_+ = \mu_+ * E;\ v_- = \mu_- * E$$

N_+ – êîëè÷åñòâî ïîëîæèòåëü íûõ èîíîâ â 1 ì ^{3}

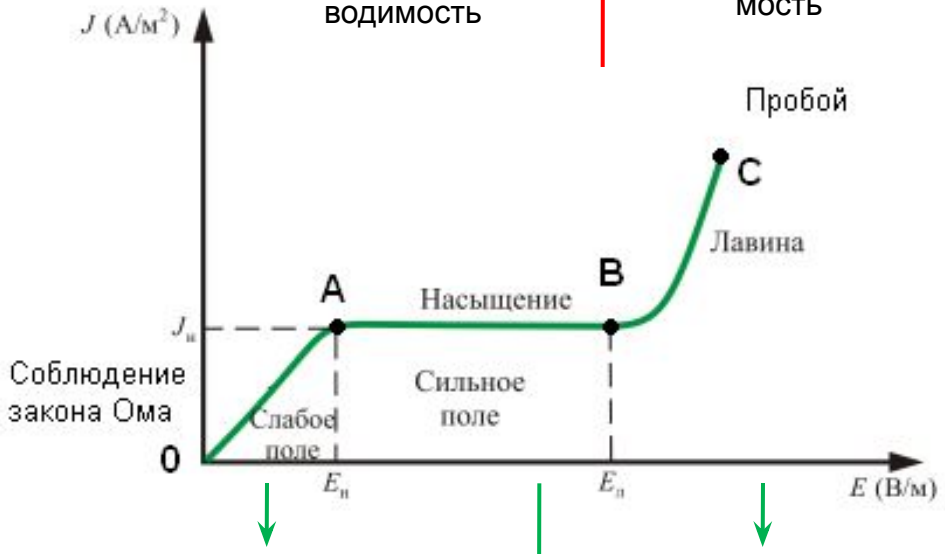
N_- – êîëè÷åñòâî îòðèöàòåëü íûõ èîíîâ â 1 ì ^{3}

N_p – êîëè÷åñòâî èîíîâ, ðåêîìáèíèð óþùèõ çà 1 ñåê

$N_p = \alpha * N_+ * N_-$ (α – êîýôôèöèåíò ðåêîìáèíàöèè)

Несамостоятельная электропроводимость

Самостоятельная электропроводимость



$$N_= = N_- = N;\ N_p = \alpha * N^2 \Rightarrow N = \sqrt{\frac{N_p}{\alpha}}$$

$$J = N * q * (v_+ + v_-) = q * \sqrt{\frac{N_p}{\alpha}} * (\mu_+ + \mu_-);$$

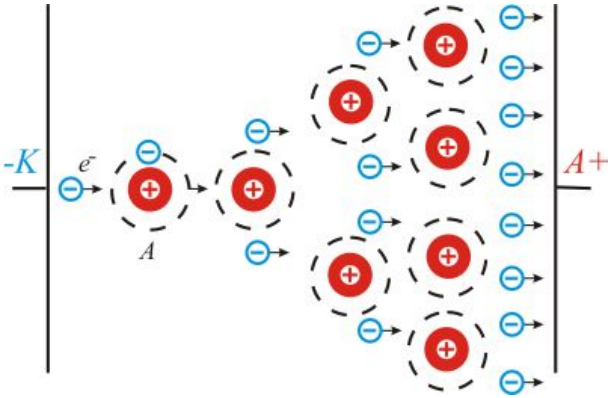
$$J = \gamma * E \Rightarrow$$

$$\gamma = q * \sqrt{\frac{N_p}{\alpha}} * (\mu_+ + \mu_-)$$

Создаваемые ионы частично рекомбинируют, частично нейтрализуются на электродах

Все ионы разряжаются на электродах без рекомбинации

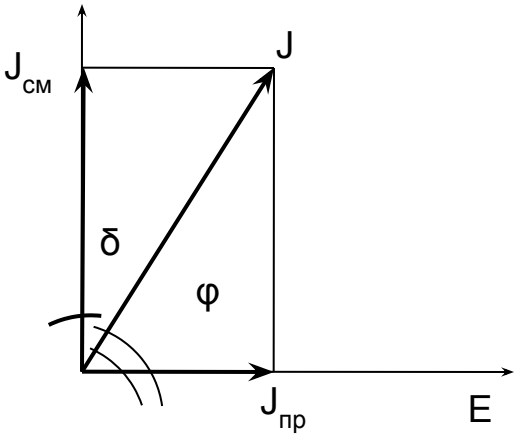
Возникновение ударной ионизации



$E_н$ = 0,6 В/м;
$E_и = 10^5 \ldots 10^6$ В/м
(10 мм)

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

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



Синусоидальное поле с напряжением E и частотой ω

$$J_{ñì} = j\omega\varepsilon\varepsilon_0 E$$

$$J_{ïð} = \gamma_a E$$

Èäåàëüíûé äèýëåêòðèê : $\gamma_{à} = 0,\ J = J_{ñì} = j\omega\varepsilon\varepsilon_0 E$

Ðåàëüíûé äèýëåêòðèê : $\gamma_{à} \neq 0 \Rightarrow \delta = 90^0 - \varphi$

Угол **δ** между векторами плотностей переменного тока диэлектрика J и тока смещения $J_{см}$ на комплексной плоскости → **угол диэлектрических потерь** (характеризует степень отличия реального электрика от идеального)

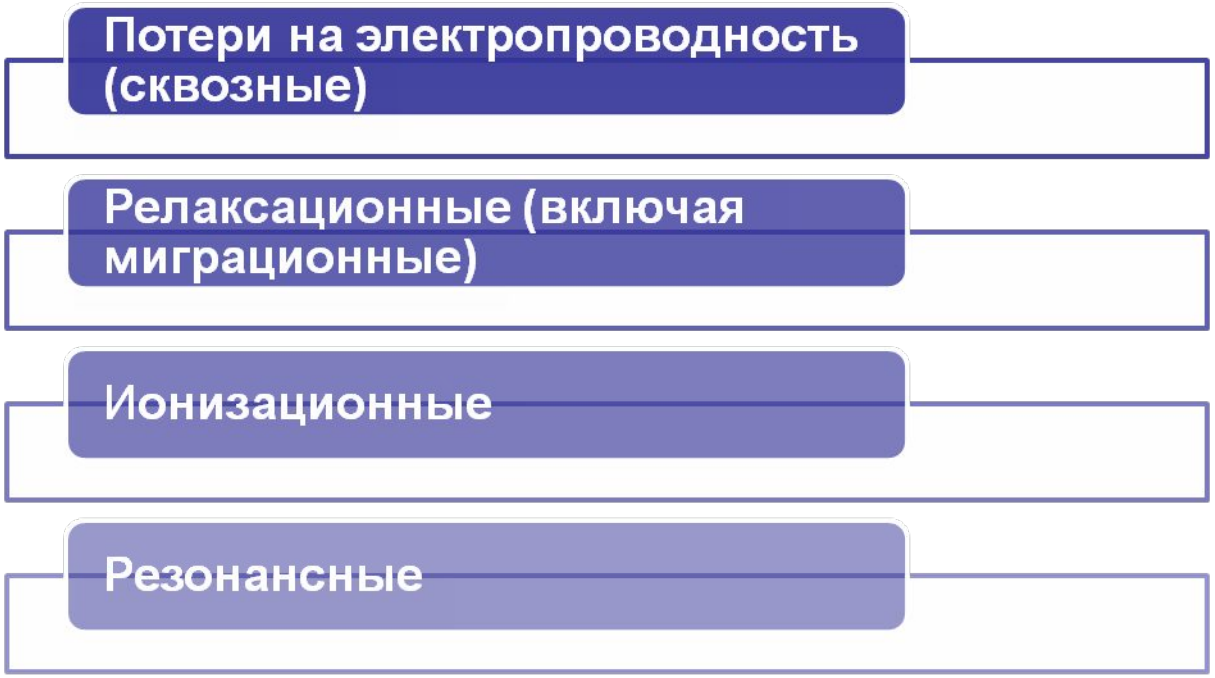
Мощность, рассеиваемая в единице объема вещества, характеризует **удельные** диэлектрические потери:

$$Ð_{óä} = \gamma_{à} Å^2 = \omega\varepsilon_0\varepsilon * \underline{tg\delta} * E^2 \quad [Âò / ì^3]$$

tgδ – основной параметр оценки качества диэлектрика. Он не зависит от формы и размеров участка изоляции и определяется только материалом

Коэффициент диэлектрических потерь **ε” = ε*tgδ**

Виды диэлектрических потерь

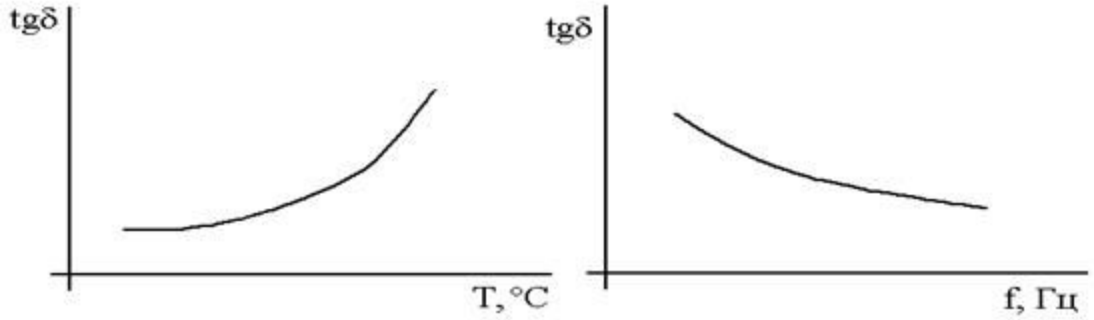


Потери на электропроводность

- Создаются сквозным током в хорошо проводящих диэлектриках ($P_{скв} = \gamma E^2$)
- Практически не зависят от частоты, но их влияние больше на низких частотах (50 – 1000 Гц) из-за уменьшения с частотой tgδ
- С ростом температуры возрастают по экспоненциальному закону

- Единственный вид потерь в однородном неполярном диэлектрике

Зависимости tgδ от температуры и частоты приложенного напряжения для неполярных диэлектриков



Релаксационные потери

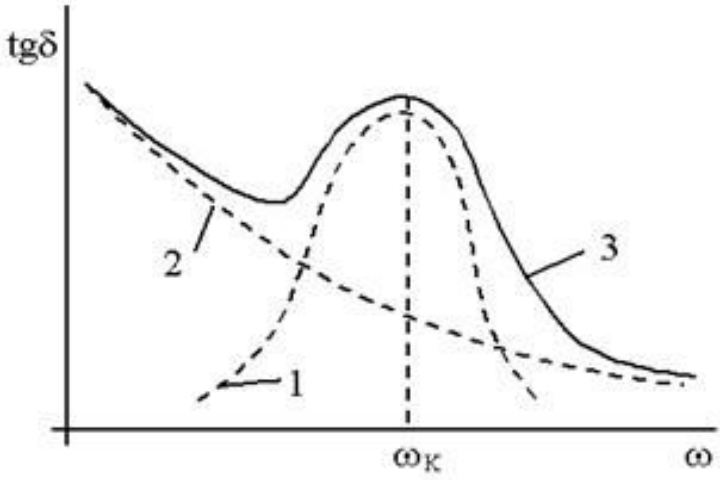
- Обусловлены активными составляющими поляризационных токов
- Характерны для диэлектриков с замедленными видами поляризации (дипольной и миграционной), преимущественно жидких ($\tau \sim 10^{-6} \ldots 10^{-11}$ с)
- Проявляются в области высоких частот (радиочастот), когда поляризация отстает от изменения поля

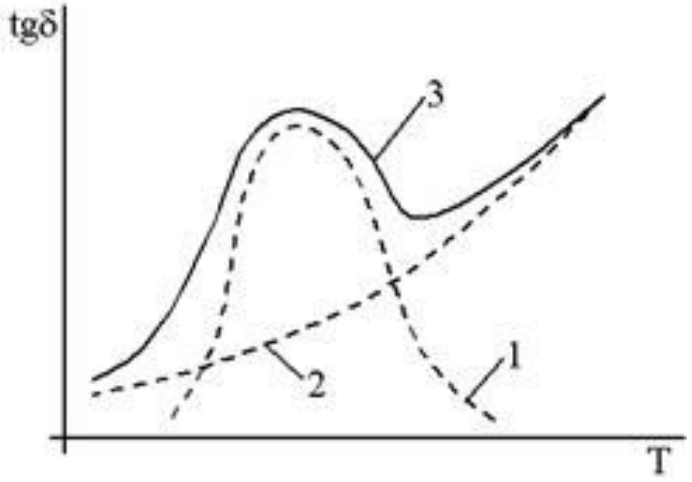
- Величина потерь зависит от соотношения времени установления поляризации τ и периода изменения электрического поля T = 1/f:
  - τ << T - энергия на поляризацию не затрачивается
  - τ ~ T - часть энергии уходит на поляризацию
  - τ >> T - поляризация вообще не успевает произойти

- Диэлектрические потери максимальны при τ ~ 1/ω; частота ω_p = 1/τ → частота релаксации

- С увеличением температуры ω_p возрастает по зависимости $\omega_\delta = \frac{1}{\tau_0} * e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$

Зависимость tgδ полярного диэлектрика от частоты и температуры





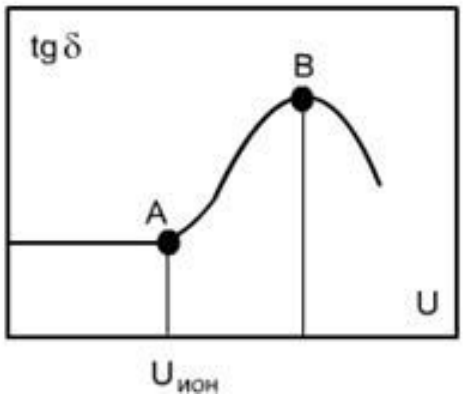
1 – потери за счет дипольной поляризации; 2 – потери за счет сквозной проводимости; 3 – суммарные потери

Резонансные потери

- Проявляются в оптическом диапазоне (10^{14} … 10^{17} Гц) в некоторых газах
- Выражаются в интенсивном поглощении светового излучения веществом
- Резонансная частота очень стабильна, не зависит от температуры → спектральные линии служат эталонами

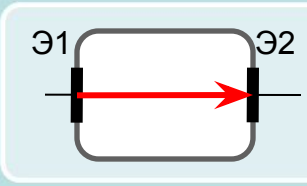
Ионизационные потери

Представляют собой потери на частичные разряды и наблюдаются в пористых диэлектриках с газовыми включениями при повышении напряжения сверх порога ионизации $U_{ион}$

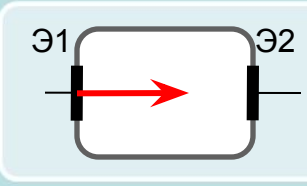


ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

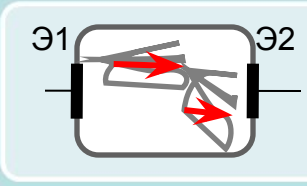
Пробой - явление образования проводящего канала в диэлектрике под действием электрического поля и потеря электроизоляционных свойств



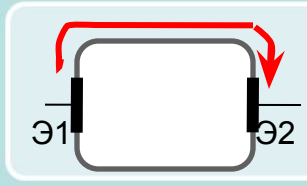
Полный (проводящий канал замыкает электроды между собой)



Неполный (проводящий канал не достигает одного из электродов)



Частичный (пробивается только газовое или жидкое включение твердого диэлектрика)



Поверхностный (проводящий канал образуется по поверхности твердого диэлектрика)

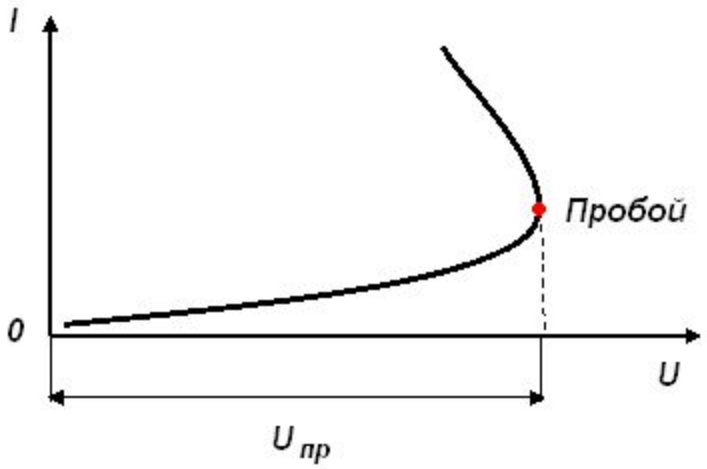
Характеристики пробоя

$U_{пр}$ – напряжение пробоя, [кВ]

$E_{пр}$ = $U_{пр}/h$ – электрическая прочность (напряженность электрического поля, при которой происходит пробой), [кВ/м]

h – толщина диэлектрика (для случая однородного поля), [м]

Вольт-амперная характеристика участка изоляции



Коэффициент запаса электрической прочности $\hat{E} = \frac{U_{ïð}}{U_{íîì}}$

Коэффициент импульса $\hat{E}_{È} = \frac{U_{ïð}^{èïï}}{U_{ïð}^{ñòàò}} > 1$

Момент пробоя:

↓

Ток резко возрастает ($dI/dU \rightarrow \infty$)

↓

В месте пробоя возникает искра или дуга, т.е. плазменный канал с высокой проводимостью

↓

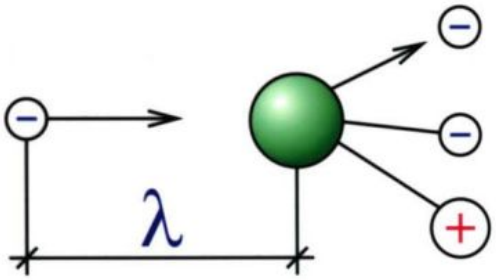
Напряжение падает, несмотря на возрастание тока

После снятия напряжения

→ В **газовых** и **жидких** диэлектриках пробитый участок восстанавливает первоначальные свойства

→ В **твердых** диэлектриках остается след в виде пробитого отверстия неправильной формы; при вторичной подаче напряжения пробой происходит в том же месте при гораздо меньшем напряжении

Пробой газов



Расщепление нейтральной молекулы (ударная ионизация)

Причина – **ударная ионизация** $W = \bar{e}*\lambda*E \geq W_{и}$

Коэффициент ударной ионизации α → число ионизаций, производимых движущимся электроном на единицу длины пути.

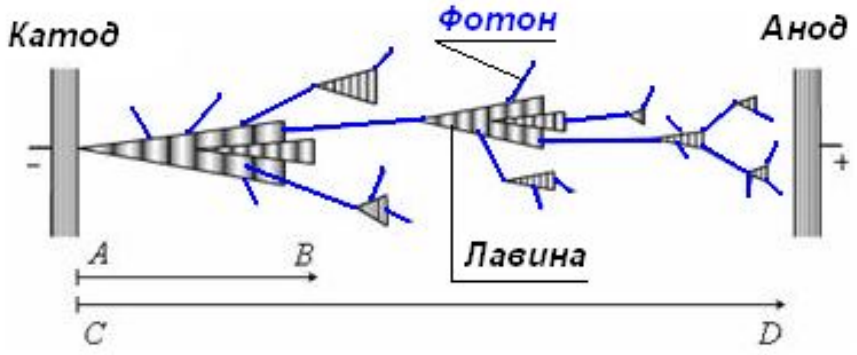
Количество электронов при движении от катода к аноду возрастает в $e^{\alpha h}$ раз (**h** – разрядный промежуток)

Механизмы пробоя

Лавинный → ударная ионизация электронов сопровождается вторичными процессами на катоде → заряды в газовом промежутке восполняются → образуется серия лавин → **пробой**

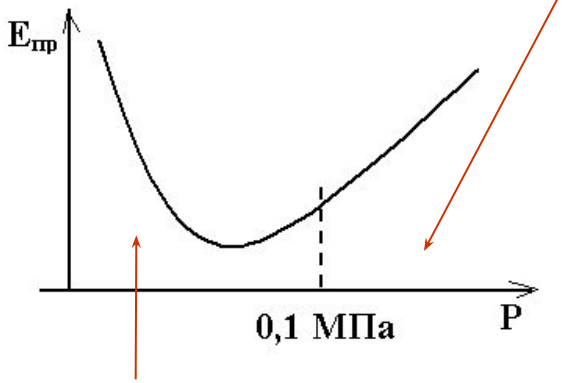
Лавинно-стримерный → фотоионизация под действием поля пространственного заряда лавины → возникновение положительных и отрицательных стримеров (скоплений ионизированных частиц с высокой степенью ионизации) → **пробой**

AB – распространение лавины
CD – распространение стримера



Зависимость электрической прочности от давления

Уменьшение длины свободного пробега электрона → увеличение $E_{пр}$

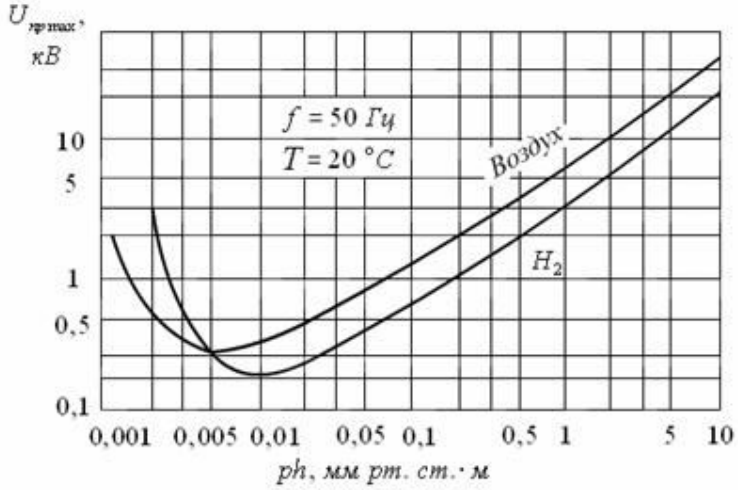


Уменьшение вероятности столкновения электрона с молекулами газа → увеличение $E_{пр}$

Зависимость электрической прочности от расстояния между электродами

Уменьшение вероятности столкновения электрона с молекулами газа → увеличение $E_{пр}$

Закон Пашена: если длина разрядного промежутка h и давление газа P изменяется так, что P*h = const, то $U_{пр}$ не меняется, $U_{пр} = f(P*h)$



Физический смысл: одинаковые частицы в газовых промежутках получают на одном и том же длине пути λ одинаковую энергию от поля

Эффективность ударной ионизации

Среднее число столкновений электронов на единицу длины пути → *Влияет при малых P*h*

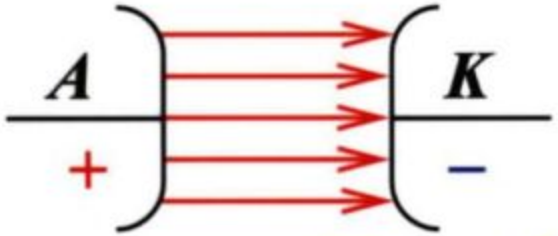
Вероятность того, что столкновение закончится ионизацией → *Влияет при больших P*h*

Пробой газа в однородном электрическом поле

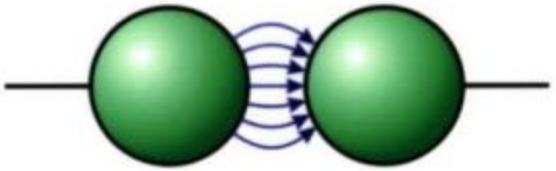
В однородном поле E – величина постоянная

Однородное поле можно получить:

1) между плоскими электродами с закругленными краями;



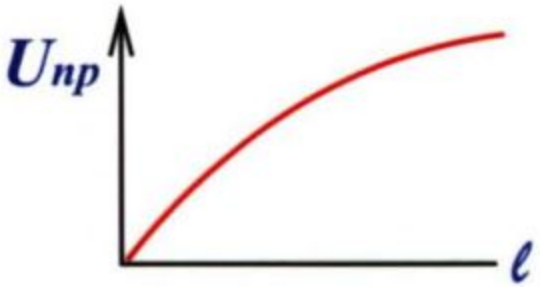
2) между шарами большого диаметра при малом расстоянии между ними.

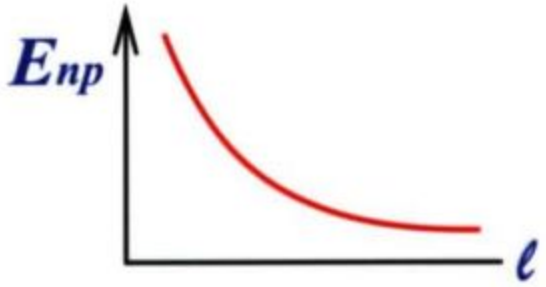


Зависимость $U_{пр}=f(\ell)$

ℓ ***– расстояние между электродами***

Зависимость $E_{пр}=f(\ell)$

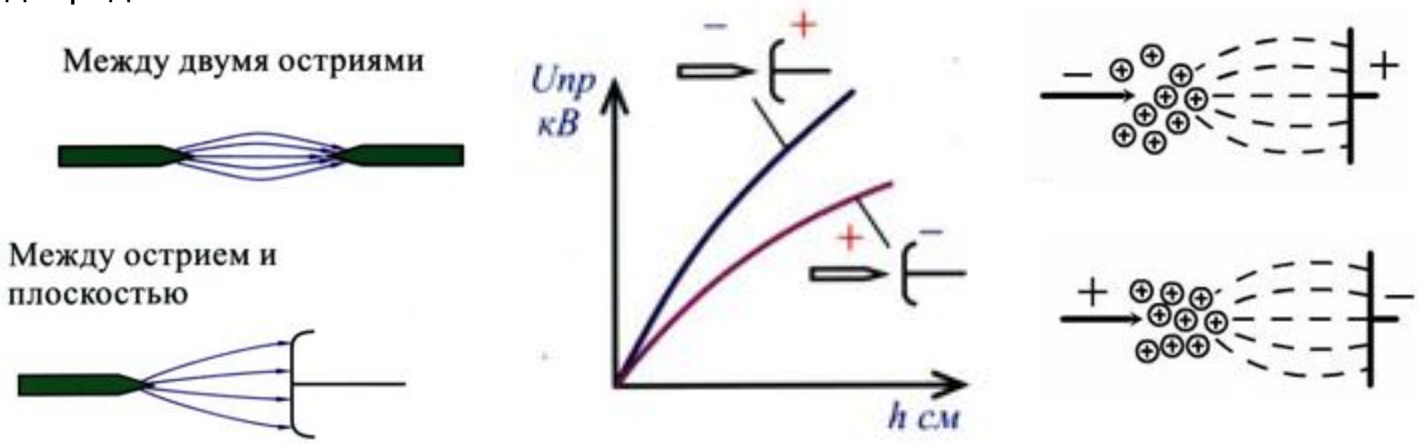




Особенность пробоя при однородном поле – возникновение искры, которая может перейти в дугу.

Пробой газа в неоднородном электрическом поле

Неоднородное поле возникает



Особенность пробоя газа в неоднородном поле - возникновение частичного разряда в виде короны в местах, где напряженность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения.

В случае несимметричных электродов игла – плоскость и **положительной полярности на игле** пробой происходит при **меньшем** напряжении, чем при обратной полярности. Ионизация газа при любой полярности на электродах происходит в районе иглы, где существуют наибольшие напряженности электрического поля. В результате ионизации образуются электроны и ионы, причем электроны быстро нейтрализуются на аноде, а вблизи иглы остаются малоподвижные положительно заряженные ионы. «Облако» объемного заряда изменяет первоначальное распределение потенциала. При положительной полярности на игле объемный заряд ослабляет напряженность поля вблизи иглы и, наоборот, усиливает ее в неионизированной области. Создаются благоприятные условия для дальнейшей ионизации газа, т. е. дальнейшего прорастания объемного заряда в направлении к катоду. В рассматриваемом случае объемный заряд фактически является продолжением иглы и сокращает эффективную длину разрядного промежутка.

При **отрицательной полярности на игле** облако положительного заряда уменьшает напряженность поля в неионизированной области. Поэтому дальнейшая ионизация газа возможна лишь при более **высоком** напряжении на электродах. Таким образом, в данном случае объемный положительный заряд играет роль экрана, сглаживающего максимальные неоднородности поля в разрядном промежутке.

Пробой жидкостей

Механизм пробоя, значение электрической прочности ↔ чистота жидкости

Суперчистые

Причины пробоя: ударная ионизация электронами и холодная эмиссия с катода

Электрическая прочность ~ 100 МВ/м (электроны движутся в плотной среде, длина свободного пробега меньше)

Загрязненные

Причины пробоя: образование проводящих мостиков из пузырьков газа, твердых частиц, капелек влаги

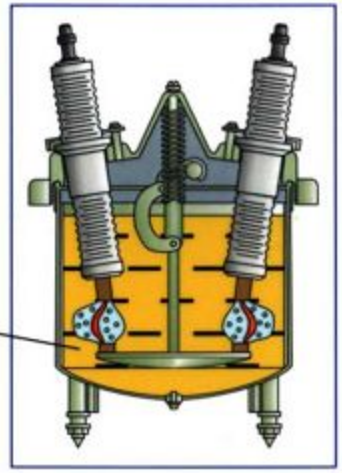
Примеси в виде органических волокон: если мостик соприкасается с одним из электродов, то он служит его игловидным продолжением → межэлектродное расстояние ↓ → электрическая прочность ↓

Примеси в виде капелек влаги: если влага находится в виде эмульсии, прочность ↓ гораздо сильнее, чем если в растворенном состоянии

Электрическая прочность зависит от времени воздействия напряжения ↔ если диэлектрик ***протекает*** между электродами, его прочность ***выше***, чем у неподвижного

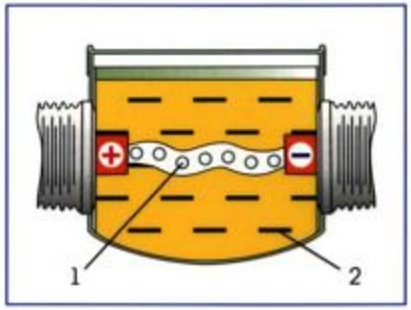
Зависимость механизма пробоя от вида примеси

I. Для максимально очищенных от примесей жидкостей.
Причина – вырывание электронов из электродов: электроны производят ударную ионизацию.



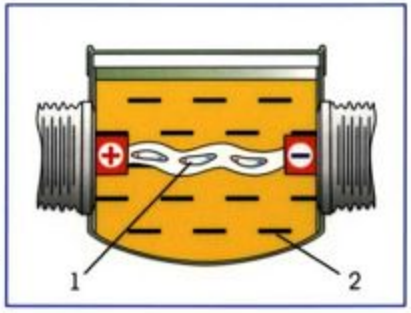
Масляный баковый выключатель

II. Для жидкостей с пузырьками газа.
Газ в пузырьках ионизируется, образуется газовый канал.



1 – пузырьки газов;
2 – трансформаторное масло

III. Для жидкостей с водой.
Вода – полярное вещество. Вода поляризуется, создает цепочки с повышенной проводимостью.



1 – вода;
2 – трансформаторное масло

Пробой твердых диэлектриков

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ

Причина – ударная ионизация или разрыв связей между частицами диэлектрика непосредственно под действием электрического поля

$E_{ПР}$ = 100 – 1000 МВ/м; зависит от внутреннего строения диэлектрика (плотность упаковки атомов, прочность их связей и т.п.)

Внешние факторы (температура, форма и размеры образца) почти не влияют

Время пробоя – микросекунды и меньше

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ

Причина – химические процессы, происходящие в диэлектрике под действием электрического поля (электрохимическое старение)

Имеет существенное значение при повышенных температурах и высокой влажности воздуха

Для развития электрохимического пробоя требуется длительное время

ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ

Причина – нарушение теплового равновесия диэлектрика вследствие диэлектрических потерь

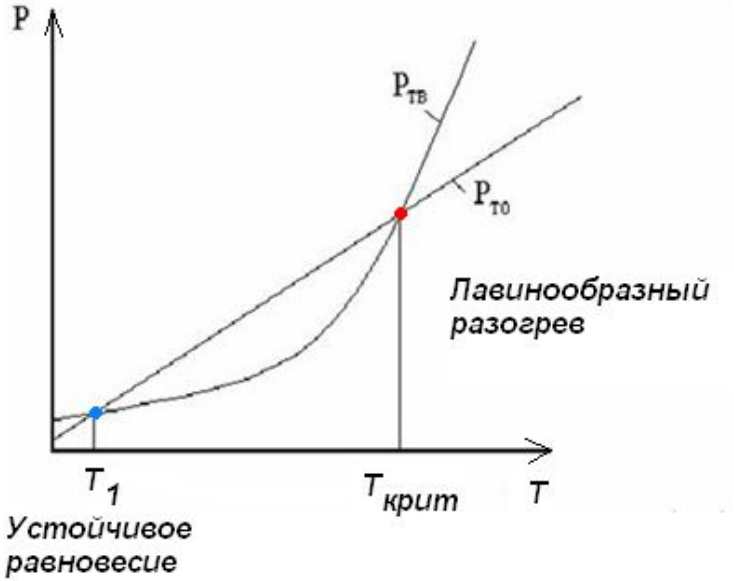
Мощность, выделяемая в образце $P_В = U^2*\omega*C*tg\delta$
Мощность, отводимая от образца $P_О = k*S*(T-T_0)$
(k – коэффициент теплоотдачи; S – площадь теплоотвода; T, T_0 – температуры образца и окружающей среды)

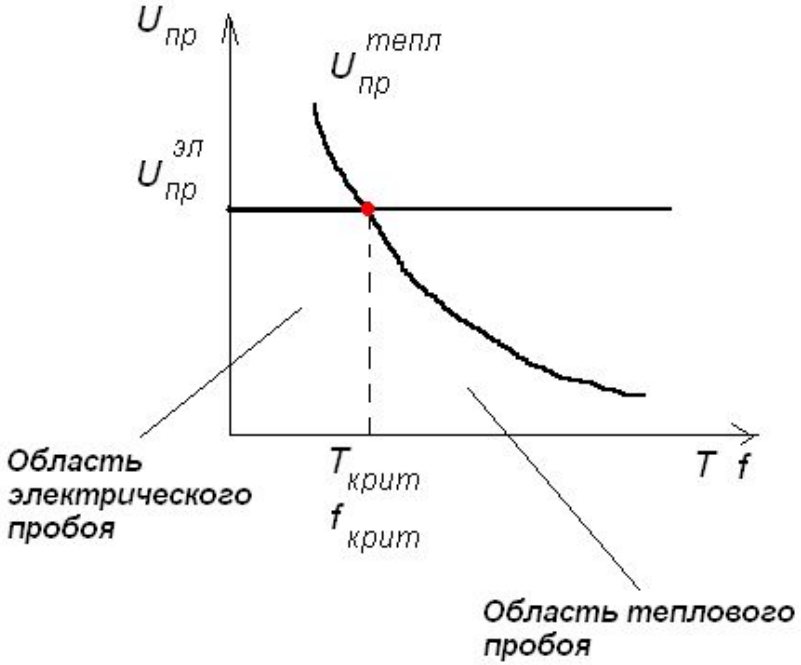
Условие теплового равновесия $P_В = P_О$

T ↑ → tgδ ↑ → $P_В > P_О$ (при $T_{критич}$) → диэлектрик лавинообразно разогревается → плавление, сгорание

$$U_{пр}^{тепл} = \sqrt{\frac{k*S*(T_{крит} - T_0)}{2\pi*f*C*tg\delta^{T_{крит}}}}; \quad U_{пр}^{тепл} = \frac{A}{\sqrt{f}}$$

Влияние внешних факторов: частота и температура (при их увеличении напряжение пробоя уменьшается)





ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПРОБОЙ

Причина - пробой газа или жидкости вблизи поверхности твердого диэлектрика
Значение поверхностного пробивного напряжения зависит от конфигурации электродов, габаритных размеров и формы твердого диэлектрика

ИОНИЗАЦИОННЫЙ ПРОБОЙ

Он характерен для твердых пористых диэлектриков и обусловлен ионизацией газа в порах. За счет ионизационных потерь разогревается поверхность закрытых пор, возникают локальные перепады температуры в диэлектрике и связанные с ними термомеханические напряжения