

ДИЭЛЕКТРИКИ

Раздел 3



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

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

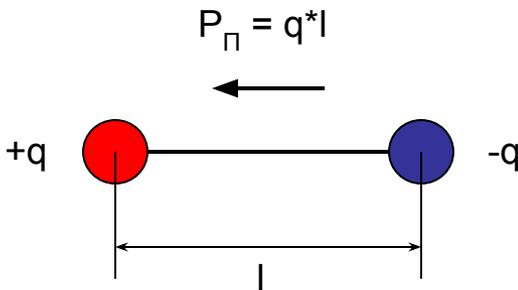
Поляризация – состояние вещества, при котором электрический момент некоторого его объема имеет ненулевое значение.

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)

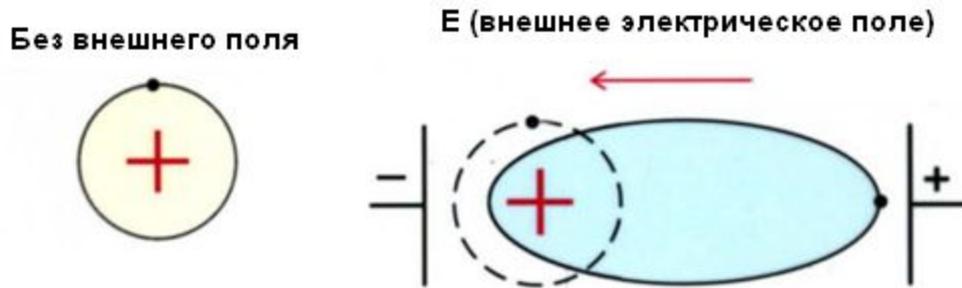
Полярные (условные суммарные положительные и отрицательные заряды не совпадают в пространстве и даже при отсутствии внешнего поля молекула имеет постоянный электрический момент) → наличие диполей



l – плечо диполя

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

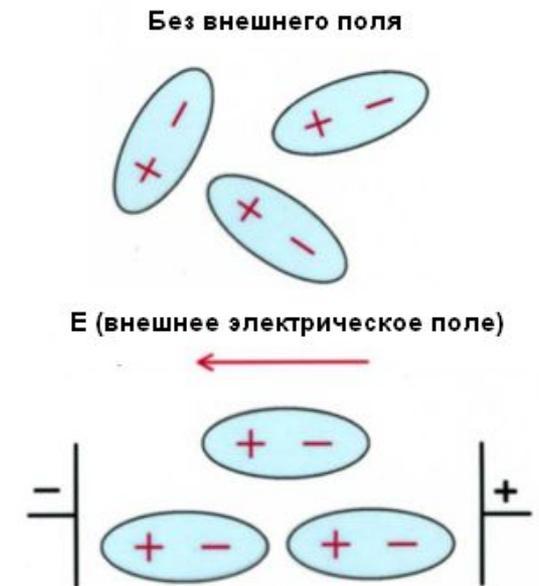
Неполярные диэлектрики



Молекулы, имеющие симметричное строение и центр симметрии:

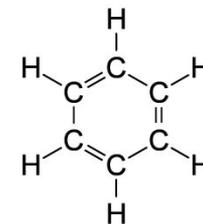
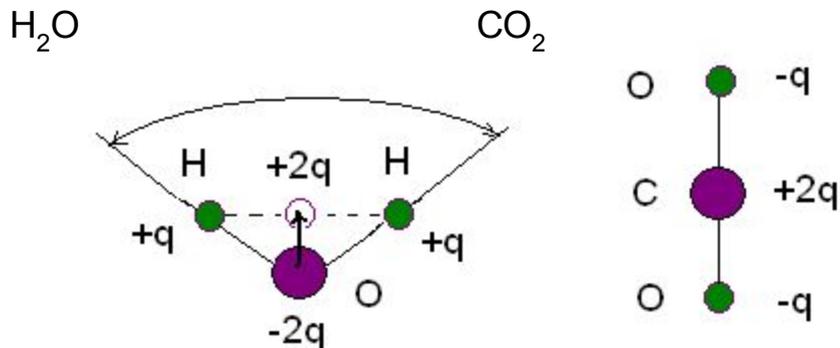
- ❑ Одноатомные молекулы инертных газов (He, Ne и др.);
- ❑ Молекулы из 2 одинаковых атомов (H_2 , N_2 , Cl_2 и др.);
- ❑ Углеводороды и электроизоляционные материалы УГВ-состава (масла, полиэтилен, полипропилен и др.)

Полярные диэлектрики

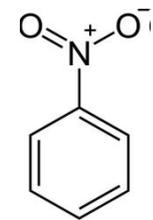


Углеводороды, в которых часть атомов H замещена другими

Пространственное расположение зарядов



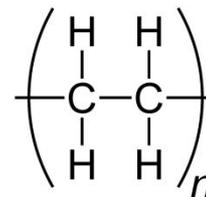
Бензол



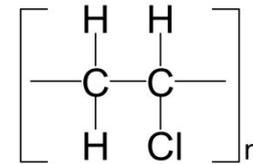
Нитробензол

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

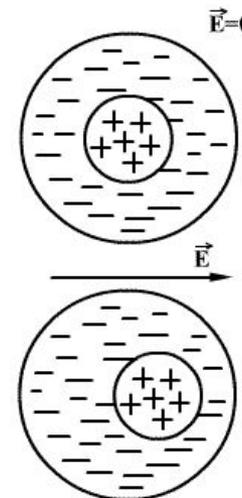
- **упругая** поляризация, протекающая практически мгновенно под действием электрического поля, не сопровождающаяся рассеянием (потерями) энергии в диэлектрике (выделением теплоты);
- **релаксационная** поляризация, нарастающая и убывающая в течение некоторого промежутка времени и сопровождающаяся рассеянием 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



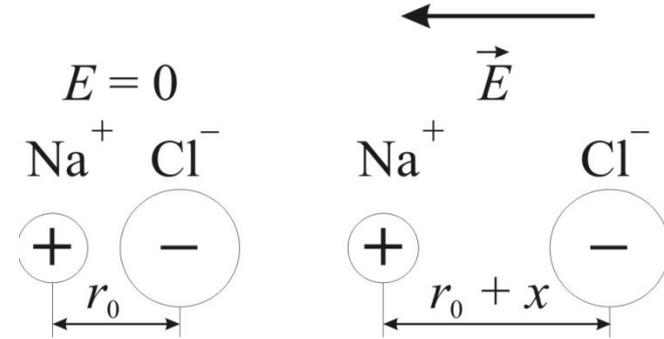
Ионная поляризация

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 $P_{и} = q \cdot x$

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

Степень поляризации пропорциональна валентности ионов



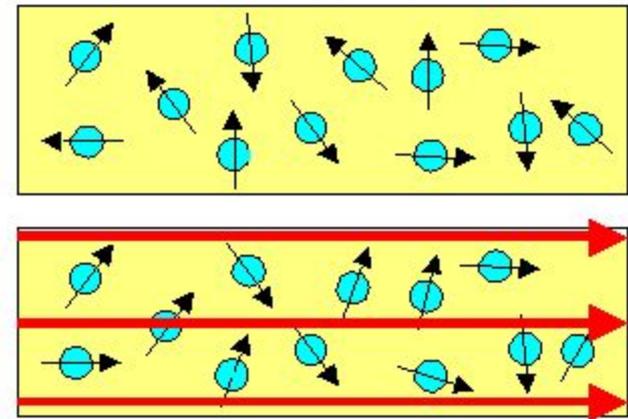
Дипольная поляризация

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 $T < \tau$, диполи не успевают переориентироваться

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

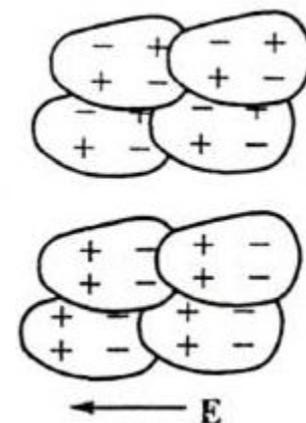
Влияние температуры: $T \uparrow \rightarrow$ силы молекулярного сопротивления повороту диполей $\downarrow \rightarrow T \downarrow$

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) \rightarrow проявляется только на низких частотах

Связана со значительным рассеянием электрической энергии

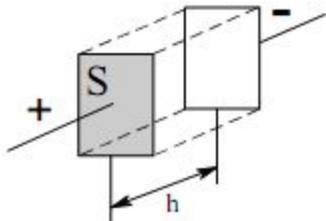


КЛАССИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПО МЕХАНИЗМАМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

- 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 стекла, керамика и др.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОЛЯРИЗАЦИИ

Участок изоляции



Количественной оценкой величины поляризации диэлектрика является поляризованность:

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

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

σ – плотность зарядов на обкладках

$$M = \sigma \cdot S \cdot h; \quad V = S \cdot h$$

$$P = \sigma \cdot S \cdot h / (S \cdot h) = \sigma$$

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

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad \chi - \text{коэффициент диэлектрической восприимчивости}$$

$$\epsilon = 1 + \chi \quad \epsilon - \text{диэлектрическая проницаемость}$$

$$\text{Для диэлектриков} \quad \chi > 0; \quad \epsilon > 1$$

Для вакуума $\epsilon = 1$ (идеально, $\epsilon = 1,00058$), ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 100$

Значение ϵ определяет интенсивность процесса поляризации

$$C = \epsilon \epsilon_0 \Lambda \quad \Lambda - \text{íðèääááíá} \quad \bar{y} \text{ äèèíá} \quad \acute{o}\div\grave{a}\grave{n}\grave{o}\grave{e}\grave{a} \text{ èçìèÿöèè}$$

$$\Lambda = \frac{S}{h} - \grave{o}\grave{a}\grave{e}\grave{i} \quad \grave{n} \grave{i}\grave{n}\grave{o}\grave{i}\grave{y}\grave{i}\grave{u}\grave{i} \quad \grave{i}\grave{i} \quad \acute{a}\acute{n}\acute{a}\acute{e} \text{ äèèíá} \quad h \quad \grave{n}\acute{a}\div\acute{a}\grave{i}\grave{e}\grave{a}\grave{i} \quad S \text{ (íðíáíá)}$$

$$\Lambda = \frac{2\pi l}{\ln(D/d)} - \grave{o}\grave{e}\grave{e}\grave{i}\grave{a}\grave{d} \quad \grave{n} \acute{a}\grave{i}\acute{a}\acute{o}\grave{i}\grave{e}\grave{i} \quad \grave{e} \acute{a}\grave{i}\acute{o}\grave{o}\grave{d}\acute{a}\grave{i}\grave{i}\grave{e}\grave{i} \quad \grave{a}\grave{e}\grave{i}\grave{a}\grave{o}\grave{d}\grave{i}\grave{i} \quad D, d \text{ è íñááíé} \quad \text{äèèíé} \quad l$$

(èçìèÿöèèÿ èíàèñèàèüí íáí èáááèÿ)

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon - \acute{a}\acute{a}\acute{n}\acute{i}\acute{e}\rho\acute{o}\acute{i}\acute{a}\acute{y} \quad \acute{a}\grave{e}\grave{y}\acute{e}\acute{a}\acute{e}\acute{o}\acute{d}\acute{e}\div \acute{a}\acute{n}\acute{e}\acute{a}\acute{y} \text{ íðííèöááíí} \quad \grave{n}\grave{o}\grave{u}$$

(óääèüíáÿ áìèíñòü äèÿèáèòðèè à)

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \Lambda U^2}{2} \quad \epsilon = \frac{\tilde{N}_A}{\tilde{N}_0}$$

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 $P_{\text{и}} = \alpha E$ (α – поляризуемость частицы) $\rightarrow P = N * P_{\text{и}} = N * \alpha * E$ (N – количество молекул в единице объема) \rightarrow

$$\epsilon = 1 + \frac{\alpha N}{\epsilon_0}$$

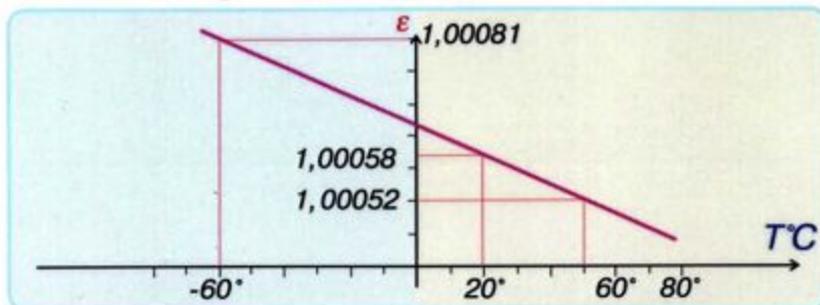
Диэлектрическая проницаемость газов

ϵ водорода = 1.00027

строение молекул



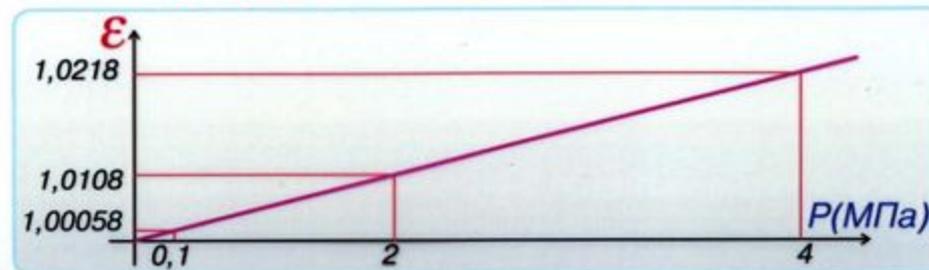
Зависимость $\epsilon = f(T)$ для воздуха при постоянном давлении



Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости

$$\text{TK}_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt}$$

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



Диэлектрическая проницаемость жидкостей

$$\epsilon \gg 1$$

, т.к. плотность жидкости большая величина.

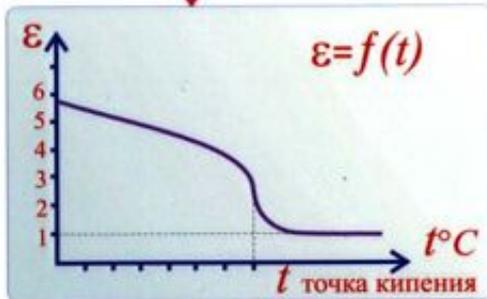
строение молекул

неполярные молекулы
(трансформаторное
масло)

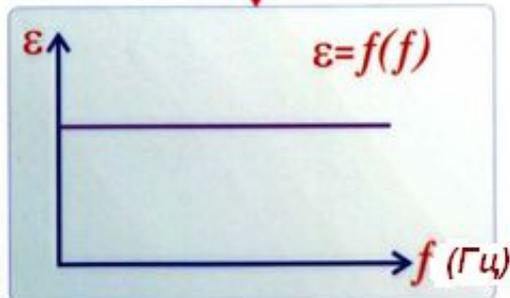
$$\epsilon = 2,1 \div 2,5$$

полярные молекулы
(совол)

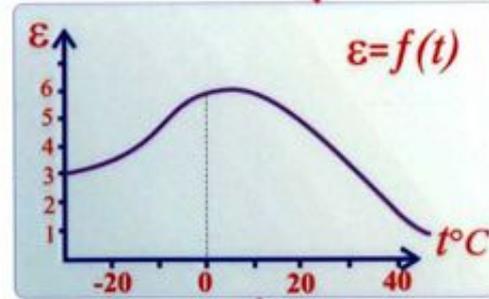
$$\epsilon = 3,5 \div 5$$



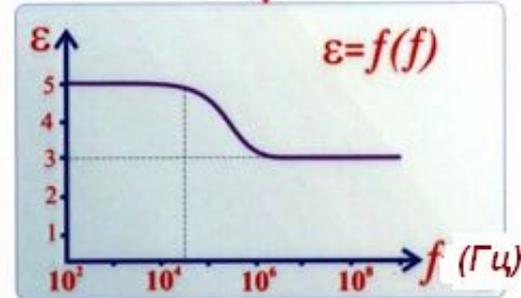
Поляризация – электронная



Эти диэлектрики применяются
на всех частотах



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

$$\epsilon = 1,9 \div 6$$

(полистирол, парафин, алмаз)

полярные молекулы

$$\epsilon = 4 \div 10$$

(целлюлоза, полимеры)

строение молекул

ионные кристаллы с плотной упаковкой частиц $\epsilon = 6 \div 150$

(кварц, слюда, корунд)

электронная и ионная поляризации

ионные кристаллы с неплотной упаковкой частиц $\epsilon = 4 \div 10$

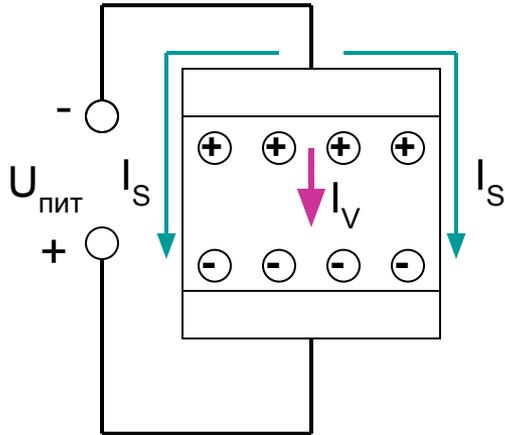
(электротехнический фарфор)

электронная, ионная и ионно - релаксационная поляризации

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Особенности

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



I_V – объемный сквозной ток
 I_S – поверхностный сквозной ток

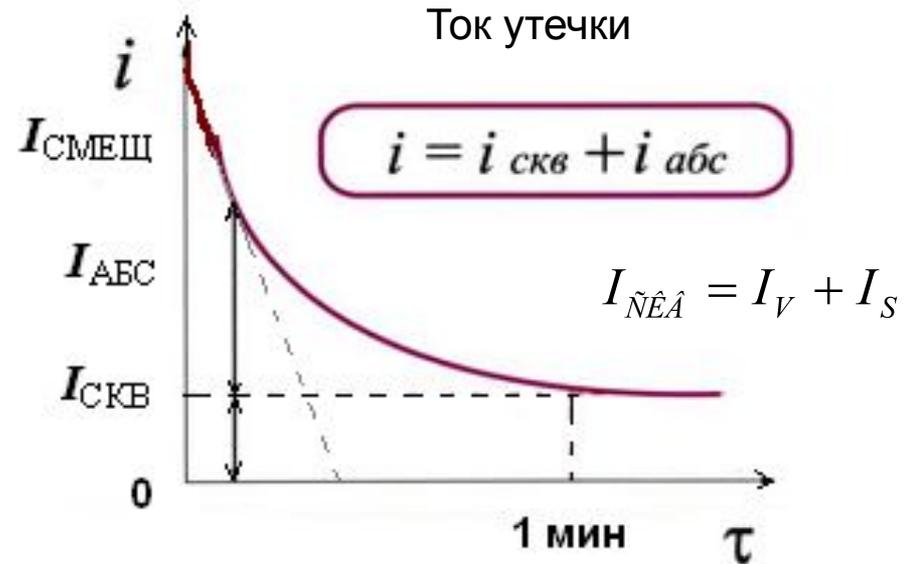
$$I = I_V + I_S$$

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

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

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

ρ_S – $\rho_{\text{поверхностный}}$ $\rho_{\text{объемный}}$
 $\rho_{\text{поверхностный}} \ll \rho_{\text{объемный}}$



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, $\gamma_{NaCl} \gg \gamma_{MgO}$

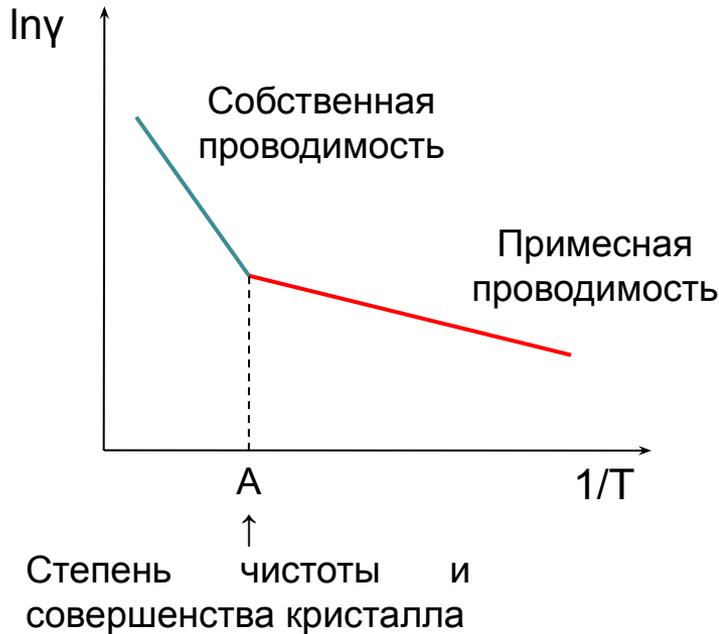
$$\mu_{\text{эii}} < \mu_{\text{yé}}; n_{\text{эii}} \gg n_{\text{yé}};$$

$$n_{\text{эii}} * q * \mu_{\text{эii}} \gg n_{\text{yé}} * \bar{e} * \mu_{\text{yé}}$$

$$\gamma = n * q * \mu$$

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

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



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

Гидрофобные диэлектрики

- Неполярные диэлектрики, чистая поверхность которых не смачивается водой

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 \leftrightarrow перенос вещества: «+» - ионы уходят к катоду, а «-» - ионы – к аноду \leftrightarrow **Электролиз**

Закон Фарадея

$$m = k \cdot I \cdot t$$

(k – электрохимический эквивалент вещества)

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

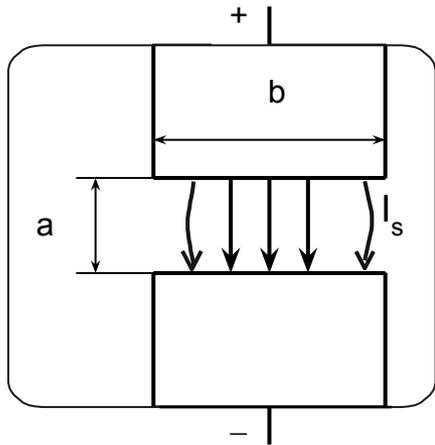
A – атомная масса; n – валентность;
 A/n – химический эквивалент

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

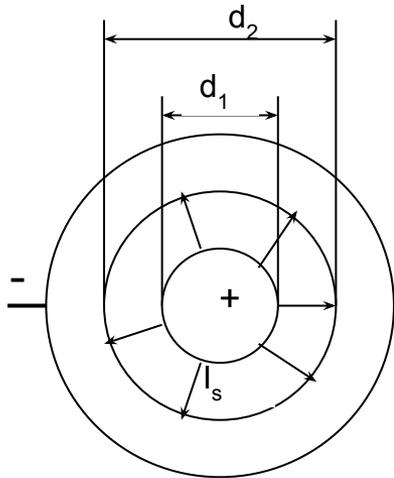
Поверхностная электропроводность



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

$$R_S = \rho_S * \frac{a}{b} \Rightarrow \rho_S = R_S * \frac{b}{a} \Rightarrow [\rho_S] = \hat{\Omega}$$

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



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

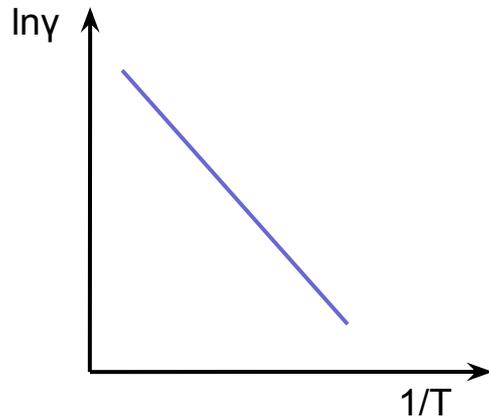
Носители заряда

Ионы или крупные заряженные коллоидные частицы

Влияющие факторы

Температура

С увеличением T степень диссоциации и концентрация ионов возрастают



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

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

Полярные жидкости (дистиллированная вода, ацетон, этиловый спирт)

$10^3 \dots 10^5$

Слабо полярные (касторовое масло)

$\rho, \text{ Ом*м}$

$10^8 \dots 10^{10}$

Неполярные (бензол, трансформаторное масло)

$10^{10} \dots 10^{14}$

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)

Соударения заряженных частиц самого газа с молекулами (ударная ионизация)



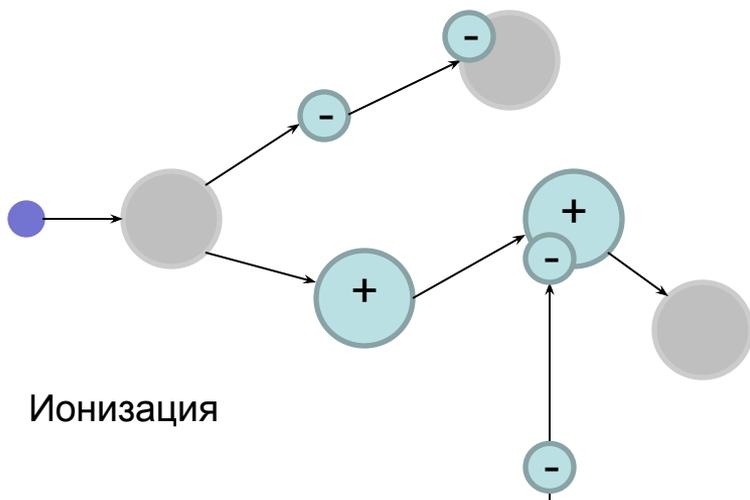
Самостоятельная электропроводность



Несамостоятельная электропроводность

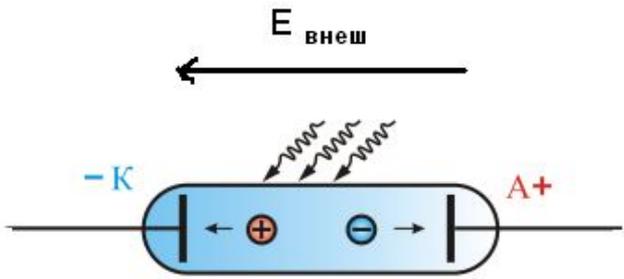


Исчезает после исчезновения внешнего фактора



Ионизация

Рекомбинация



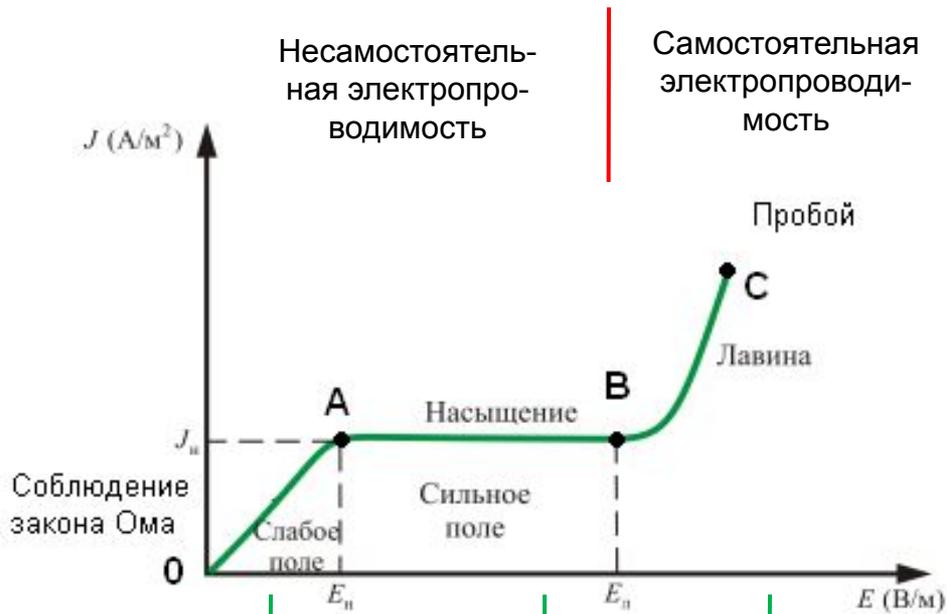
$$v_+ = \mu_+ * E; v_- = \mu_- * E$$

N_+ – количество положительных ионов в единице объема

N_- – количество отрицательных ионов в единице объема

N_p – количество пар ионов, создаваемых в единице объема

$$N_p = \alpha * N_+ * N_- \quad (\alpha - \text{коэффициент умножения})$$



Несамостоятельная электропроводимость

Самостоятельная электропроводимость

Создаваемые ионы частично рекомбинируют, частично нейтрализуются на электродах

Возникновение ударной ионизации

Все ионы разряжаются на электродах без рекомбинации

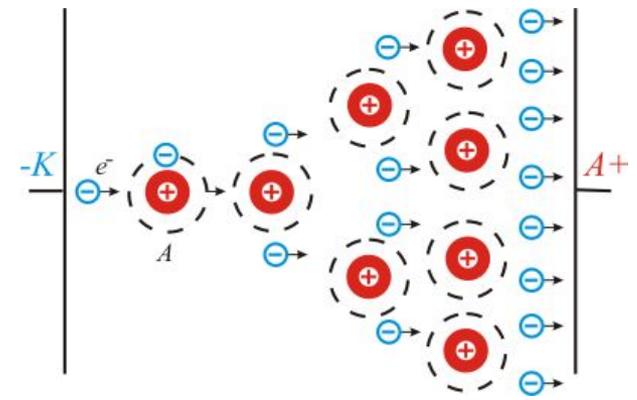
$E_н = 0,6 \text{ В/м};$
 $E_и = 10^5 \dots 10^6 \text{ В/м}$
 (10 мм)

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

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

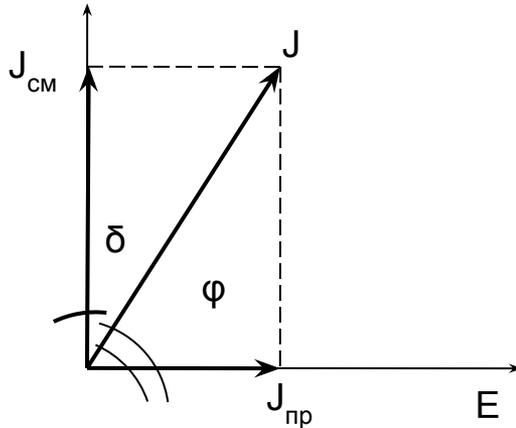
$$J = \gamma * E \Rightarrow$$

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



ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

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



Синусоидальное поле с напряжением E и частотой ω

$$J_{\text{нi}} = j\omega\varepsilon\varepsilon_0 E$$

$$J_{\text{i}\delta} = \gamma_a E$$

Идеальный диэлектрик : $\gamma_a = 0, J = J_{\text{нi}} = j\omega\varepsilon\varepsilon_0 E$

Реальный диэлектрик : $\gamma_a \neq 0 \Rightarrow \delta = 90^\circ - \varphi$

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

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

$$P_{\text{дп}} = \gamma_a A^2 = \omega\varepsilon_0\varepsilon * \underline{\text{tg}\delta} * E^2 \quad [\text{Вт} / \text{м}^3]$$

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

Коэффициент диэлектрических потерь $\varepsilon'' = \varepsilon * \text{tg}\delta$

Виды диэлектрических потерь

Потери на
электропроводность
(свободные)

Релаксационные
(включая
интервенционные)

Ионизационные

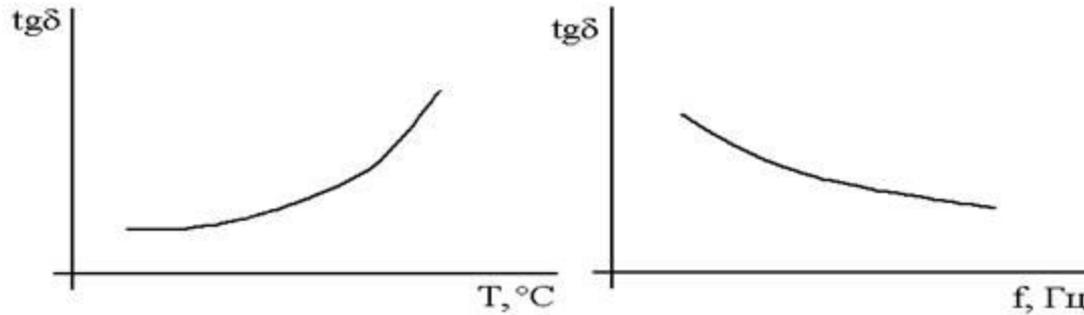
Резонансные

Потери на электропроводность

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

- Единственный вид потерь в однородном неполярном диэлектрике

Зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от температуры и частоты приложенного напряжения для неполярных диэлектриков



Релаксационные потери

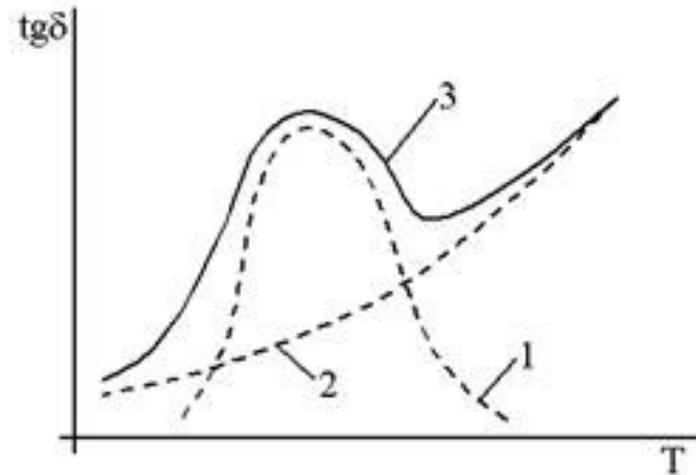
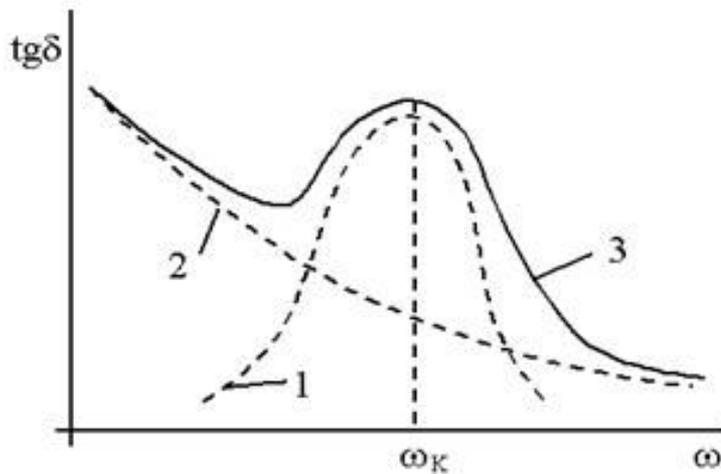
- Обусловлены активными составляющими поляризационных токов
- Характерны для диэлектриков с замедленными видами поляризации (дипольной и миграционной), преимущественно жидких ($\tau \sim 10^{-6} \dots 10^{-11} \text{ с}$)
- Проявляются в области высоких частот (радиочастот), когда поляризация отстает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

- Величина потерь зависит от соотношения времени установления поляризации τ и периода изменения электрического поля $T = 1/f$:
 - $\tau \ll T$ - энергия на поляризацию не затрачивается
 - $\tau \sim T$ - часть энергии уходит на поляризацию
 - $\tau \gg T$ - поляризация вообще не успевает произойти

- Диэлектрические потери максимальны при $\tau \sim 1/\omega$; частота $\omega_p = 1/\tau \rightarrow$ частота релаксации

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

Зависимость $\text{tg}\delta$ полярного диэлектрика от частоты и температуры



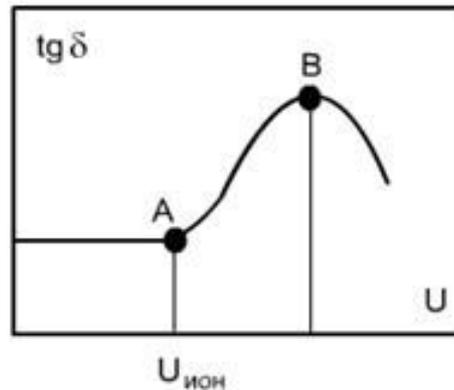
1 – потери за счет дипольной поляризации; 2 – потери за счет сквозной проводимости; 3 – суммарные потери

Резонансные потери

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

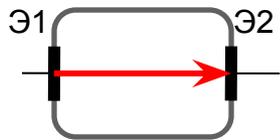
Ионизационные потери

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



ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

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



• Полный (проводящий канал замыкает электроды между собой)
• Частичный (проводящий канал не достигает одного из электродов)

• Частичный (пробивается только газовое или жидкое включение твердого диэлектрика)

• Поверхностный (проводящий канал образуется по поверхности твердого диэлектрика)



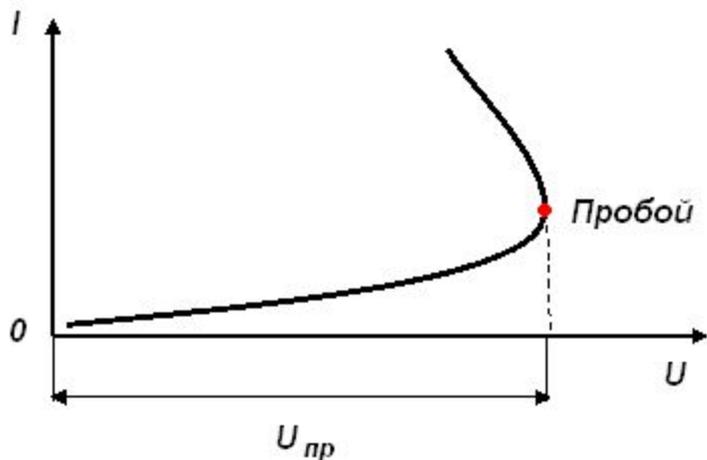
Характеристики пробоя

$U_{пр}$ – 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

$$\hat{E} = \frac{U_{i\delta}}{U_{ii}}$$

Коэффициент импульса

$$\hat{E}_{\hat{E}} = \frac{U_{i\delta}^{eii}}{U_{ii}^{n\delta\delta}} > 1$$

Момент пробоя:

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

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

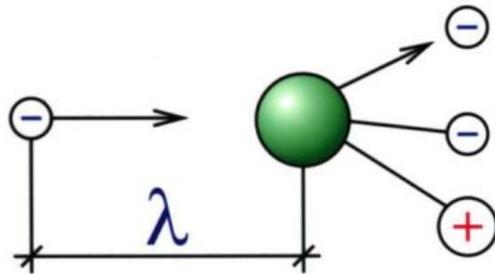
Пробой газов

Причина – **ударная ионизация**

$$W = \bar{e} \cdot \lambda \cdot E \geq W_{\text{и}}$$

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)

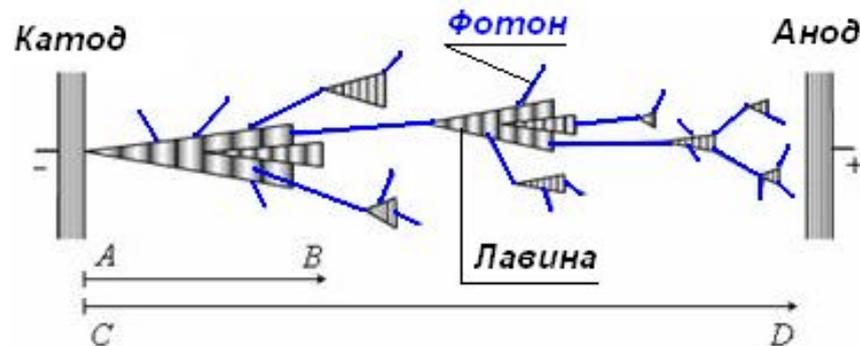


Расщепление нейтральной молекулы (ударная ионизация)

Механизмы пробоя

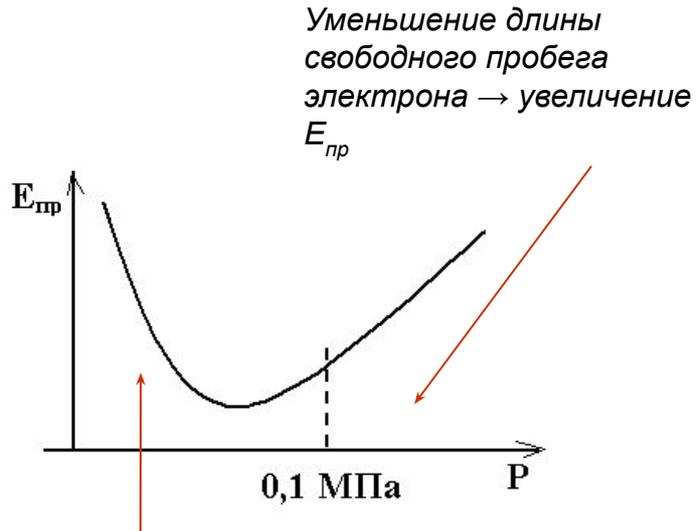
Лавинный → ударная ионизация электронов сопровождается вторичными процессами на катоде → заряды в газовом промежутке восполняются → образуется серия лавин → **пробой**

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

Зависимость электрической прочности от расстояния между электродами



Эффективность ударной ионизации

Среднее число столкновений электронов на единицу длины пути

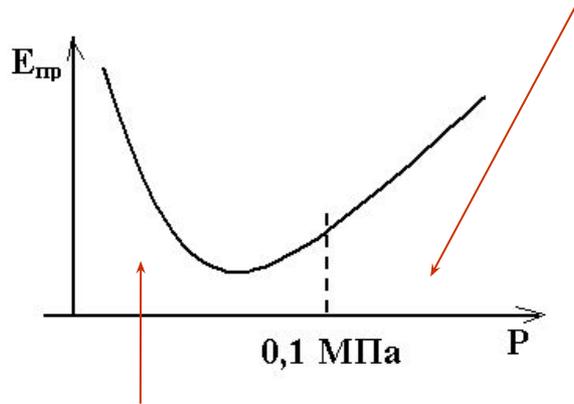
Влияет при малых $P \cdot h$

Вероятность того, что столкновение закончится ионизацией

Влияет при больших $P \cdot h$

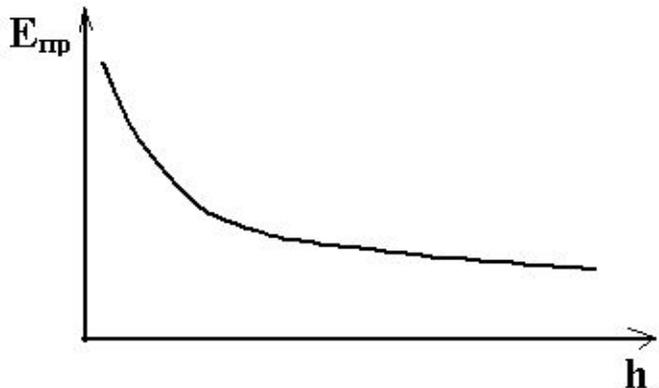
Зависимость электрической прочности от давления

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



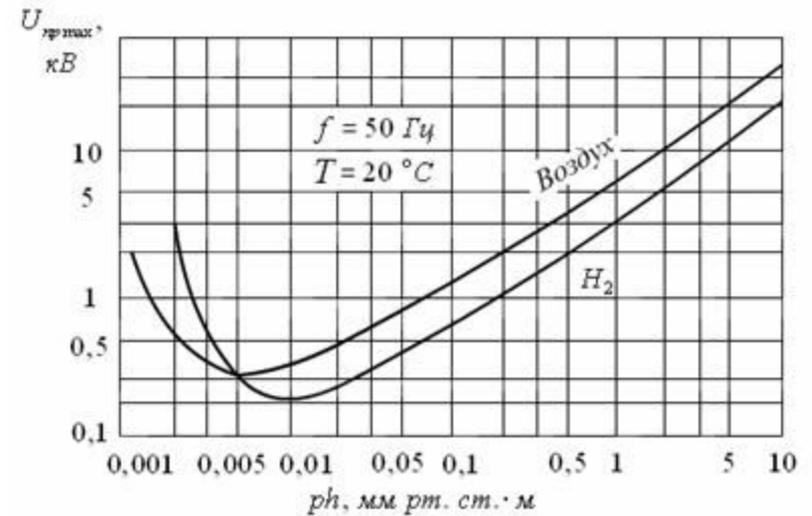
Уменьшение вероятности столкновения электрона с молекулами газа → увеличение $E_{пр}$

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 $P \cdot h = \text{const}$, то $U_{пр}$ не меняется, $U_{пр} = f(P \cdot h)$



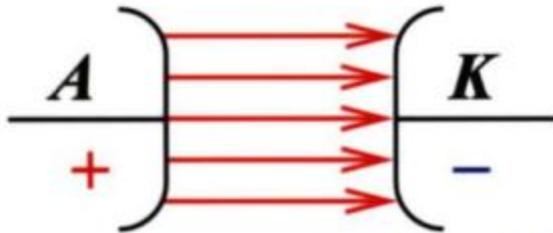
Физический смысл: одинаковые частицы в газовых промежутках получают на одном и том же длине пути λ одинаковую энергию от поля

Пробой газа в однородном электрическом поле

В однородном поле E – величина постоянная

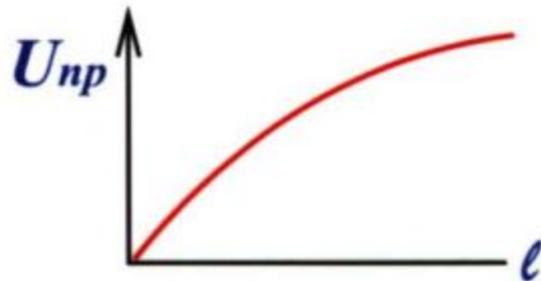
Однородное поле можно получить:

1) между плоскими электродами с закругленными краями;

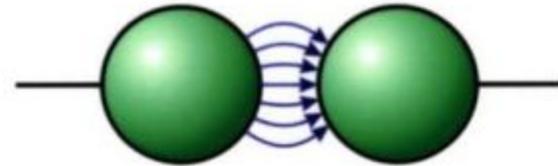


Зависимость $U_{пр} = f(\ell)$

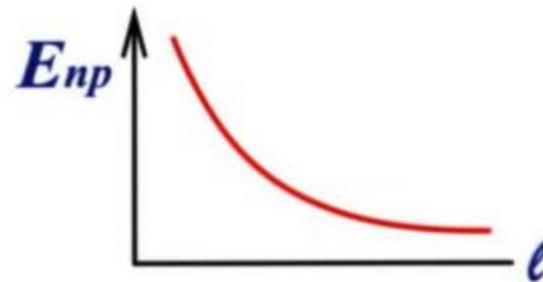
ℓ – расстояние между электродами



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



Зависимость $E_{пр} = f(\ell)$



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

Пробой газа в неоднородном электрическом поле

