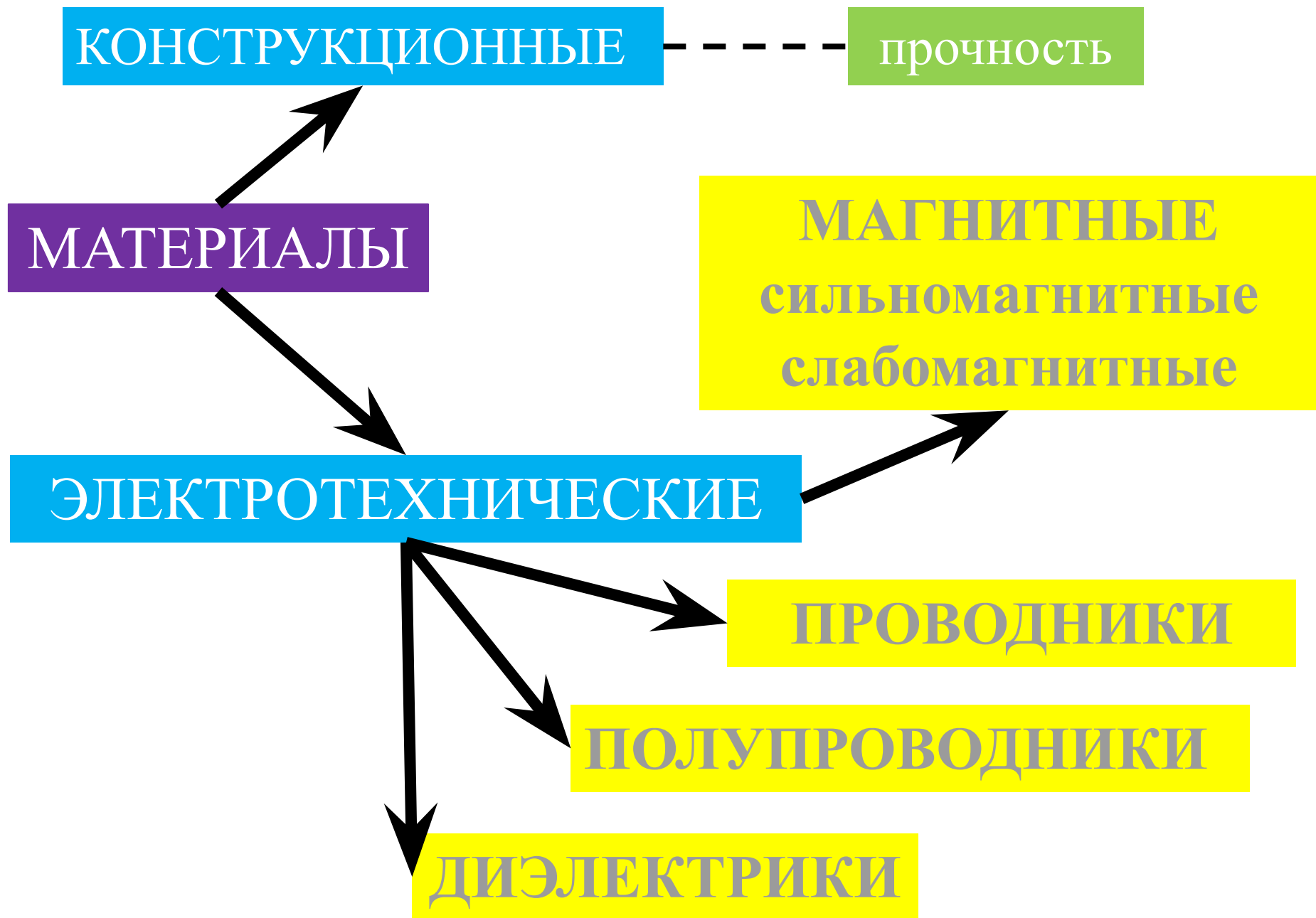


ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



Состояния вещества

- **ГАЗООБРАЗНОЕ**
- **ЖИДКОЕ**
- **ТВЁРДОЕ:**
 - *монокристаллическое*
 - *поликристаллическое*
 - *аморфное (стекло)*
 - *смешанное (полимеры, ситаллы)*

Виды связей в веществе

ХИМИЧЕСКИЕ

энергия $\sim 10^2$ кДж/моль:

- Ионная
- Ковалентная полярная
- Ковалентная неполярная
- Металлическая

МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫЕ

- Силы Ван-Дер-Ваальса
 $\sim 0,1 \div 1$ кДж/моль
- Водородная
 $\sim 10 \div 50$ кДж/моль

Электрический ток – направленное движение свободных носителей заряда (с.н.з.) q в электрическом поле напряженностью E [В/м].

Плотность тока j – суммарный электрический заряд, переносимый в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной E .

$$j = q \cdot n \cdot v_{\text{др}} = q \cdot n \cdot \mu \cdot E = \gamma \cdot E$$

(дифференциальная форма закона Ома)

n – концентрация с.н.з. [м^{-3}];

μ – подвижность с.н.з. [$\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$];

$v_{\text{др}} = \mu \cdot E$ – средняя дрейфовая скорость с.н.з.

$$\gamma = q \cdot n \cdot \mu \quad [\text{См/м}, 1 \text{См} = \text{Ом}^{-1}]$$

удельная электрическая проводимость

$$\rho = 1/\gamma \quad [\text{Ом} \cdot \text{м}]$$

удельное электрическое сопротивление

ρ и γ характеризуют электрические свойства материала

Обычно относят:

к проводникам вещества с $\rho < 10^{-5} \text{Ом} \cdot \text{м}$;

к диэлектрикам – с $\rho > 10^7 \text{Ом} \cdot \text{м}$;

к полупроводников – с $\rho \sim 10^{-6} - 10^9 \text{Ом} \cdot \text{м}$.

Проводимость G [См] и сопротивление R [Ом] однородного изотропного образца зависят от его геометрии, а значит не являются характеристикой материала:

$$G = 1/R = \gamma \cdot \Delta = \Delta / \rho$$

Δ – геометрический параметр. Например:

Для цилиндра длиной ℓ , сечением S :

$$\Delta = S/\ell.$$

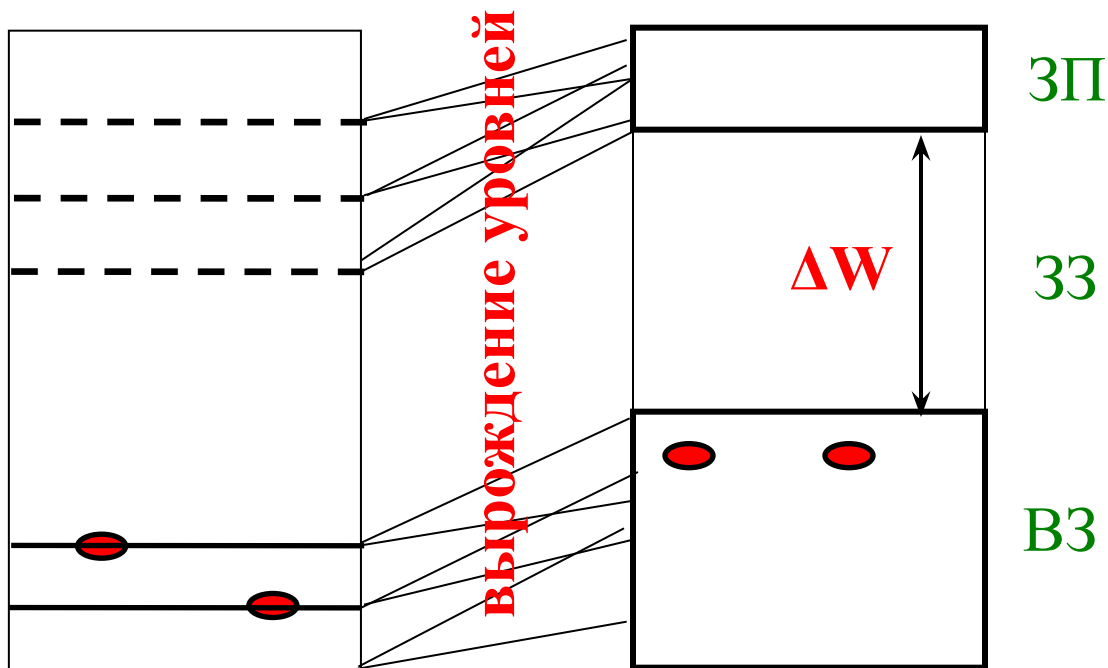
Для цилиндра с внешним и внутренним диаметрами D и d и осевой длиной ℓ :

$$\Delta = 2\pi\ell/\ln(D/d).$$

ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

Возбуждённые
(неустойчивые)
энергетические
уровни

Энергетические
уровни
основного
состояния
(устойчивые)



линейчатый спектр
излучения газа

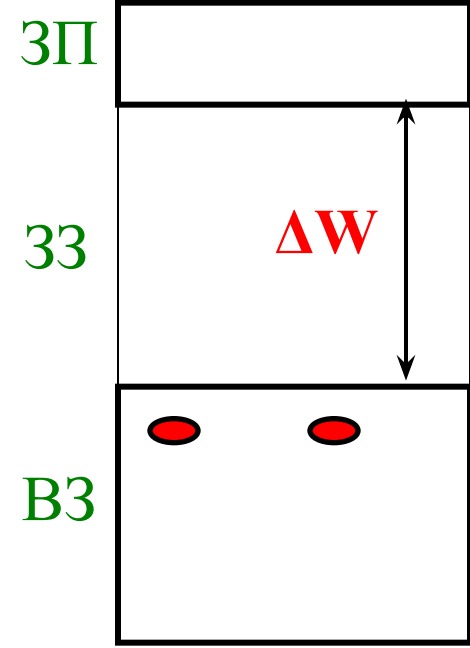
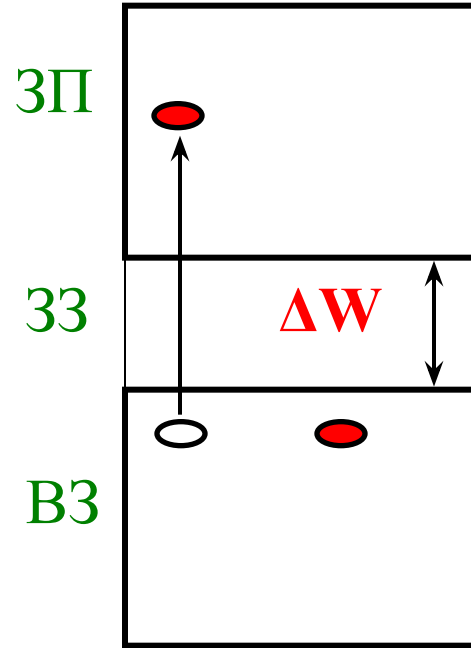
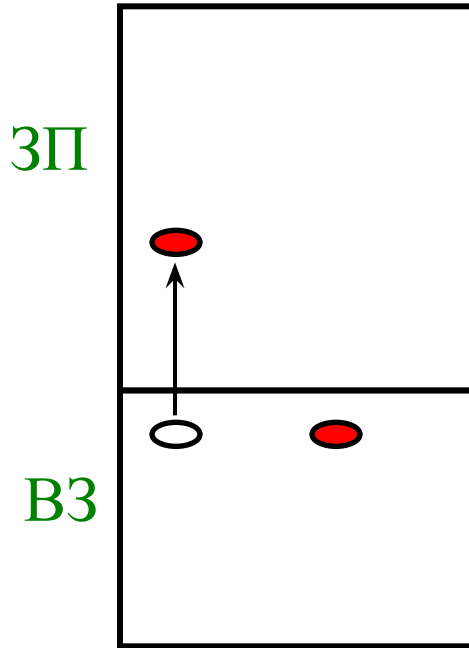
зонная
структура
твёрдого тела

Классификация материалов согласно зонной теории

проводники

полупроводники

диэлектрики



$\Delta W = 0$

ΔW до 3эВ

ΔW выше 3эВ

Металлы

Неметаллы

металлическая

ионная, ковалентная или

связь

смешанная связь

Система единиц СИ Производные

Основные

Длина L [м]

Масса M [кг]

Время t [с]

Сила эл.тока I [А]

Температура T [°K]

Сила света [св]

Вспомогательные

Плоский угол [рад]

Телесный угол [стер]

Скорость м/с

Сила $N=кг \cdot м/с^2$

Работа, энергия Н·м

Мощность Вт=Дж/с

Разн.потенц. $V=Вт/А$

Заряд Кл=А·с

Напр.эл.поля В/м

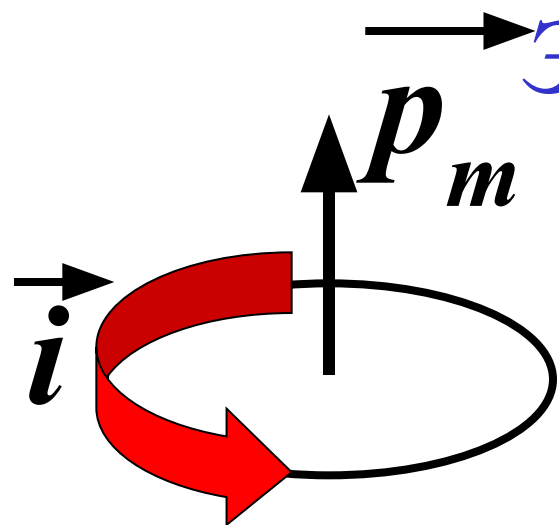
Эл.сопр. Ом=В/А

Эл.ёмкость $\Phi=Кл/В$

Магн.индукция $Tл=Кл \cdot Ом/м^2$

Напр.магн.поля А/м

Магнитные материалы



*Элементарный магнитный
момент атома*

$$\vec{p}_m = i\vec{S} \cdot \vec{n}$$

является векторной суммой
орбитальных и спиновых магнитных
моментов электронов,
а также магнитного момента ядра, который
составляет 10^{-3} магнитного момента электрона.

Векторная сумма магнитных
моментов атомов в единице объёма
называется

намагниченностью M [А/м]:

$$\vec{M} = \Sigma \vec{p}_m ; \quad \vec{M} = \chi \cdot \vec{H}$$

χ — магнитная восприимчивость

Суммарное магнитное поле в объёме вещества называется

магнитной индукцией B [Тл]

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \vec{H}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Гн/м]}$$

$$\mu = 1 + \chi ; \mu_a = \mu_0 \mu$$

Намагничиванием называется процесс ориентации магнитных моментов атомов вещества под влиянием внешнего магнитного поля, в результате которого намагниченность материала становится $M \neq 0$.

Виды магнетизма:

Различают следующие механизмы намагничивания:

- 1. Диамагнетизм**
- 2. Парамагнетизм**
- 3. Ферромагнетизм**
- 4. Антиферромагнетизм**
- 5. Ферримагнетизм**

Диамагнетизм – свойство вещества слабо намагничиваться противоположно внешнему магнитному полю

Магнитная восприимчивость $\chi \sim -10^{-5} \div -10^{-7}$

Магнитная проницаемость $\mu \approx 0,9999$

Диамагнетики

Cu, Ag, Au, Be, Zn, Ga, B, Pb, Sb

Парамагнетизм – свойство вещества слабо намагничиваться согласованно с внешнем магнитным полем

Магнитная восприимчивость $\chi \sim 10^{-2} \div 10^{-6}$

Магнитная проницаемость $\mu \approx 1,0001..$

Парамагентики

Al, O, Pt, Mg, Pd, Cr, Ca, Mo

Ферромагнетизм – свойство вещества
сильно намагничиваться согласованно с
внешним магнитным полем

Магнитная восприимчивость $\chi \sim 10^3 \div 10^7$

Магнитная проницаемость μ от 10^3 до 10^7

Ферромагнетики

Fe, Co, Ni

Cd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm

Антиферромагнетики – материалы, в которых в результате обменного взаимодействия соседних атомов происходит антипараллельная ориентация **равных** по величине **магнитных моментов**

Магнитная восприимчивость $\chi \sim 10^{-2} \div 10^{-5}$

Магнитная проницаемость $\mu \approx 1,0001..$

Антиферромагнетики

Ce, Nd, Pr, Sm, Eu, Mn, Cr

Ферримагнетики (**ферриты**) – материалы, в которых обменное взаимодействие соседних атомов приводит к антипараллельной ориентации различных по величине (**нескомпенсированных**) магнитных моментов

Магнитная восприимчивость $\chi \sim$ до 10^7

Магнитная проницаемость μ до 10^7

Ферриты $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MeO}$

где **Me** – Mg, Fe, Zn, Co, Cu, Cd, Mn и др.

Намагничивание ферромагнетиков

Доменом называется

макроскопическая область

материала, внутри которой

намагниченность спонтанно ($H=0$)

достигает насыщения,

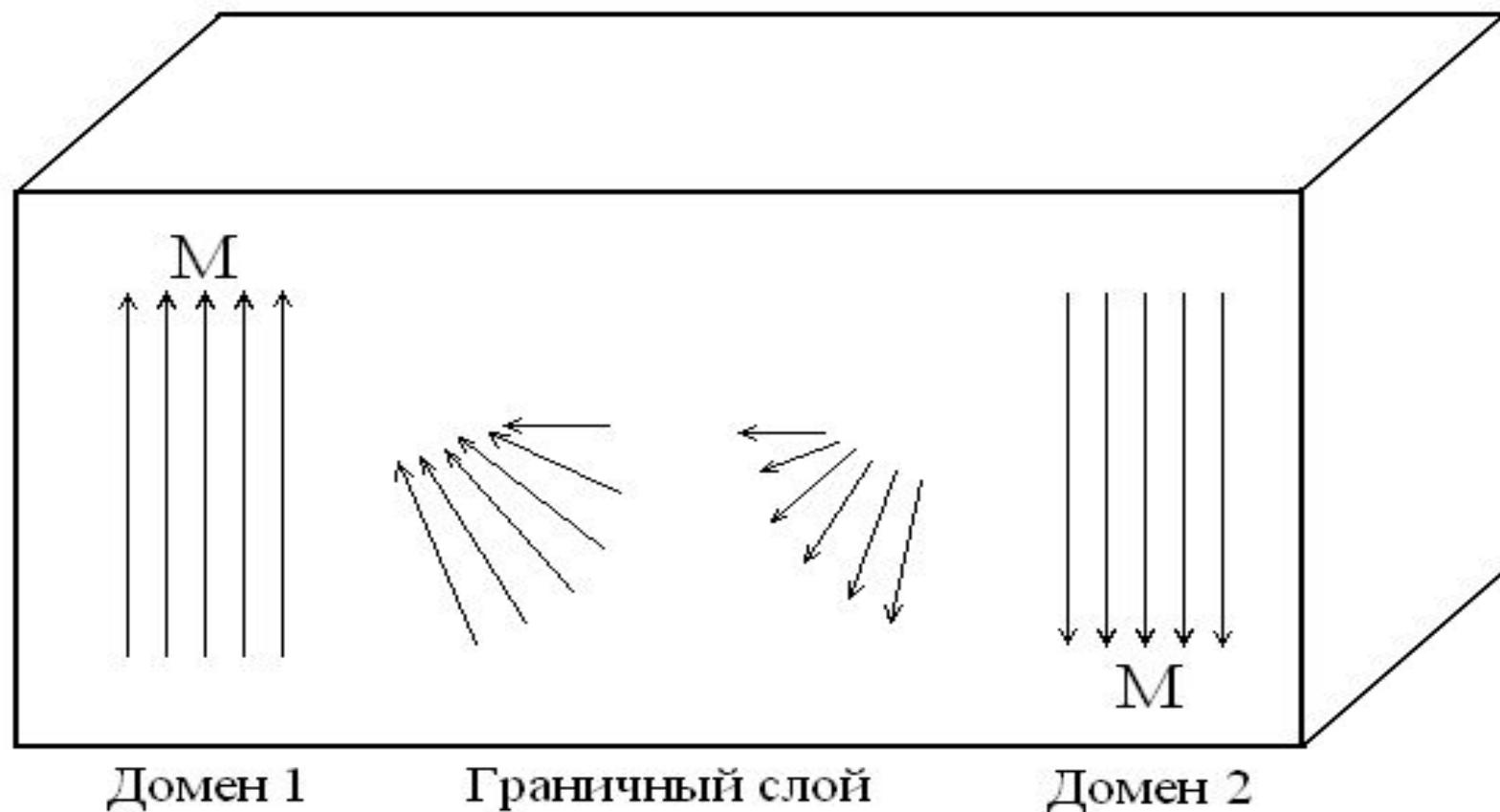
т. е. внутри домена магнитные моменты

практически всех атомов ориентированы в

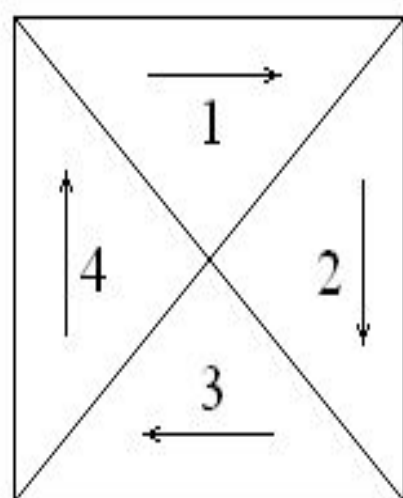
одном направлении.

Условия возникновения доменной структуры (ферромагнетизма)

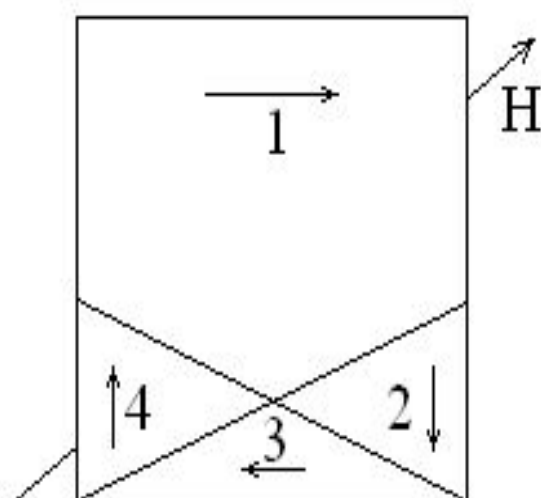
1. Наличие внутренних незаполненных электронных оболочек (d или f) атома;
2. Величина интеграла обменной энергии $A > 0$, что выполняется если диаметр незаполненных оболочек мал по сравнению с межатомным расстоянием кристаллической решетки: $a/d > 1,5$.



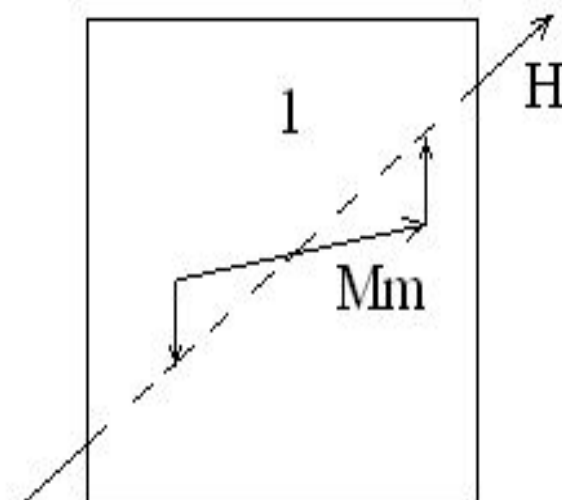
Магнитная структура граничного слоя в кристалле



а

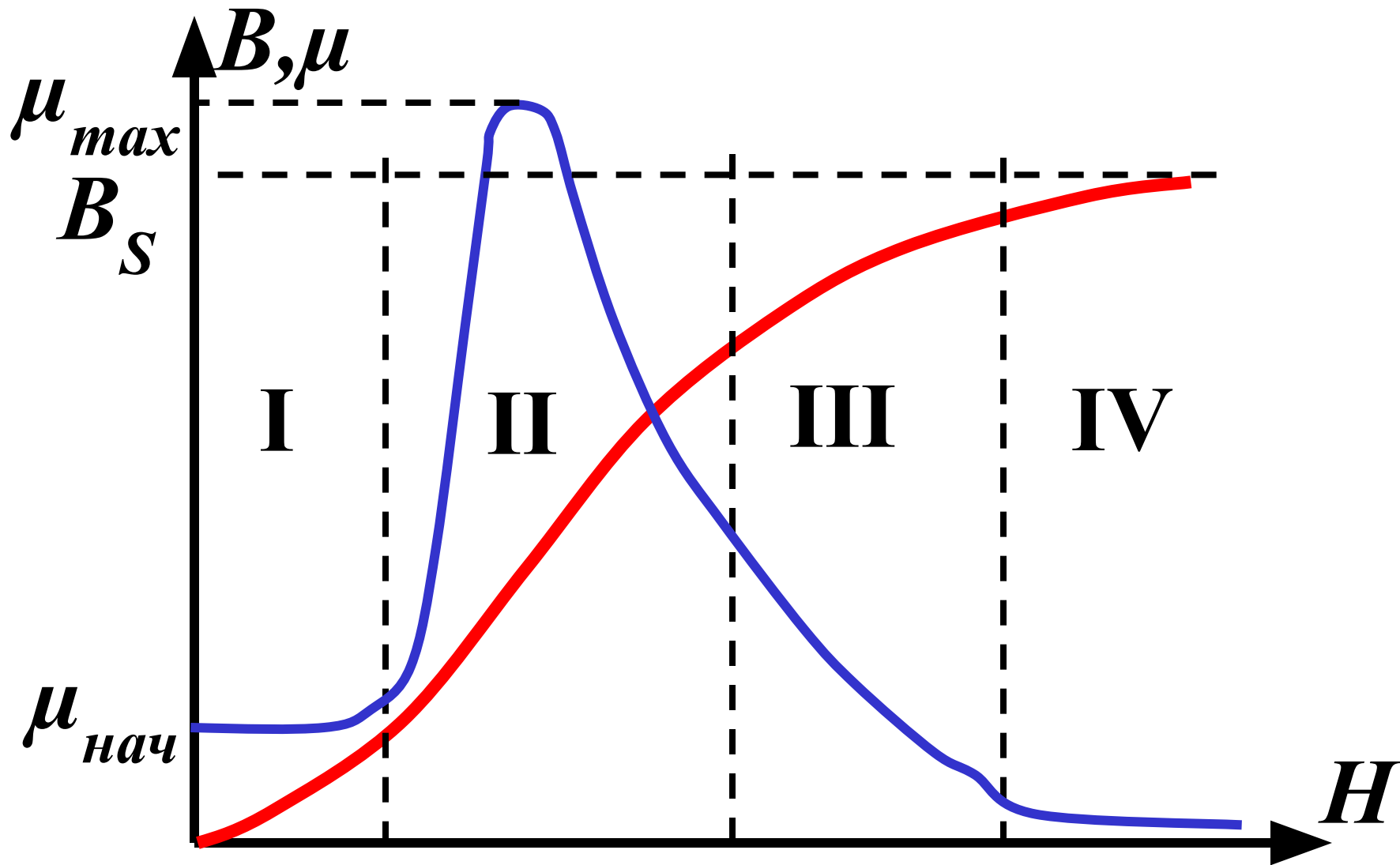


б

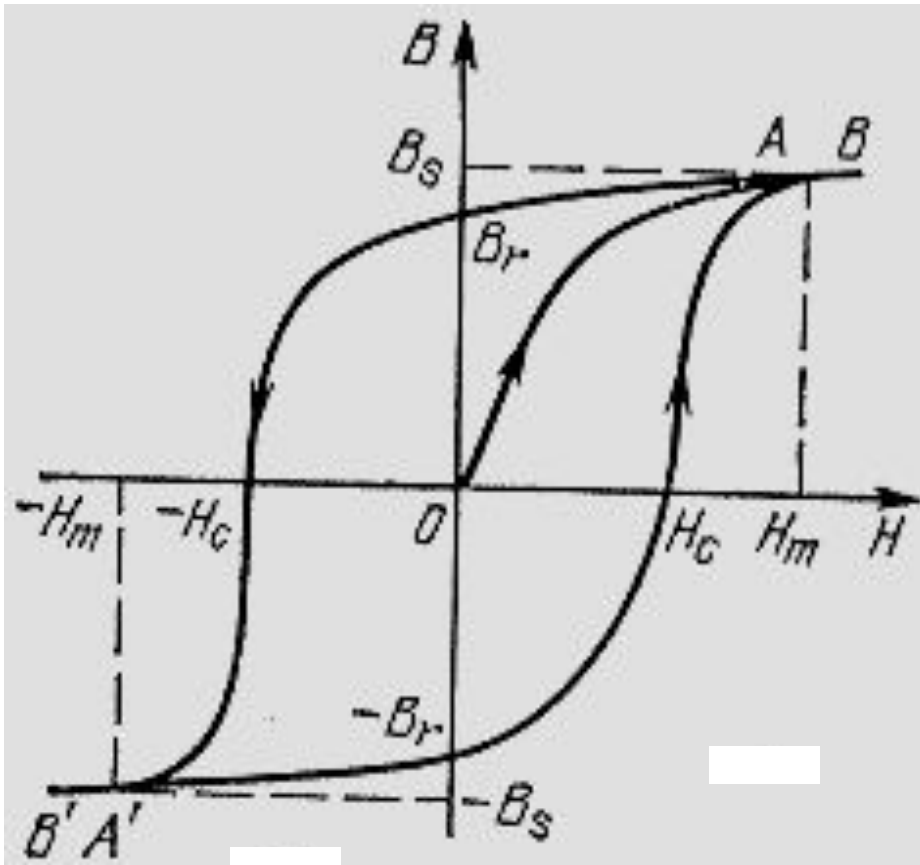


в

Схема процессов, протекающих при намагничивании

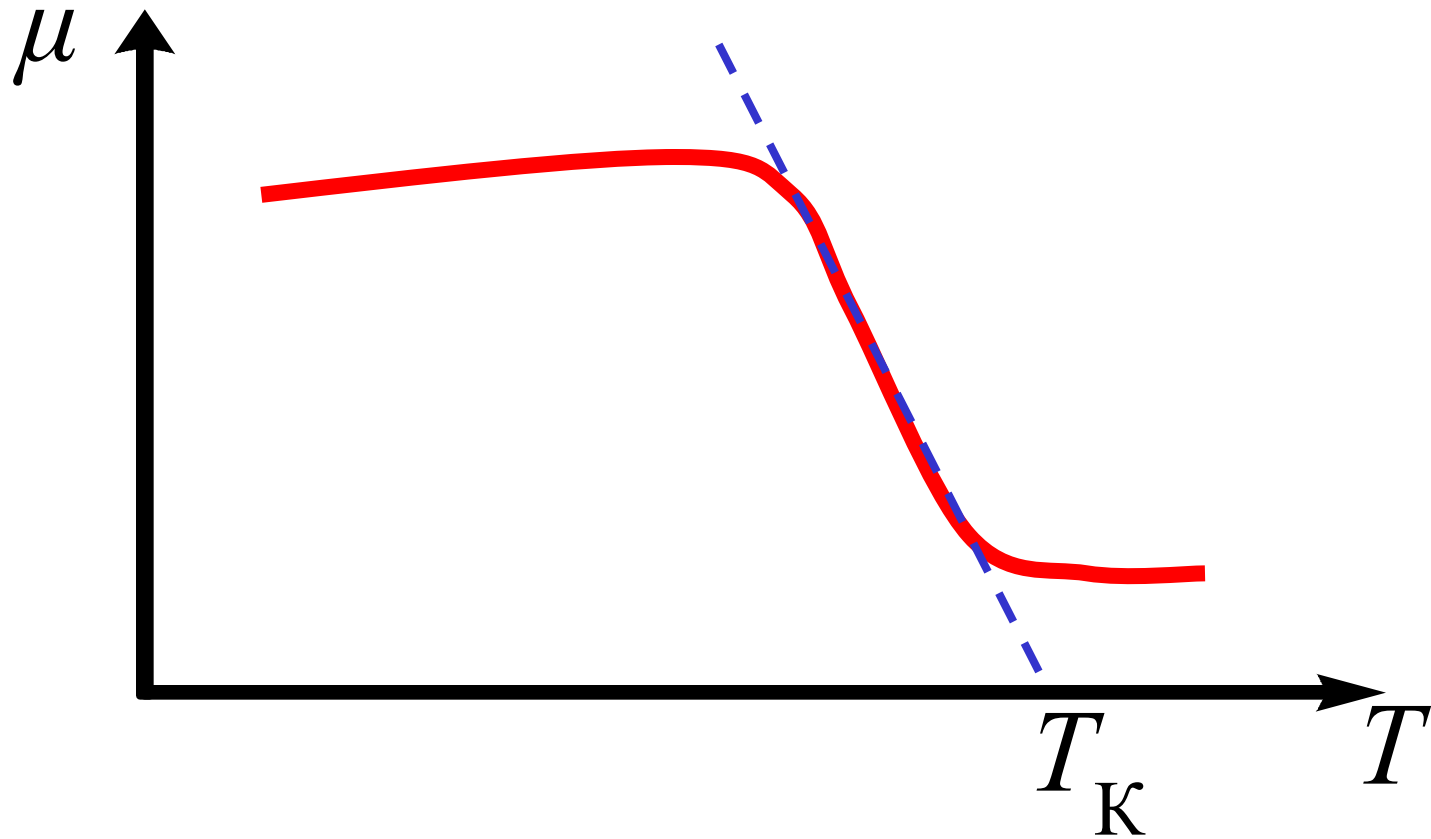


НАМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ



1. B_s – индукция насыщения
2. H_c – коэрцитивная сила
3. B_r – остаточная индукция
4. Потери на гистерезис (на перемагничивание) – площадь петли гистерезиса

Зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнитных материалов от температуры T .



Особенность ферромагнетиков:

1. Наличие доменной структуры
2. Зависимость магнитного состояния от предшествующей магнитной истории
3. Наличие температуры Кюри

$$\mu_a = B/H \quad (1)$$

$$\mu = \mu_a / \mu_0 \quad (2)$$

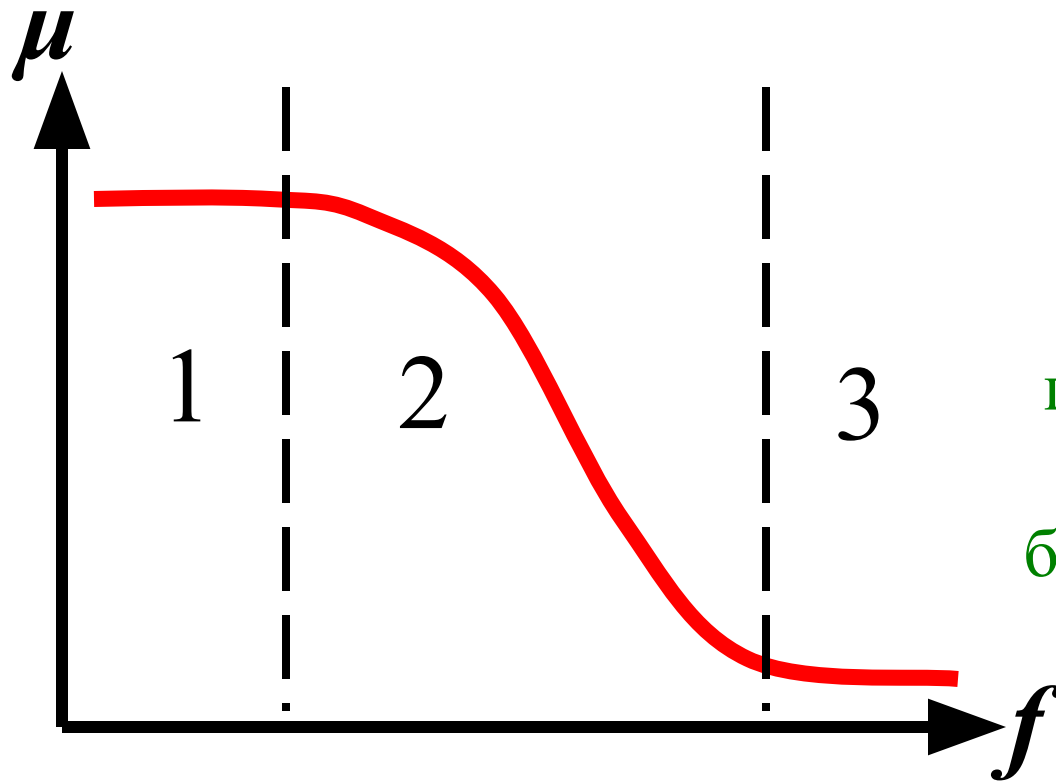
$$\mu_{\max} = B_{\max} / H_{\max} \quad (3)$$

Величина магнитной проницаемости
зависит от вида приложенного
внешнего магнитного поля

$$\mu_{\sim} = B_m / H_m \quad (4)$$

В переменном магнитном поле μ
зависит от частоты f

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ f НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ μ



С повышением
частоты магнитные
моменты доменов
не успевают
переориентироваться
вслед за
быстроизменяющимся
магнитным полем

Виды потерь

1. Потери на гистерезис

За один цикл к единице объема:

$$P_r = \oint H dB ; \text{Дж/м}^3$$

Или к единице массы при перемагничивании
с частотой f :

$$P_r = (f/D) \oint H dB ; \text{Вт/м}^3$$

f – частота [Гц]

D – плотность вещества [кг/см³]

2. Потери на вихревые токи для листового сердечника

$$P_{\text{в}} = \frac{1,64 \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_{\text{max}}^2}{D \cdot \rho_V} \quad ; \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right]$$

d — толщина листа [м]

B_{max} — амплитуда значения в [Тл]

ρ_V — удельное объемное сопротивление [Ом·м]

ВИДЫ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ

1. ПОТЕРИ НА ГИСТЕРЕЗИЗ

$$P_{\Gamma} = f \frac{\oint H dB}{D} \text{ [Вт / кг]}$$

2. ПОТЕРИ НА ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

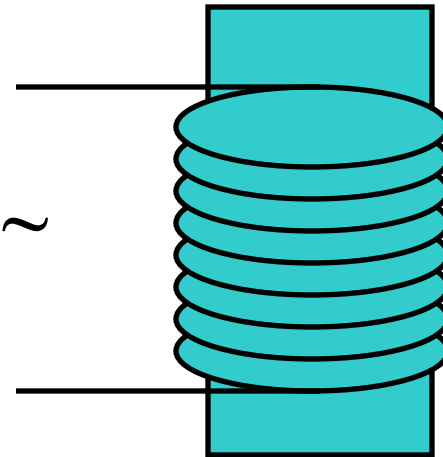
$$P_{\epsilon} = \frac{1,64 \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2}{D \cdot \rho_V}$$

3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ

МАГНИТОСТРИКЦИЯ -

**- ИЗМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ
МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Генераторы УЗ – колебаний.



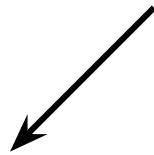
Классификация магнитных материалов:

1. **Магнитомягкие ($H_C < 4$ кА/м)** – высокая μ , малая H_C , узкая петля гистерезиса, малые потери на перемагничение.
2. **Магнитотвердые ($H_C > 4$ кА/м)** – большая B_r , широкая петля гистерезиса, большие потери на перемагничение
3. **Магнитные материалы специального назначения**

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ - вещества, основным свойством которых является сильная электропроводность

По механизму образования свободных
носителей заряда (с.н.з.)

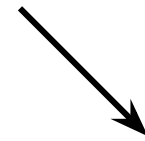
I рода



Металлы и сплавы,
электронная
электропроводность

с.н.з. — электроны

II рода

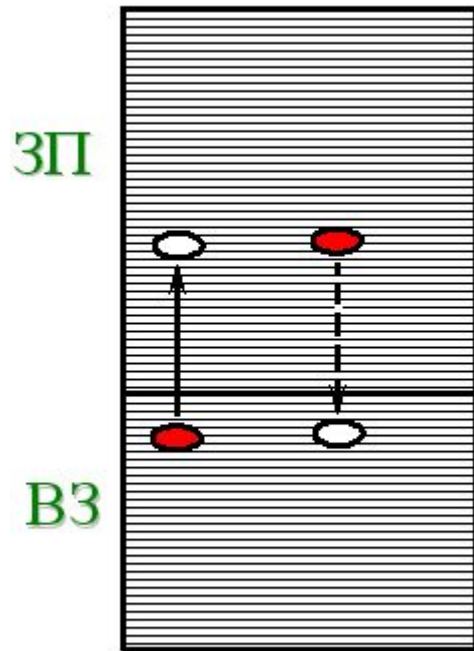


Водные растворы кислот,
солей, щелочей -
ЭЛЕКТРОЛИТЫ

с.н.з. — ионы

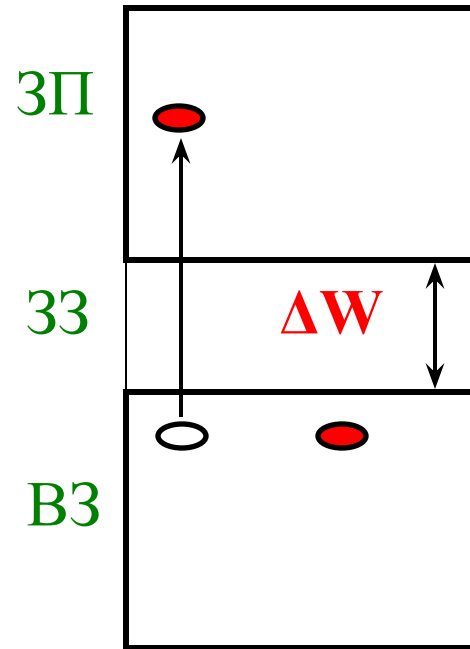
ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

проводники



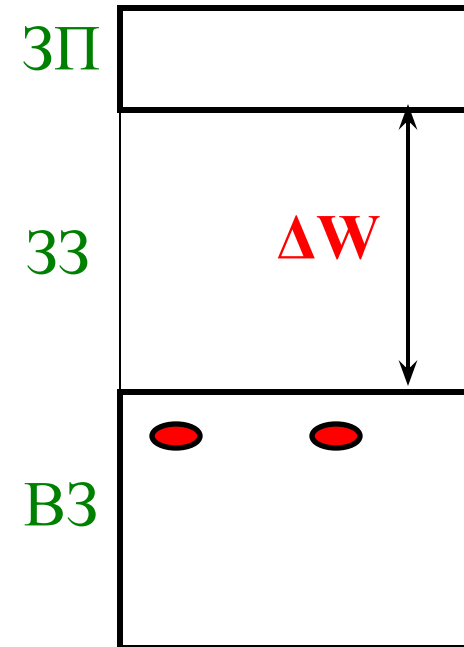
$$\Delta W = 0$$

полупроводники



$$\Delta W \text{ до } 3\text{эВ}$$

диэлектрики



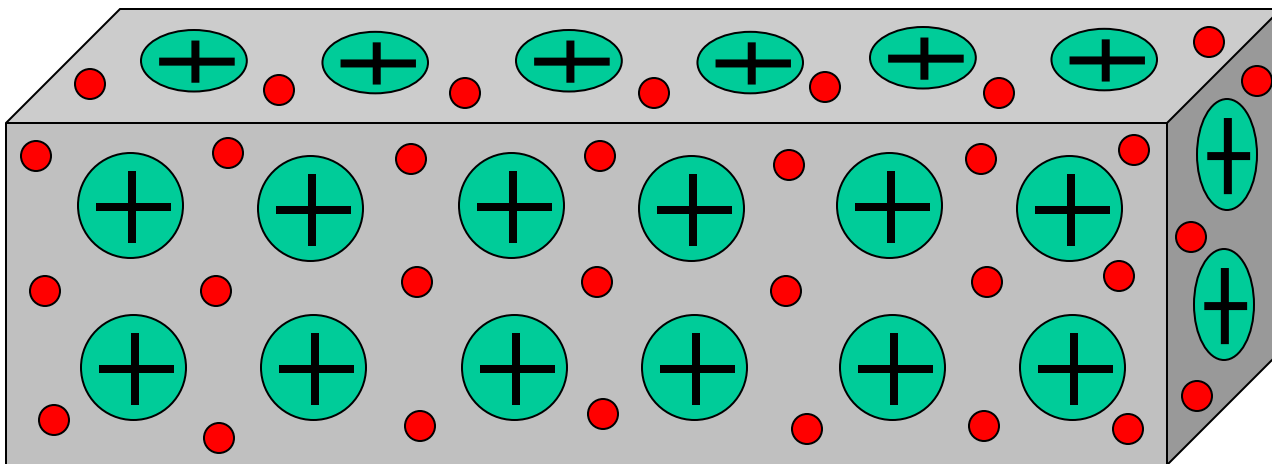
$$\Delta W \text{ выше } 3\text{эВ}$$

$$\rho \sim 10^{-6} \div 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$\rho \sim 10^5 \div 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$\rho \sim 10^{-4} \div 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ



Металлическая связь – взаимодействие между положительно заряженными ионами в узлах кристаллической решетки и коллективизированными электронами (электронным газом)

λ - длина свободного пробега с.н.з.,
определяет подвижность μ с.н.з.

Λ - это расстояние, которое проходит электрон под действием внешнего электрического поля между двумя соударениями с ионами кристаллической решетки.

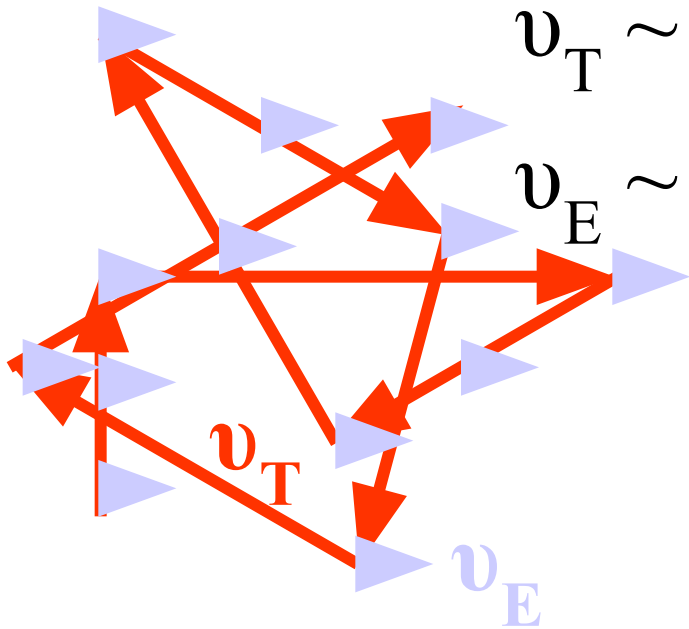
μ - показывает среднюю скорость, которую приобретает с.н.з. в единицу времени в электрическом поле $E=1\text{В/м}$

$$F = qE$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_T + \mathbf{v}_E \quad v_T \gg v_E$$

$$v_T \sim 10^5 \text{ м/с,}$$

$$v_E \sim 10^{-3} \text{ м/с при } E=1 \text{ В/м}$$



$$\mathbf{v}_E = \mu \mathbf{E}$$

μ - подвижность [$\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$]

$$\mathbf{j} = qn\mathbf{v} = qn\mu\mathbf{E}$$

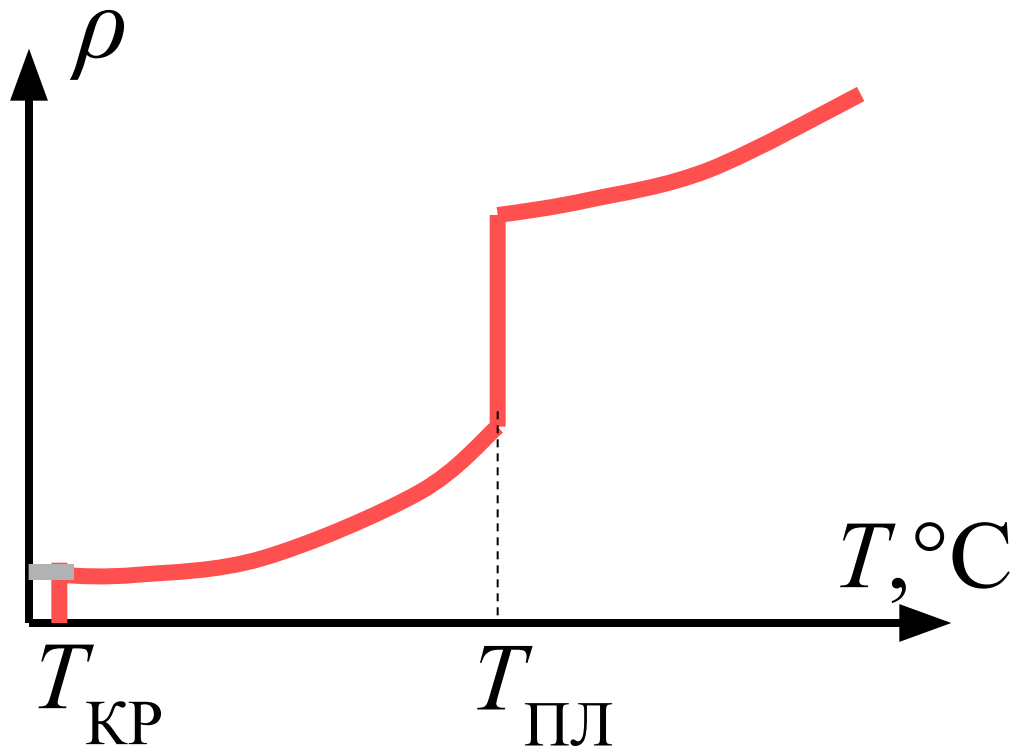
$\gamma = qn\mu$ удельная эл. проводимость
[См/м]

$$\mathbf{j} = \gamma\mathbf{E} = \mathbf{E}/\rho \quad \text{закон Ома,}$$

$\rho = 1/\gamma$ удельное эл. сопротивление
[Ом·м], $1\text{См} = 1\text{Ом}^{-1}$

$$R = \rho \cdot \ell / S \text{ [Ом]}, \quad \text{или} \quad \rho = R \cdot S / \ell$$

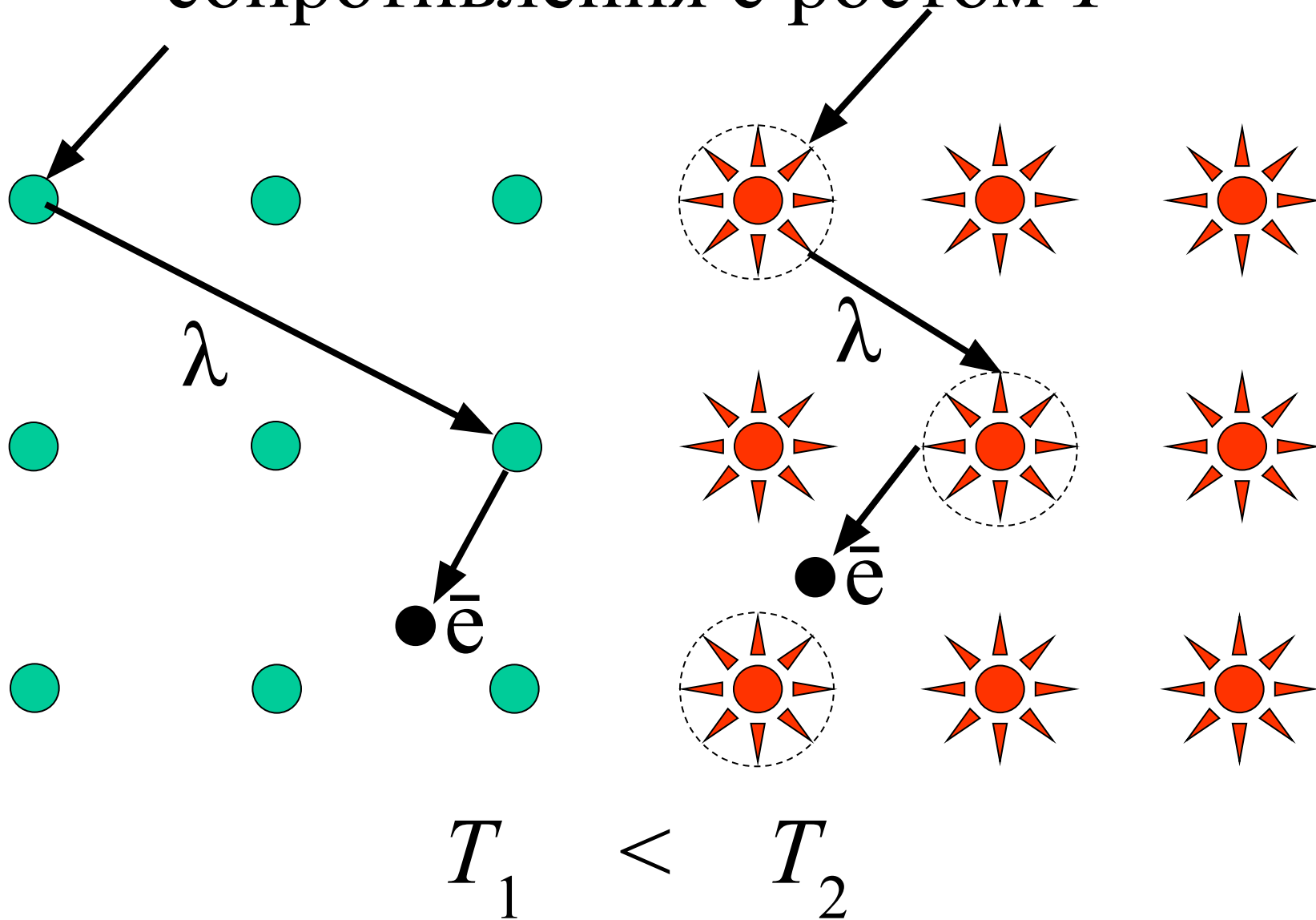
Зависимость $\rho = f(T)$ для металлов и сплавов в широком интервале температур



В металлах
концентрация
с.н.з. = const !

$$\rho = \rho_{\text{ост}} + \rho_{\text{T}}$$

Причины увеличения ρ удельного сопротивления с ростом T



Температурный коэффициент любой физической характеристики A :

$$\text{ТК}_A = \frac{1}{A} \frac{dA}{dT}$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления

$$\text{ТК}_\rho = \alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

КРИОПРОВОДИМОСТЬ

Явление сильного снижения ρ при $T < -173^{\circ} \text{C}$.

Обусловлено уменьшением рассеивания электронов за счет тепловых колебаний решетки. Сохраняется остаточный вклад в удельное сопротивление $\rho_{\text{ост}}$.

КРИОПРОВОДНИКИ - Cu, Al, Be

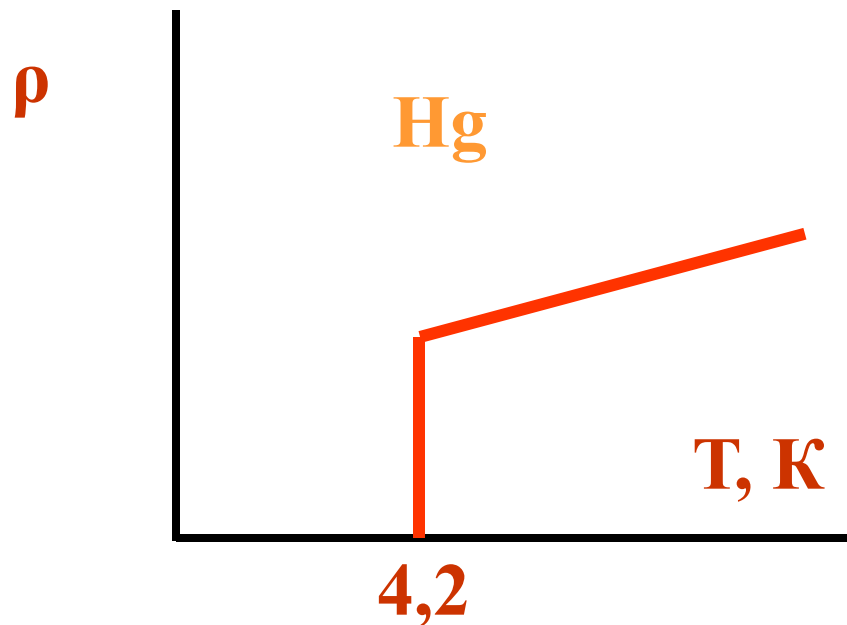
Требования к криопроводникам:

- минимальное содержание примесей;
- правильная (без дефектов) кристаллическая решетка

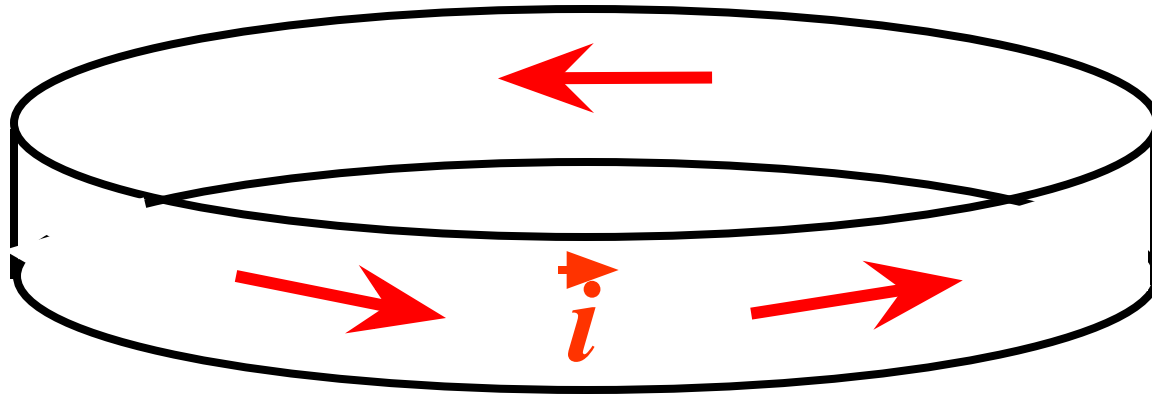
СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Явление **ИЗЧЕЗНОВЕНИЯ** ρ , т.е. появления бесконечной электропроводности при температурах близких к абсолютному нулю.

1911 год. Камерлинг - Оннес



Если в кольце из сплава Nb_3Sn путем электромагнитной индукции возбудить ток



он будет протекать примерно $5 \cdot 10^4$ лет

Это соответствует величине ρ порядка 10^{-26} Ом·м

В объеме сверхпроводника **нет
магнитного поля**

**Сильное магнитное поле разрушает
явление сверхпроводимости!!!**

**УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
СВЕРХПРОВОДИМОСТИ**

- 1. Сверхнизкие температуры $T_i < T_{кр}$**
- 2. Слабые магнитные поля $H_i < H_{кр}$**

Критические температуры $T_{\text{КР}}$ перехода
в сверхпроводящее состояние

$$Al = 1,19 \text{ } ^\circ\text{K}$$

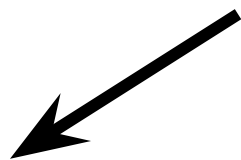
$$Cd = 0,56 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Sn = 3,722 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Zn = 0,875 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Nb_3Ge = 23,2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

СВЕРХПРОВОДНИКИ

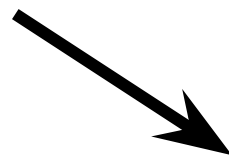


I рода (мягкие)

резкий переход в
сверхпроводящее
состояние при одном
фиксированном значении

$H_{кр}$.

Полное вытеснение
магнитного поля из
объема сверхпроводника

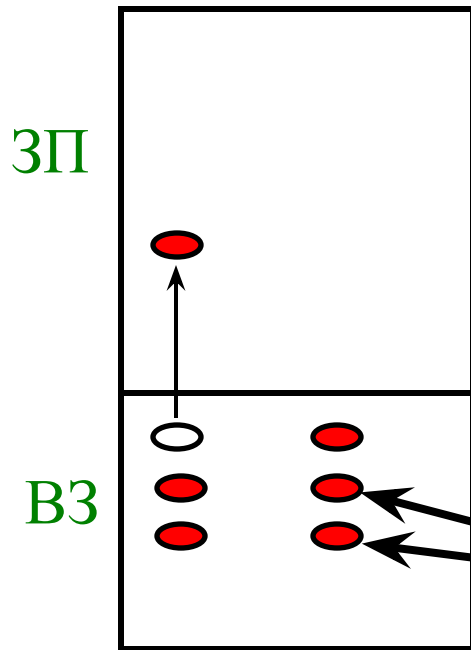


II рода (твёрдые)

Характеризуются при переходе в
сверхпроводящее состояние
двумя значениями $H_{кр1}$ и $H_{кр2}$.
Между $H_{кр1}$ и $H_{кр2}$ наблюдается
смешанное состояние
проводимости и
сверхпроводимости, а также
частичное вытеснение
магнитного поля из объема
сверхпроводника

ПРИРОДА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Согласно теориям Л.Купера, Д.Бардина, Дж.Шриффера



$$\Delta W = 0$$

При $T \approx 0$ К меняется характер взаимодействия электронов между собой и атомной решеткой т.о., что становится возможным притягивание электронов с одинаковыми спинами и образование т.н. электронных (куперовских) пар.

Куперовские пары образуются из электронов, расположенных ниже поверхности Ферми

Эти пары в состоянии сверхпроводимости обладают большой энергией связи, **перемещение электронов происходит без взаимодействия с атомами кристаллической решеткой!!!**

ВТСП – высокотемпературная сверхпроводимость



**В настоящее время известно 27 простых и более
1000 сложных сверхпроводников.**

**Широко используется керамика на основе
висмута.**

**Применение: создание сверхсильных магнитных
полей, обмоток ЭМ с очень высоким КПД, кабели
для мощных линий электропередач.**

ВЛИЯНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

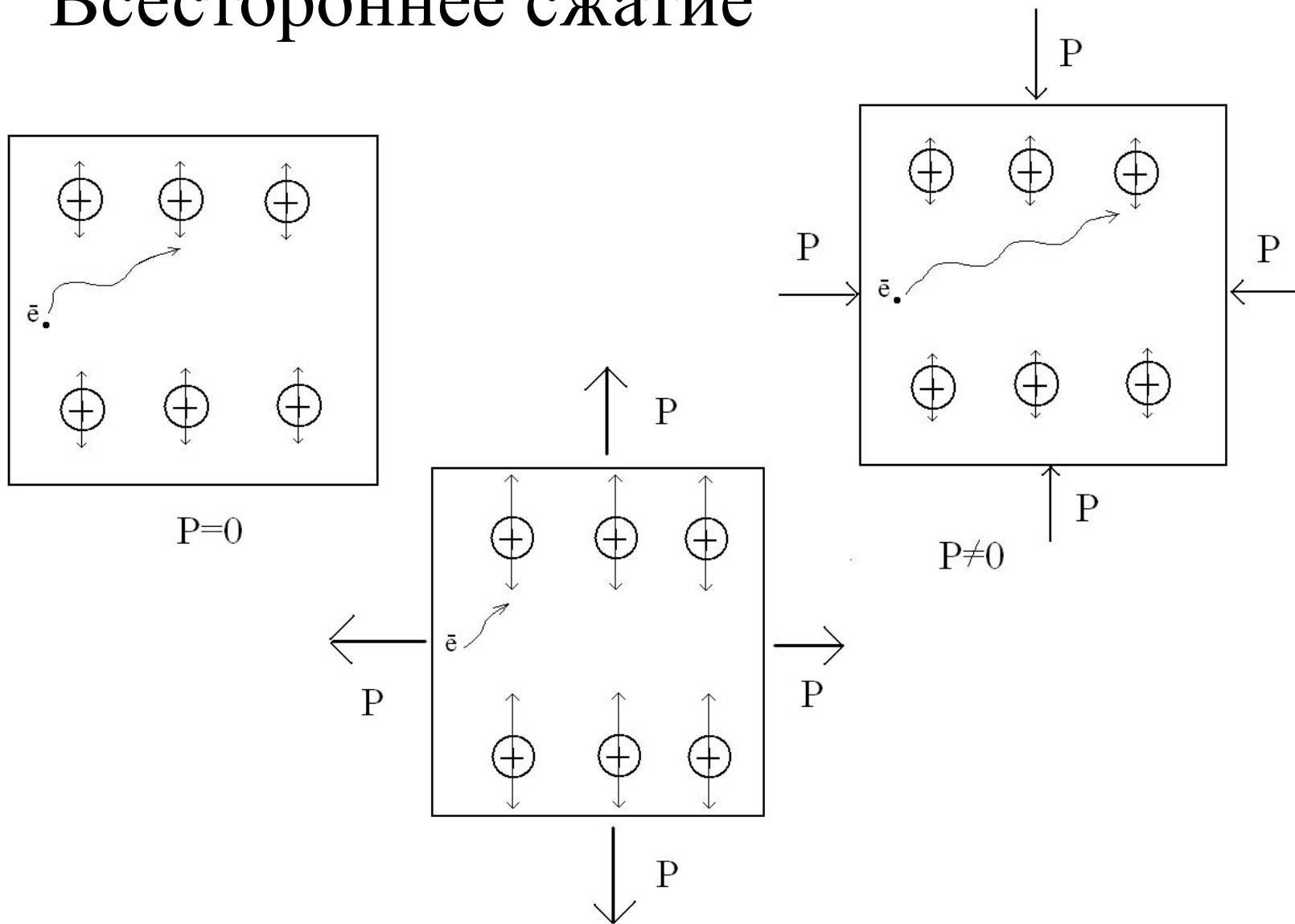
$$\rho = \rho_0 [1 \pm S \cdot \sigma]$$

«-» сжатие
«+» растяжение

$S = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\sigma}$ – коэффициент удельного сопротивления по давлению

Изменение ρ обусловлено изменением межатомного расстояния и подвижности с.н.з.

Всестороннее сжатие (релаксация)



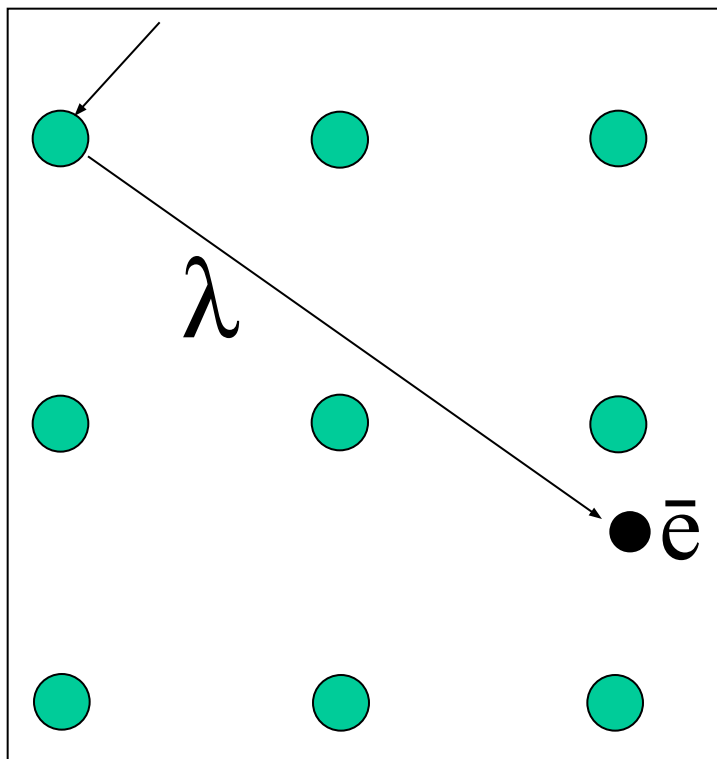
УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ

Значительное увеличение ρ наблюдается при сплавлении двух металлов при образовании общей кристаллической решетки, когда атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого – т.н. **твердые растворы**

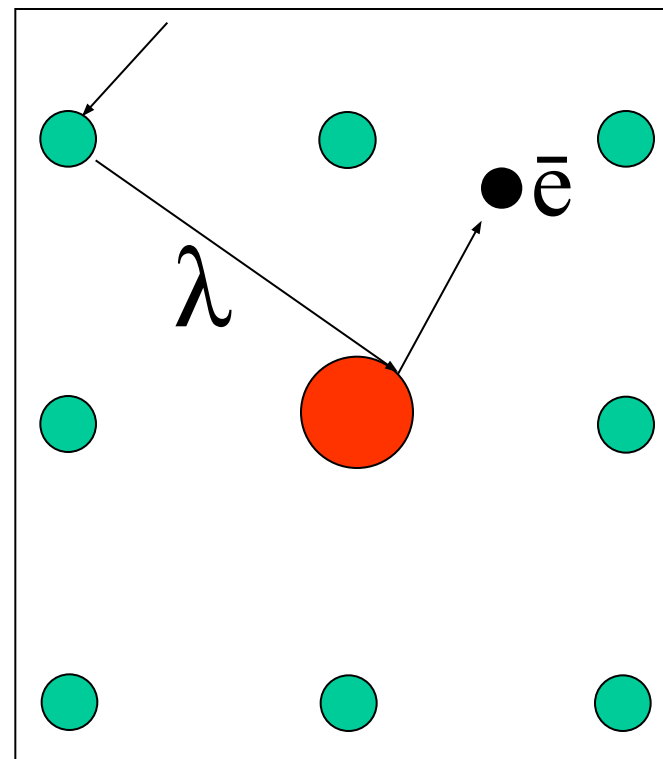
Происходит снижение подвижности с.н.з.

В проводниковых материалах любая примесь резко снижает электропроводность!!!

ρ сплавов как правило выше, чем
 ρ чистых металлов



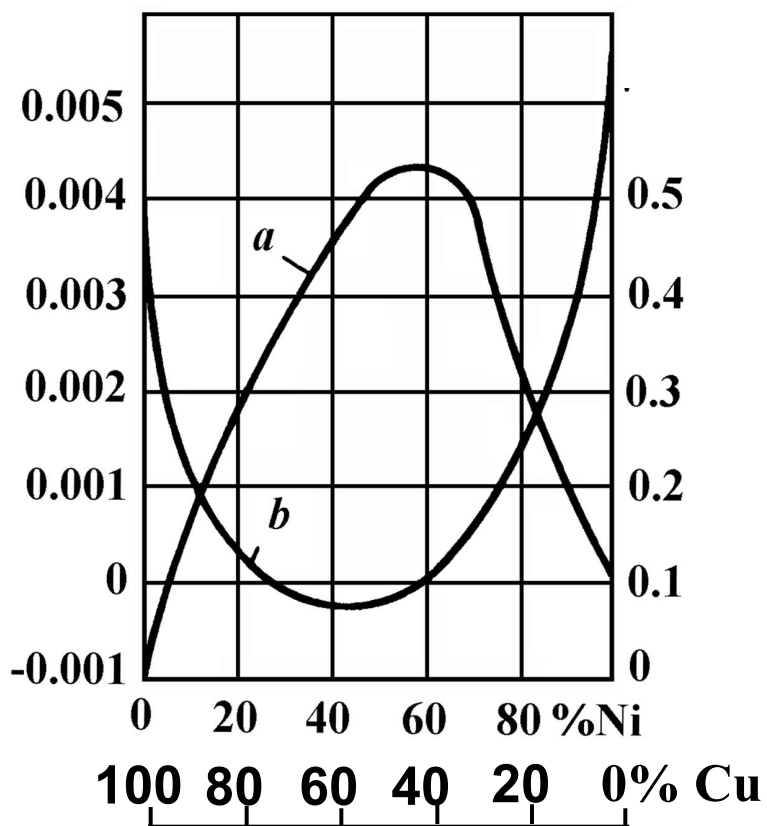
Чистый металл



Сплав

Влияние концентрации на удельное сопротивление сплава $NiCu$

$TK\rho, K^{-1}$ $\rho, \text{мкОм}\cdot\text{м}$

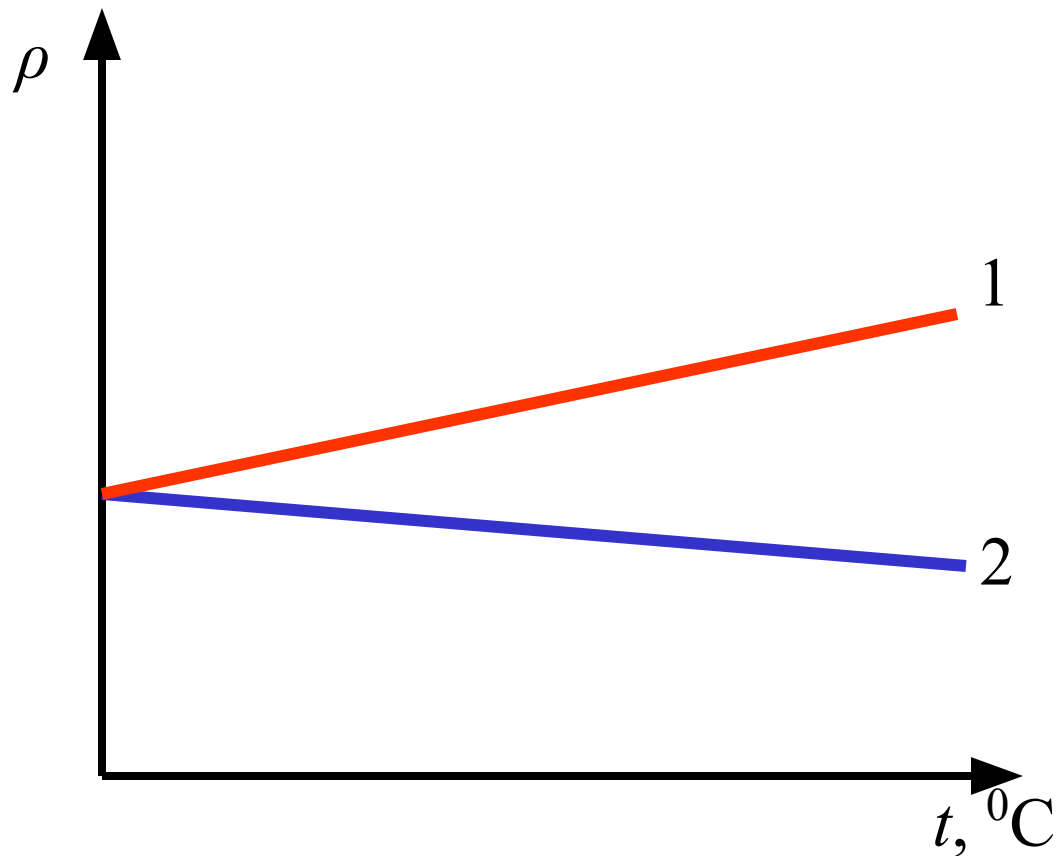


a – зависимость ρ

b – зависимость $TK\rho$

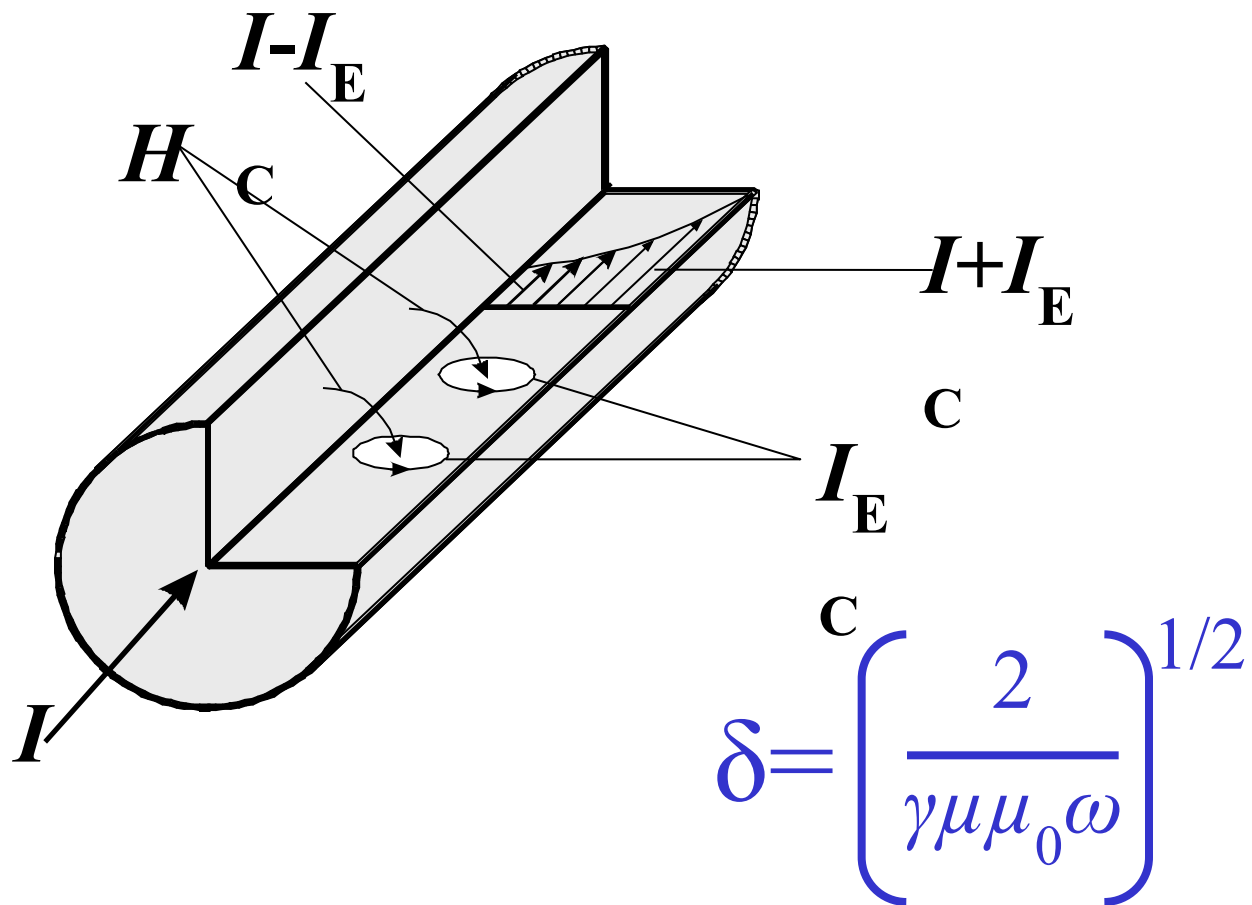
от концентрации

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ



В РЯДЕ СЛУЧАЕВ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ У СПЛАВОВ **МОЖЕТ УВЕЛИЧИВАТЬСЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ С.Н.З.**, ЧТО КОМПЕНСИРУЕТ ПОТЕРЮ ПОДВИЖНОСТИ, ИНОГДА ПРИВОДЯ К ПРЕИМУЩЕСТВЕННОМУ РОСТУ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ (кривая 2)

Скин-эффект



ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

При соприкосновении двух различных металлов A и B , между ними возникает *контактная разность потенциалов*, обусловленная различием значений работы выхода электронов и концентрации свободных электронов соприкасающихся металлов



термоЭДС

$$U = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B}$$

n_A и n_B – концентрации свободных электронов в металлах A и B

$$K = (k/e) \ln(n_A/n_B), \quad U = K \Delta T$$

K – коэффициент термоЭДС

Это явление используется при изготовлении термопар (для измерения температур), термогенераторов и термохолодильников

Конструкции термопар

- | | |
|-------------------------|----------------|
| 1. Платина-Платинородий | до 1600 °С |
| 2. Хромель-Алюмель | до 1000 °С |
| 3. Железо-Константан | |
| Железо-Копель | до 600 °С |
| Хромаль-Копель | |
| 4. Медь-Константан | до 350 °С |
| Медь-Копель | |
| 5. Железо-Золото | до (10÷100) °К |

- Копель ($44\%Ni+56\%Cu$)
- Алюмель ($95\%Ni+Al; Si; Mn$)
- Хромель ($90\%Ni+10\%Cr$)
- Платинородий ($90\%Pt+10\%Rh$)

Таблица значений K [мкВ/град] относительно Pt при 0°C

Bi	$- 65.0$	$(Fe\text{--}конст.) =$
Fe	$+ 16.0$	$= (Fe\text{--}Pt) - (конст.\text{--}Pt) =$
Cu	$+7.4$	$= +16,0 - (-34,4) = 50,4$
Ni	$- 16.4$	Знак показывает направление термотока: в нагретом спае ток течет от меньшего K к большему (напр. в Fe -конст. от конст. к Fe)
Sb	$+ 47.0$	
Константан $Cu(60\%)Ni(40\%)$	$- 34.4$	

В полупроводниках термоЭДС значительно сильнее, так как концентрация с.н.з. сильнее зависит от температуры.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Тепло в металлах передается в основном теми же свободными электронами, которые определяют электропроводность

Закон ВИДЕМАНА-ФРАНЦА-ЛОРЕНЦА

$$\frac{\lambda}{\gamma} = L_0 \cdot T$$

где T - абсолютная температура, K ;
 L_0 - число Лоренца, равное

$$L_0 = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k}{e^2}$$

k – постоянная Больцмана;
 e – заряд электрона.

Механические свойства проводников

- предел прочности при растяжении σ_p ;
- относительное удлинение при растяжении;
- твердость;
- хрупкость.

Температурный коэффициент линейного расширения

$$TK_{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \frac{d\Delta}{dT} \quad [K^{-1}]$$

Классификация проводников по области применения

1. Металлы и сплавы с высокой удельной электропроводностью

Cu $\rho=0.01724$ мкОм·м

Бронзы *Cu*+легирующая примесь
(до 10% *Sn*, *Si*, *P*, *Be*, *Cr*, *Mg*, *Ca* и др.)

Латуни сплав *Cu* с *Zn*

Al $\rho=0,026$ мкОм·м
легче *Cu* в 3,5 раза

Au $\rho=0.024$ мкОм·м

Ag $\rho=0.016$ мкОм·м

Pt $\rho=0.105$ мкОм·м

Fe (*сталь*) $\rho=0.098$ мкОм·м

Pd $\rho=0.110$ мкОм·м

2. Металлы и сплавы с высоким удельным сопротивлением

Манганин: $Cu-85\%$; $Mn-12\%$; $Ni-3\%$

$$\rho = 0,42 \div 0,48 \text{ мкОм}\cdot\text{м} \quad \text{TK}\rho = (6 \div 50) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

Константан: $Cu-60\%$; $Ni-40\%$

$$\rho = 0,48 \div 0,52 \text{ Мк}\cdot\text{Ом}\cdot\text{м} \quad \text{TK}\rho = (5 \div 25) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

Нихромы: $\rho = 1,0 \div 1,5 \text{ мк}\cdot\text{Ом}\cdot\text{м}$

$(60-80)\% Ni + (15-20)\% Cr + Fe$ (до 10%)

Фехрали $\rho = 1,1 \div 1,5 \text{ Мк}\cdot\text{Ом}\cdot\text{м}$

$(20 \div 40)\% Fe + (60 \div 70)\% Cr + (5 \div 10)\% Al$

Хромали $\rho = 1,1 \div 1,5 \text{ Мк}\cdot\text{Ом}\cdot\text{м}$

$(5 \div 10)\% Al$, ост. Cr

3. Металлы и сплавы специального назначения

Материалы для термопар

Тензометрические сплавы

Контактные материалы

скользящие, разрывные контакты

Припои

мягкие, низкотемпературные, твёрдые

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
МАТЕРИАЛЫ -
вещества, основным свойством которых
является сильная зависимость
электропроводности от внешних факторов**

По типу электропроводности

Собственные

с.н.з. – электроны и дырки

12 простых веществ

B, C, Si, P, S, Ge, As, Sn (серое олово), Sb, Te, Y, Se.

Примесные

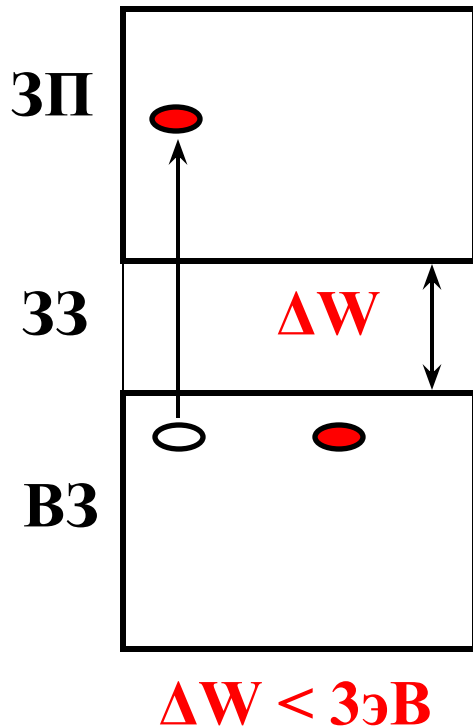
Донорные

с.н.з. –
электроны

Акцепторные

с.н.з. –дырки

полупроводники



$$\rho_V \sim 10^{-4} \div 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$A^I B^{VII}$ (AgCl, CaBr и др.),

$A^{II} B^{VI}$ (CdS, CdSe и др.),

$A^{III} B^V$ (GaP, GaAs и др.),

$A^{IV} B^{IV}$ (PbS, GeO₂ и др.),

$A^I B^{VI}$ (CuS и др.)

$A^I B^{VII} C^{VI}$ (CuAlS₂, CuJnS₂ и др.);

$A^I B^V C^{VI}$ (CuSbS₂, CaAsS₂ и др.);

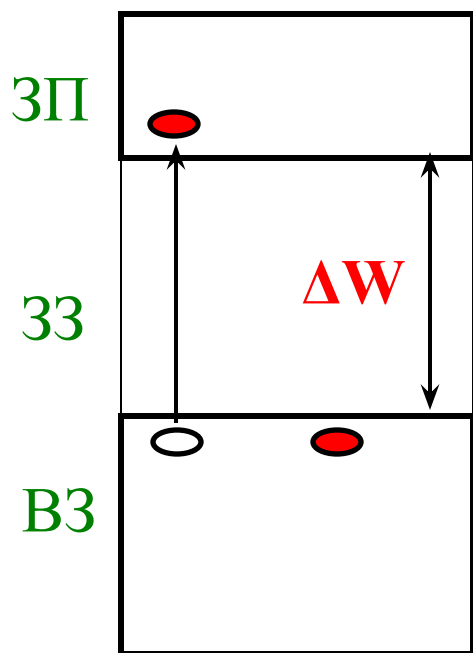
$A^I B^{VIII} C^{VI}$ (CuFeSe₂ и др.);

$A^{II} B^{IV} C^V$ (ZnSiAs₂, ZnGeAs и др.);

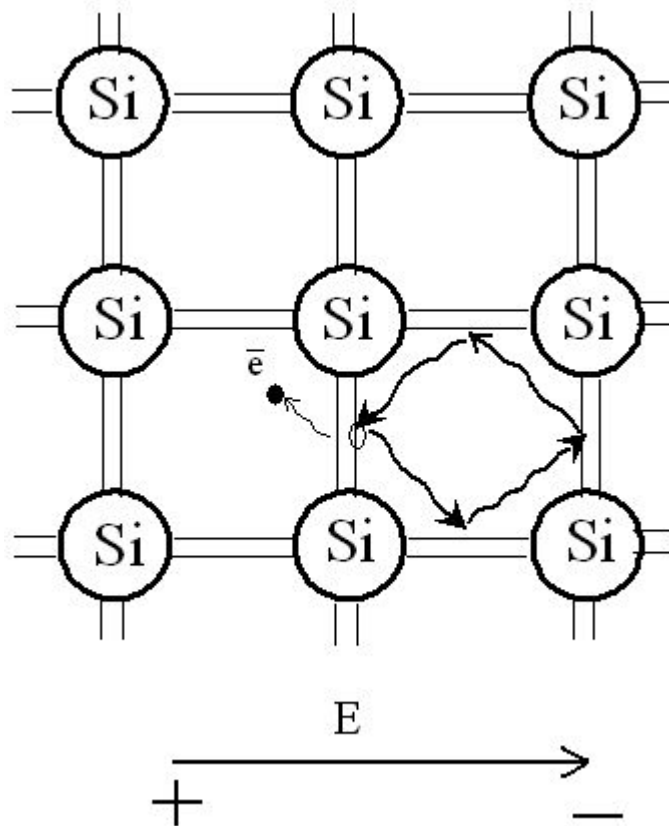
$A^{IV} B^V C^{VI}$

Энергия активации (ΔW) – минимальная энергия,
необходимая для перевода электрона в зону
проводимости

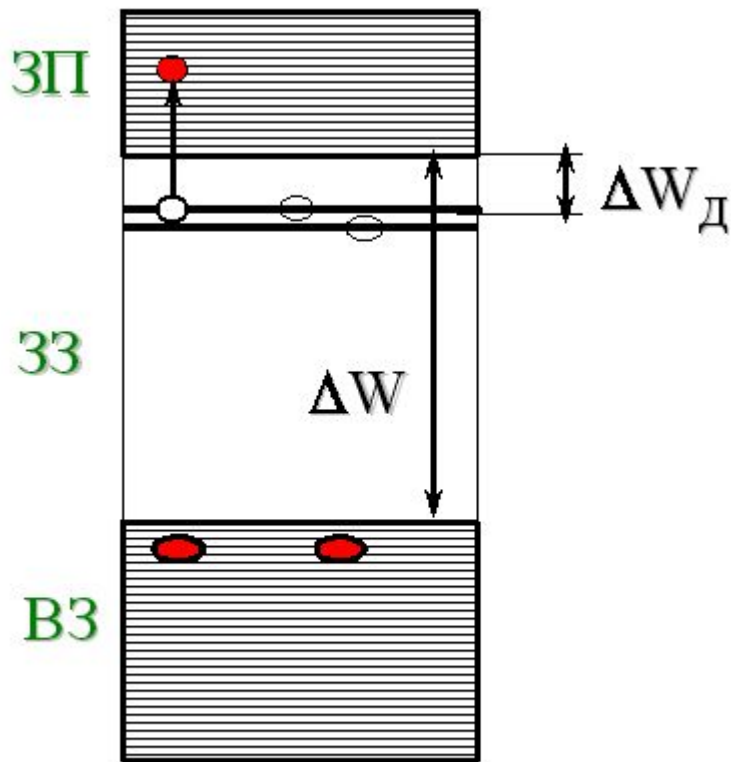
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СОБСТВЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



$$\Delta W < 3\varepsilon_B$$



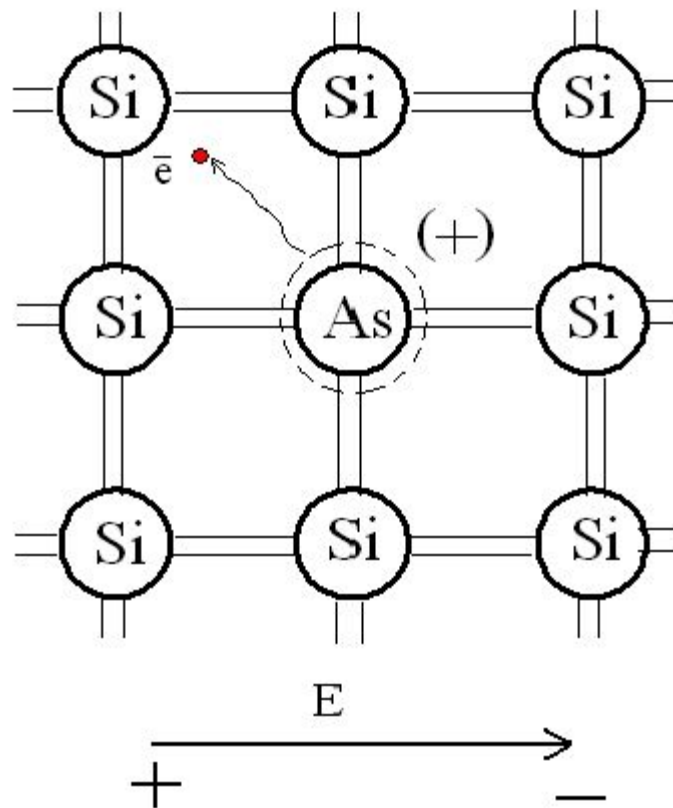
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДОНОРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



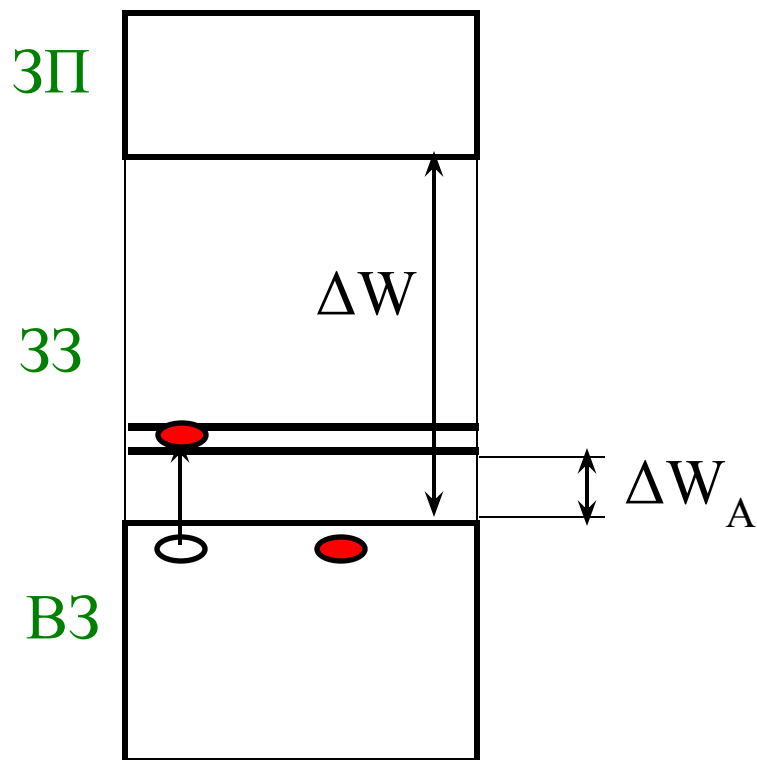
ΔW до 3эВ

$\Delta W_д$ МНОГО МЕНЬШЕ ΔW

$\Delta W_д \sim 0,01$ эВ



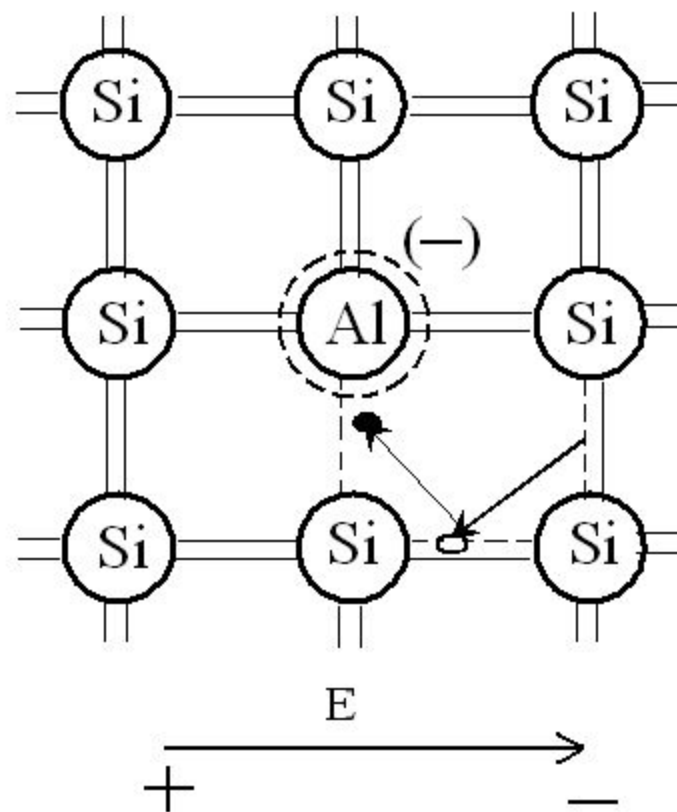
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АКЦЕПТОРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



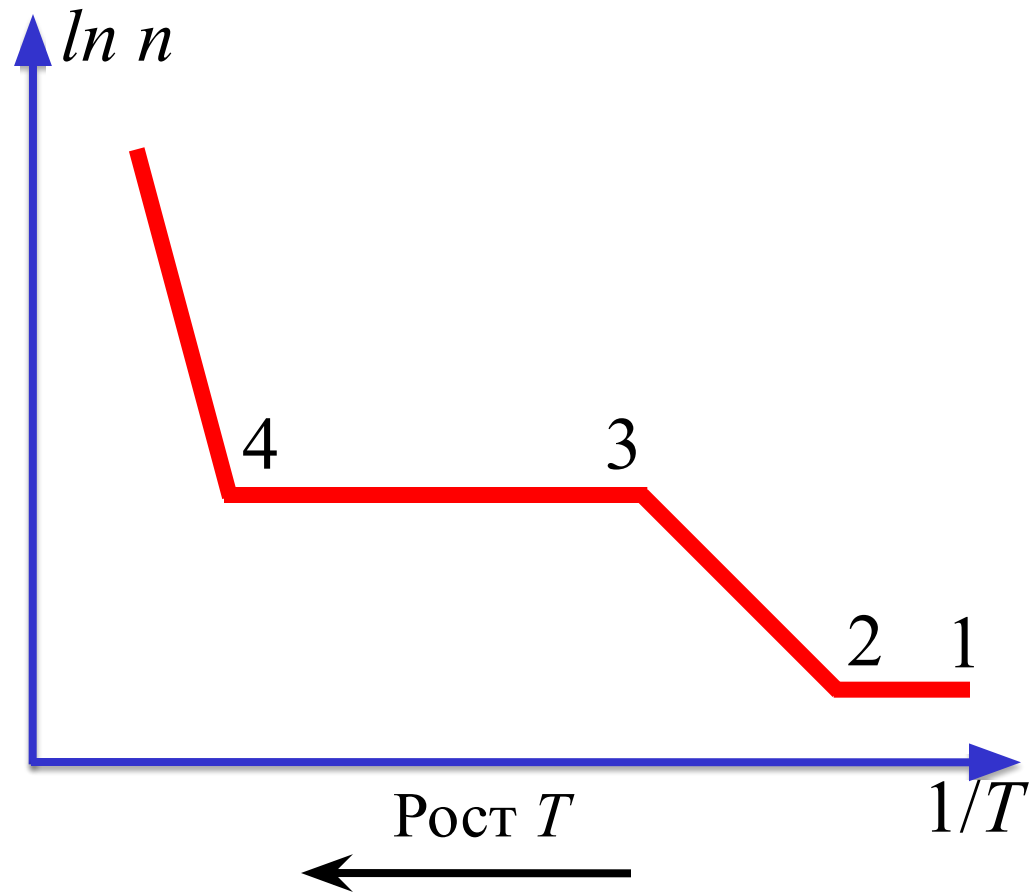
ΔW до 3эВ

ΔW_A МНОГО МЕНЬШЕ ΔW

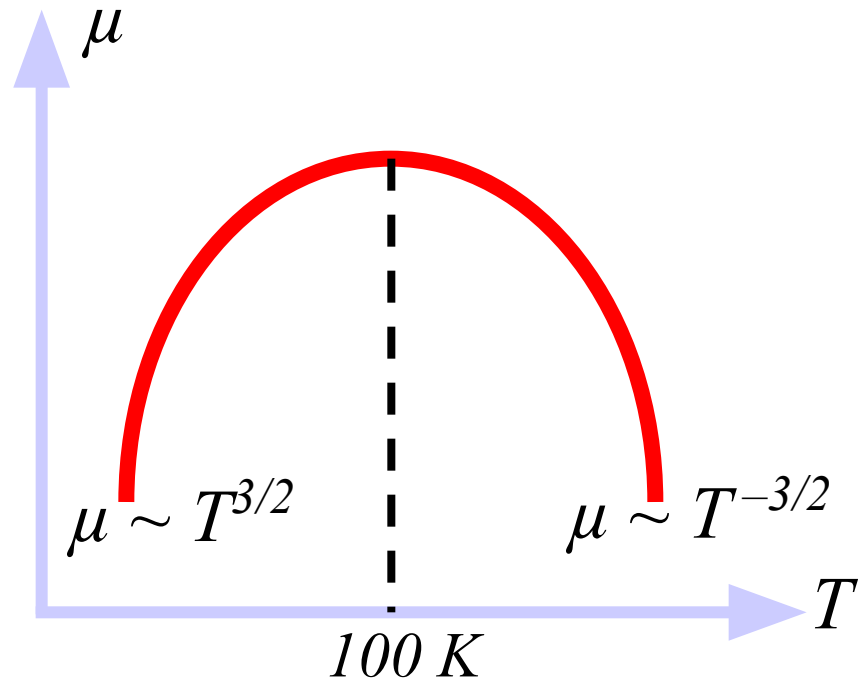
$\Delta W_A \sim 0,01$ эВ



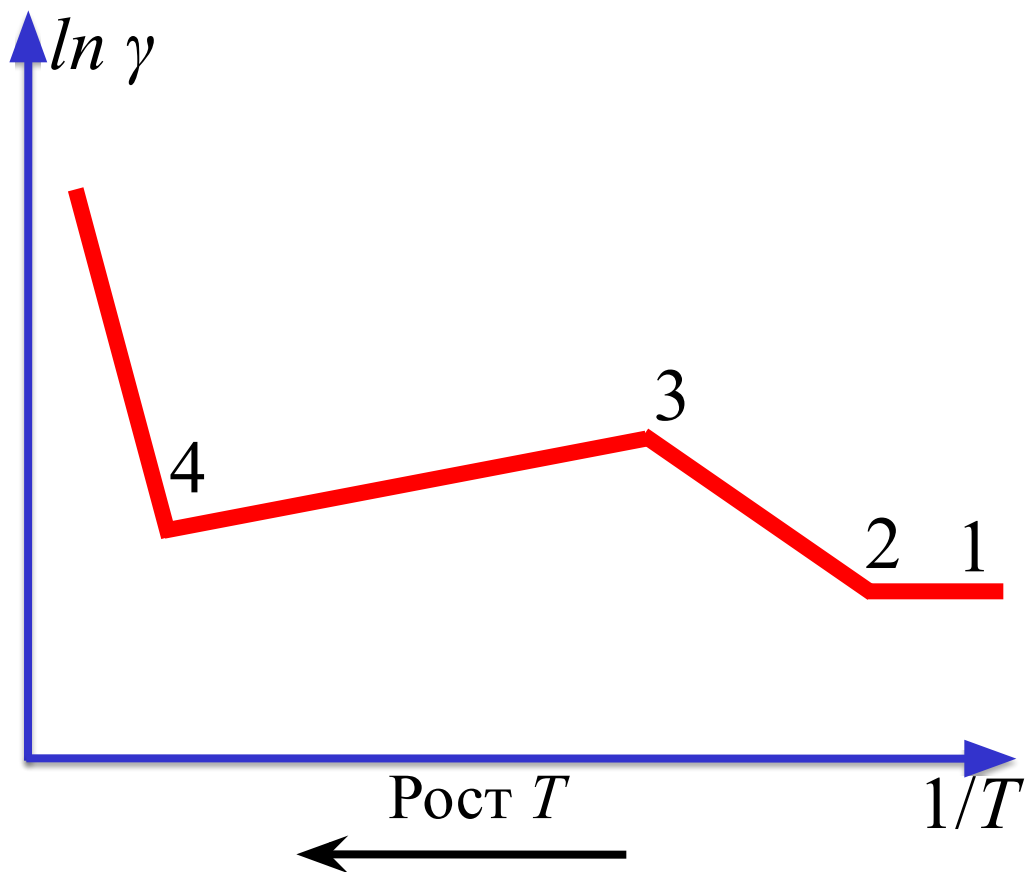
Температурная зависимость концентрации n с.н.з. в примесном полупроводнике



Температурная зависимость подвижности μ с.н.з. в полупроводниках.



ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ γ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



$$\gamma = n e \mu_n + p e \mu_p \quad \text{и} \quad n = A e^{-\Delta E / 2kT} \quad \Rightarrow$$

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\Delta E / 2kT} \quad \text{и} \quad R_T = R_0 e^{-B/T}, \quad \text{где}$$

$$B = \Delta E / 2k$$

B – коэфф. температурной чувствительности.

Температурный коэффициент удельного сопротивления:

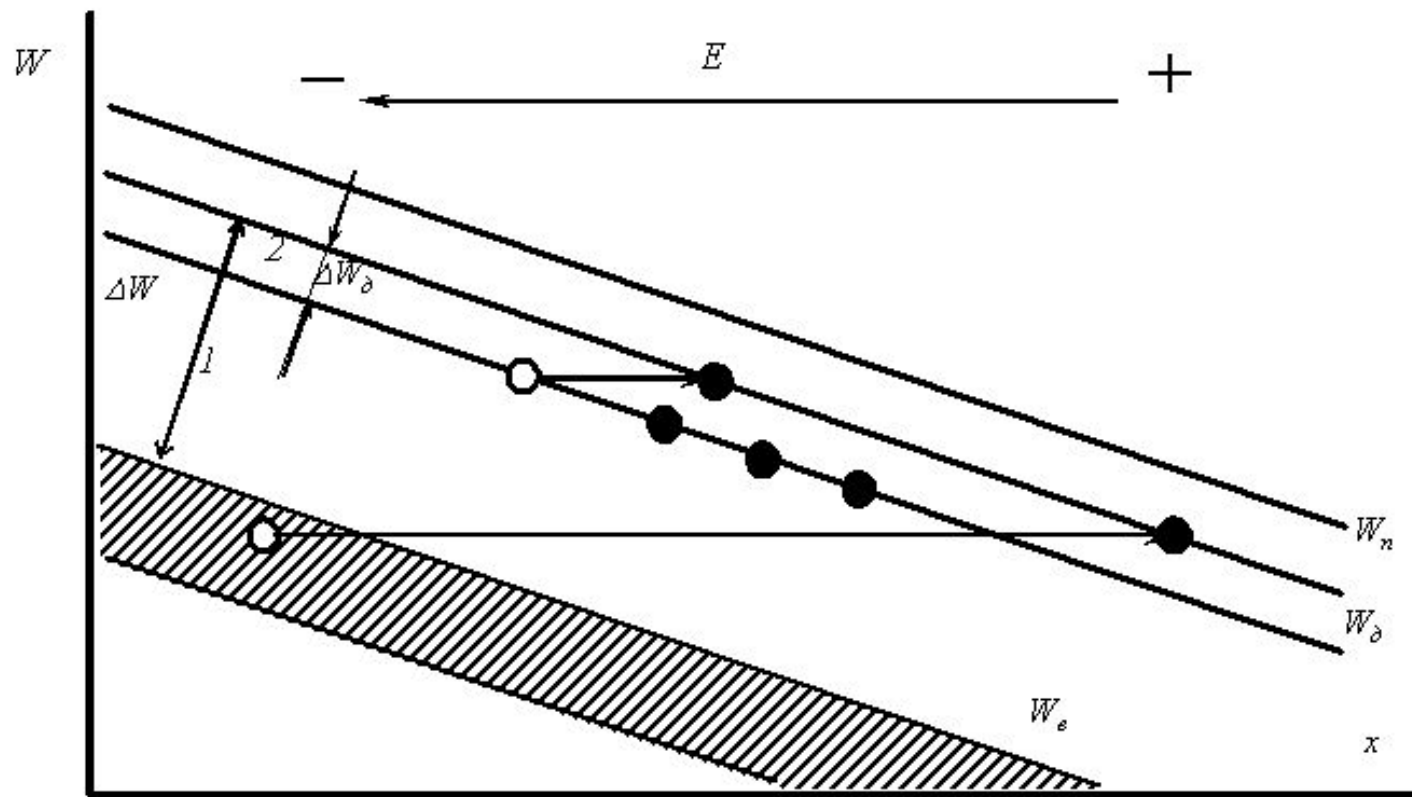
$$\text{TK}_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = -B/T^2$$

ТЕРМОРЕЗИСТОР – полупроводниковый прибор, действие которого основано на зависимости электрического сопротивления от температуры

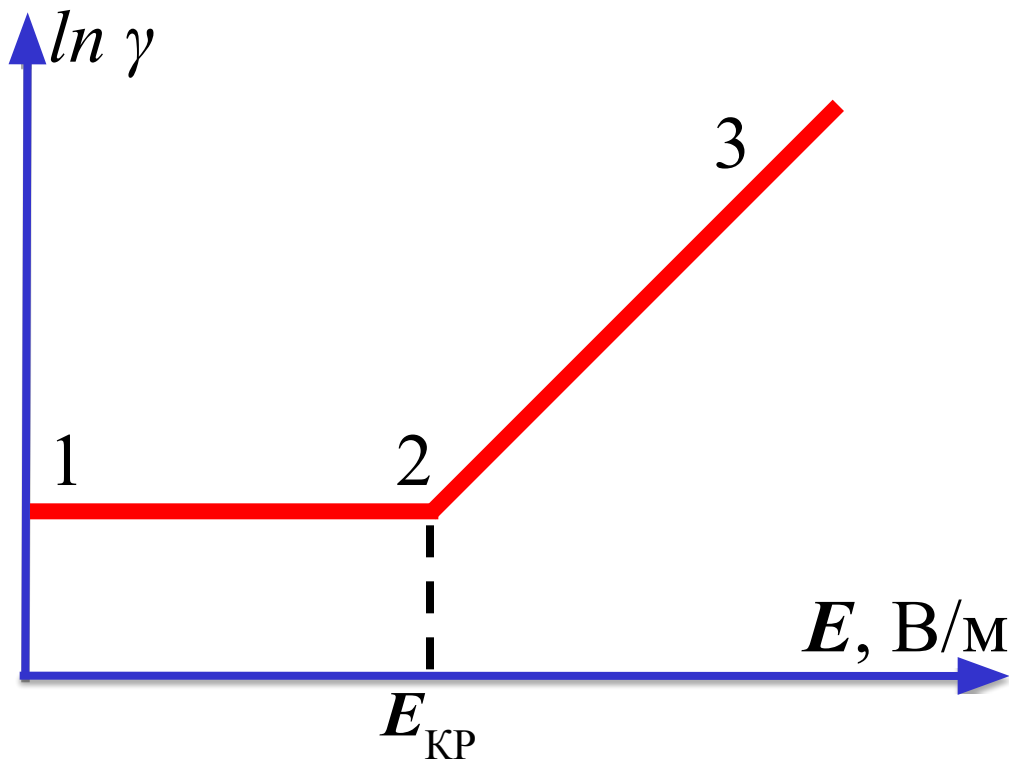
ТЕРМОРЕЗИСТОРЫ:

- 1. Кобальто-марганцевые**
- 2. Медно-марганцевые**
- 3. Медно-кобальто-марганцевые**

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ



$E_{кр}$ – критическая напряженность электрического поля: минимальная напряженность при которой начинается сильная зависимость концентрации и подвижности с.н.з. от E . Закон Френкеля:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta \sqrt{E}) \quad ; \quad R = R_0 \exp(-\beta \sqrt{E})$$

Полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании зависимости электропроводности (сопротивления) n/n от напряженности электрического поля называется

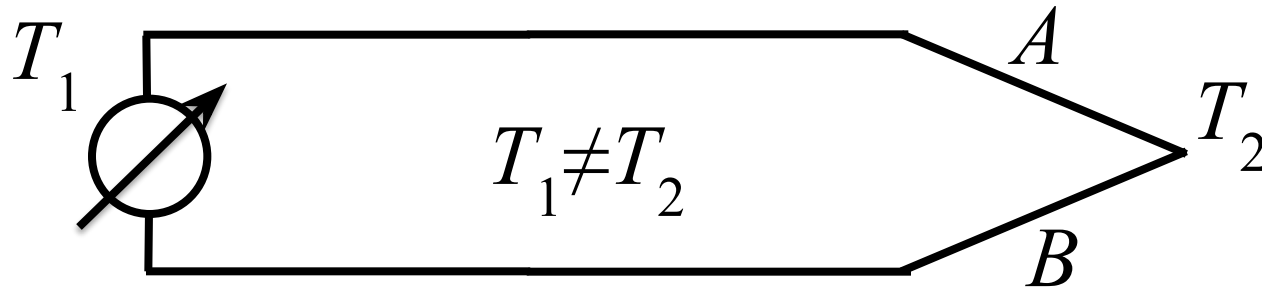
ВАРИСТОРОМ

В качестве материалов для изготовления варисторов используют:

- а) карбид кремния (СН1)
- б) селен (СН2)

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.



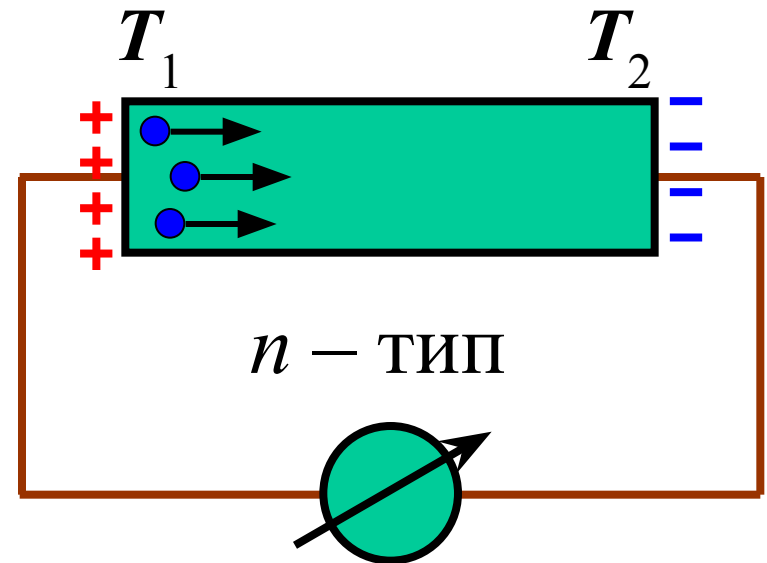
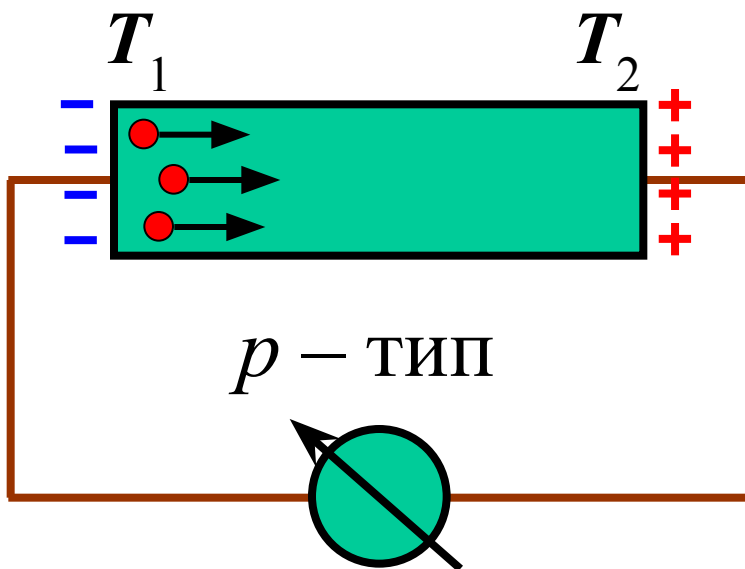
Эффект Зеебека: если в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных полупроводников, на спаях создана разность температур $\Delta T \neq 0$, то в цепи возникает термоЭДС:

$$U_T = \alpha \cdot \Delta T$$

α – коэффициент термоЭДС, который зависит от материалов термопары и интервала температур

Определение типа с.н.з. с помощью эффекта Зеебека

$$T_1 > T_2$$



Эффект Пельтье: при прохождении тока через контакт двух последовательно соединенных разнородных полупроводников, место соединения нагревается или охлаждается в зависимости от направления тока.

Количество теплоты: $Q_{\Pi} = \pm \Pi \cdot I \cdot t$

Π – коэффициент Пельтье

I – величина тока, протекающего через контакт

t – время прохождения тока

Томсон установил связь: $\alpha = \Pi/T$

Эффект Томсона: при прохождении тока через полупроводник, вдоль которого есть градиент температуры, в дополнении к теплоте Джоуля, в зависимости от направления тока, выделяется или поглощается некоторое количество тепла.

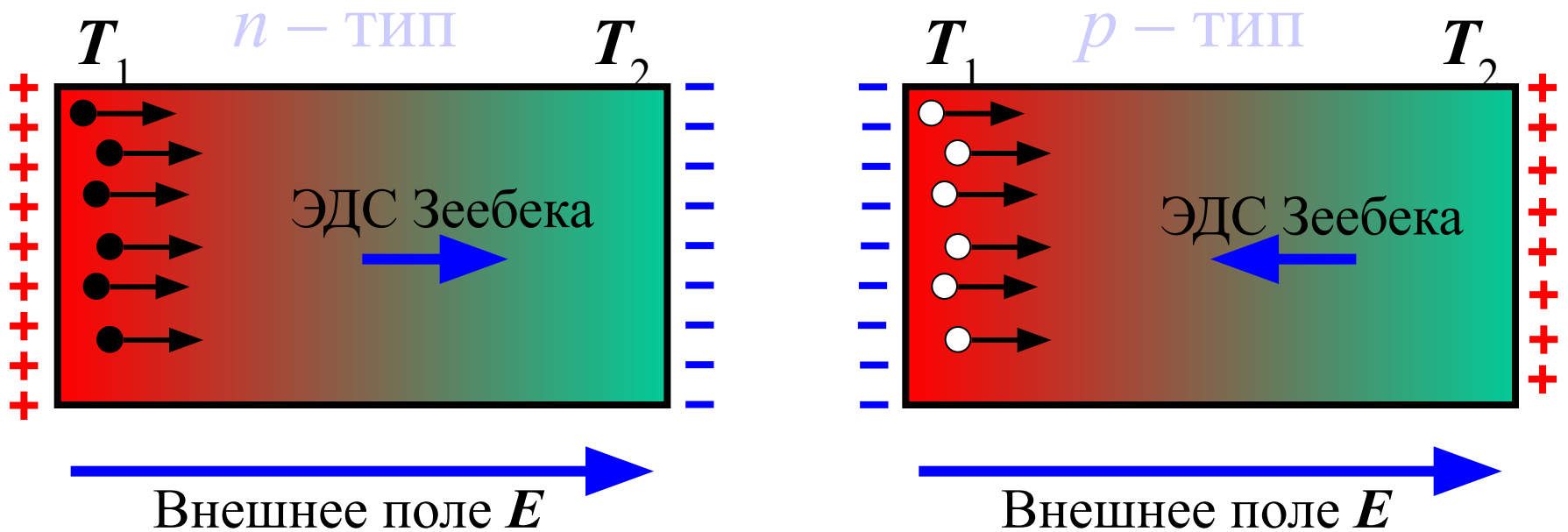
Теплота Томсона: $Q_T = \tau \cdot \Delta T \cdot I \cdot t$

τ — коэффициент Томсона

Между всеми термоэлектрическими явлениями существует связь.

$$\alpha = d\Pi/dT + (\tau_1 - \tau_2)$$

Механизм возникновения эффекта Томсона. $T_1 > T_2$



Гальваномагнитный эффект

Холла

Если пластину полупроводника, вдоль которой течёт электрический ток I , поместить в магнитное поле B , направленное перпендикулярно направлению тока, то в полупроводнике возникнет поперечное электрическое поле E , направленное перпендикулярно току и магнитному полю.

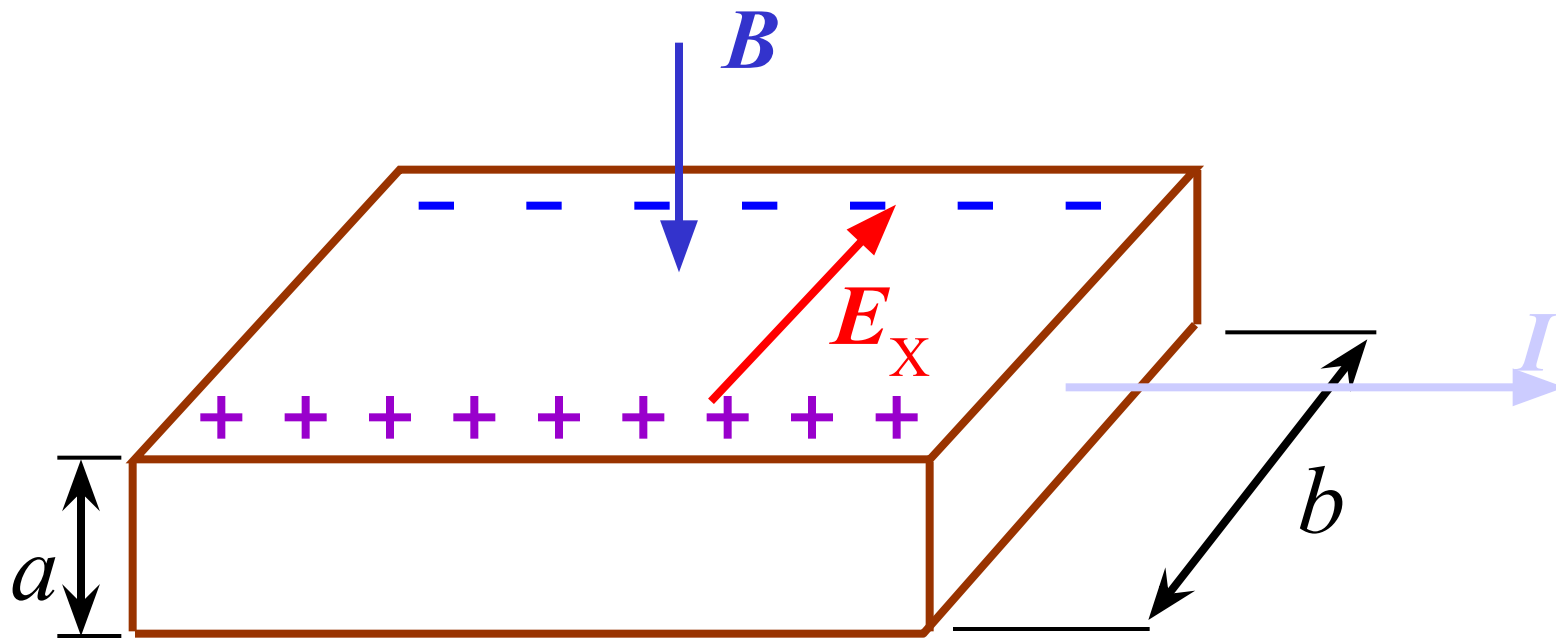


Схема возникновения ЭДС Холла U_x

$$U_x = R_x \frac{I \cdot H}{a} [B]$$

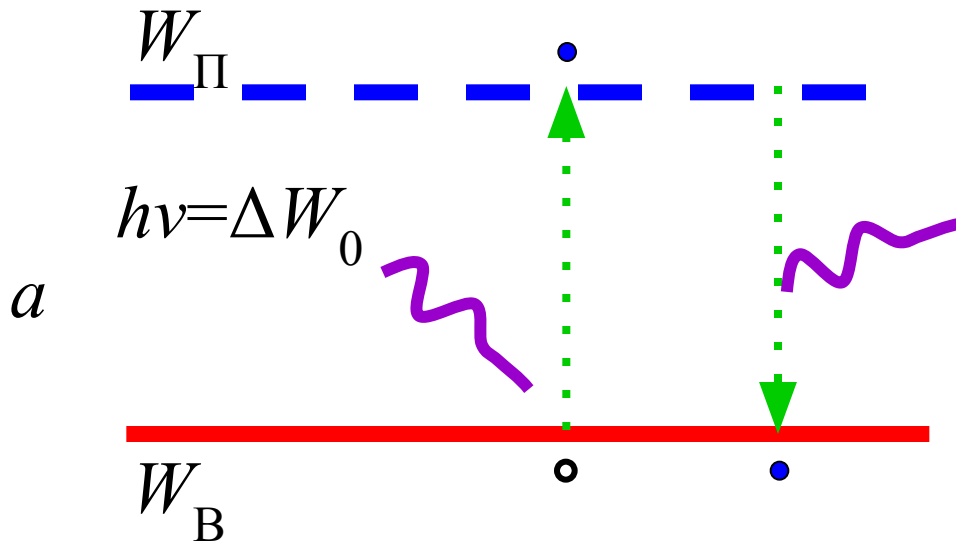
Для полупроводника n -типа: $R_X = \frac{-1}{en}$

Для полупроводника p -типа: $R_X = \frac{1}{ep}$

Для собственного
полупроводника:

$$R_X = \frac{1}{en} \cdot \frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n}$$

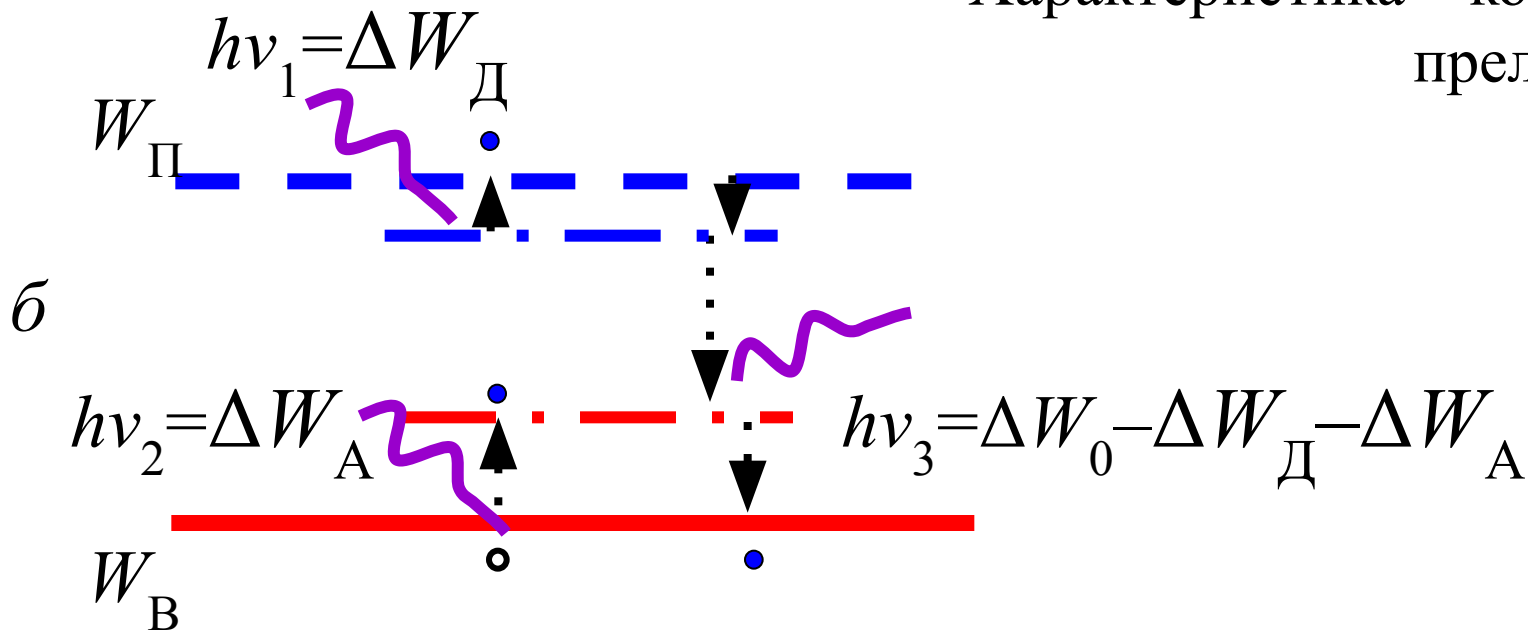
Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках



Оптика:

преломление, отражение, рассеяние.

Характеристика – коэффициент преломления n .



Фотоэлектрические явления:

- эмиссия электронов с поверхности,
- генерация свободных электронов и дырок,
- фотолюминесценция,
- нагревание,
- образование экситонов, то есть связанных электрически нейтральных пар электрон-дырка

Фотоэлектрические явления происходят в результате поглощения энергии фотонов полупроводником.

Поглощение света полупроводниками.

Закон *Бугера-Ламберта*:

$$I = I_0(1 - R)\exp(-\alpha x) ,$$

I_0 – интенсивность падающего монохроматического излучения;

I – интенсивность прошедшего (или отраженного) излучения;

R – коэффициент отражения;

x – текущая координата от поверхности вдоль луча;

α – толщина образца, на которой интенсивность уменьшается в e раз (коэффициент поглощения).

Зависимости $\alpha(\lambda)$ (или $\alpha(h\nu)$) называют *спектром поглощения*, а $R(\lambda)$ (или $R(h\nu)$) – *спектром отражения*.

Механизмы поглощения света:

- *собственное поглощение*: переходы из валентной зоны в зону проводимости;
- *экситонное поглощение*: переходы с участием экситонных состояний;
- *поглощение свободными носителями заряда*: переходы электронов и дырок внутри разрешённых зон;
- *примесное поглощение*: переходы с участием примесных состояний;
- *решёточное и фононное поглощение*: поглощение энергии фотонов колебаниями кристаллической решётки.

В разных интервалах спектра преобладают различные

Фотопроводимость

удельная фотопроводимость γ_{Φ} :

$$\gamma_{\Phi} = \gamma - \gamma_0 = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$$

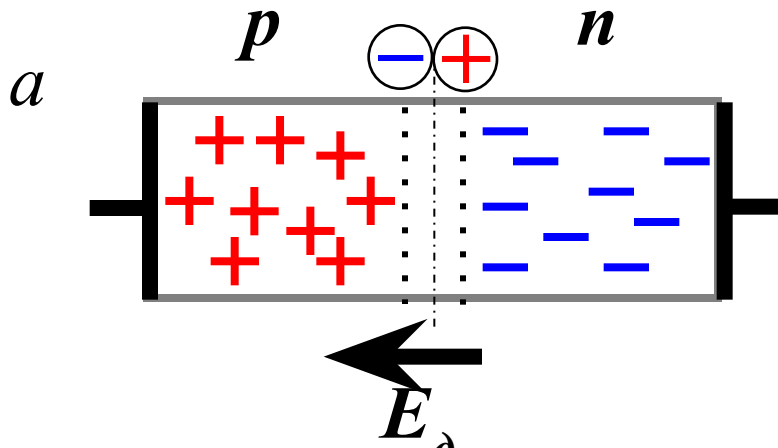
γ_0 – удельная проводимость полупроводника в отсутствие освещения;

γ – удельная проводимость освещенного полупроводника;

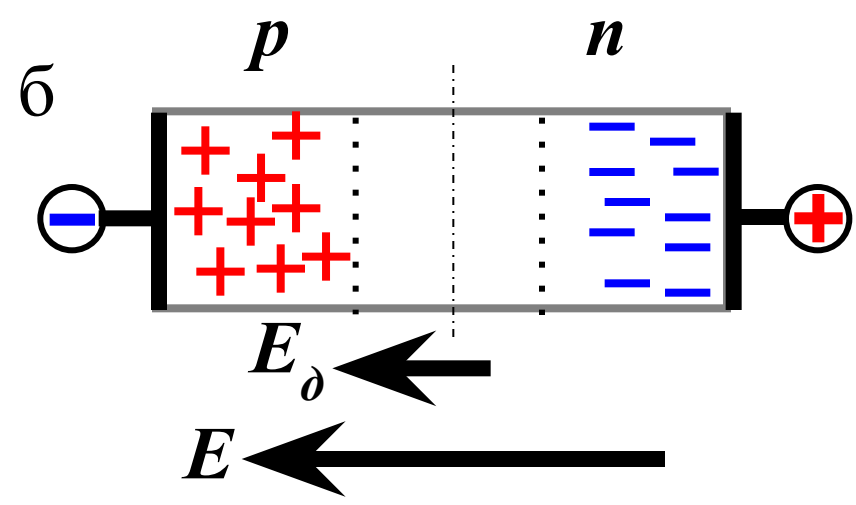
Δn и Δp – концентрация неравновесных с.н.з., возбужденных светом

р-n переход

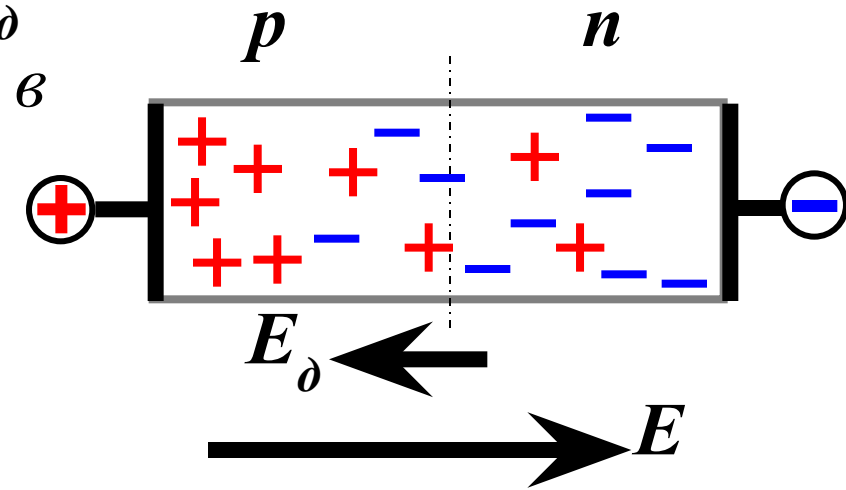
Электронно-дырочные переходы получают вводя в полупроводник донорные и акцепторные примеси так, чтобы одна часть полупроводника обладала электронной, а другая дырочной электропроводностью.



(а) Диффузионное поле E_δ возникает из-за диффузии с.н.з. Образуется запирающий слой толщиной $d \sim 10^{-5}$ см.



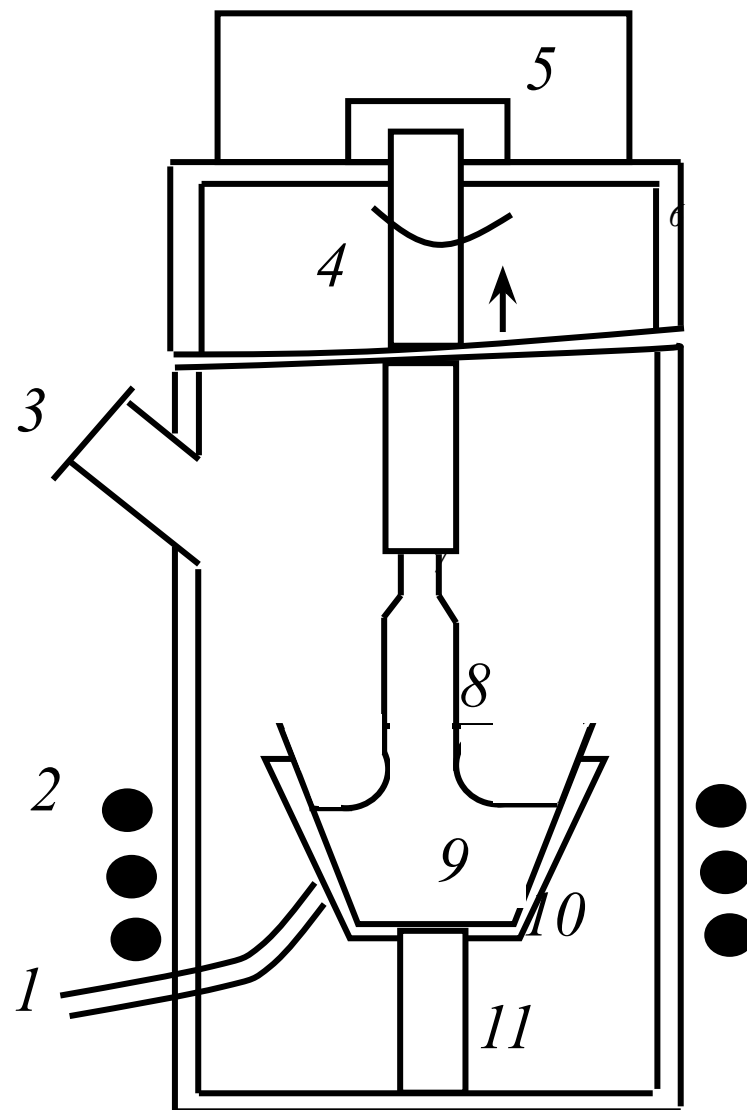
(б) Направление E совпадает с E_δ и переход «заперт».



(в) E направлено против E_δ , запирающий слой насыщается с.н.з., и переход «открыт».

Схема установки для
выращивания монокристаллов
по методу Чохральского:

- 1 – термопара;
- 2 – индукционная печь;
- 3 – окно для визуального
контроля;
- 4 – ось вращения;
- 5 – устройство для вращения;
- 6 – водяная рубашка;
- 7 – монокристаллическая
затравка;
- 8 – выращиваемый кристалл;
- 9 – расплав;
- 10 – графитовый нагреватель;
- 11 – теплоизоляционная
подложка.



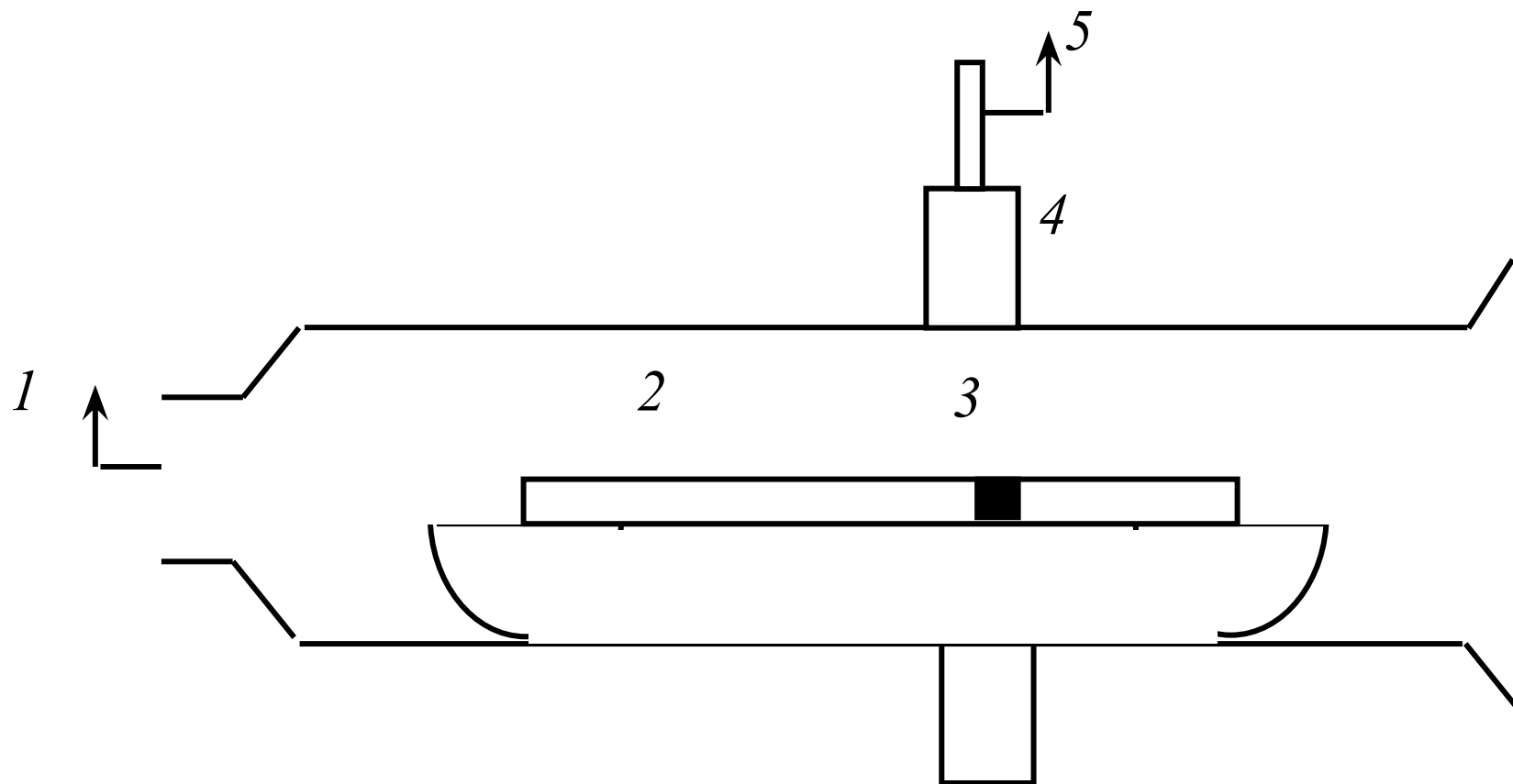


Схема установки для проведения зонной перекристаллизации:
 1 – откачка на вакуум; 2 – образец в тигле; 3 – расплавленная зона;
 4 – перемещаемый нагреватель; 5 – к устройству, перемещающему зону.

$$K_{з.п.} = C_{ж.ф.} / C_{т.ф.} > 1$$

Диэлектрические материалы

основные свойства:

очень слабая электропроводность и

способность к электрической поляризации

(существование электрического поля в объёме материала).

ΔW более 3 эВ

$\rho_v \sim 10^5 \div 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Пассивные

(электроизоляционные)

- применяются для создания электрической изоляции

Активные

- изменяют свои параметры под действием внешних факторов

Классификация диэлектриков

По агрегатному состоянию:

твердые (кристаллические, аморфные),

жидкие, газообразные,

а также твердеющие материалы: лаки, компаунды.

По химической природе:

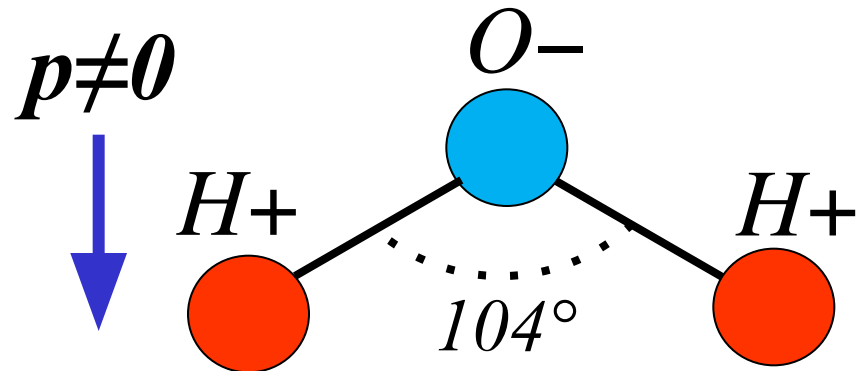
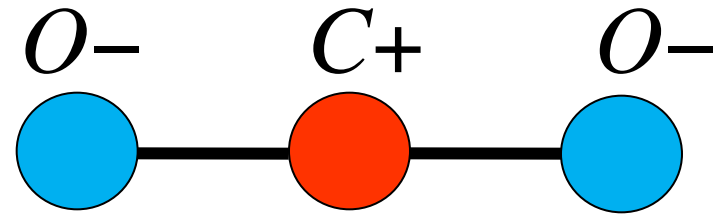
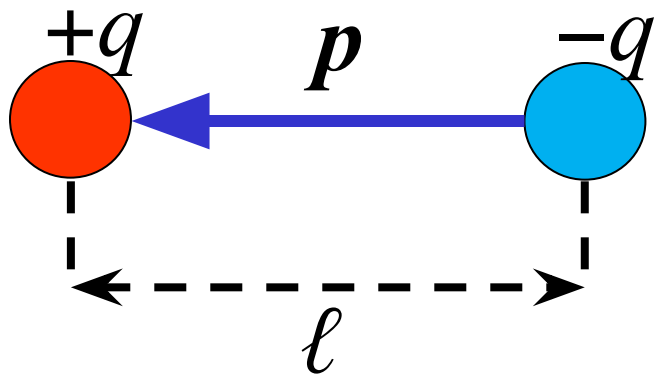
Органические – молекулы содержат атомы углерода.

Неорганические – молекулы не содержат атомов углерода (кроме таких соединений, как оксиды углерода, сероуглерод, угольная кислота и ее соли).

Элементоорганические – молекулы содержат атомы элементов не характерных для органических веществ: *Si, Mg, Al* и др.

Полярность диэлектриков

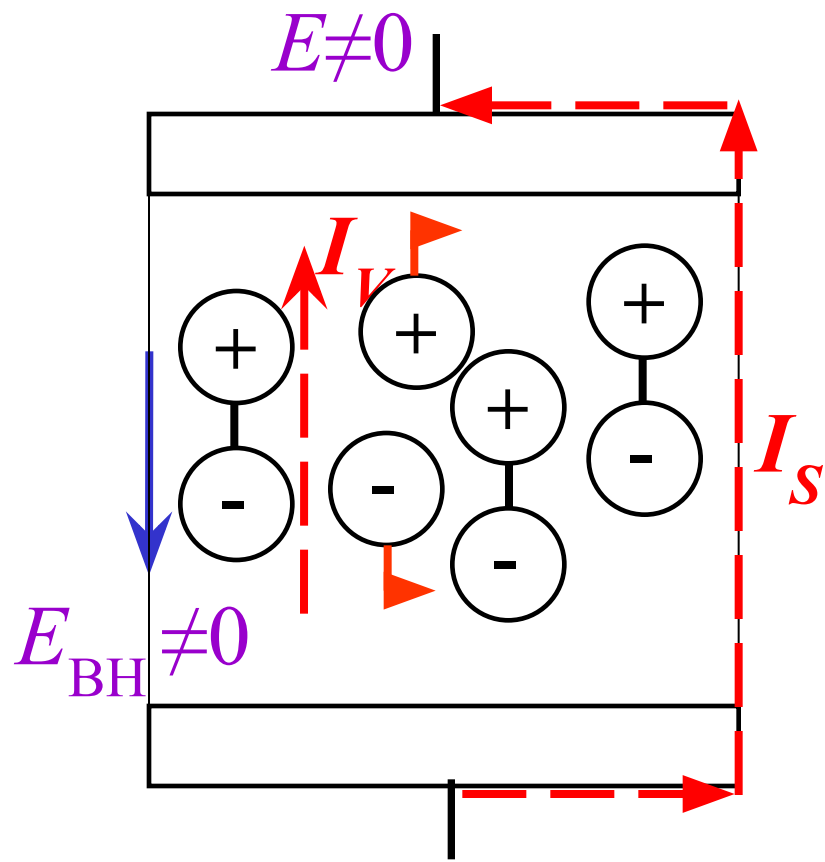
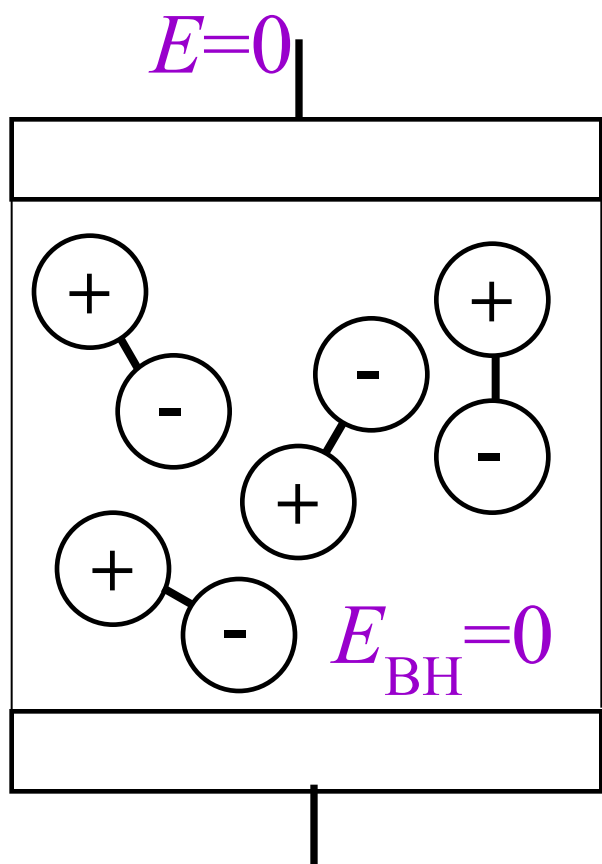
$$p = q \cdot \ell$$



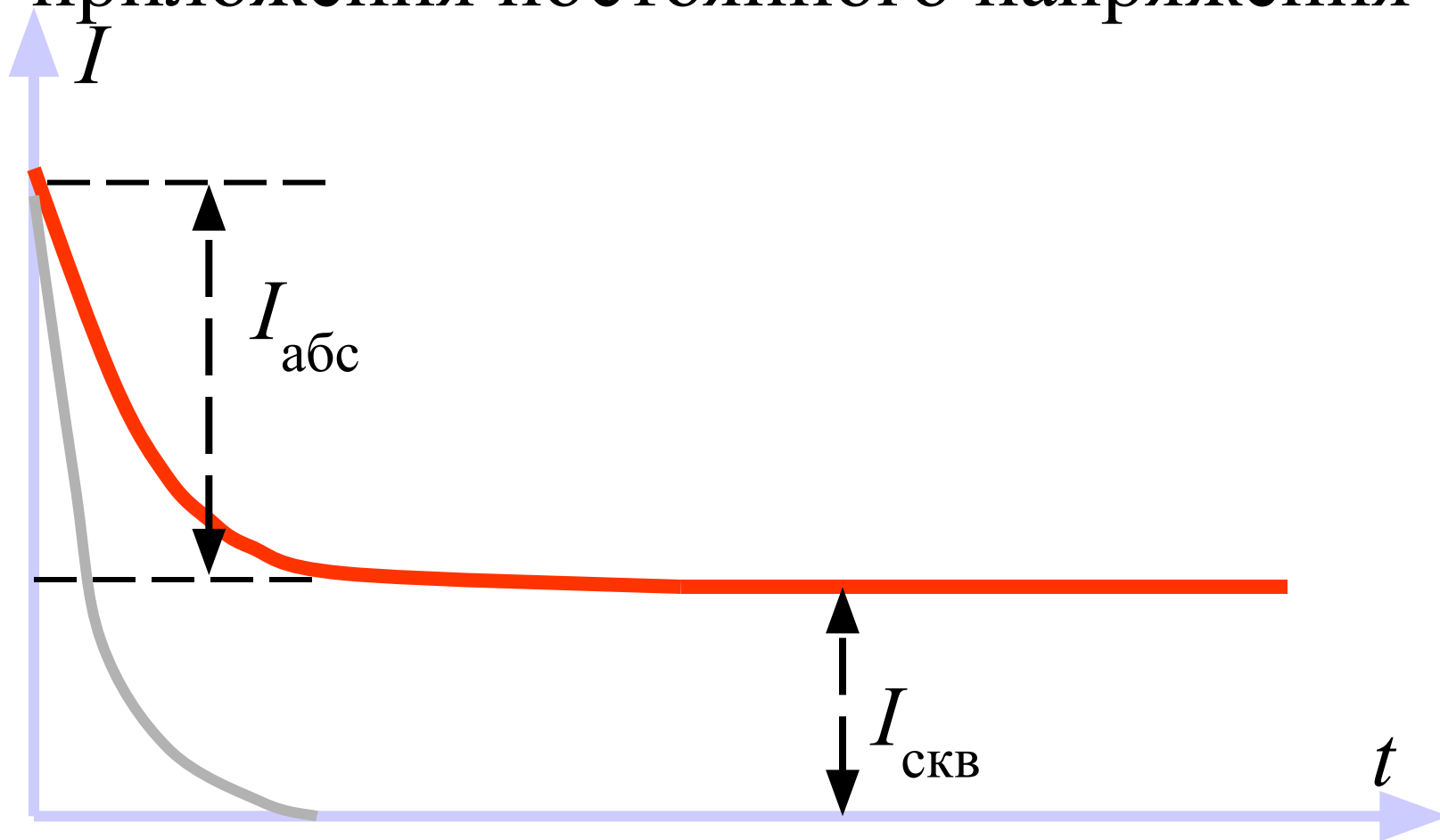
Основные характеристики,
описывающие поведение
диэлектриков в электрических полях:

1. Электропроводность γ (ρ)
2. Поляризация ϵ
3. Диэлектрические потери $tg\delta$
4. Электрическая прочность $E_{\text{ПР}}$

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

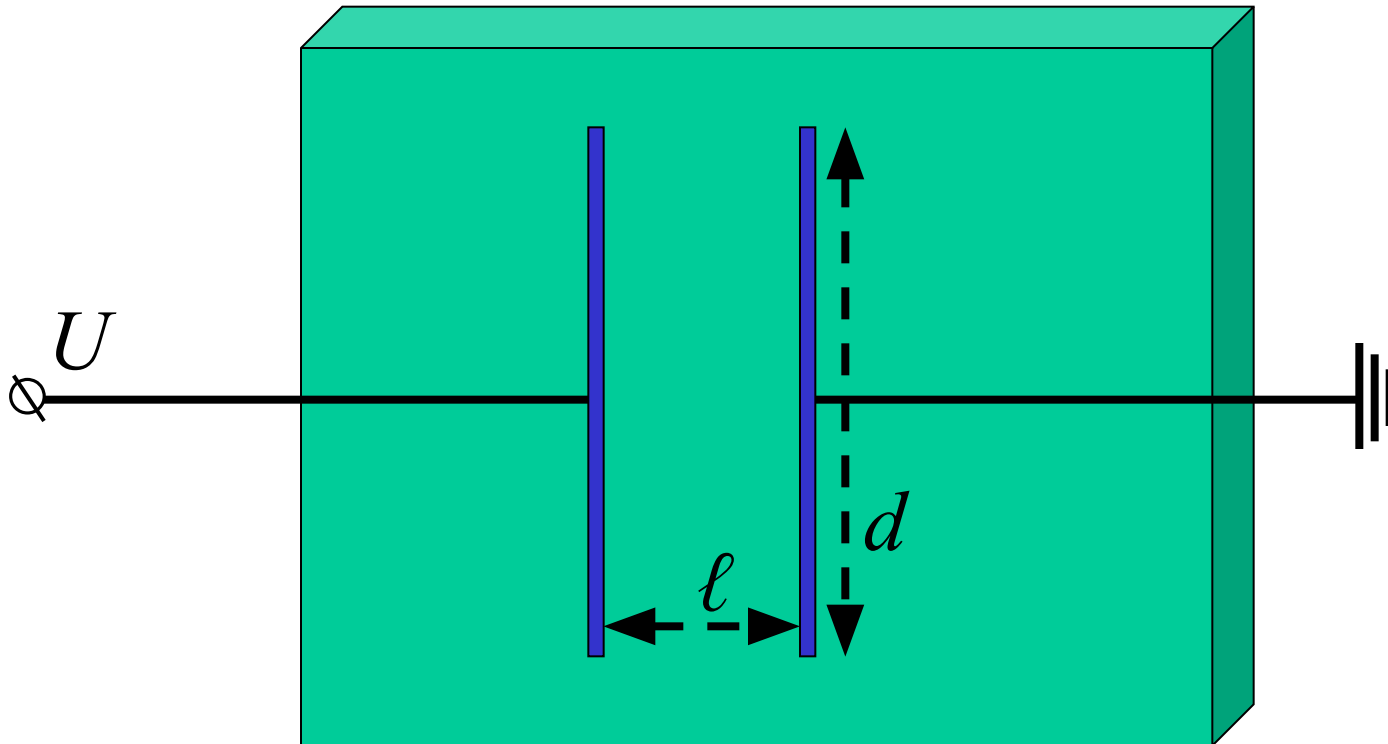


Изменение тока в диэлектрике при приложении постоянного напряжения



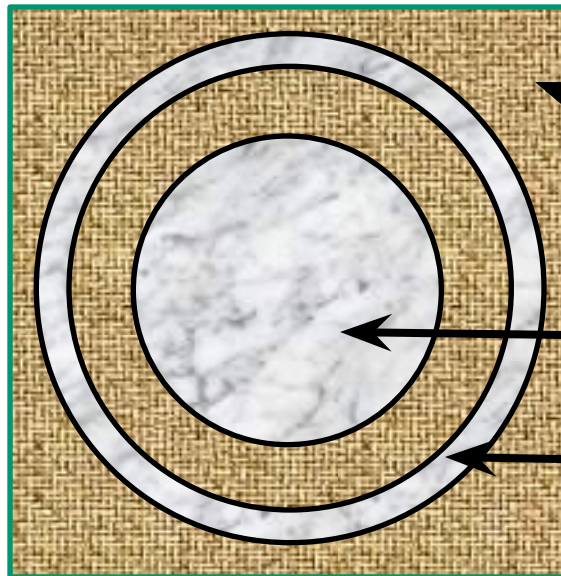
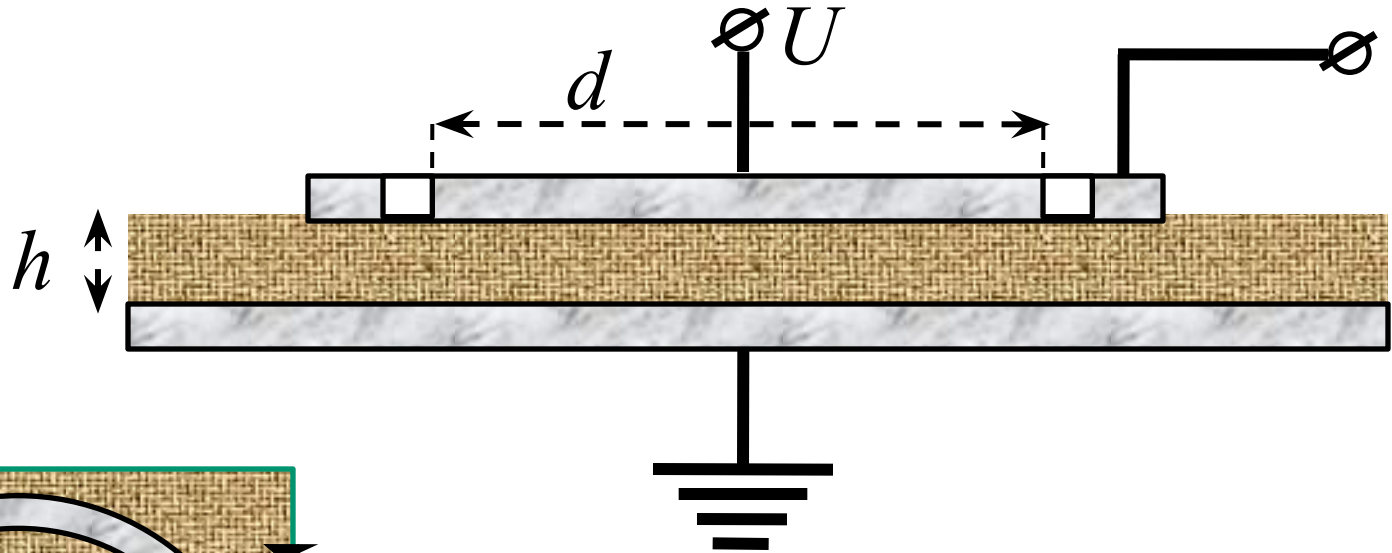
Удельное поверхностное
сопротивление:

$$\rho_s = 1/\gamma_s = R_s d/\ell \quad [\text{Ом}]$$



Удельное объемное сопротивление

$$\rho_V = 1/\gamma_V = R_V S/h \text{ [Ом}\cdot\text{м]}$$



образец

измерительный электрод

охранное кольцо

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

В стационарном случае концентрация ионов n :

$$n = n_- = n_+ = \sqrt{(N_{REC} / \alpha)},$$

$N_{REC} = \alpha n_- n_+$ — число рекомбинирующих ионов в 1 м^3 ; α — коэффициент рекомбинации.

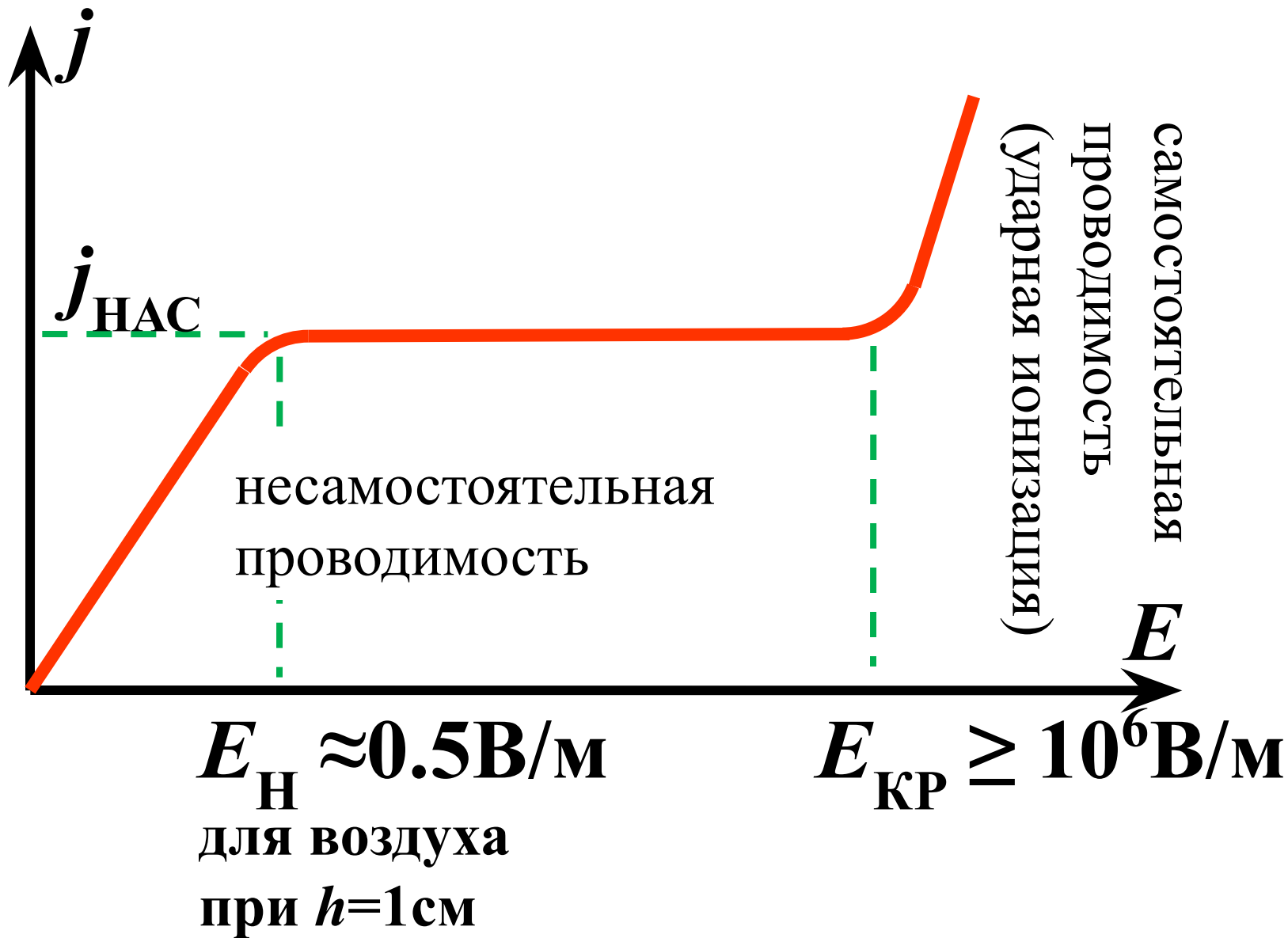
В слабых полях удельная проводимость:

$$\gamma = qn(\mu_- + \mu_+)$$

μ_- и μ_+ — ПОДВИЖНОСТЬ ИОНОВ

Для воздуха (в слабых полях)

$$\alpha \sim 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}; \quad \gamma \sim 10^{-15} \text{ См/м}$$

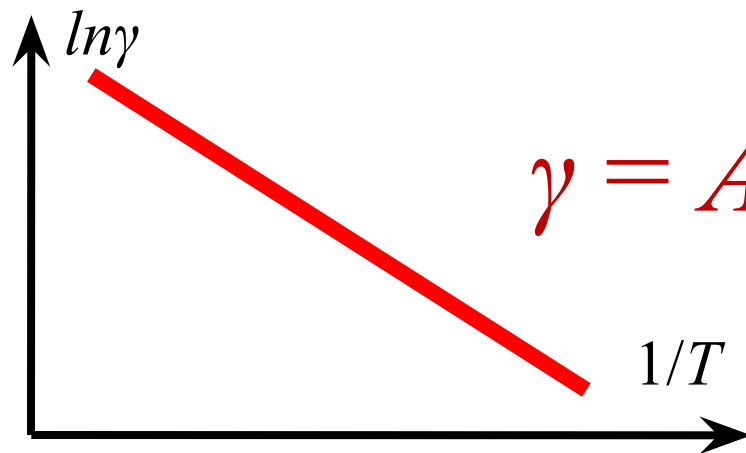


$\gamma = qn(\mu_- + \mu_+)$ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ
ЖИДКОСТЕЙ

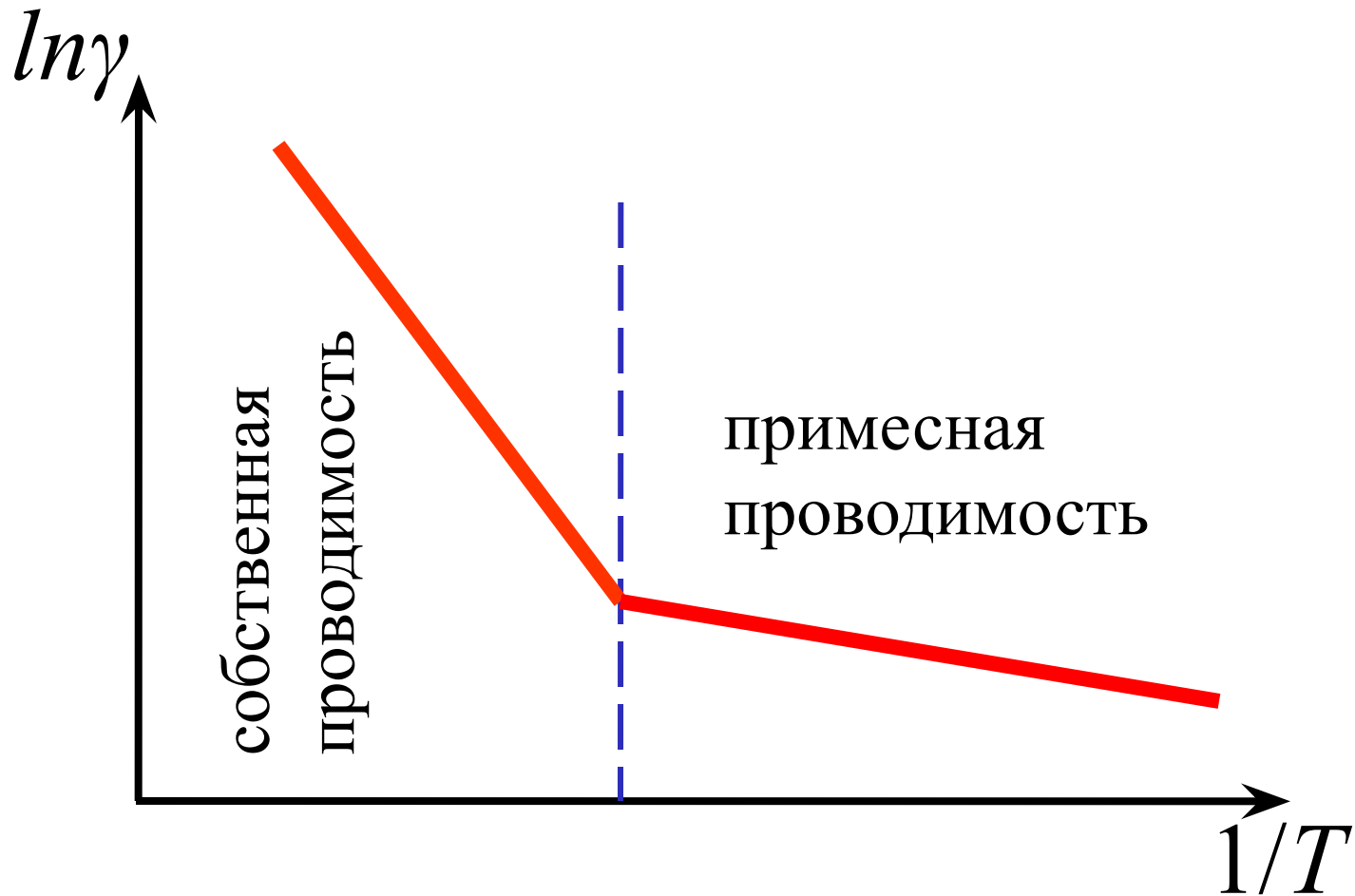
$$n = n_0 \exp(-W/kT)$$

W – энергия диссоциации молекул;

обозначим: $a = W/k, A = n_0(\mu_- + \mu_+)$;



$$\gamma = A \exp(-a/T)$$



В жидкостях рост γ (с ростом T) связан не только с диссоциацией молекул, но и с уменьшением вязкости. Большое влияние оказывают примеси.

Проводимость сильно зависит от полярности жидкости:

Для **сильно полярных** жидкостей
(вода, этиловый спирт, ацетон)

$$\rho = 10^3 \div 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Для **слабо полярных** жидкостей
(совол, касторовое масло)

$$\rho = 10^8 \div 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Молекулы **неполярных жидкостей**

(бензол, трансформаторное масло) диссоциируют слабо.

Проводимость примесная:

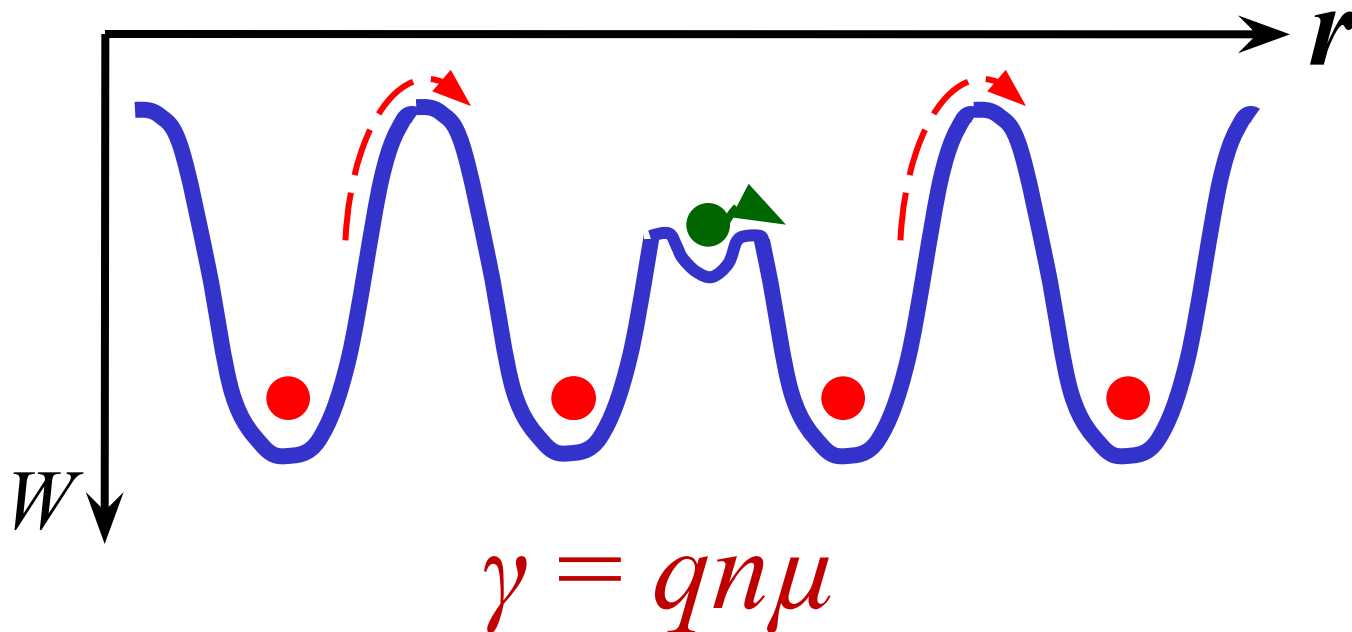
$$\rho \geq 10^{10} \div 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

В коллоидах носителями заряда м.б. **молионы**, что используют при нанесении покрытий электрофорезом.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

С.Н.З. — ИОНЫ

Примесные ионы активируются
легче, чем собственные:



С изменением T меняется n и μ с.н.з.:

$$n = n_0 \exp(-W_{\text{д}}/kT)$$

$W_{\text{д}}$ – энергия диссоциации, необходимая для вырывания иона из кристаллической решётки

$$\mu = \mu_0 \exp(-W_{\text{п}}/kT)$$

$W_{\text{п}}$ – энергия «перескока», необходимая для перехода иона из одного узла кристаллической решётки в другой

$$\gamma = A \exp(-b/T),$$

$$A = qn_0\mu_0$$
$$b = (W_{\text{д}} + W_{\text{п}})/k$$

Зависимость
проводимости
диэлектрика от
температуры

$\ln \gamma$

собственная
проводимость

проводимость

примесная
проводимость

$1/T$

ρ

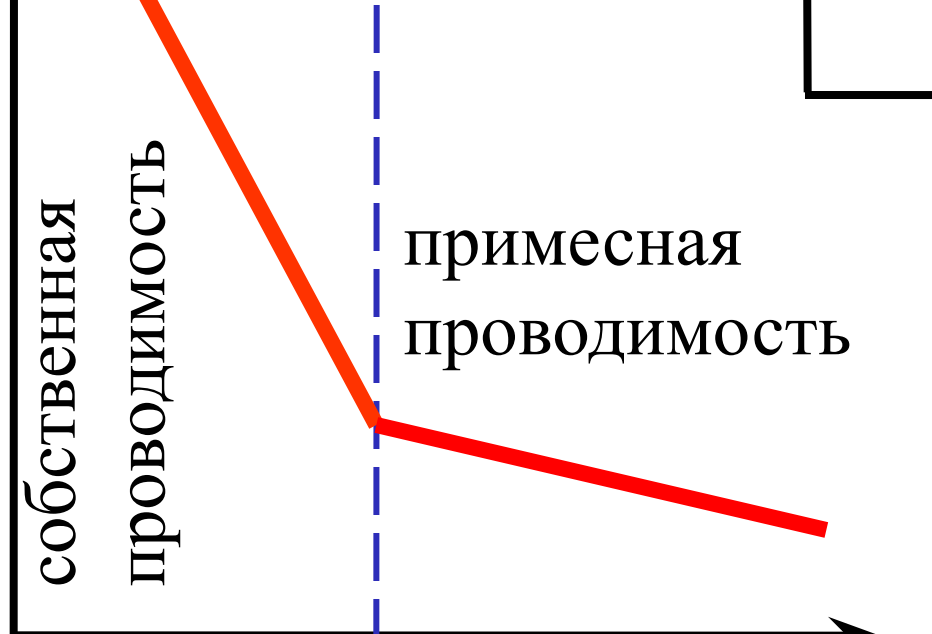
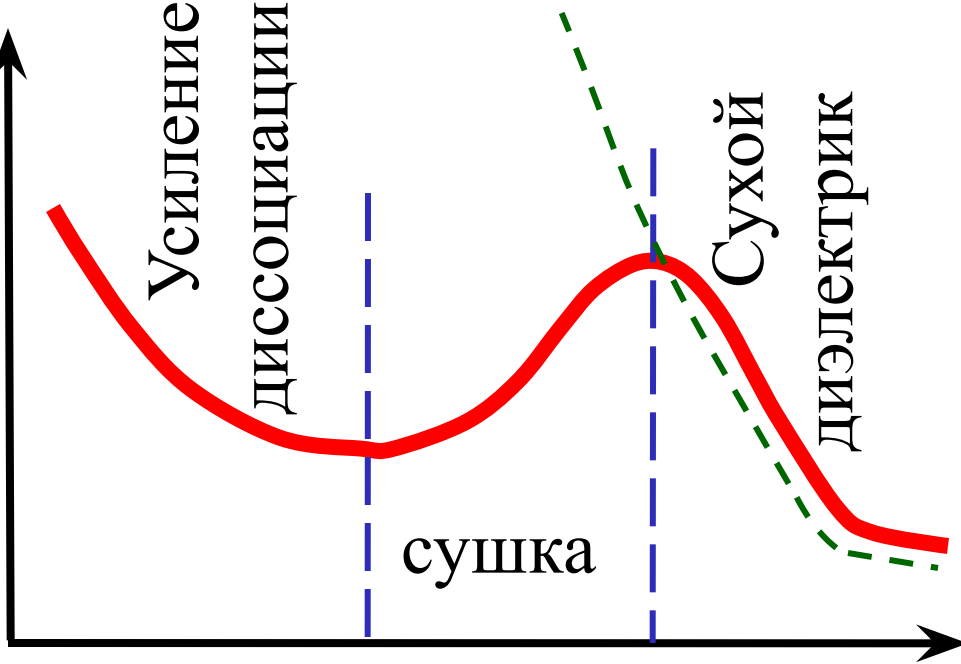
Усиление
диссоциации

сушка

Сухой
диэлектрик

Проводимость
увлажнённого
диэлектрика

T



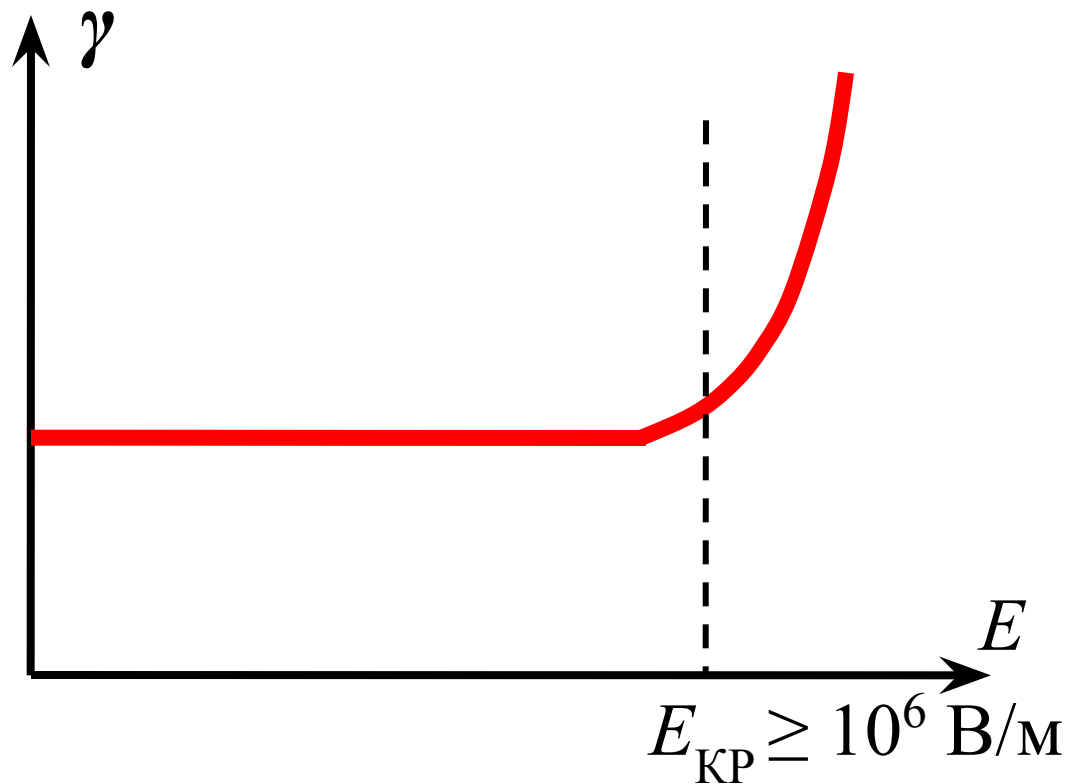
Зависимость проводимости γ диэлектрика от напряжённости электрического поля E .

В сильных полях (при $E > E_{\text{кр}}$) выполняется закон Пуля:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta_1 E)$$

Для ряда диэлектриков, как и для полупроводников, выполняется закон Френкеля:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta_2 \sqrt{E})$$



ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Поляризацией называется процесс смещения упруго связанных зарядов или ориентация диполей под действием электрического поля.

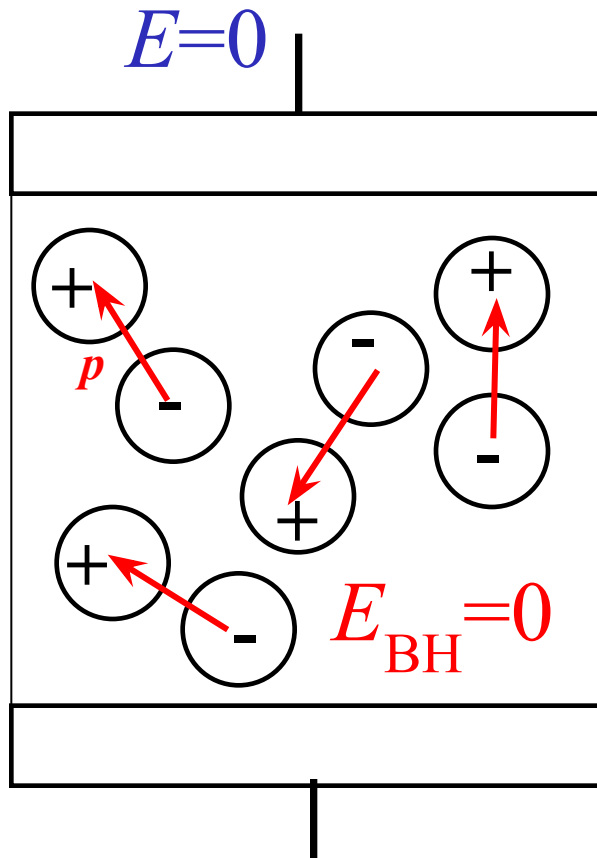
*В результате поляризации в объеме диэлектрика возникает суммарный электрический момент **P** , отличный от нуля.*

Поляризованностью (*вектором поляризации*) **P** называется индуцированный электрический момент единицы объёма диэлектрика:

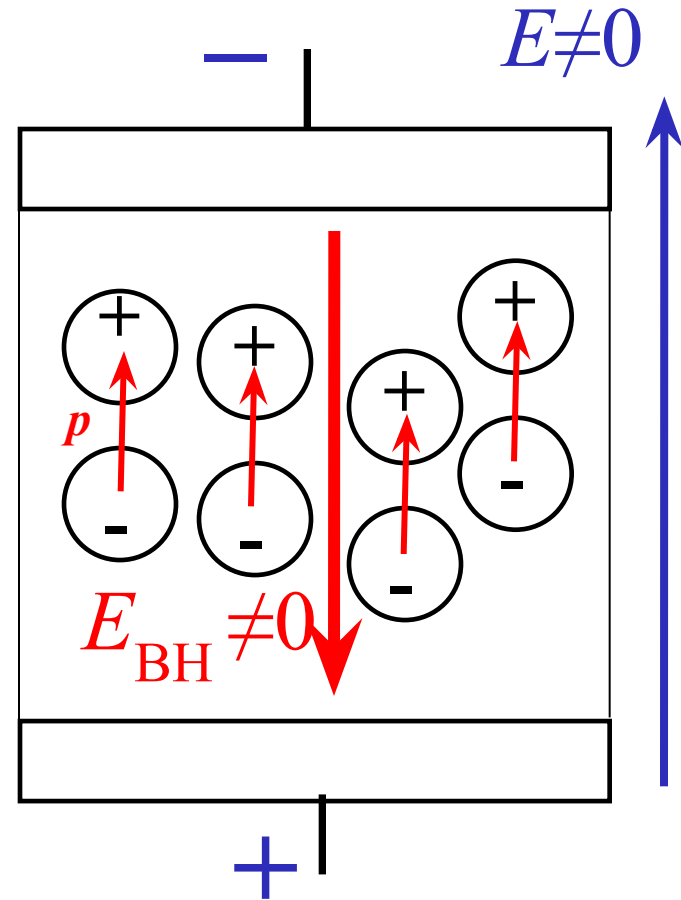
$$**$P = dp/dV$**$$

ПОЛЯРИЗОВАННОСТЬ P

$$\sum p = P = 0$$



$$\sum p = P \neq 0$$



Для линейных (*не активных*) диэлектриков:

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

χ – диэлектрическая восприимчивость (безразмерная величина)

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная
(*абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума*)

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$ – абсолютная диэлектрическая
проницаемость вещества

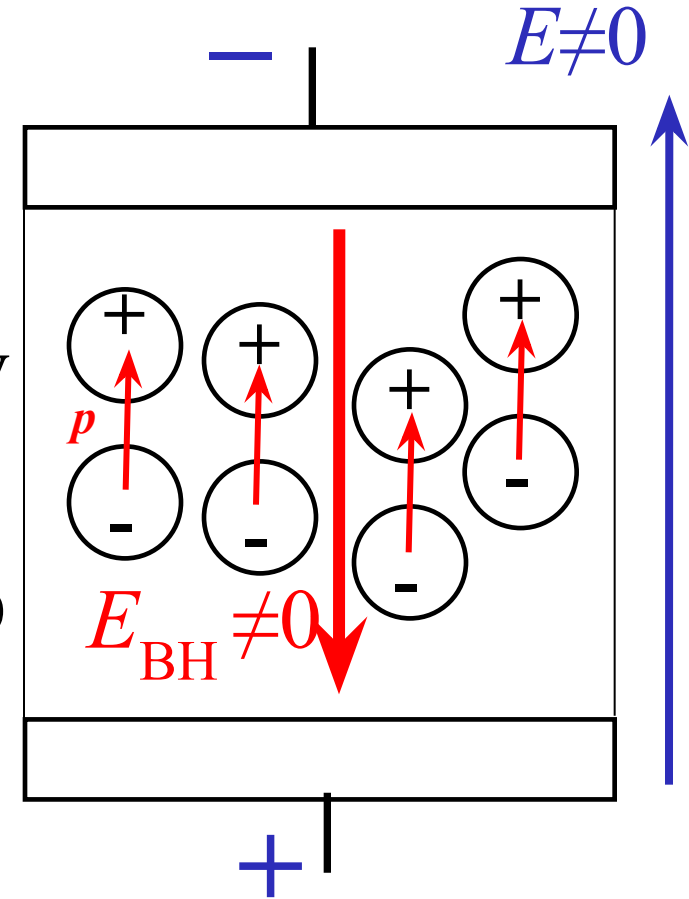
$\varepsilon = 1 + \chi$ – относительная диэлектрическая
проницаемость

$$\varepsilon = Q/Q_0 = (Q_0 + Q_d)/Q_0 = 1 + Q_d/Q_0 \text{ всегда } > 1$$

Для конденсатора к обкладкам которого приложено напряжение U $Q = CU$ и значит:

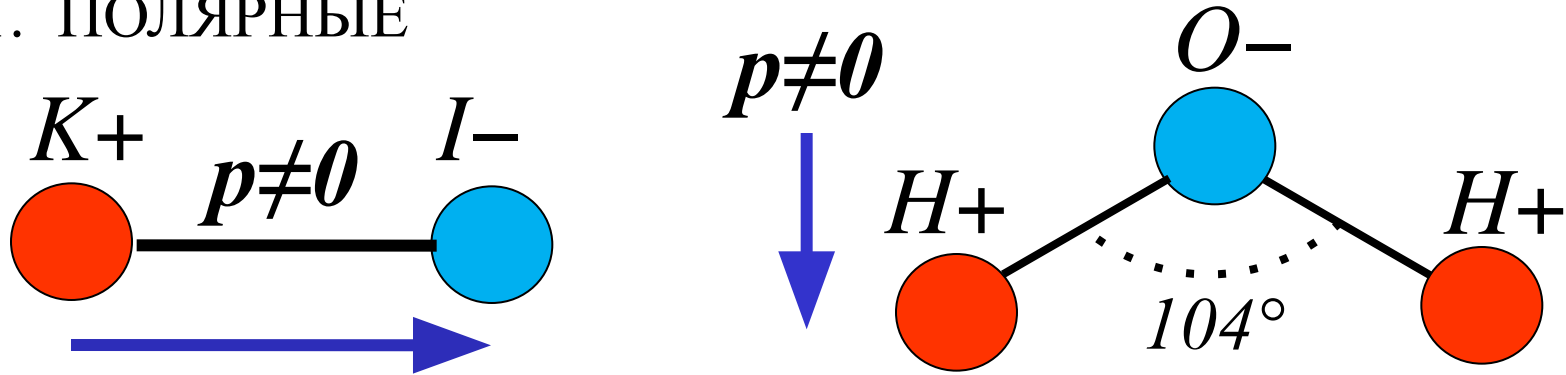
$$\varepsilon = C/C_0.$$

ε показывает во сколько раз ёмкость C конденсатора, между обкладками которого диэлектрик, больше ёмкости C_0 конденсатора, между обкладками которого вакуум.

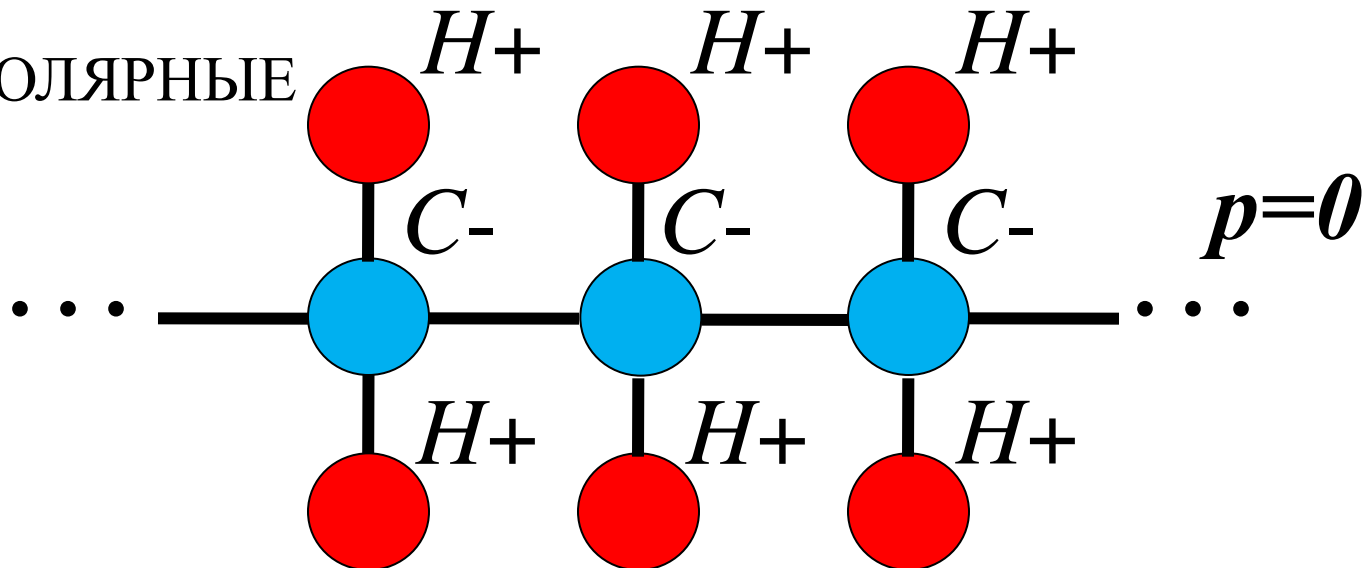


ПО СПОСОБНОСТИ К ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКИ ПОДРАЗДЕЛЯЮТСЯ:

1. ПОЛЯРНЫЕ



2. НЕПОЛЯРНЫЕ



Различают **2 ВИДА** поляризации:

1. БЫСТРЫЕ (*упругие*):

Малое время установления τ .

Не приводят к потерям энергии при промышленных частотах.

- Электронная,
- Ионная упругая,
- Дипольная упругая.

2. МЕДЛЕННЫЕ (*неупругие, релаксационные*):

Большое время установления τ .

Приводят к потерям энергии и нагреву диэлектрика.

- Ионно-релаксационная,
- Дипольно-релаксационная,
- Миграционная (междуслойная),
- Спонтанная.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Наблюдается во всех диэлектриках. $\tau \sim 10^{-15}$ с.

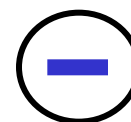
Не зависит от частоты электромагнитного поля вплоть до частот оптических колебаний.

Не приводит к потере энергии поля.

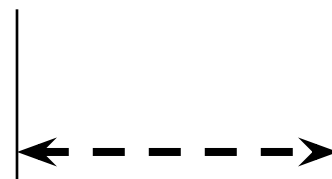
$$\mu_e = 0$$



a



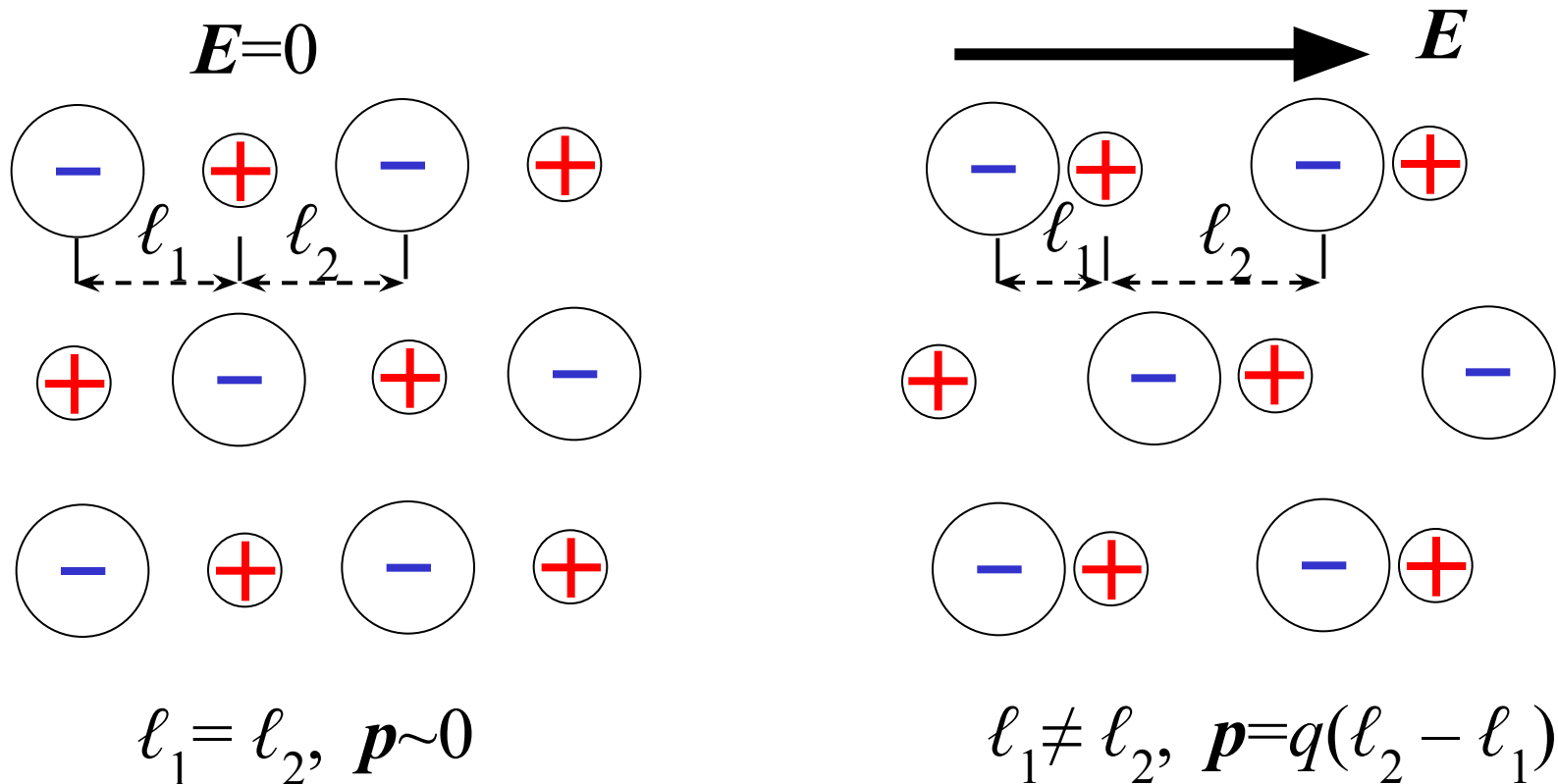
б



ИОННАЯ УПРУГАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Характерна для ионных кристаллов с плотной упаковкой ионов (*NaCl*, *LiF* и т.п.). $\tau \sim 10^{-13}$ с

Не связана с потерями энергии и не зависит от частоты, вплоть до частот инфракрасного диапазона.



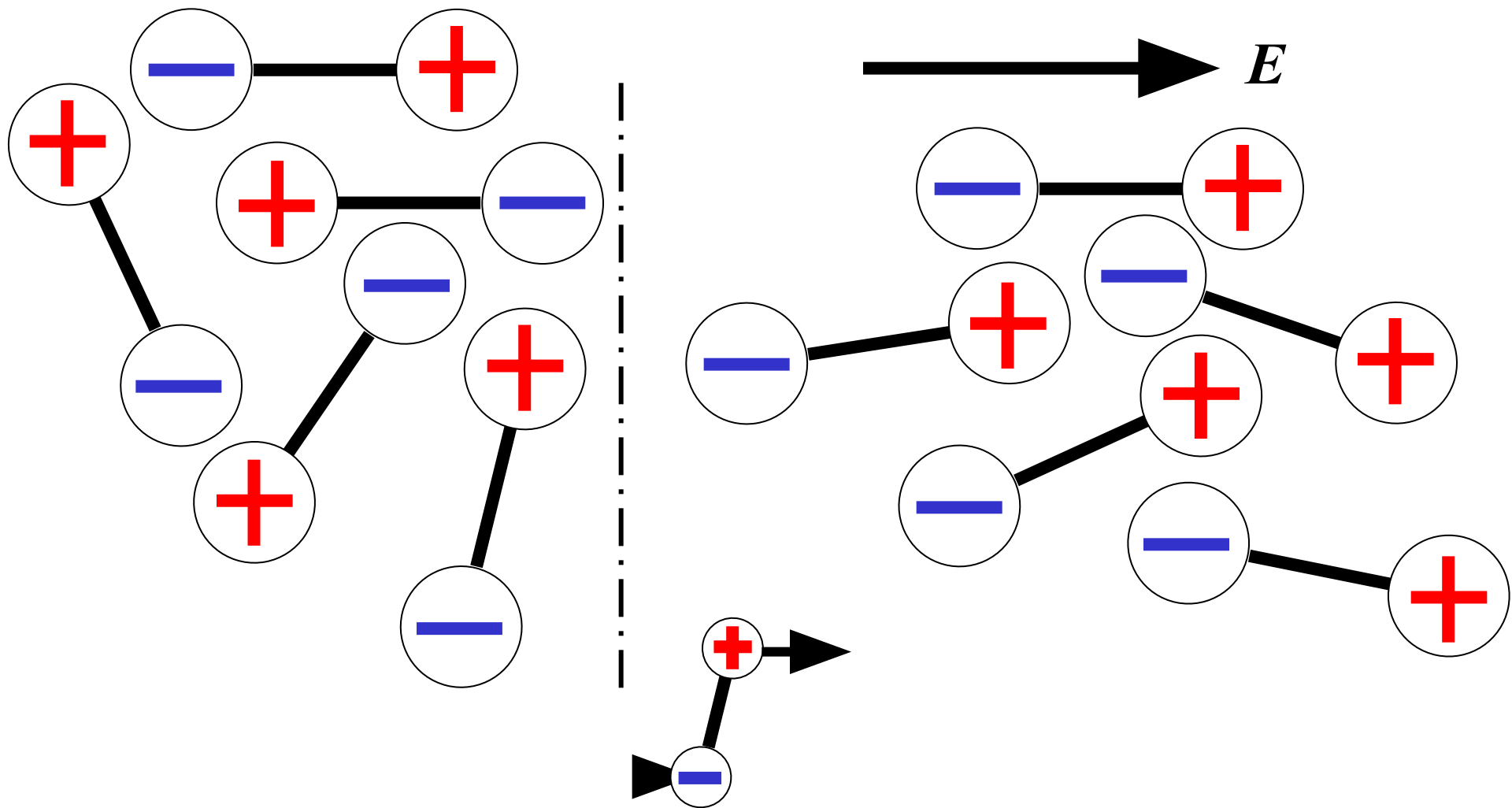
ИОННО-РЕЛАКСАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Наблюдается в ионных диэлектриках аморфного строения (стекла, керамика и т.д.), в неорганических кристаллических диэлектриках с неплотной упаковкой ионов (рыхлого строения).

Заключается в смещениях слабосвязанных ионов под действием внешнего электрического поля на расстояния, превышающие амплитуду ангармонических тепловых колебаний.

ДИПОЛЬНО-РЕЛАКСАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

В большинстве случаев $\tau \sim 10^{-6} - 10^{-10}$ с.



Наблюдается в полярных газах, жидкостях и в некоторых твердых диэлектриках.

В органических диэлектриках наблюдается ориентация не самой молекулы, а имеющихся в ней полярных радикалов по отношению к молекуле.

Такую поляризацию называют *дипольно-радикальной*.

При снятии приложенного E ориентация дипольных моментов p нарушается хаотическим тепловым движением молекул, и суммарная поляризованность P спадает с течением времени t :

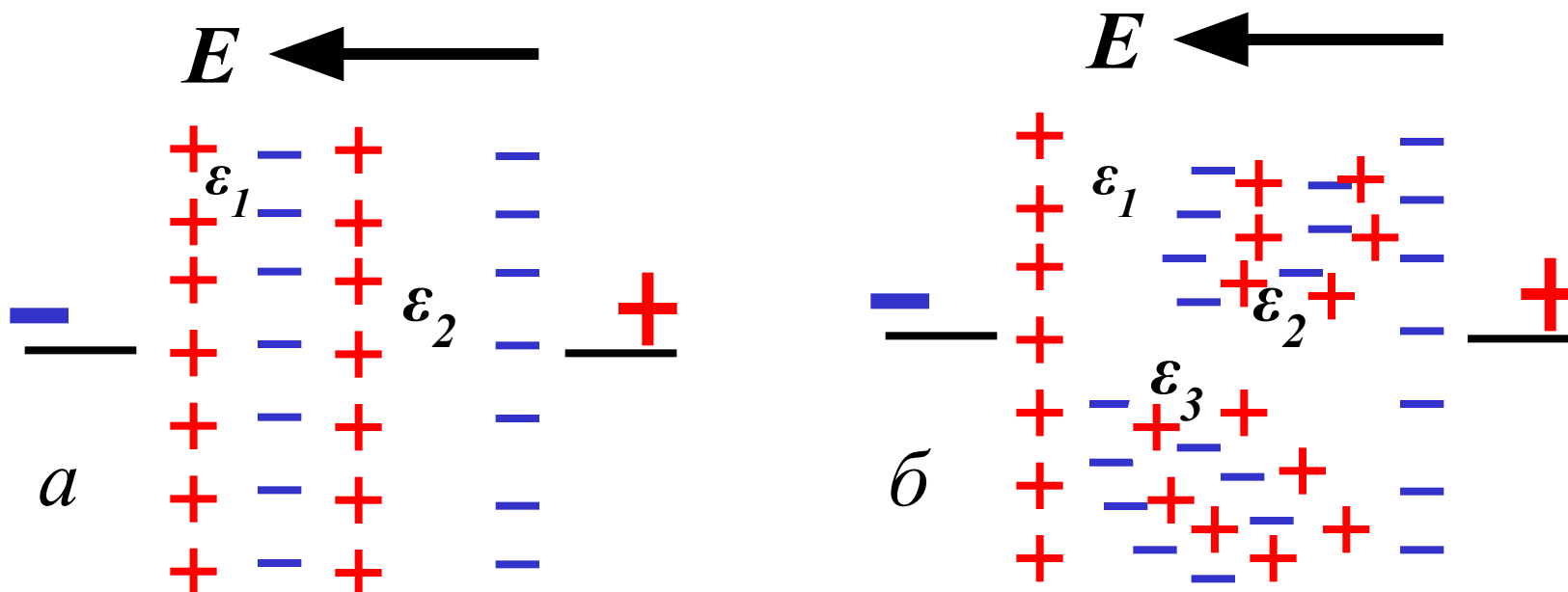
$$P(t) = P_0 \exp(-t/\tau)$$

МИГРАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

(междуслойная, структурная)

Наблюдается в диэлектриках, содержащих проводящие и полупроводящие включения или слои с различной проводимостью, в композиционных материалах.

Время установления: секунды, минуты и даже часы.



Перераспределение зарядов в слоистых диэлектриках (а) и диэлектриках с включениями (б).

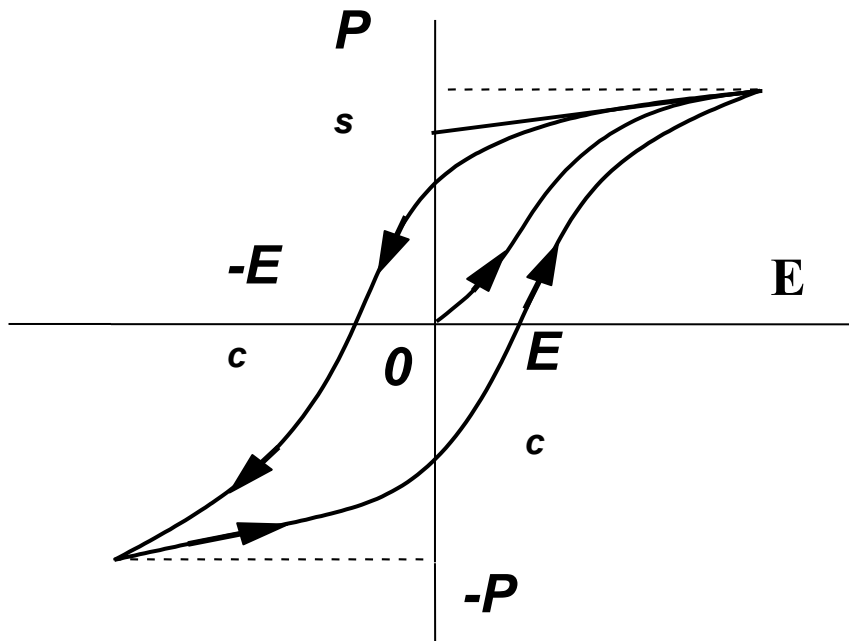
Спонтанная поляризация

Возникает без внешних воздействий в *активных* диэлектриках в виде *доменов*.

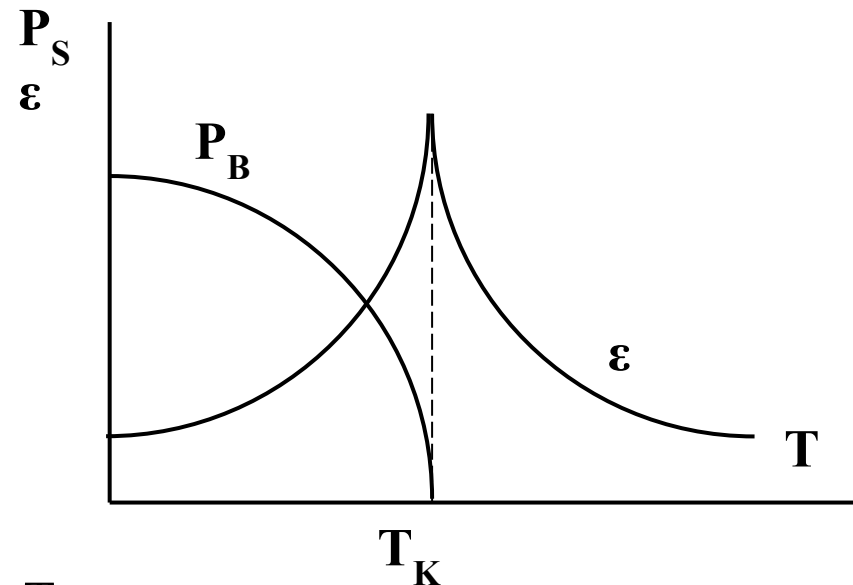
Сегнетоэлектрики: сегнетова соль $NaKCS_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$; титанат бария $BaTiO_3$; нитрит натрия $NaNO_2$ и т.д.

Наличие доменной структуры приводит к сильной поляризации во внешнем поле:

$$\varepsilon > 1000$$



Цикл поляризации сегнетоэлектриков.



Температурные зависимости спонтанной поляризованности P_S и диэлектрической проницаемости ϵ в сегнетоэлектриках.

По видам поляризационных процессов диэлектрики разделяют на:

1. *Нейтральные и слабополярные,*

в основном электронная поляризация

твёрдые – парафин, сера, ПЭ

жидкие – бензол, трансформаторное масло

газы – азот, водород

2. *Полярные,*

электронная и дипольно-релаксационная поляризация

органические жидкие, полужидкие и твёрдые

вещества – компаунды, смолы, целлюлоза

3. *Ионные кристаллы с плотной упаковкой,*

электронная и ионная (упругая) поляризация

кварц, слюда, каменная соль,

корунд, рутил, перовскит

4. *Неорганические стёкла и керамика,*

электронная и ионно-релаксационная поляризация

фарфор, микалекс

5. *Неоднородные диэлектрики,*

в зависимости от состава – любые виды поляризации

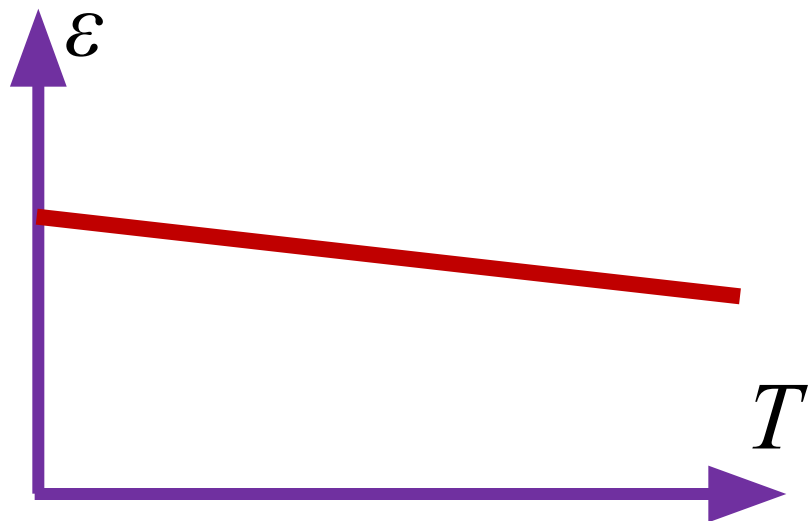
6. *Активные диэлектрики,*

сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики и т.д.

Зависимость ϵ от температуры

для неполярных диэлектриков :

электронная поляризация

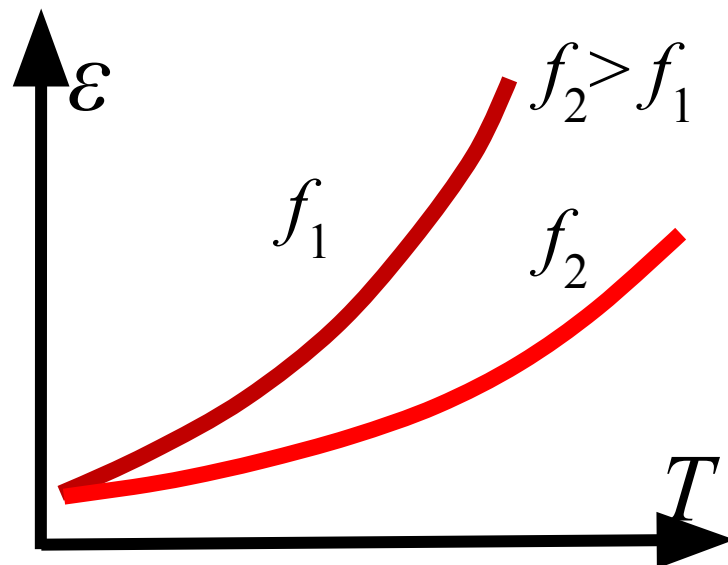


$$\text{TK}\epsilon < 0$$

так как с ростом T

поляризуемость не изменяется, но
увеличивается объем

ионная поляризация

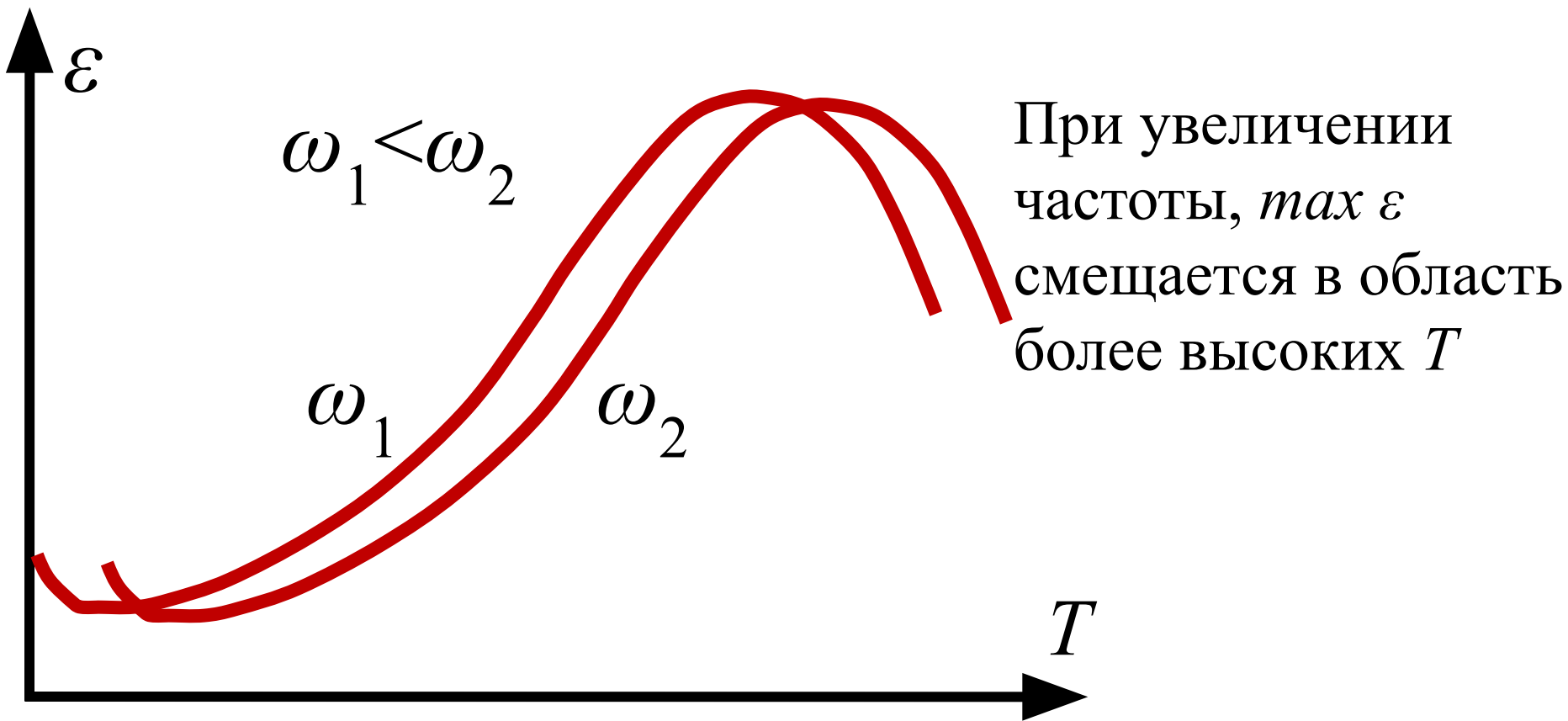


$$\text{TK}\epsilon > 0$$

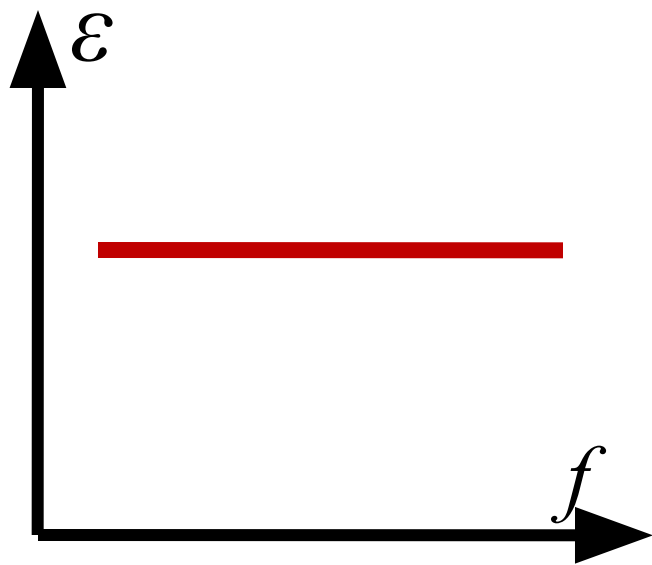
так как с ростом T возрастает

поляризуемость ионов

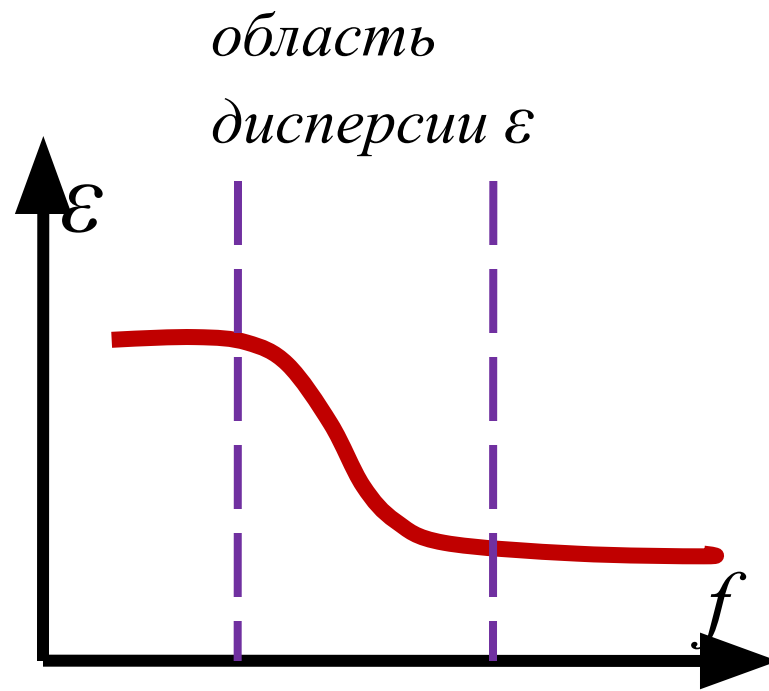
Зависимость ε от температуры для полярных диэлектриков (дипольно-релаксационная поляризация)



Зависимость ϵ от частоты приложенного переменного электрического поля



Неполярный
диэлектрик



Полярный
диэлектрик

Диэлектрическая проницаемость композиционных диэлектриков

Для параллельного соединения:

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 S_1 / h + \varepsilon_0 \varepsilon_2 S_2 / h$$

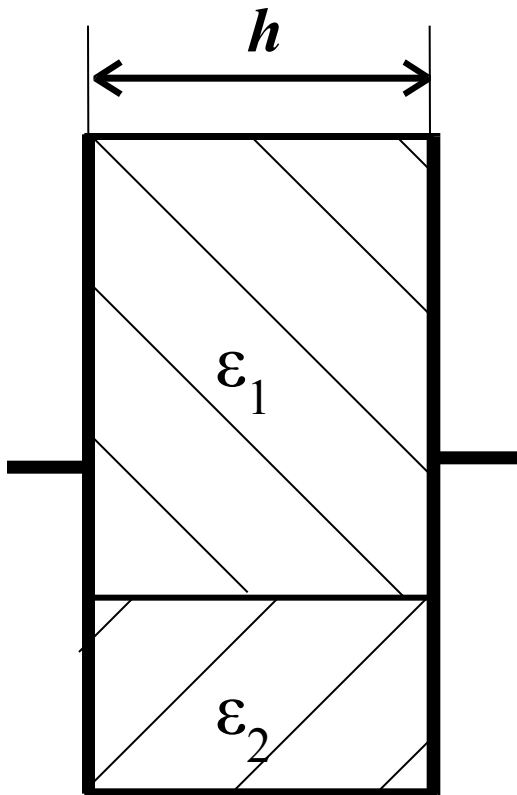
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon^* (S_1 + S_2) / h$$

$$\varepsilon^* = y_1 \varepsilon_1 + y_2 \varepsilon_2$$

$$y_1 = S_1 / (S_1 + S_2); \quad y_2 = S_2 / (S_1 + S_2)$$

объемные концентрации $y_1 + y_2 = 1$

$$\varepsilon^* = \sum_{i=1}^{i=m} y_i \varepsilon_i$$



Для последовательного соединения:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2$$
$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 S / h_1; \quad C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 S / h_2$$

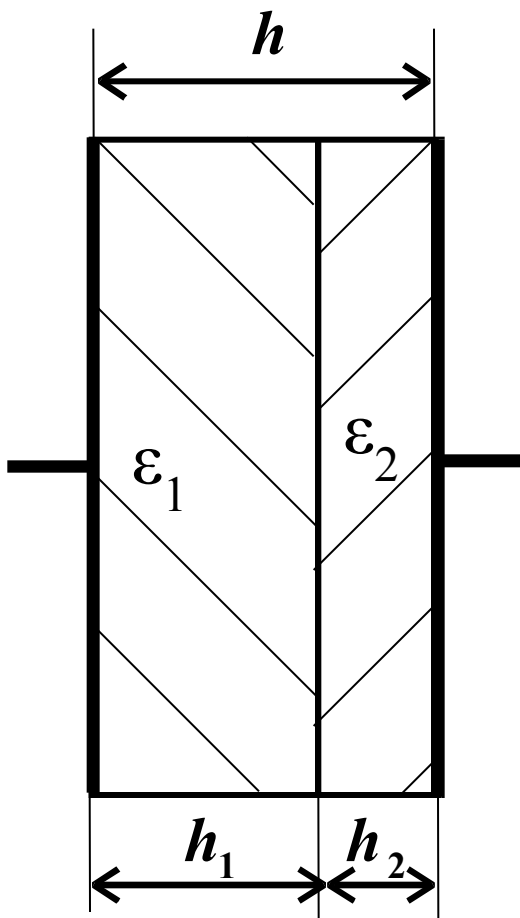
$C = \varepsilon_0 \varepsilon^* S / (h_1 + h_2)$, обозначив
 $y_1 = h_1 / (h_1 + h_2)$, $y_2 = h_2 / (h_1 + h_2)$,
получаем:

$$1/\varepsilon^* = y_1/\varepsilon_1 + y_2/\varepsilon_2$$

ИЛИ

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / (y_1 \varepsilon_2 + y_2 \varepsilon_1).$$

$$\frac{1}{\varepsilon^*} = \sum_{i=1}^{i=m} \left(\frac{y_i}{\varepsilon_i} \right)$$

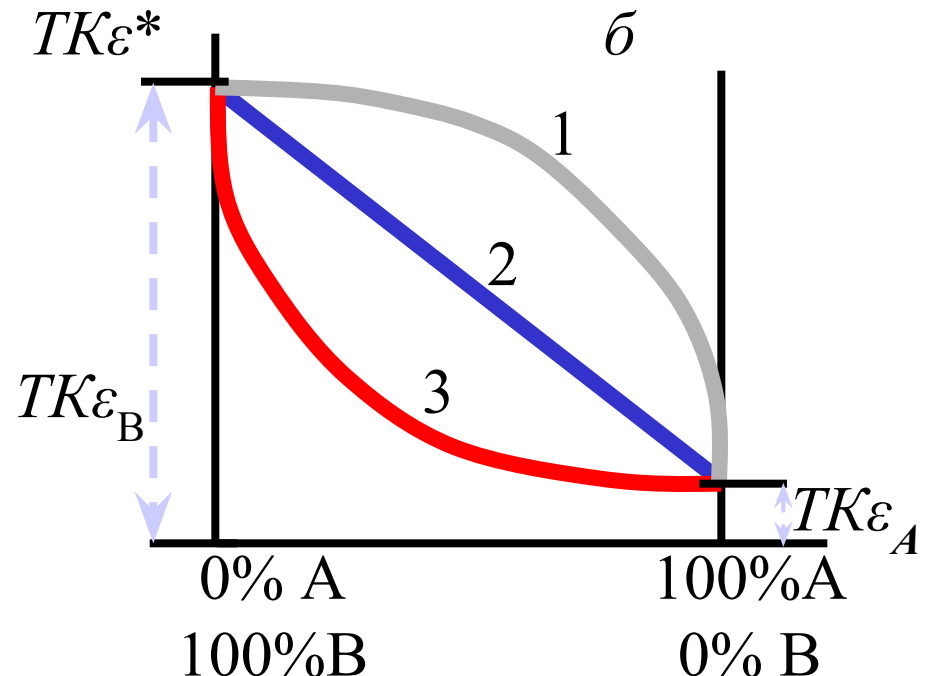
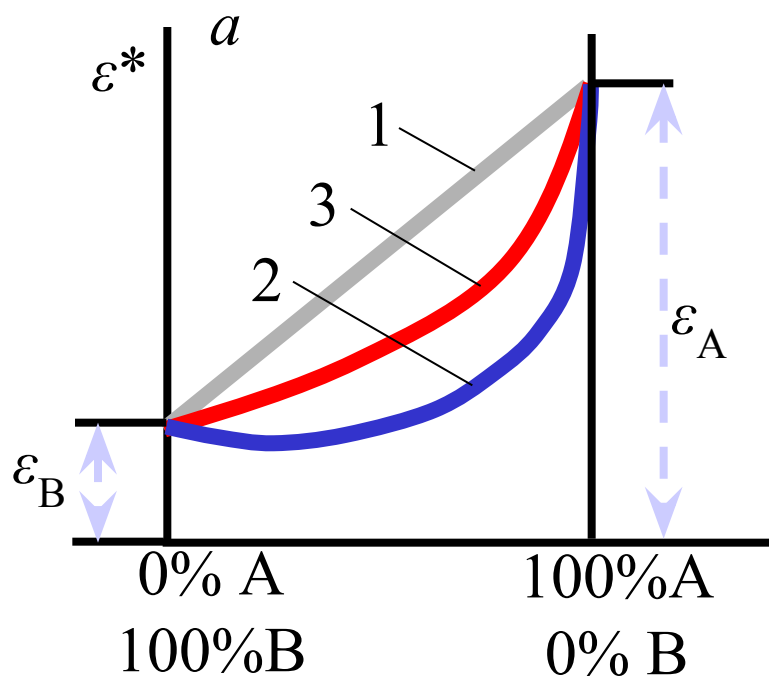


Для статистических смесей
выполняется неравенство Винера:

$$[\sum (y_i/\varepsilon_i)]^{-1} \leq \varepsilon^* \leq \sum y_i \cdot \varepsilon_i$$

Для смеси с разным объемным содержанием
компонентов A и B в смеси:

- 1 – модель параллельного подключения;
- 2 – модель последовательного подключения;
- 3 – статистическая смесь.



ε_1 ε_2
 ε_3 ε_4

Существует несколько **приближенных формул** расчета ε^* для статистических смесей.

Чем ближе значения ε_i друг к другу, тем точнее результат.

Формула Лихтенекера-Роттера $lg\varepsilon^* = \sum y_i lg\varepsilon_i$
(логарифмический закон смешения) приводит

к «арифметическому закону смешения» для температурных коэффициентов диэлектрической проницаемости.

$$TK\varepsilon^* = \sum y_i TK\varepsilon_i$$

$$\sum y_i = 1$$

Формула Ландау-Лившица

$$\sqrt[3]{\varepsilon^*} = \sum y_i \cdot \sqrt[3]{\varepsilon_i}$$

Диэлектрическими потерями

называется энергия, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии на него электрического поля E и вызывающая нагрев диэлектрика.

Диэлектрические потери наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжении.

В постоянном поле:

потери P в диэлектрике обусловлены выделением тепла Джоуля при прохождении сквозного тока:

$$P = U^2/R ,$$

R – сопротивление диэлектрика,

U – приложенная разность потенциалов.

В переменном поле:

$$U = U_0 \cdot \sin \omega t$$

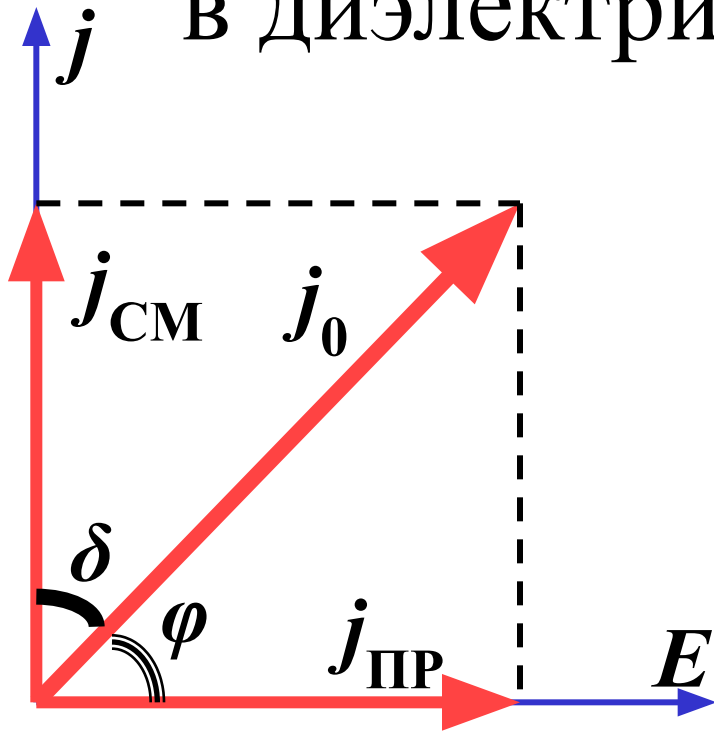
U_0 – амплитуда,

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота переменного напряжения

Энергия поля затрачивается на:

1. выделение тепла Джоуля;
2. медленные виды поляризации.

Векторная диаграмма токов в диэлектрике конденсатора



$$j_{CM} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega E \quad \text{A/M}^2$$

$$j_{ПР} = \gamma E \quad \text{A/M}^2$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{j_{ПР}}{j_{CM}} = \frac{j_a}{j_c} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega}$$

$$Q = 1/\operatorname{tg} \delta$$

В «идеальном» диэлектрике ток проводимости $I_a = 0$. В переменном поле ток, протекающий через конденсатор – это ток смещения в диэлектрике $I = I_r$.

В «идеальном» диэлектрике ток I отстаёт по фазе от вектора напряжения E на 90° .

В хороших диэлектриках угол сдвига фаз ϕ близок к 90° .

Угол δ , дополняющий угол ϕ до 90° :

$$\delta = 90^\circ - \phi.$$

наз. *углом диэлектрических потерь*.

Отношение активной и реактивной составляющих полного тока:

$$\operatorname{tg}\delta = I_a/I_r,$$

наз. *тангенсом угла диэлектрических потерь*, который м.б. определён экспериментально.

Потери на проводимость: $P = U^2/R$

$$I_a = U/R_a \quad \Rightarrow \quad P = U \cdot I_a ;$$

$$I_a = I_r \operatorname{tg} \delta \quad \Rightarrow \quad P = U \cdot I_r \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

$$I_r = U \cdot \omega \cdot C \quad \Rightarrow \quad P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [\text{Вт}]$$

Чем больше $\operatorname{tg} \delta$ изоляции, тем сильнее она нагревается в переменном поле.

Для неоднородного диэлектрика или поля, формула даёт среднее значение потерь по всему объёму

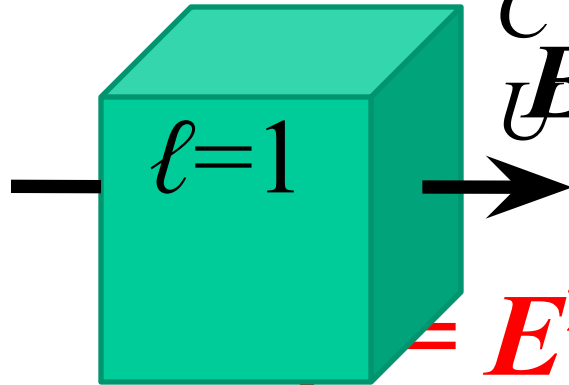
диэлектрика, или

полные

диэлектрические потери.

Удельными диэлектрическими потерями p

называется мощность, рассеиваемая в данном единичном объёме диэлектрика.



The diagram shows a 3D green cube representing a dielectric material. A black arrow labeled E points from left to right through the center of the cube. The length of the cube along the direction of the field is labeled $l=1$. To the right of the cube, there are two equations: $C = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \Delta$ and $\Delta = S/l$, followed by $U = E \cdot l$. Below the cube, the formula for dielectric loss is given: $p = E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg}\delta$ [Вт/м³].

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \Delta, \quad \Delta = S/l,$$
$$U = E \cdot l$$
$$p = E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg}\delta \quad [\text{Вт/м}^3].$$

Чем больше ε и $\operatorname{tg}\delta$, тем больше потери p в данном месте диэлектрика.

$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta$ – коэффициент диэлектрических потерь

Виды диэлектрических потерь

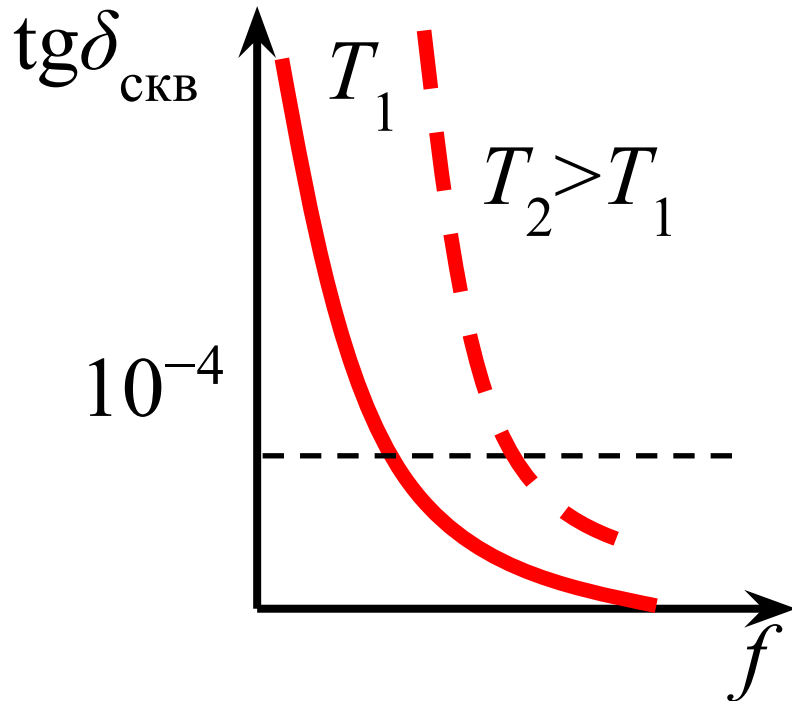
1. Потери на сквозную электропроводимость.
2. Потери на медленные виды поляризации.
3. Потери на неоднородность структуры диэлектрика.
4. Ионизационные потери.
5. Резонансные потери.

Диэлектрические потери на сквозную электропроводимость

наблюдаются во всех диэлектриках

$$P_{\text{СКВ}} = \gamma \cdot E^2$$

$$\text{tg}\delta_{\text{СКВ}} = \frac{\gamma_{\text{СКВ}}}{\omega\epsilon\epsilon_0} = \frac{1,8 \cdot 10^{-10}}{f\epsilon\rho_v}$$

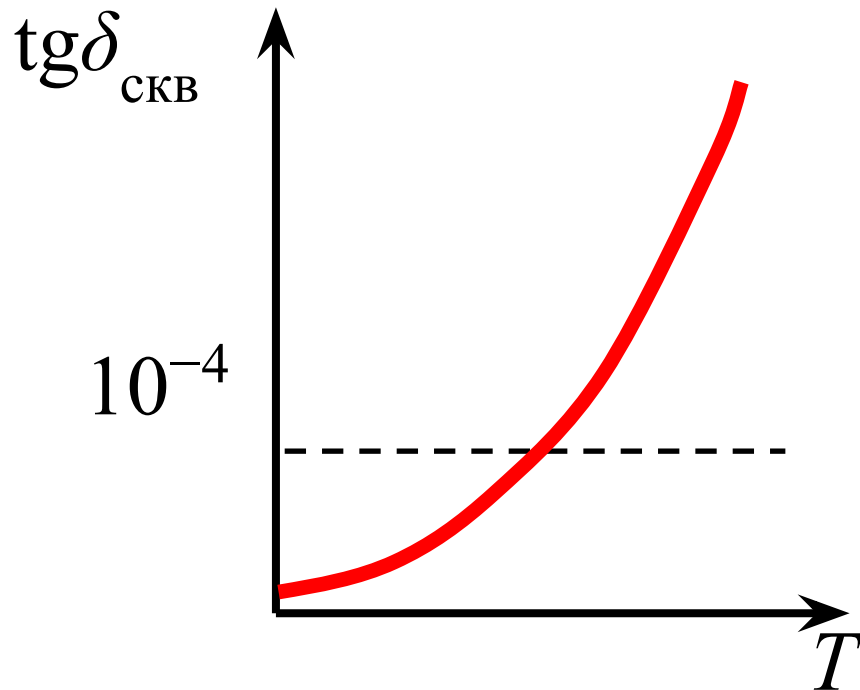


При $\rho > 10^{10}$ Ом·м и $f > 10$ кГц,
 $\text{tg}\delta_{\text{СКВ}} < 10^{-4}$.

Потери существенны лишь при $50 < f < 1000$ Гц, при повышенных T ($> 100^\circ \text{C}$) и при снижении ρ (увлажнение).

С ростом T потери экспоненциально
возрастают из-за роста проводимости γ :

$$P_T = P_0 \cdot \exp(\alpha T)$$



P_T – потери при T ;

P_0 – потери при
 $T = 0^\circ\text{C}$ (или 20°C);

α – постоянная,
определяемая свойствами
диэлектрика.

Диэлектрические потери на медленные виды поляризации

проявляются в полярных диэлектриках и только
в переменных электрических полях

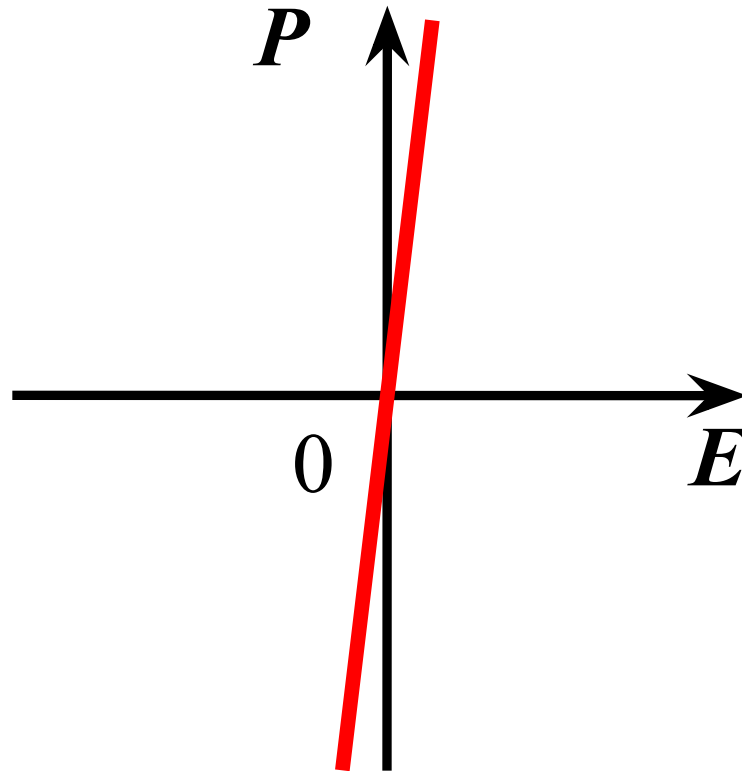
Работа, синусоидального поля E на поляризацию единицы объема диэлектрика за один период определяется интегралом по замкнутому контуру $P(E)$ и равна площади петли $P(E)$:

$$\omega = \oint P dE$$

Если $\tau \ll 1/f$

(область очень низких частот поля),

То P успевает следовать за E , и $\oint P dE = 0$.



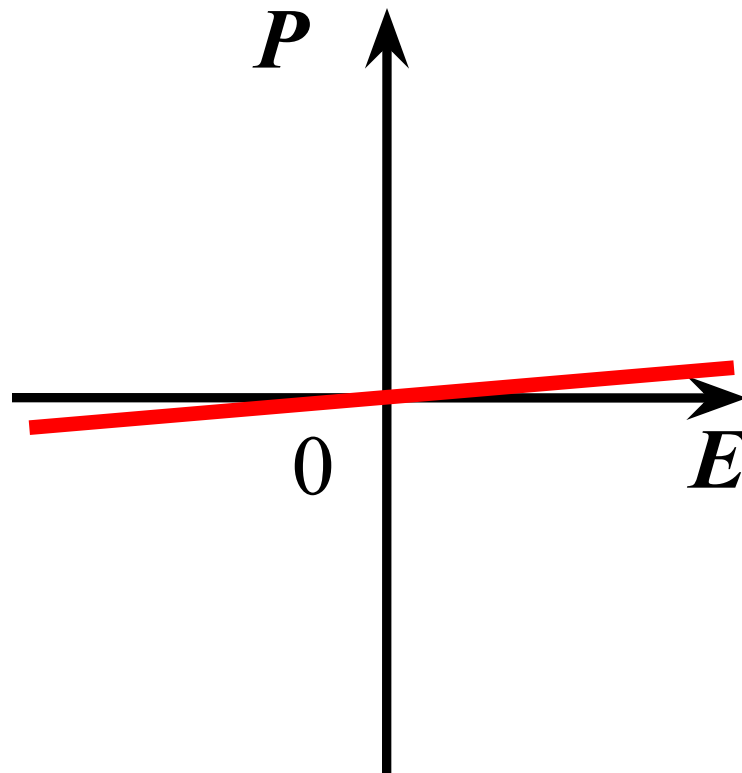
$\tau \ll 1/f$

Если $\tau \gg 1/f$,

(область очень высоких частот поля), то поляризация не успевает установиться

за полупериод изменения E ,

$$P=0 \text{ и } \oint P dE=0.$$



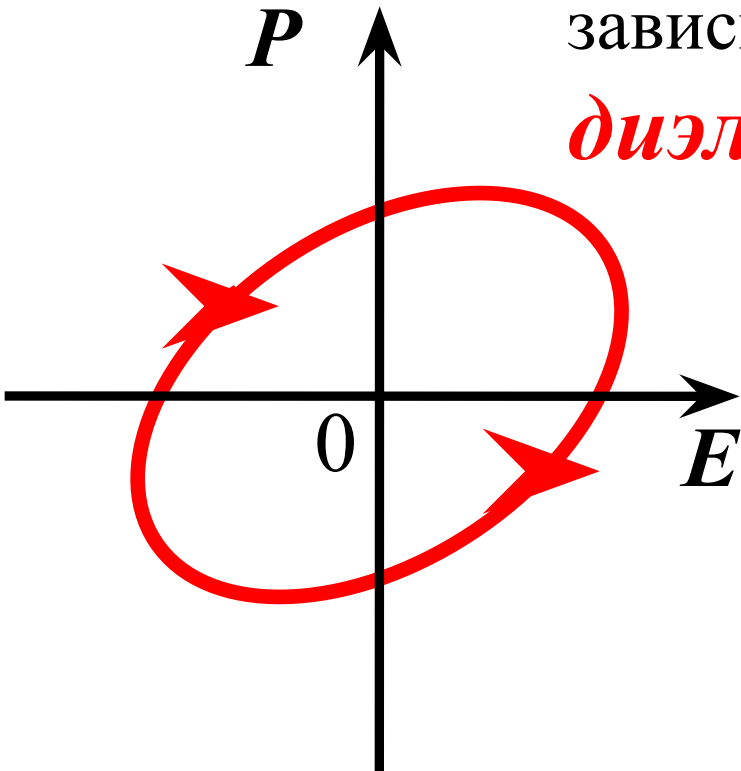
$$\tau \gg 1/f$$

Если $\tau \approx 1/f$,

то P отстает по фазе от E , и $\oint P dE > 0$.

На поляризацию затрачивается энергия поля E , переходящая в диэлектрические потери.

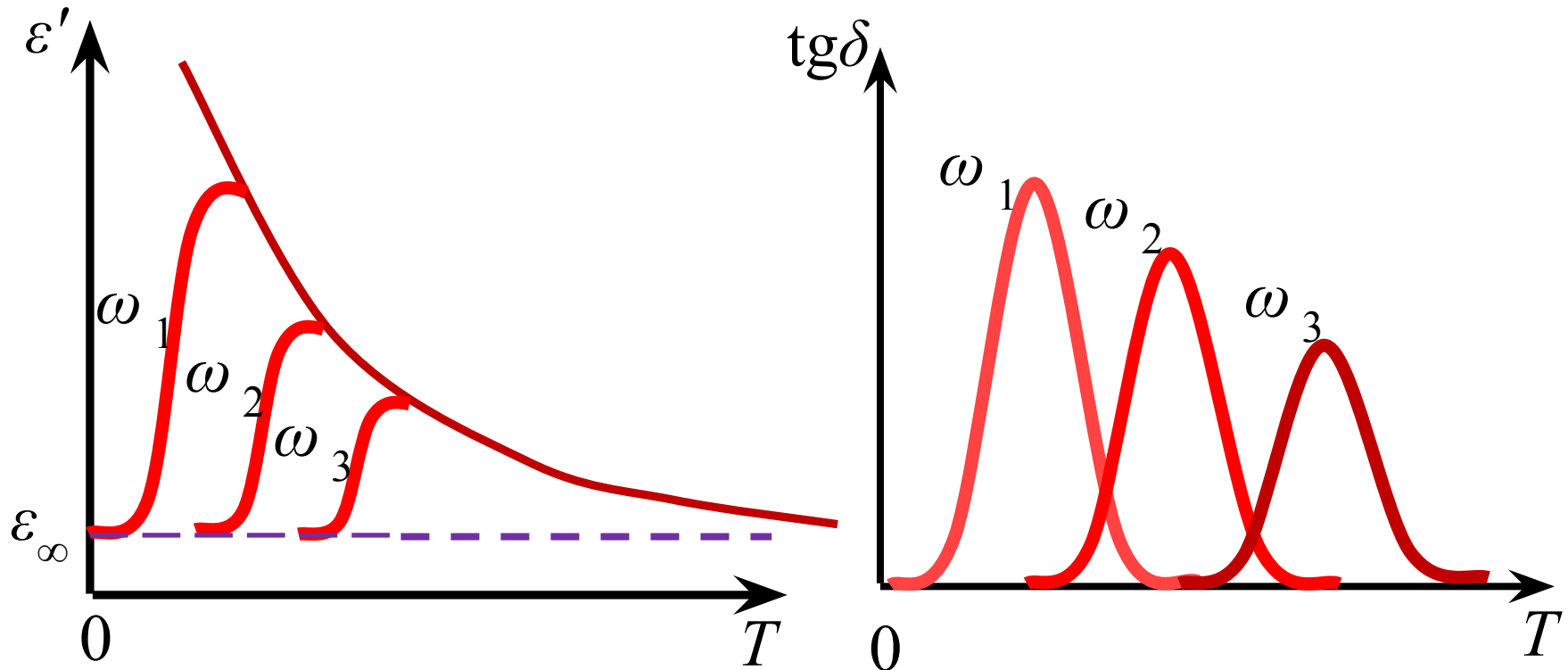
В области частот $f \approx 1/\tau$ наблюдается зависимость ε от частоты, называемая *диэлектрической дисперсией*.



Условие максимума потерь: $\tau \approx 1/f$

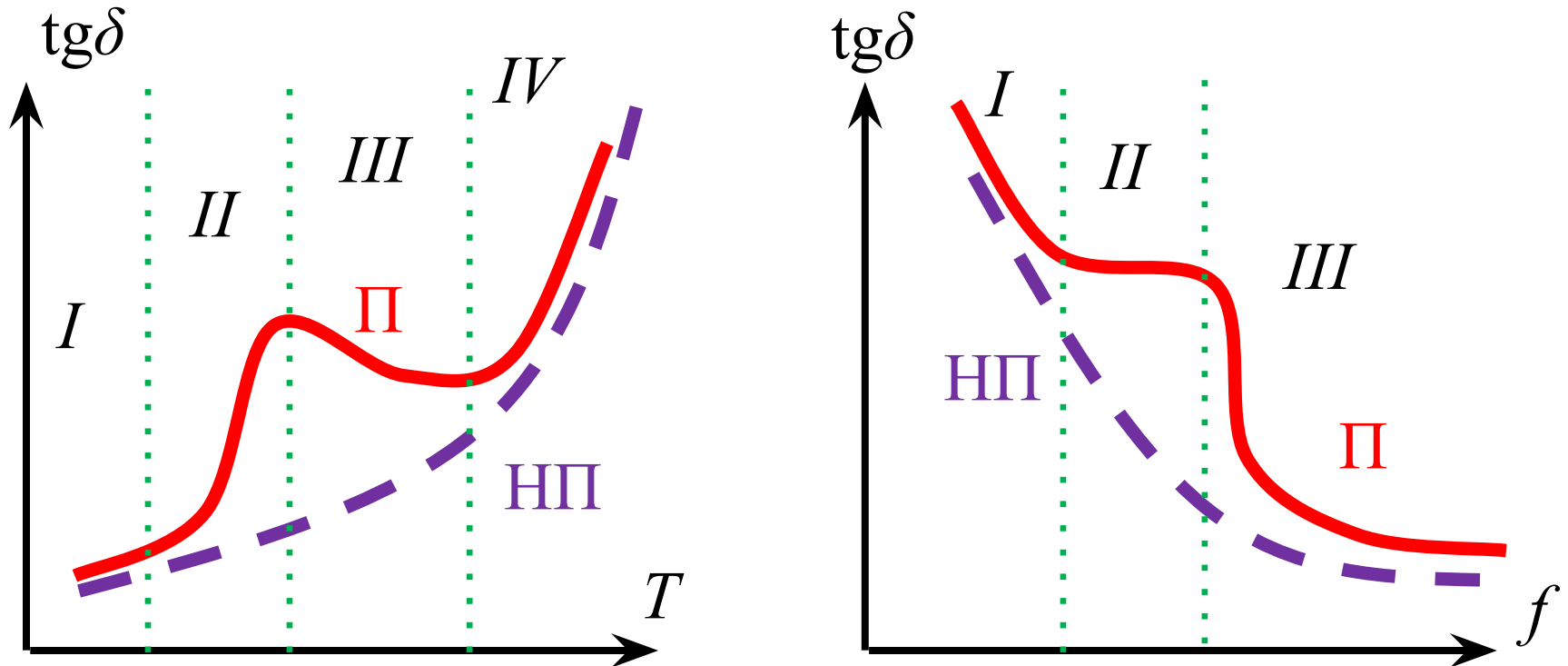
Время установления τ релаксационных видов поляризации уменьшается с ростом температуры \Rightarrow с ростом T максимум диэлектрической дисперсии смещается в область более высоких частот электрического поля.

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$$



Диэлектрические потери в полярных диэлектриках складываются из потерь на электропроводность и релаксационных потерь.

Зависимости $\text{tg}\delta$ от T и f для полярного (II) и неполярного (НП) жидкого диэлектрика:



Диэлектрические потери на неоднородность структуры

характерны для композиционных диэлектриков
и диэлектриков с примесями
(в том числе и проводящими)

гетинакс, текстолит, слюдопласты, керамика,
компаунды, пропитанные материалы и т.д.

Миграционная поляризация обусловлена
миграцией зарядов в проводящих включениях и
их накоплением на границах неоднородностей.

Время установления τ очень велико.

Для композиционных материалов, состоящих из хороших диэлектриков, частота релаксации $f_p < 1$ Гц и миграционные потери малы даже на промышленной частоте (50 Гц).

Если в диэлектрике есть проводящие включения, то f_p оказывается в области рабочих частот и миграционные потери необходимо учитывать.

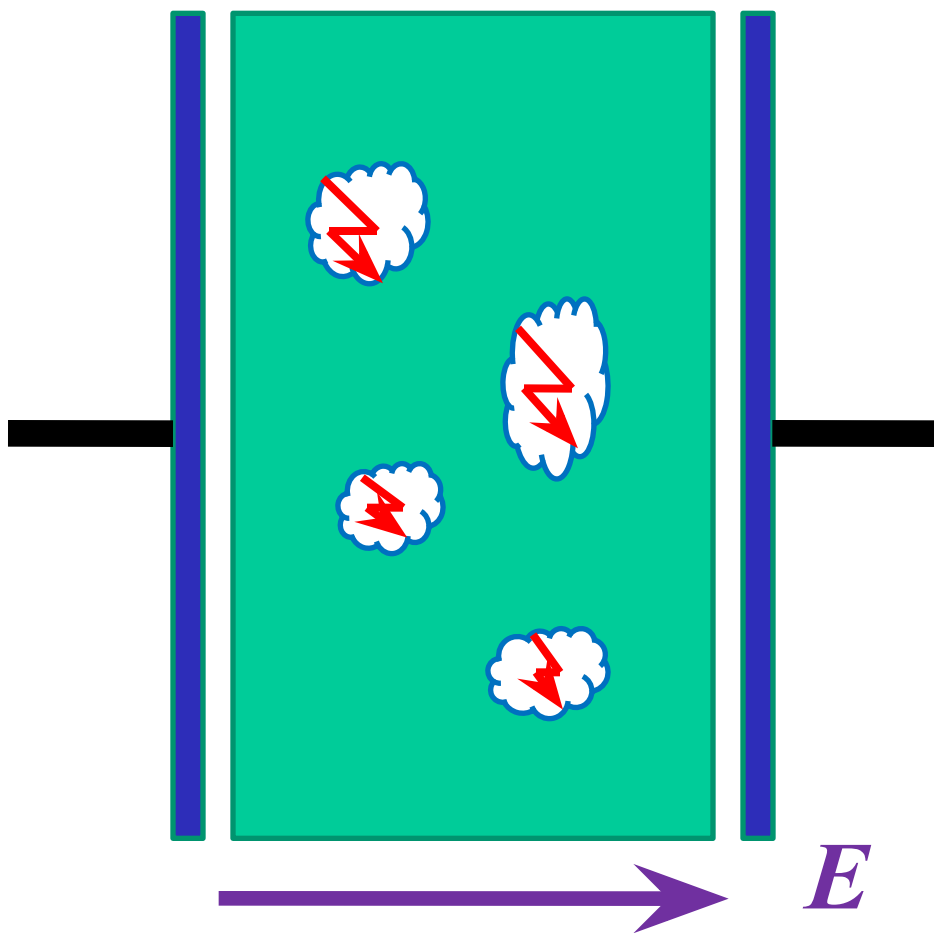
Так, при увлажнении $\text{tg}\delta$ диэлектрика возрастает, так как проводимость воды велика.

В случае миграционной поляризации, как и дипольной, возникает **интервал времен τ релаксации**, что приводит к увеличению частотного интервала миграционных потерь. Причина: неодинаковые свойства основной среды и проводящих включений диэлектрика, неодинаковая форма и ориентация включений.

С ростом T удельная проводимость γ растет экспоненциально, поэтому частота релаксации и максимума миграционных потерь повышается с ростом температуры.

Ионизационные диэлектрические потери

в пористых диэлектриках при повышении напряжения сверх *порога ионизации* $U_{\text{ион}}$



Ионизационные потери:

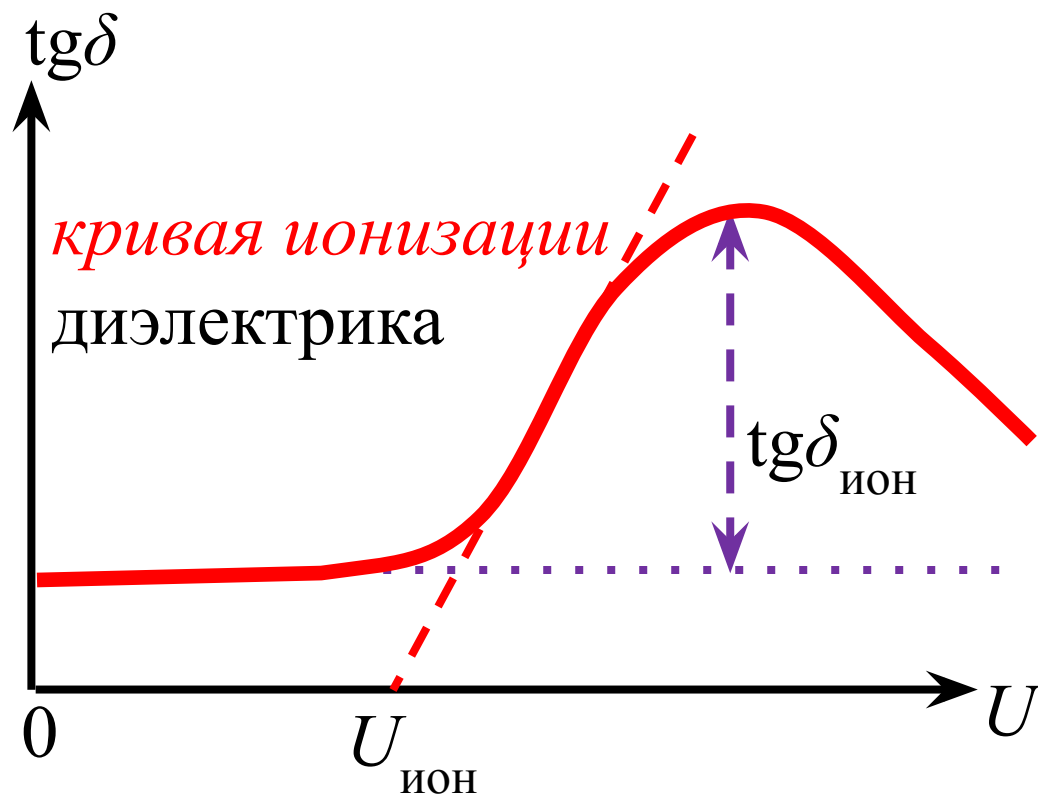
$$P_{\text{ион}} = Af(U - U_{\text{ион}})^3,$$

A – постоянная зависящая от свойств газа в порах;

f – частота приложенного электрического поля;

U – приложенное напряжение.

чем меньше приращение $\operatorname{tg}\delta$ из-за ионизационных потерь ($\operatorname{tg}\delta_{\text{ион}}$) и чем при более высоких напряжениях $U_{\text{ион}}$ начинается рост $\operatorname{tg}\delta$, тем выше качество изоляции высокого напряжения



Резонансные диэлектрические потери

Наблюдаются во всех диэлектриках.

Происходят при дисперсии резонансного характера, когда частота электрического поля приближается к частотам собственных колебаний электронов или ионов.

Резонансные потери электронной поляризации имеют максимумы в оптическом диапазоне: инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра (на частотах 10^{14} – 10^{17} Гц).

С ними связано поглощение света веществом.

Потери сопровождаются частотной зависимостью показателя преломления и максимальны в области т.н. «аномальной» дисперсии, где ε снижается с ростом ω .

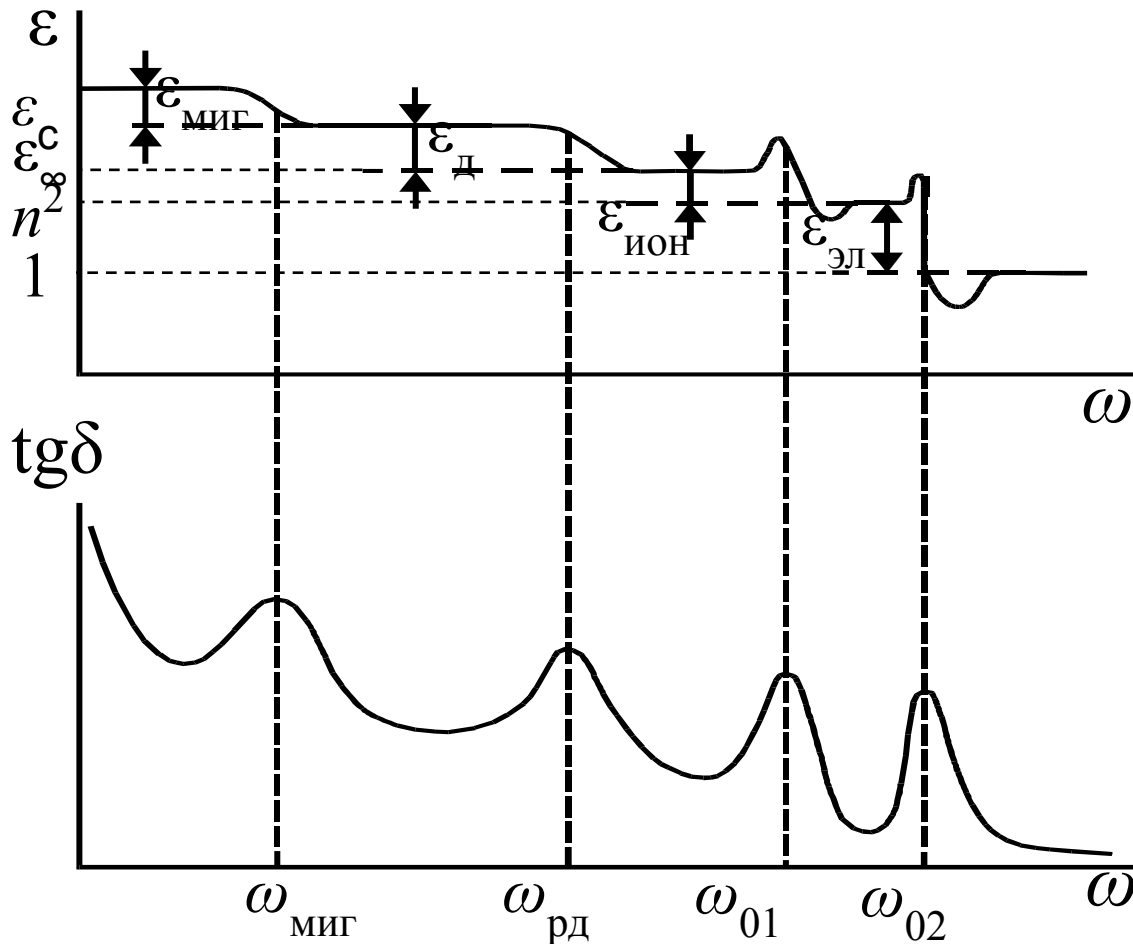
Максимумы резонансных потерь ионной поляризации наблюдаются в инфракрасном диапазоне на частотах 10^{13} – 10^{14} Гц.

В веществах с высокой ε , а также в стеклах и ситаллах, где есть слабо связанные ионы, частоты ионного резонанса могут быть ниже ($\sim 10^{12}$ Гц).

В этом случае начало резонансного максимума потерь захватывает диапазон СВЧ (10^9 – 10^{10} Гц).

Полный диэлектрический спектр

$$\rho = \rho_{\text{скв}} + \rho_{\text{д}} + \rho_{\text{ион}} + \rho_{\text{рез}} + \rho_{\text{миг}}$$



Пробой диэлектриков

Образование в диэлектрике электропроводящего канала под действием электрического поля называют *пробоем*.

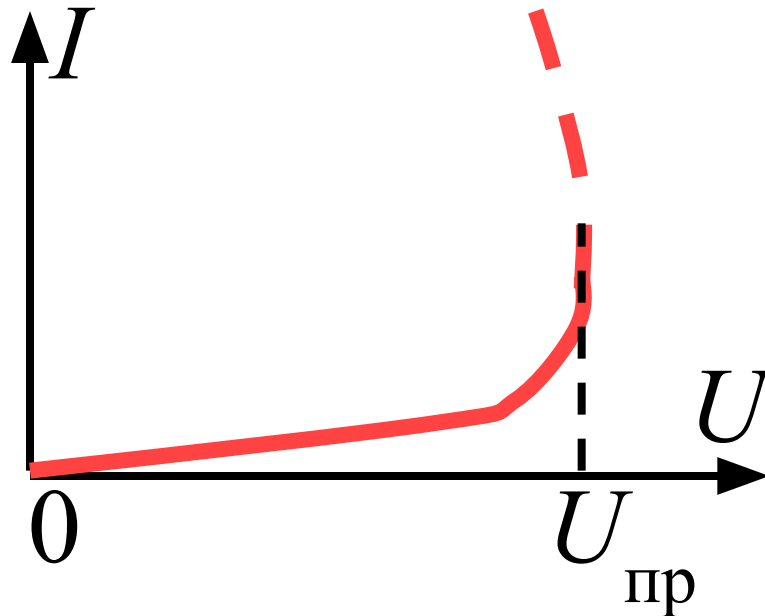
Пробой может быть

полным, неполным, частичным, поверхностным.

Пробивным напряжением $U_{пр}$

называется минимальное приложенное к образцу диэлектрика напряжение, приводящее к его пробое.

Вольтамперная характеристика электрической изоляции:



Отношение $U_{пр}$ к номинальному напряжению, называют *коэффициентом запаса электрической прочности*.

При длительном воздействии электрического поля высокой напряженности происходит *электрическое старение* изоляции, в результате чего $U_{пр}$ снижается.

Кривую зависимости $U_{пр}$ от времени приложения напряжения называют *кривой жизни* электрической изоляции.

$U_{пр}$ зависит от времени приложения напряжения.

При медленном увеличении напряжения, $U_{пр}$ называют

статическим пробивным напряжением.

При воздействии импульсов –

импульсным пробивным напряжением.

Отношение импульсного пробивного напряжения диэлектрика к статическому называют

коэффициентом импульса, который > 1 .

Электрическая прочность —
напряженность однородного
электрического поля,
приводящая к пробоею:

$$E_{\text{ПР}} = U_{\text{ПР}} / h$$

Пробой газов

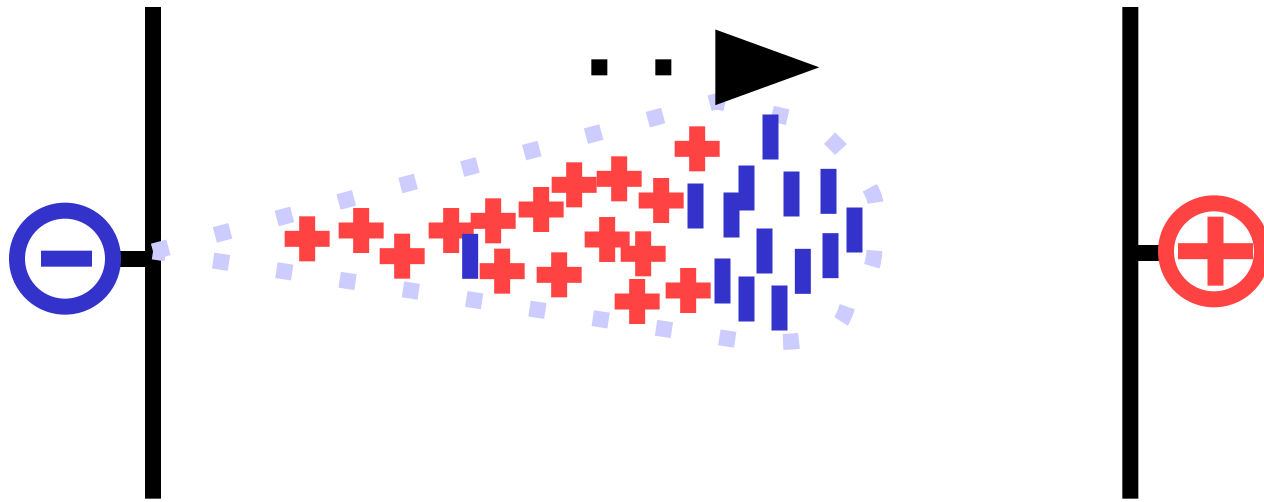
В поле E , заряженные частицы между двумя соударениями приобретают энергию $W=qlE$.

Если $W \geq W_{и}$, то возможен пробой, где $W_{и}$ энергия ионизации молекулы газа.

Начальная напряженность поля $E_{НАЧ}$ — значение напряженности, при которой в данном газе (при данных P и T) начинается *ударная ионизация*.

Пробой газа зависит также от степени однородности электрического поля.

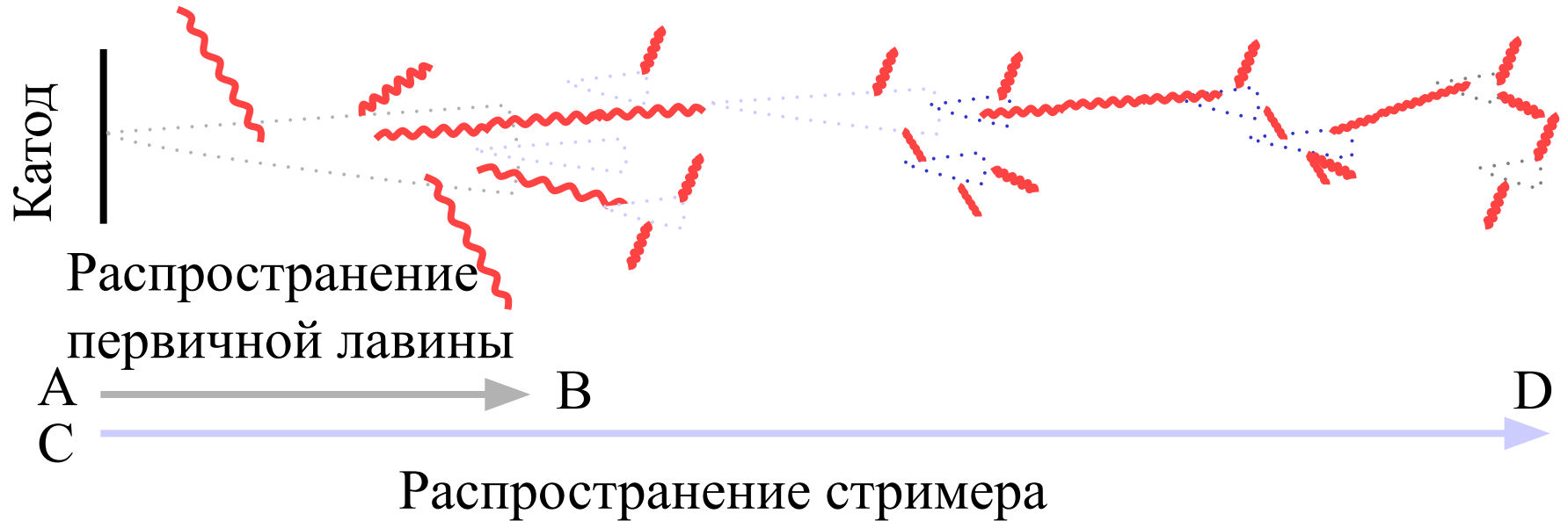
Лавинный механизм пробоя газа – ударная ионизация



Лавинный пробой развивается относительно долго, более 1 мкс, и не характерен для импульсных напряжений.

Лавинно-стримерный пробой, при длине промежутка 1 см, развивается 10^{-7} – 10^{-8} сек.

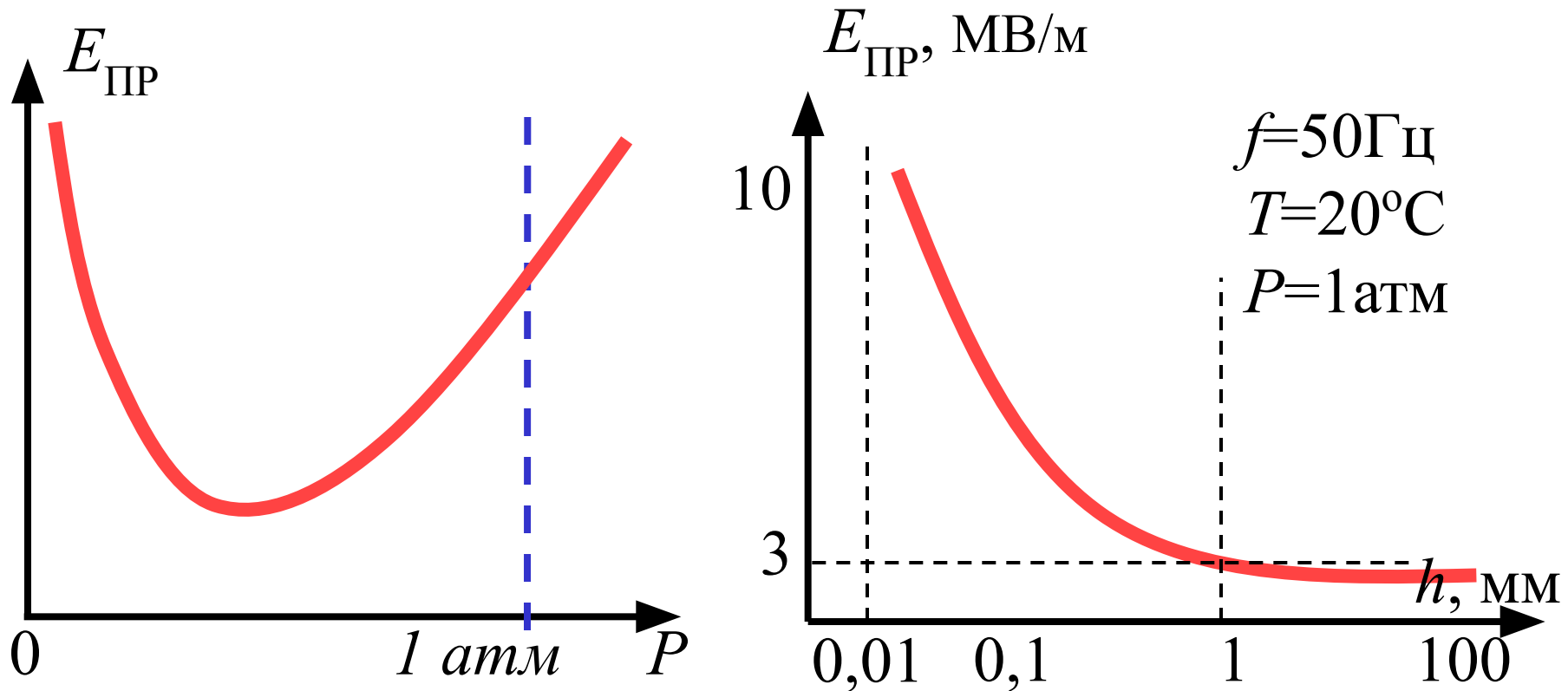
Лавинно-стримерный механизм пробоя газа – совместное действие поля пространственного заряда лавины и фотоионизации в объеме газа.



Стример – скопление ионизованных частиц, намного превосходящее лавину по степени ионизации.

Одновременно с ростом стримера, направленного к аноду, образуется лавинный поток положительно заряженных частиц, направленный к катоду.

Зависимость $E_{\text{ПР}}$ газа от давления P и расстояния между электродами h в *однородном* поле:



Эмпирический *закон Пащенко*:

если длина разрядного промежутка h и давление газа p изменяются так, что

$h \cdot p = const$, то и $U_{\text{ПР}} = const$.

Т.е. $U_{\text{ПР}}$ газов является функцией произведения ph .

В неоднородном поле:

В местах, где E достигает критических значений, возникают частичные разряды в виде *короны*.

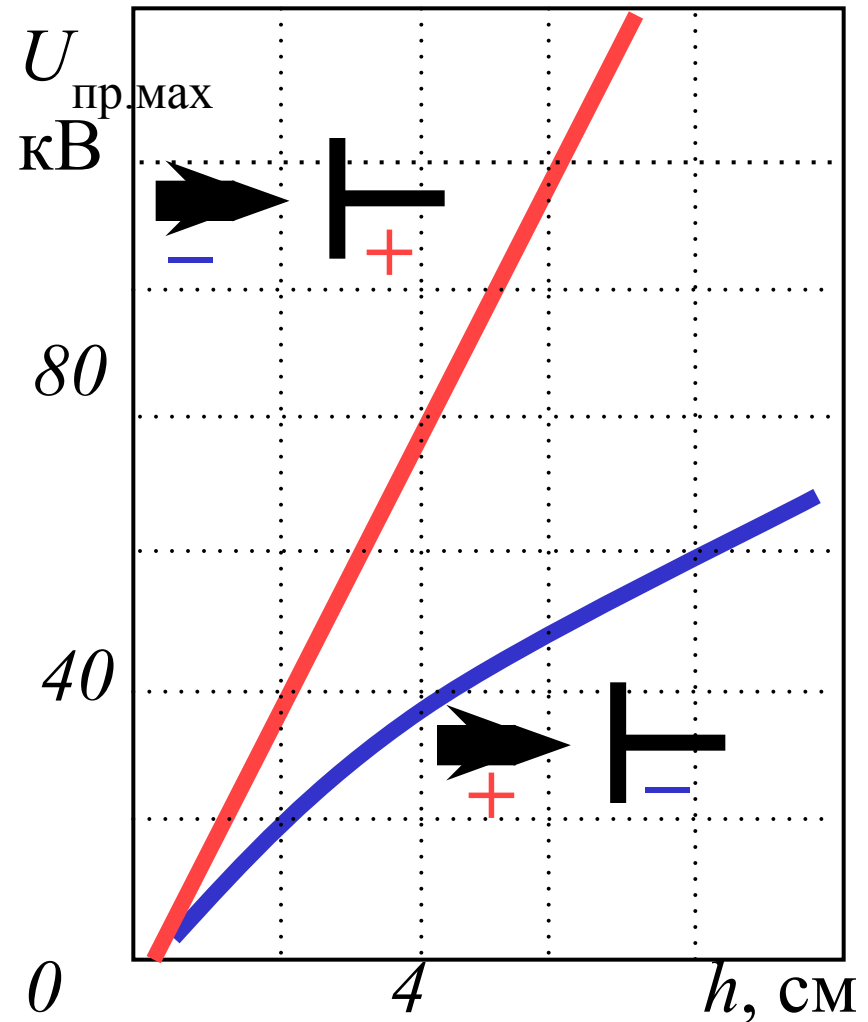
При возрастании напряжения корона переходит в искровой разряд и дугу.

Величина $U_{\text{ПР}}$ газа зависит от расстояния между электродами, от полярности электродов и от частоты поля.

Зависимость $U_{\text{пр}}$ воздуха от расстояния между электродами:

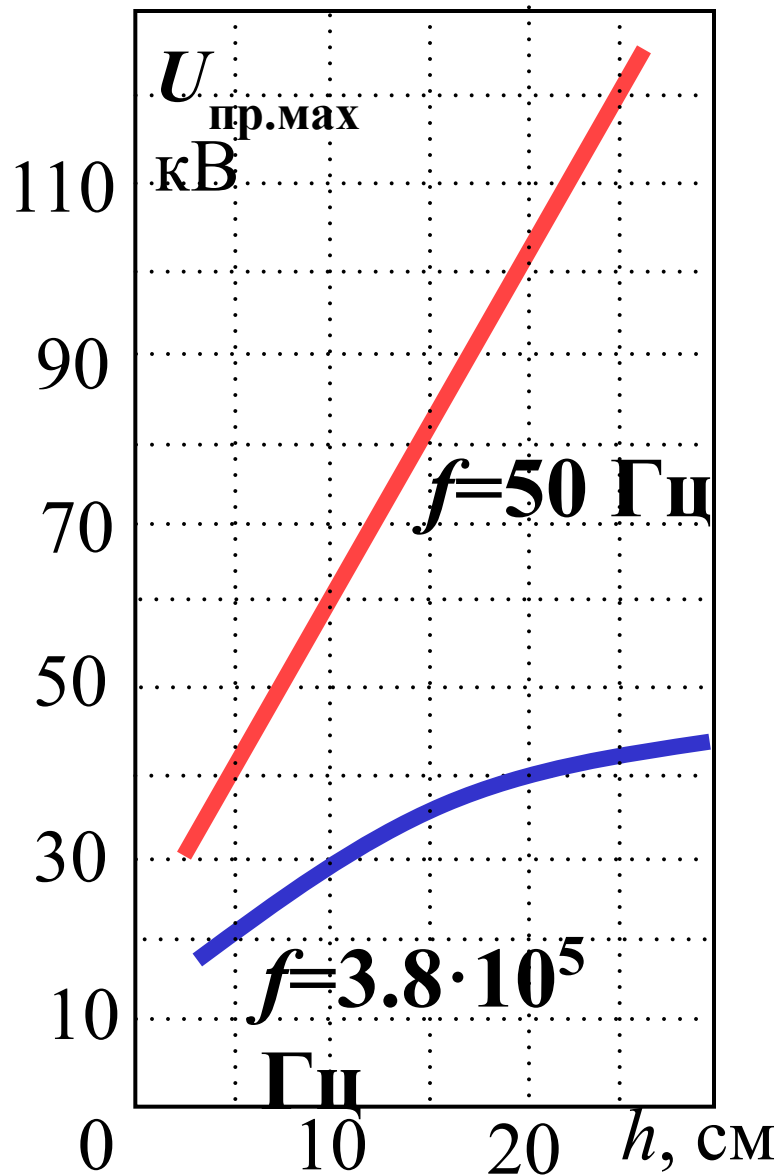
При положительной полярности на игле, $U_{\text{пр}}$ меньше, чем при обратной полярности.

Это объясняется образованием у иглы положительного объемного заряда, содействующего развитию пробоя.



В отличие от пробоя газа в однородном поле, в неоднородном поле *при высоких частотах $U_{\text{ПР}}$ меньше, чем при постоянном напряжении* или напряжении технической частоты.

При высоких частотах напряжение появления короны, почти совпадает с $U_{\text{ПР}}$. В этом случае $U_{\text{ПР}}$ слабо возрастает с увеличением расстояния между электродами.



Зависимость $U_{\text{пр}}$ воздуха от расстояния между электродами в неоднородном поле при разных частотах.

При н.у., постоянном напряжении и расстоянии между электродами 1 см электрическая прочность воздуха $E_{\text{пр}}=3\text{МВ/м}$.

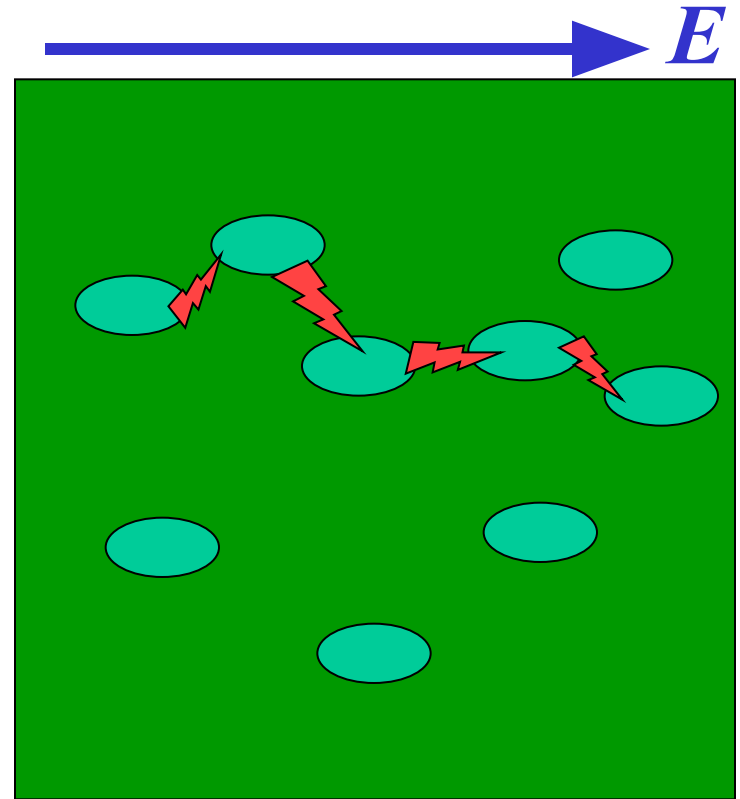
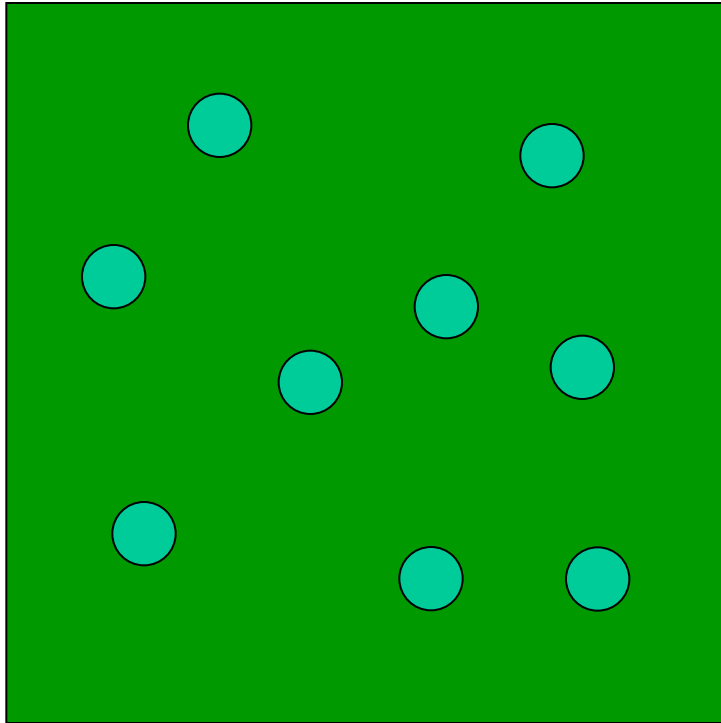
Пробой жидких диэлектриков

Механизм пробоя и электрическая прочность жидких диэлектриков зависят от чистоты.

При кратковременном воздействии, пробой *тщательно очищенных жидкостей* связан с: *ударной ионизацией* и *холодной эмиссией* с катода.
 $E_{\text{ПР}} \sim 100 \text{ МВ/м}$, на 2 порядка выше, чем у газов.

В *загрязненных и технически чистых жидкостях* пробой связан с движением и перераспределением частиц примесей.

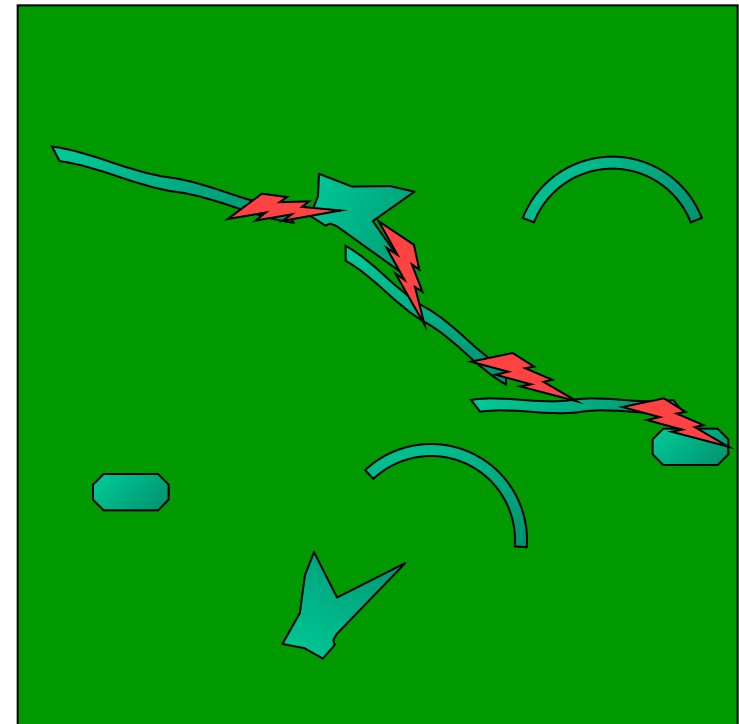
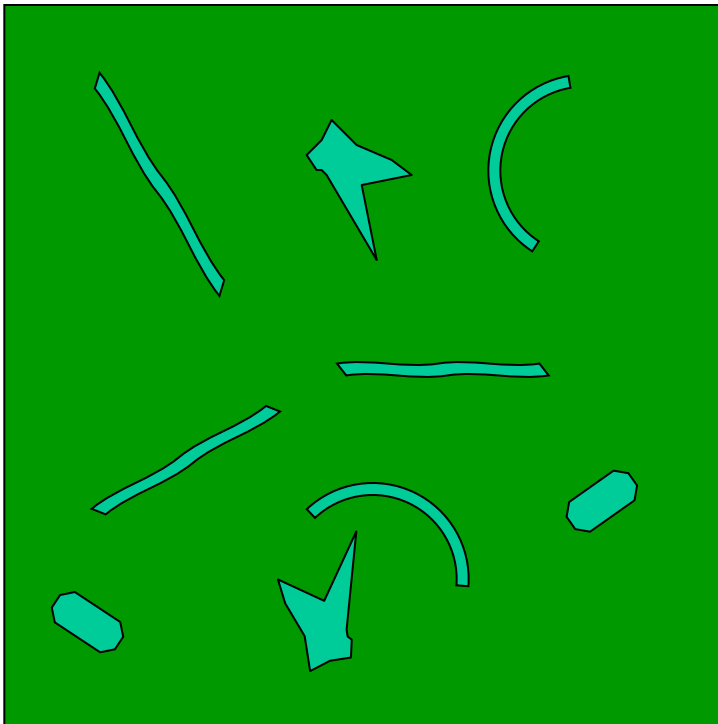
Пробой жидкого диэлектрика с *эмульгированной влагой* (теория Геманта).



Критерий Геманта:

пробой происходит, когда межэлектродное пространство перекрыто каплями на **60–70%**.

Пробой жидкого диэлектрика с
твёрдыми примесями
(теория А.Ф. Вальтера)



Пробой твердых диэлектриков

Механизмы пробоя:

- *электрический,*
- *электротепловой,*
- *электрохимический,*
- *ионизационный.*

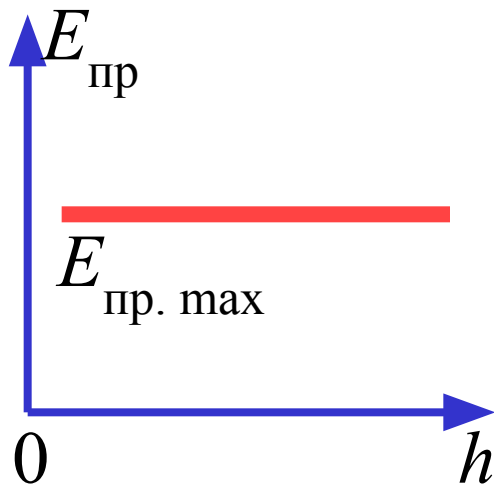
Электрический пробой

обусловлен ударной ионизацией или разрывом связей между частицами диэлектрика под действием электрического поля

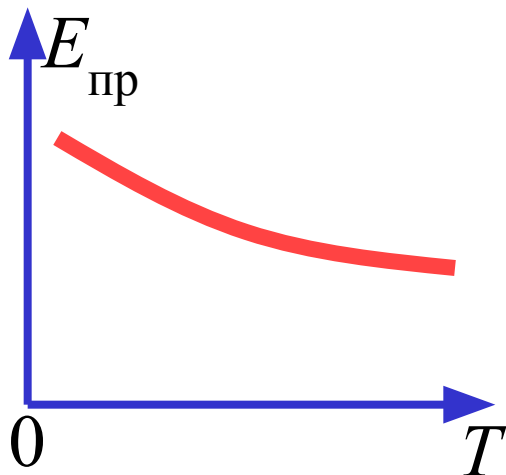
Наблюдается в однородных диэлектриках с малым $tg\delta$.

Время пробоя $< 10^{-7} \div 10^{-8}$ с.

$$E_{\text{ПР}} = 100 \div 1000 \text{ МВ/м}$$



$E_{\text{пр}}$ определяется строением диэлектрика (плотностью упаковки, прочностью связей атомов).



$E_{\text{пр}}$ практически не зависит от внешних факторов: температура, частота приложенного напряжения, форма и размеры образца.

Тепловой пробой

возникает, когда количество тепла, выделенного в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превышает количество рассеиваемого тепла.

Нарушение теплового равновесия ведет к разогреву материала, расплавлению, растрескиванию, обугливанию и к разрушению диэлектрика.

Условие теплового равновесия :

$$P_n = P_p.$$

Мощность, выделяемая в диэлектрике:

$$P_n = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta.$$

Тепло, отводимое от образца:

$$P_p = k S (T - T_0),$$

k – коэффициент теплоотдачи.

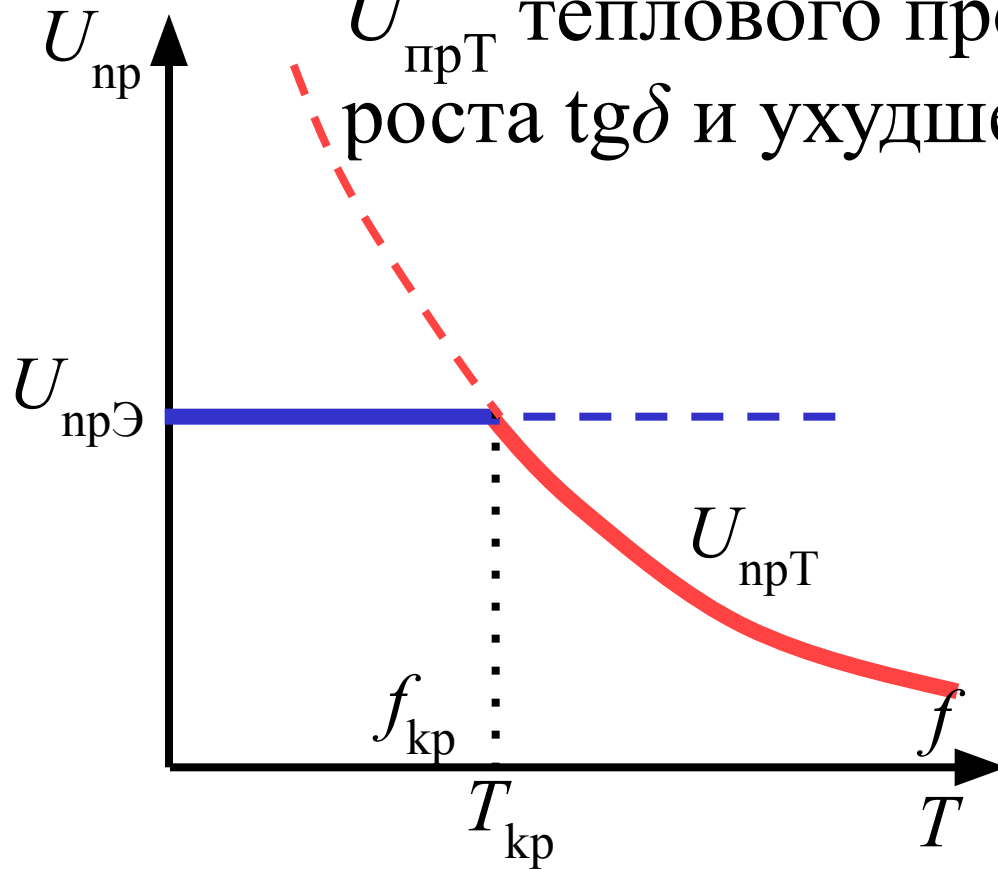
$$U_{пр} = \sqrt{\frac{k \cdot S \cdot (T_{кр} - T_0)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}}$$

$\operatorname{tg} \delta$ соответствует критической температуре $T_{кр}$, при которой выполняется $P_n = P_p$.

В отличие от электрического пробоя, напряжение теплового пробоя зависит от частоты как $f^{-1/2}$.

Т.о., $U_{пр}$ снижается на высоких частотах.

С ростом T электрическая прочность $E_{прТ}$ при тепловом пробое уменьшается, т.к. $U_{прТ}$ теплового пробоя снижается за счет роста $\text{tg}\delta$ и ухудшения теплоотвода.



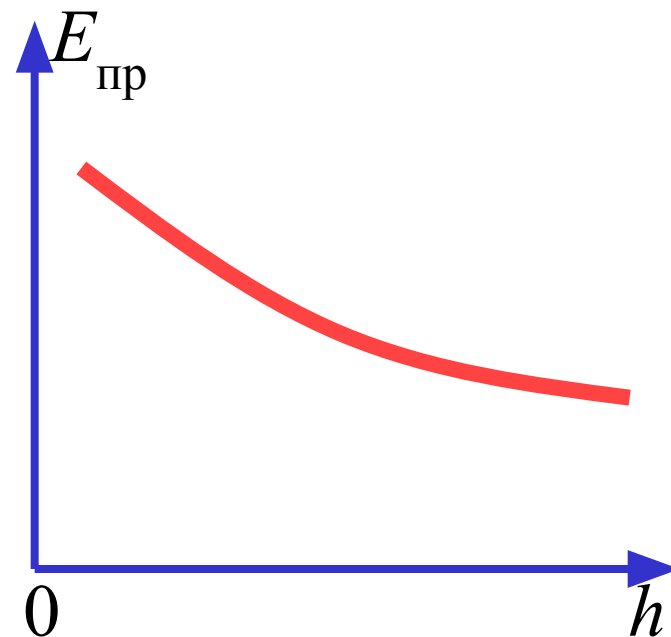
$U_{прТ} > U_{прЭ}$
электрический
пробой

$U_{прТ} < U_{прЭ}$
тепловой
пробой

С изменением f или T может изменяться механизм пробоя диэлектрика. $f_{кр}$ (или $T_{кр}$), зависит от свойств диэлектрика, условий теплоотвода, времени приложения напряжения, скважности импульсов.

При увеличении толщины диэлектрика h , $U_{\text{прТ}}$ возрастает.

Количество выделяемого тепла пропорционально **объему** диэлектрика, а количество отводимого тепла пропорционально **площади** теплообмена. Поэтому при увеличении толщины h , нагрев диэлектрика за счет потерь возрастает быстрее, чем отвод тепла.



При тепловом пробое электрическая прочность $E_{\text{прТ}}$ с ростом h уменьшается.

Электрохимический пробой наблюдается при длительном приложении напряжения.

Под действием E , T , кислорода в диэлектрике идет окисление, разрыв связей и другие процессы, приводящие к его **старению**. Образующиеся низкомолекулярные вещества (щёлочи, кислоты, окислы азота, озон и др.), взаимодействуют с веществом диэлектрика и ускоряют процессы старения.

Электрическое старение особенно существенно при воздействии постоянного напряжения. Характеристикой является **время жизни** электрической изоляции или **кривая жизни**.

Ионизационный пробой

Обусловлен ионизационными процессами из-за частичных разрядов в диэлектрике.

Характерен для диэлектриков с воздушными включениями.

При больших напряженностях поля в воздушных порах возникает ионизация воздуха, образование озона, ускоренных ионов, выделение тепла. Эти факторы приводят к разрушению изоляции и снижению $E_{пр}$.

Наряду с объемным возможен и *поверхностный пробой*: пробой в жидком или газообразном диэлектрике, прилегающем к поверхности твердой изоляции.

Так как $E_{\text{пр}}$ жидкостей и газов ниже $E_{\text{пр}}$ твердых диэлектриков, то пробой в первую очередь будет происходить по поверхности диэлектрика.

Чтобы исключить поверхностный пробой, поверхность изоляторов делают гофрированной, а в конденсаторах оставляют не металлизированные закраины диэлектрика. Поверхностное $U_{\text{пр}}$ также повышают путем герметизации поверхности электрической изоляции лаками, компаундами, жидкими диэлектриками с высокой $E_{\text{пр}}$.