

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2021 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

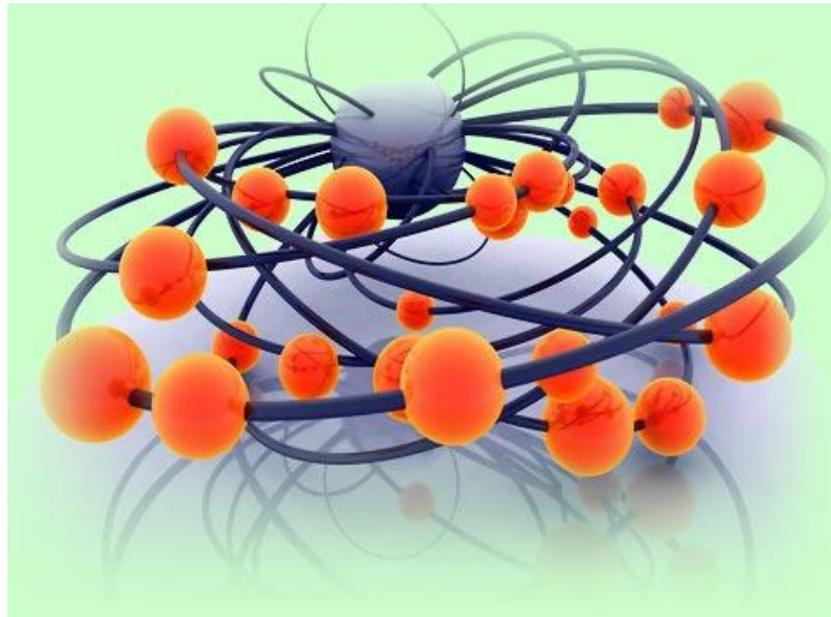
Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

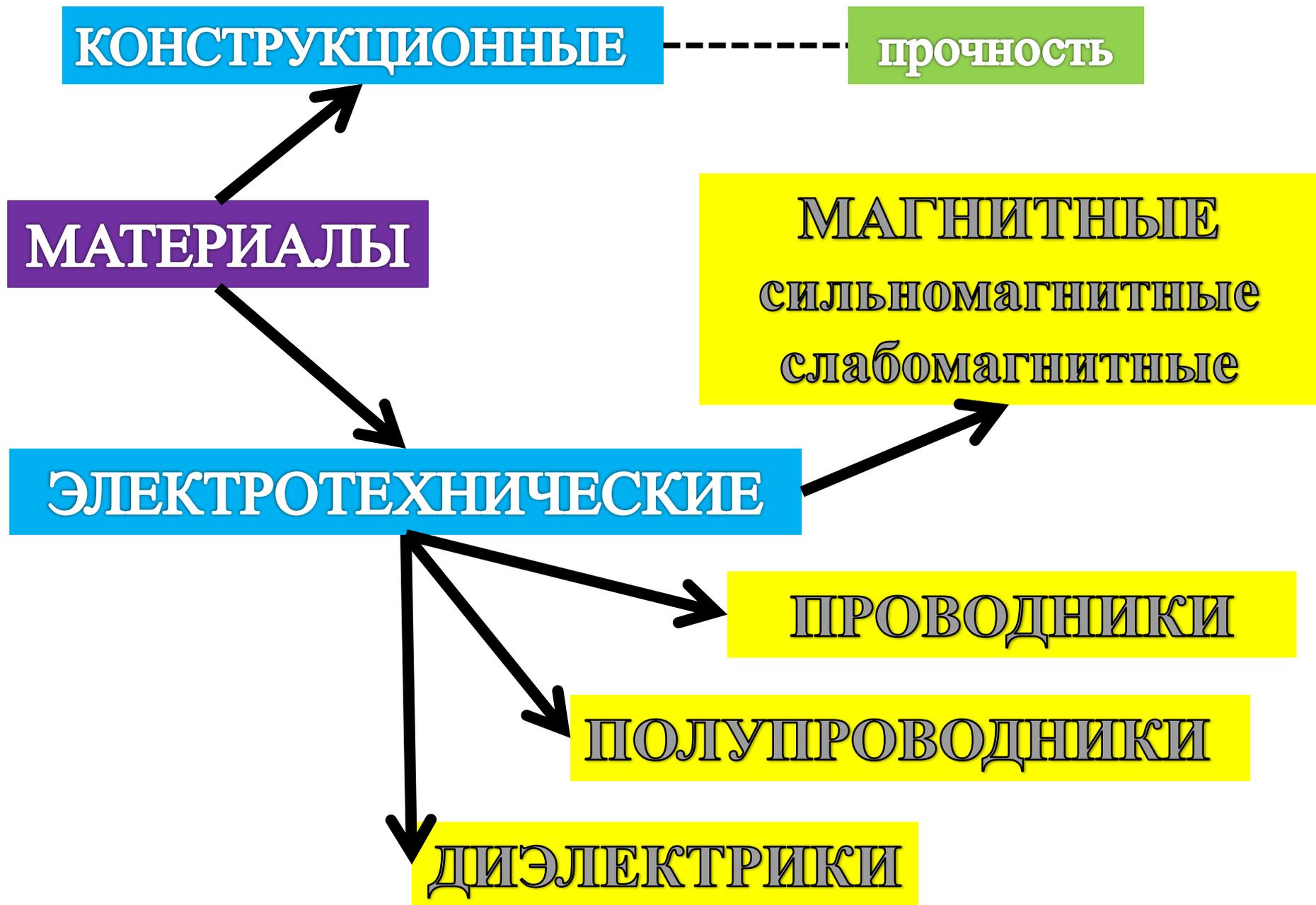
# Литература

- **Дудкин А.Н., Ким В.С. Электротехническое материаловедение. Учебное пособие**
- **Корицкий Ю. В. Электротехнические материалы.**
- **Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. Изд. 6-е, Энергия, 1977.**
- **Майофис И.М. Химия диэлектриков. Высшая школа, 1970.**
- **Тареев Б.М. Электрорадиоматериалы.- М.: Высшая школа, 1978.-336 с.**

# МДЭ Консультация

- ❖ Магнитные материалы.
- ❖ Проводниковые материалы.
- ❖ Полупроводниковые материалы.
- ❖ Диэлектрические материалы





# ДЕМО версия экзамена

Запрещенной зоной называется

- 1) энергетическая область в веществе, где не могут находиться электроны
- 2) энергия электронов, при которой кристалл разогревается вплоть до разрушения
- 3) значения энергий электронов, которые необходимы для образования металлической связи
- 4) значения энергий, которыми собственные электроны обладать не могут

❖ 1. Правильный ответ: **1.**

Явление магнитострикции вещества заключается в

- 1) способности вещества создавать поле, направленное противоположно внешнему полю
- 2) изменении линейных размеров веществ при воздействии магнитного поля
- 3) способности вещества длительное время оставаться в состоянии намагничивания
- 4) различной намагниченности вдоль разных осей кристалла

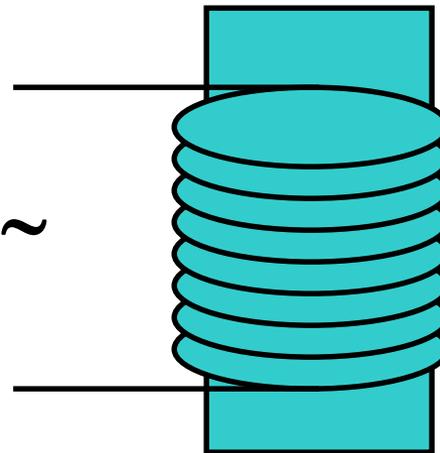
❖ 2. Правильный ответ: **2.**

- Если же вещество находится в **конденсированном** (т.е. в жидком или твердом) агрегатном состоянии, имеет место **взаимодействие атомов**. В результате **взаимодействия** линейные уровни валентных электронов сливаются в непрерывный спектр энергий: **валентную зону (ВЗ)**.
- А **незанятые разрешённые уровни** возбуждённых состояний объединяются в **зону проводимости (ЗП)**.
- У **неметаллических** материалов эти зоны разделены **запрещённой зоной (ЗЗ)**, т.е. интервалом энергий, запрещённых для электронов. В **металлах** **запрещённая зона отсутствует**.

# МАГНИТОСТРИКЦИЯ -

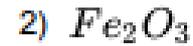
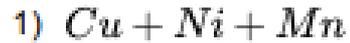
**- ИЗМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ  
МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

**Генераторы УЗ – колебаний. ~**



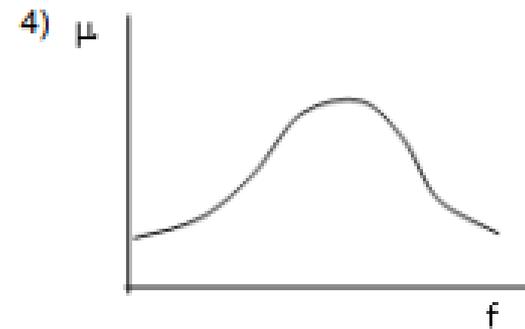
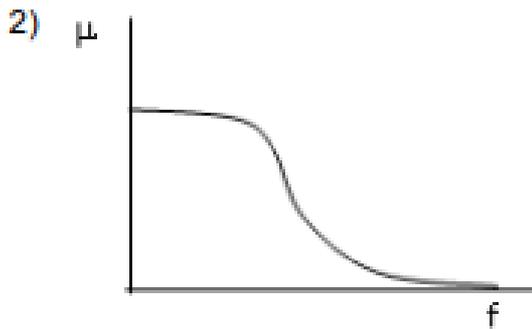
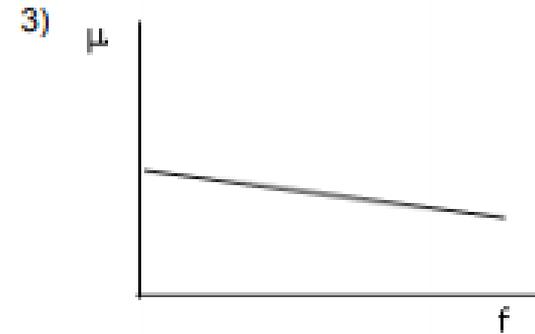
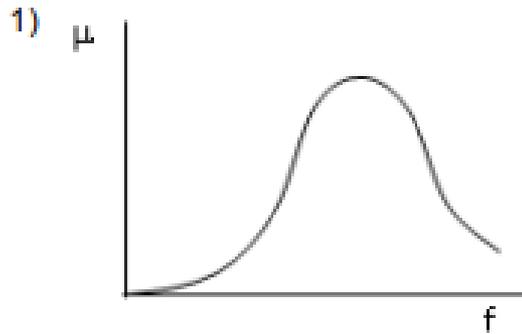
Пожарные и другие сирены, изготовлены на основе таких генераторов.

Сплав типа пермаллой



❖ 3. Правильный ответ: 3.

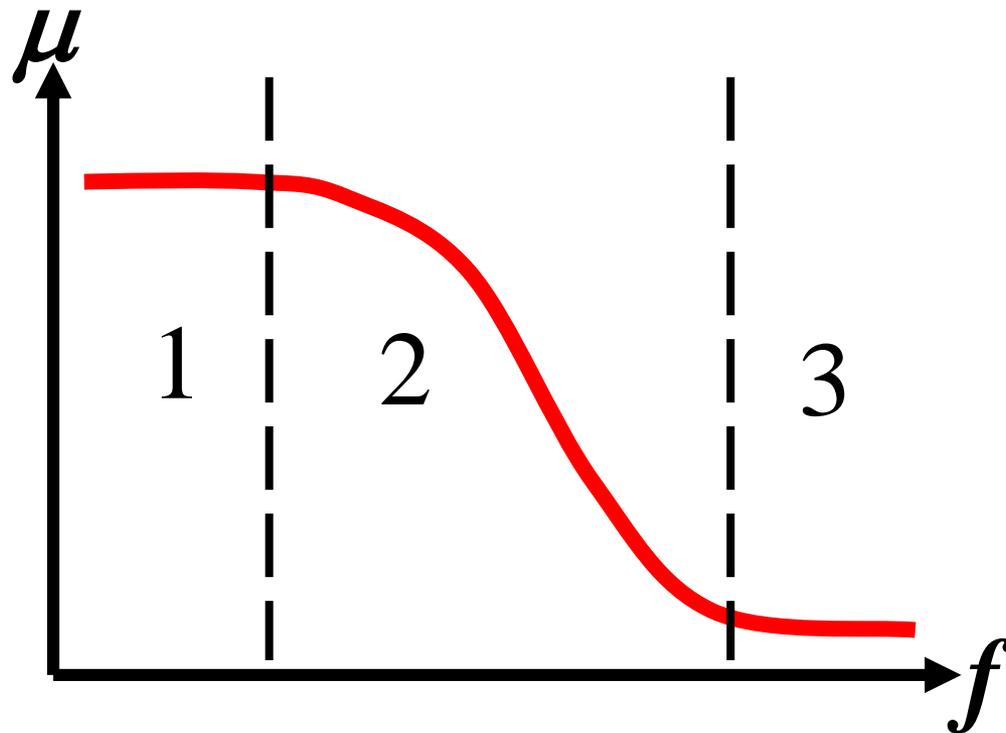
График зависимости относительной магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнетиков от частоты приложенного поля  $f$



❖ 4. Правильный ответ: 2.

*Пермаллои* представляют собой сплавы железа с никелем или железа с никелем и кобальтом, обычно легированные молибденом, хромом и другими элементами.

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ $f$ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ $\mu$



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

Обл. 2 — домен начал разворачиваться вслед за  $H$ , а  $H$  развернулся уже в др. сторону. Обл. 3 — по магнитным свойствам — парамагнетик.

Доменной структурой обладают

- 1) ферромагнетики      2) ферримагнетики      3) диамагнетики      4) парамагнетики

❖ 5. Правильный ответ: 1, 2.

Под доменами в ферро- и ферримагнетиках понимаются области

- 1) в которых магнитные моменты атомов компенсируют друг друга  
2) в которых магнитные моменты атомов расположены неупорядоченно  
3) в которых элементарные магнитные моменты образуют замкнутую силовую линию  
4) самопроизвольного намагничивания почти до насыщения без воздействия внешнего поля

❖ 6. Правильный ответ: 4.

Химический состав ферритов характеризуется формулой

- 1)  $Fe - Ni - Cr$       2)  $Na(CO_3)_2 \cdot MeO$       3)  $Fe_2O_3 \cdot MeO$       4)  $Cu - Ni - Fe$

❖ 7. Правильный ответ: 3.

Величина удельного сопротивления  $\rho$  проводниковых материалов находится в пределах

- 1)  $10^{-8} \div 10^{-6}$  Ом·м      3)  $10^{-18} \div 10^{-16}$  Ом·м  
2)  $10^7 \div 10^{17}$  Ом·м      4)  $10^{-5} \div 10^9$  Ом·м

❖ 8. Правильный ответ: 1.

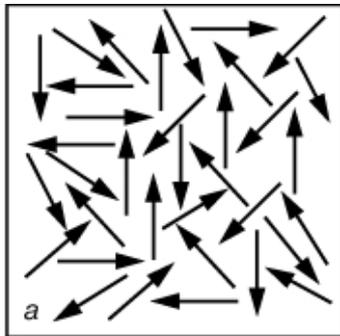
- Для **ферримагнетиков**, как и для **ферромагнетиков**, характерно **наличие доменной структуры**.
- К **ферримагнетикам** относятся **ферриты** — соединения, которые могут иметь различную структуру кристаллической решетки типа **шпинели**, **граната**, **каменной соли**, **гексагональную** и др.

По **электрическим свойствам** ферриты представляют собой **полупроводники**.

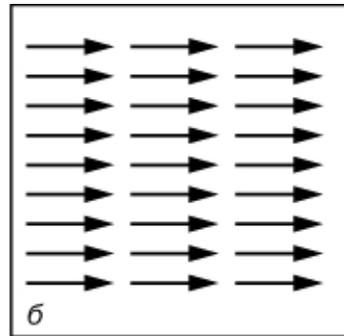


# Намагничивание ферромагнетиков

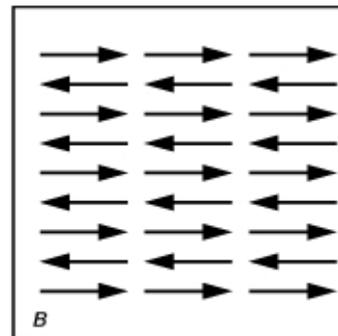
**Доменом** называется *макроскопическая* область материала, внутри которой *намагниченность* спонтанно ( $H=0$ ) достигает насыщения, т.е. внутри домена *магнитные моменты* практически всех атомов ориентированы в *одном* направлении.



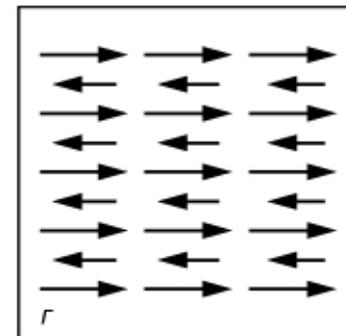
Парамагнитное вещество  
во внешнем поле —  
атомные магниты  
разупорядочены



Ферромагнитное  
вещество —  
атомные магниты  
упорядочены



Антиферромагнитное  
вещество —  
атомные магниты  
ориентированы  
антипараллельно  
и магнитный момент  
отсутствует



Ферримагнитное  
вещество —  
нескомпенсированная  
антипараллельная  
ориентация

Ферриты – химические соединения окиси железа  $Fe_2O_3$  с оксидами металлов. Они могут быть получены различными способами, однако промышленностью освоена пока только керамическая технология.

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

*удельная электрическая проводимость*

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

*удельное электрическое сопротивление*

$\rho$  и  $\gamma$  характеризуют электрические свойства материала

Обычно относят:

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

к *полупроводникам* – с  $\rho \sim 10^{-6} - 10^9 Ом \cdot м$ ;

к *диэлектрикам* – с  $\rho > 10^7 Ом \cdot м$ .

Под длиной свободного пробега электрона  $\lambda$  в металлах понимается расстояние, которое пролетает электрон

- 1) за полупериод приложенного электрического напряжения
- 2) между двумя соударениями с другими электронами
- 3) под действием электрического поля между соударениями с ионами кристаллической решётки
- 4) за время действия приложенного электрического напряжения

❖ 9. Правильный ответ: 3.

Установите соответствие между областями применения проводниковых материалов

А	Б

**МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ**

- А) высокой проводимости
- Б) с высоким удельным сопротивлением

**МАТЕРИАЛЫ**

- 1) константан, нихром, вольфрам
- 2) бронза, латунь, медь, алюминий
- 3) слюда, миканит, оксид алюминия

❖ 10. Правильный ответ: А-2, Б-1.

С увеличением температуры удельное сопротивление металлов растёт по причине увеличения

- 1) амплитуды и частоты колебаний ионов, т.к. уменьшается длина свободного пробега электронов
- 2) энергии тепловых колебаний ионов кристаллической решётки, т.к. увеличивается длина свободного пробега ионов
- 3) энергии тепловых колебаний ионов решётки, т.к. увеличивается концентрация свободных ионов
- 4) деформаций кристаллической решётки, т.к. уменьшается концентрация свободных носителей зарядов

❖ 11. Правильный ответ: 1.

**$\lambda$**  - длина свободного пробега с.н.з., определяет подвижность  $\mu$  с.н.з.

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

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

# 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:**  $Cu-60\%$  ;  $Ni-40\%$

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

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

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

**Фехрали**  $\rho = 1,1 \div 1,5 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$

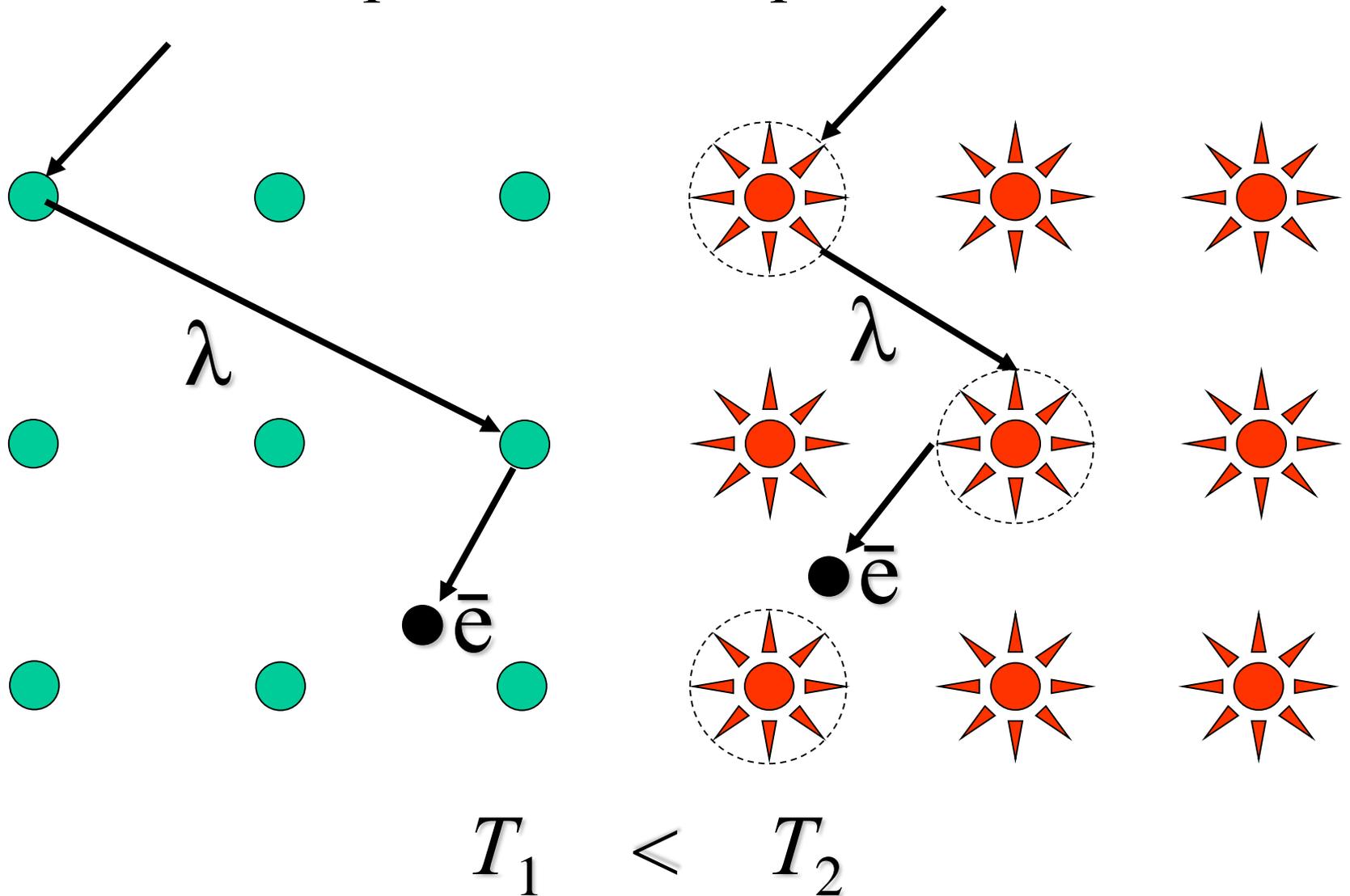
$(20 \div 40)\% Fe + (60 \div 70)\% Cr + (5 \div 10)\% Al$

**Хромали**  $\rho = 1,1 \div 1,5 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$

$(5 \div 10)\% Al$ , ост.  $Cr$

- Рост  $\rho$  **металлов** при **повышении температуры** обусловлен тем, что **с ростом температуры** **возрастает амплитуда ангармонических тепловых колебаний узлов** кристаллической решетки.
- Вследствие этого **возрастает вероятность столкновения** дрейфующих под действием сил электрического поля **электронов с этими узлами**.
- При этом **уменьшается длина свободного пробега** электрона и **уменьшается его подвижность**.

# Причины увеличения $\rho$ удельного сопротивления с ростом $T$



Ионы совершают колебания вокруг своей оси.

Основными свободными носителями заряда в акцепторном полупроводнике являются

1) молионы

2) электроны

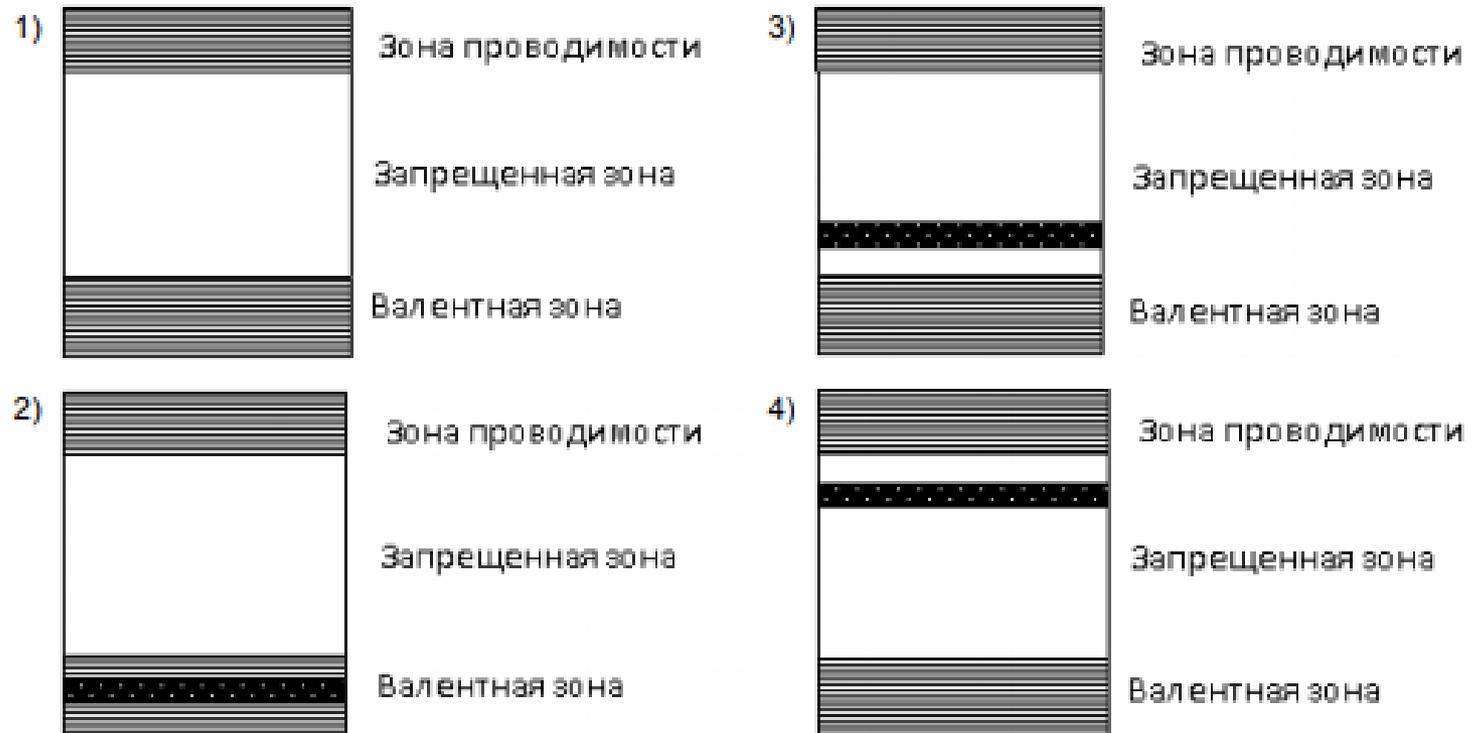
3) ионы

4) дырки

❖ 12. Правильный ответ: 4.

Энергетическая диаграмма акцепторного полупроводника

\* Локальный примесный энергетический уровень



❖ 13. Правильный ответ: 3.

# 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**

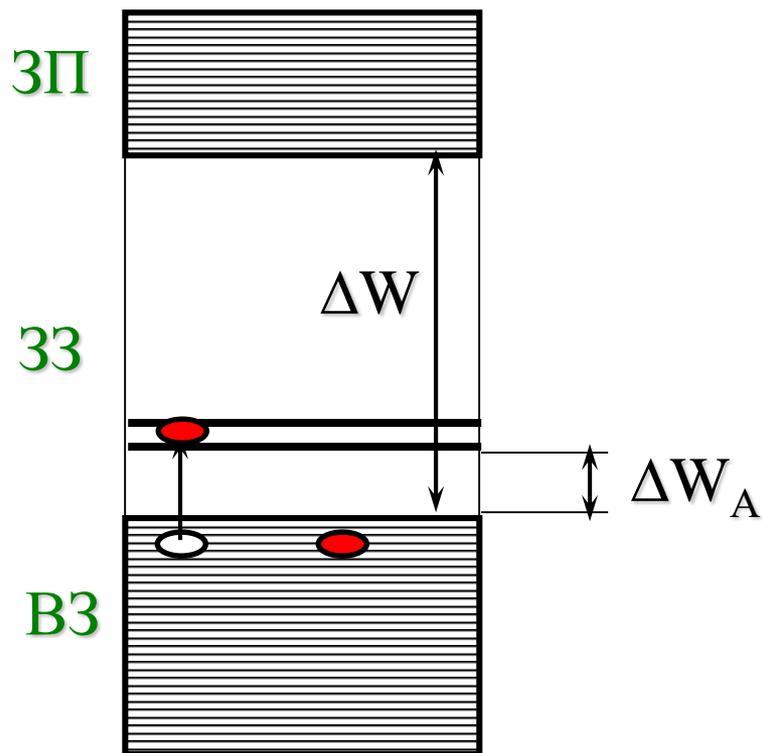
с.н.з. –  
электроны

**Акцепторные**

с.н.з. –дырки

Si – кремний, As – мышьяк, Sb – сурьма, Y – иттрий, Se – селен.

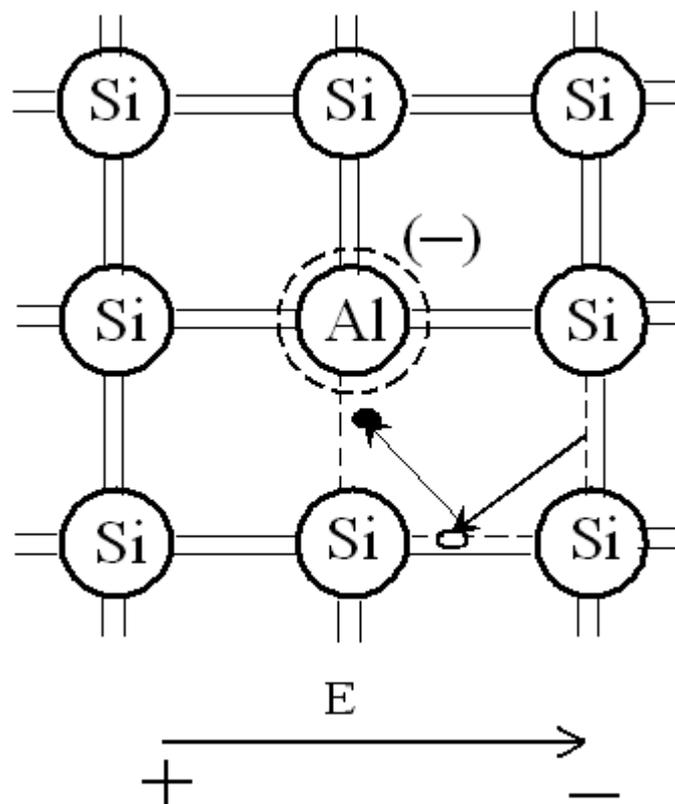
# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АКЦЕПТОРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



$\Delta W$  до 3эВ

$\Delta W_A$  МНОГО МЕНЬШЕ  $\Delta W$

$\Delta W_A \sim 0,01$  эВ



Al – алюминий

После достижения критической напряженности электрического поля  $E_{кр}$  изменение электропроводности в полупроводниках подчиняется

- 1) закону Ома                      2) линейному закону                      3) закону Пашена                      4) закону Френкеля

❖ 14. Правильный ответ: 4.

Причиной тока абсорбции в диэлектрике являются

- 1) медленно устанавливающиеся виды поляризации                      3) свободные электроны и ионы  
2) упругие виды поляризации: электронная и ионная                      4) заряды, образованные при ударной ионизации

❖ 15. Правильный ответ: 1.

К диэлектрическим материалам относятся вещества, у которых ширина запрещенной зоны  $\Delta W$  составляет

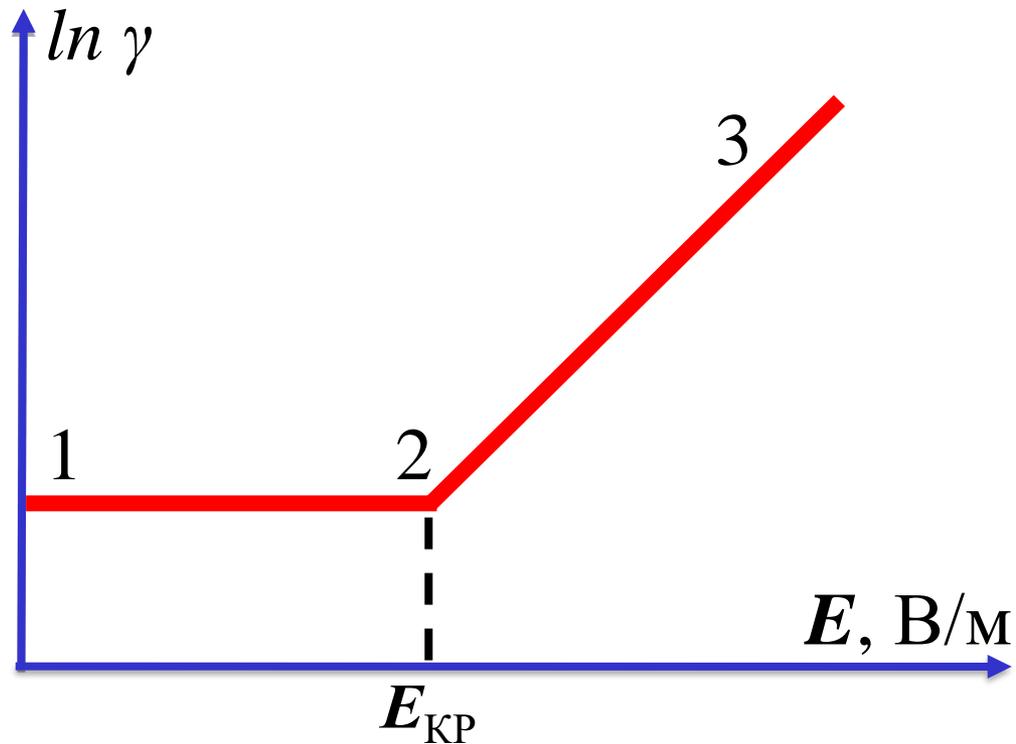
- 1)  $0,03 \div 3\text{эВ}$                       2)  $1 \div 3\text{эВ}$                       3) более  $3\text{эВ}$                       4)  $0,01 \div 0,03\text{эВ}$

❖ 16. Правильный ответ: 3.

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  показывает, во сколько раз емкость конденсатора

- 1) между обкладками которого находится диэлектрик, увеличивается при нагревании диэлектрика                      3) с диэлектриком больше емкости конденсатора таких же размеров, между обкладками которого находится вакуум  
2) увеличивается при изменении напряжения поля                      4) с диэлектриком меньше емкости конденсатора таких же размеров, между обкладками которого находится вакуум

❖ 17. Правильный ответ: 3.



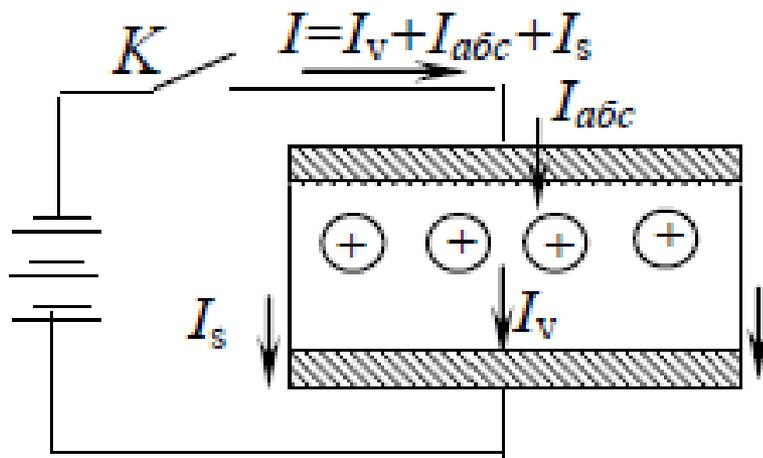
$E_{кр}$  – критическая напряженность электрического поля: минимальная напряженность при которой начинается сильная зависимость концентрации и подвижности с.н.з. от  $E$ . Закон Френкеля:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta \sqrt{E}) \quad ; \quad \rho = \rho_0 \exp(-\beta \sqrt{E})$$

$\gamma_0, \rho_0$  – проводимость и сопротивление при  $E \leq E_{кр}$ ,  $\beta$  – коэффициент нелинейности.

# Электропроводность диэлектриков

- По сравнению с электропр-ю *пр-в* и *n/n-ов* **электропр-ть диэлектриков** имеет ряд характерных **особенностей**.
- Все диэлектрики под воздействием **не изменяющегося во времени напряжения** пропускают некоторый, хотя и **весьма незначительный ток**, называемый **током утечки  $I$** .



Виды эл. тока в образце диэлектрика

$I$  – ток утечки;

$I_v$  – объемный ток;

$I_s$  – поверхностный ток;

$I_{abc}$  – ток абсорбции – ток, обусловленный **перераспределением объемных зарядов**, а также **установлением медленных видов поляризации** (релаксацион., миграцион.); **спадание** может продолжаться **в течение нескольких минут, часов и т.д.** (зависит от структуры диэ-ка);

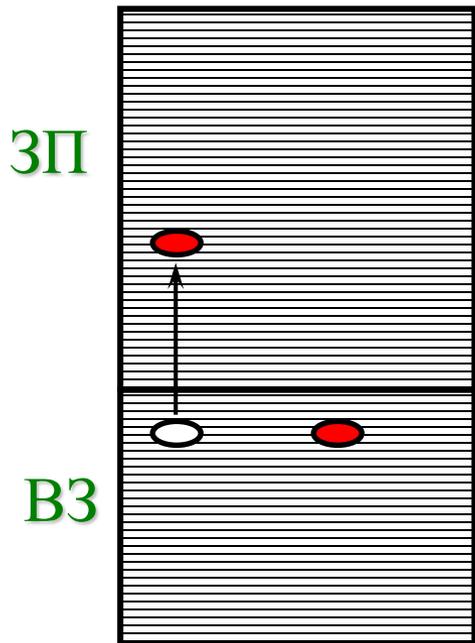
$I_{скв} = I_v + I_s$  – сквозной ток – **не изменяющ. во времени**, обусловленный **объемной и поверхностной электропроводн-ми** (за счет несовершенства).

# Классификация материалов согласно зонной теории

проводники

полупроводники

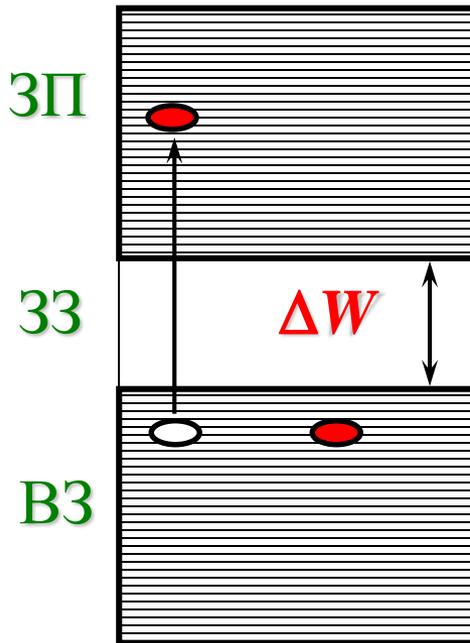
диэлектрики



$$\Delta W = 0$$

Металлы

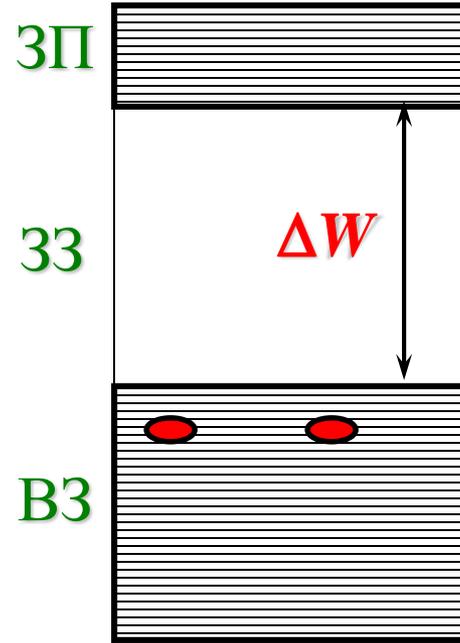
металлическая  
связь



$$\Delta W \text{ до } 3\text{эВ}$$

Неметаллы

ионная, ковалентная или  
смешанная связь



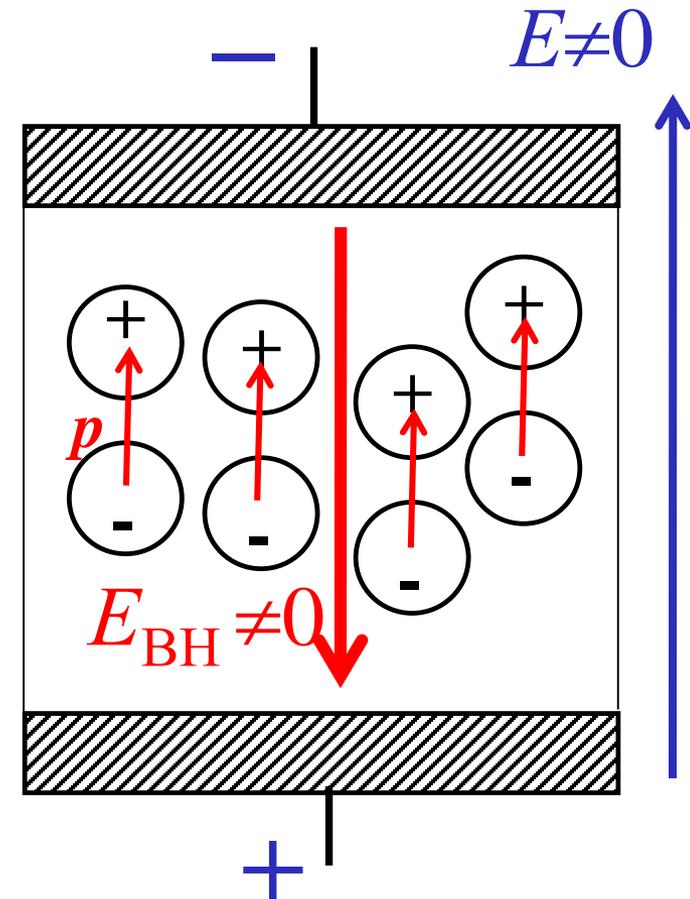
$$\Delta W \text{ выше } 3\text{эВ}$$

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

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

$$\varepsilon = C/C_0.$$

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



У диэлектрических материалов величина удельного объемного сопротивления  $\gamma_V$  находится в пределах

1)  $10^{-5} \div 10^9$  Ом · м

3)  $10^{-18} \div 10^{-16}$  Ом · м

2)  $10^7 \div 10^{17}$  Ом · м

4)  $10^{-8} \div 10^{-6}$  Ом · м

❖ 18. Правильный ответ: 2.

Тангенсом угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  называется отношение

1) вектора полного тока к активной составляющей тока в емкостной цепи

2) реактивной составляющей тока в емкостной цепи к активной

3) активной составляющей тока в емкостной цепи к реактивной

4) вектора полного тока к реактивной составляющей тока в емкостной цепи

❖ 19. Правильный ответ: 3.

С повышением температуры величина электропроводности твердого диэлектрика

1) увеличивается за счет увеличения подвижности и концентрации ионов

2) уменьшается за счет уменьшения подвижности и концентрации свободных электронов

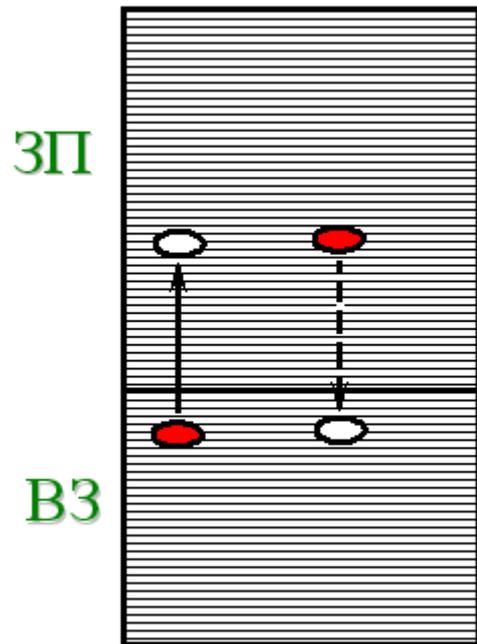
3) уменьшается за счет уменьшения подвижности и концентрации ионов

4) увеличивается за счет увеличения подвижности концентрации свободных электронов

❖ 20. Правильный ответ: 1.

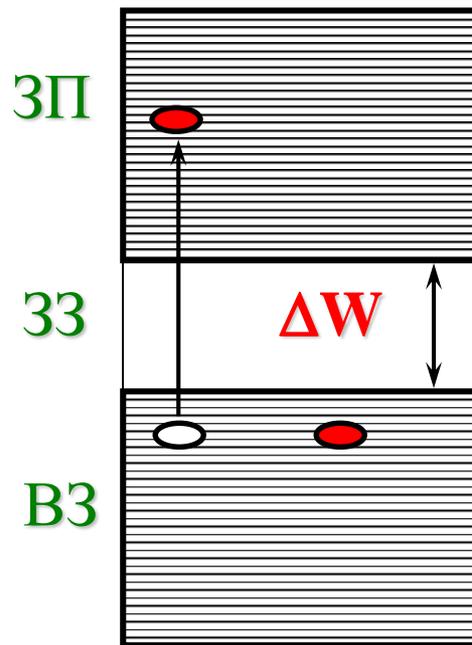
# ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

проводники



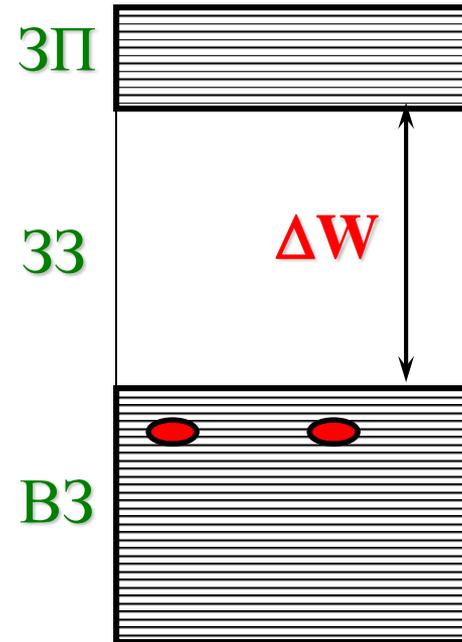
$\Delta W = 0$

полупроводники



$\Delta W$  до 3эВ

диэлектрики



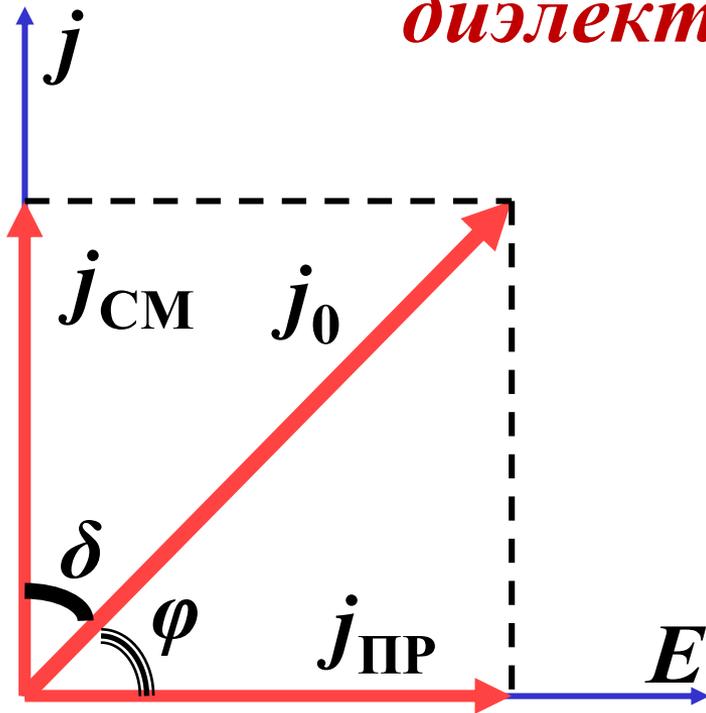
$\Delta W$  выше 3эВ

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

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

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

## *Векторная диаграмма токов в диэлектрике конденсатора*



Полный ток через конденсатор  
–  $I(j_0)$

$$j_{\text{СМ}} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega E \quad \text{А/м}^2$$

$$j_{\text{ПР}} = \gamma E \quad \text{А/м}^2$$

$$\text{tg } \delta = \frac{j_{\text{ПР}}}{j_{\text{СМ}}} = \frac{j_{\text{a}}}{j_{\text{c}}} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega}$$

Добротность:

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

Ток через емкость –  $I_{\text{c}}(j_{\text{c}})$ , диэлектрик – конденсатор

Угол  $\delta$ , дополняющий угол  $\varphi$  до  $90^\circ$ :

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

наз. *углом диэлектрических потерь*.

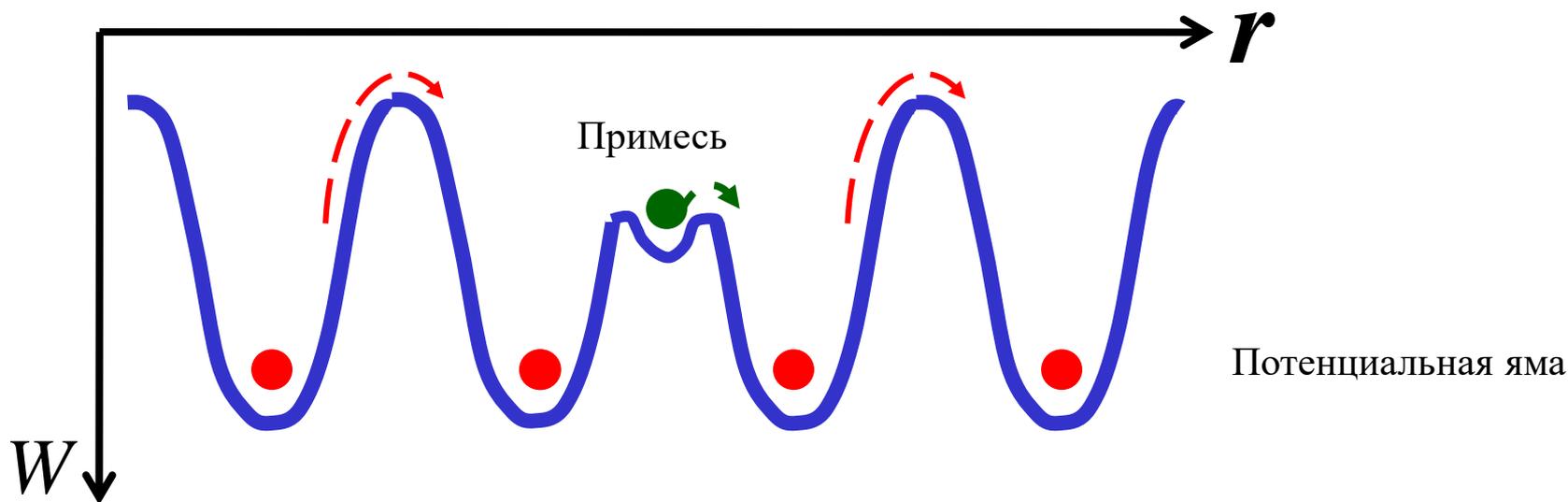
Отношение активной и реактивной составляющих полного тока:

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

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

# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

- ✓ с.н.з. – *ионы*;
- ✓ *примесные ионы* активируются легче, чем собственные:



$$\gamma = qn\mu$$

Межмолекулярные и внутримолекулярные связи еще гораздо сильнее.

# Электропроводность тв. диэл-в

- Электропроводность диэл-в в отличие от п/п-в чаще всего носит не электронный, а *ионный* характер. Это связано с тем, что ширина ЗЗ в диэл-х  $\Delta W \gg kT$  (тепловой эн-и) и лишь *ничтожное количество эл-в* может отрываться от своих атомов *за счет теплового движения*.
- *Ионы* же часто оказываются *слабо связанными* в узлах решетки, и энергия  $W$ , необходимая для их срыва, *сравнима* с  $kT$ .
- *Ионная провод-ть* оказывается *больше электронной* за счет значительно *большей концентрации свободных ионов* (хотя подвижность ионов меньше подвижности эл-в):  
 $n_{\text{ион}} \mu_{\text{ион}} \gg n_{\text{эл}} \mu_{\text{эл}}$ .

С изменением  $T$  меняется  $n$  и  $\mu$  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

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

$$A = qn_0\mu_0$$

$$b = (W_{\text{Д}} + W_{\text{П}})/k$$

## Вопросы к контрольной работе №1 на тему «Магнитные материалы»

1. Чем определяются магнитные свойства вещества?
2. Как классифицируются вещества по магнитным свойствам?
3. Основные типы магнитного состояния вещества.
4. В чем отличие ферромагнетиков от парамагнетиков?
5. В чем отличие ферромагнетиков от диамагнетиков?
6. Что такое магнитная проницаемость?
7. Какие существуют виды магнитной проницаемости?
8. Что понимают под магнитным доменом?
9. Как меняется индукция в зависимости от напряженности магнитного поля ферромагнетиков (процесс намагничивания)?
10. Описать процесс намагничивания ферро- и ферримагнетиков.
11. Описать процесс перемагничивания ферро- и ферримагнетиков.
12. Виды потерь при переменных магнитных полях.
13. Причины возникновения потерь в ферромагнетиках.
14. В чем заключаются потери на гистерезис в ферро- и ферримагнетиках?
15. В чем заключаются потери на вихревые токи ферро- и ферримагнетиков? Указать способы их уменьшения.
16. Что называется точкой Нееля?
17. Привести и объяснить зависимость  $\mu = f(t^{\circ}\text{C})$  ферро- и ферримагнетиков.
18. Привести и объяснить зависимость  $\mu = f(H)$  ферро- и ферримагнетиков.
19. Привести и объяснить зависимость  $\mu = \phi(f)$  ферро- и ферримагнетиков.
20. Основная кривая намагничивания.

21. Из каких материалов и почему можно изготовить постоянные магниты?
22. Какой материал можно использовать для магнитной антенны радиоприемника (почему)?
23. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы, их отличие и область применения.
24. По какому признаку магнитные материалы разделяются на магнитомягкие и магнитотвердые?
25. Какие изделия изготавливают из магнитотвердых материалов?
26. Описать явление магнитострикции и указать его использование.
27. Какие магнитные материалы могут быть использованы в устройствах высоких и сверхвысоких частот? Объяснить почему?
28. Указать особенности и способы получения текстурированных магнитных материалов.
29. Что из себя представляют магнитодиэлектрики? Области их применения.
30. Что такое пермаллой?
31. Что понимают по температурой точки Кюри для ферро- и ферримагнетиков?
32. Можно ли из магнитотвердого материала изготовить магнитопровод трансформатора? Ответ обосновать.
33. Какие магнитные материалы могут быть использованы в электротехнических устройствах промышленной частоты? Обосновать ответ.
34. Что из себя представляют ферриты? Область их применения.
35. Какие магнитные материалы могут быть использованы в устройствах звуковых частот? Ответ обосновать.
36. Почему магнитопроводы электрических машин и трансформаторов выполняют шихтованными, т.е. состоящими из отдельных пластин?

## Вопросы к контрольной работе №2 на тему «Проводниковые материалы»

1. Какие вещества с точки зрения зонной теории твердых тел относятся к проводникам?
2. Указать отличие проводников I и II рода.
3. Какие типы электропроводности реализуются в проводниках I и II родов?
4. Описать характер изменения подвижности свободных носителей зарядов в металлических проводниках при изменении температуры.
5. Дать определения проводимости и удельного сопротивления. Назвать единицы измерения.
6. Описать характер изменения электропроводности проводников при изменении температуры.
7. Зависимость  $\rho_v = f(t^{\circ}C)$  для проводников. Объяснить ход кривой.
8. Как влияет температура на величину концентрации свободных носителей зарядов в проводниках?
9. Описать явление криопроводности.
10. Описать явление сверхпроводимости.
11. Описать характер изменения сопротивления проводников при всестороннем сжатии.
12. Как изменяется подвижность свободных носителей зарядов в проводниках при всестороннем сжатии?
13. Что характеризует температурный коэффициент удельного сопротивления?
14. Описать характер изменения сопротивления проводников при всестороннем растяжении.
15. Описать характер изменения сопротивления проводников при механической обработке (волочение, резание).
16. Как влияют механические напряжения на величину  $\rho_v$  проводников?
17. Дать классификацию проводниковых материалов по области применения.
18. Какие материалы можно использовать для изготовления проволочных резисторов? Обосновать ответ.
19. Какие проводниковые материалы применяют для изготовления образцовых резисторов?
20. Какие материалы относятся к проводникам с высоким удельным сопротивлением?

21. Какие материалы относятся к проводникам с высокой электропроводностью?
22. Какие материалы относятся к проводникам специального назначения?
23. Какие проводниковые материалы используются для изготовления электронагревательных элементов?
24. Указать условия возникновения термоЭДС в проводниковых материалах.
25. Что такое контактная разность потенциалов в проводниках?
26. Описать влияние примесей на величину электропроводности проводниковых материалов.
27. Как влияют примеси на величину  $\rho_v$  проводников?
28. Описать принцип работы проводниковой термопары.
29. Назовите наиболее часто применяемые конструкции термопар.
30. Описать металлическую связь в веществах.
31. Описать поверхностный (скин-) эффект в проводниковых материалах.
32. Описать требования и указать основные материалы, применяемые для изготовления скользящих контактов.
33. Описать требования и указать основные проводниковые материалы, используемые в электровакуумной технике.
34. Какие материалы применяют для разрывных контактов?
35. Указать назначение и дать краткую характеристику припоям.
36. К каким проводникам относятся нихромы? Их применение.
37. Что такое тензометрические сплавы?
38. Укажите области применения константана.
39. К каким проводникам относятся манганин и константан? Их применение.
40. Какие проводниковые материалы используются в микроэлектронике?
41. Область применения Fe как проводникового материала?
42. Как изменится  $\rho_v$  проводников после обработки на токарном станке?
43. Из каких материалов можно изготовить спираль для электроплиты?

### Вопросы к контрольной работе №3 на тему «Полупроводниковые материалы»

1. Какие вещества относятся к полупроводникам?
2. Описать механизм образования свободных носителей зарядов в собственном полупроводнике.
3. Какие свободные носители зарядов в собственных полупроводниках? Привести примеры собственных полупроводников.
4. Какие примеси являются донорными, а какие – акцепторными?
5. Дать описание зонной структуры полупроводника примесного типа.
6. Описать механизм образования свободных носителей зарядов в донорном полупроводнике.
7. Описать механизм образования свободных носителей зарядов в акцепторном полупроводнике.
8. Описать характер изменения подвижности свободных носителей зарядов в полупроводнике при изменении температуры.
9. Описать характер изменения концентрации свободных носителей зарядов в примесном полупроводнике при изменении температуры.
10. Описать характер изменения электропроводности в собственном полупроводнике при изменении температуры.
11. Как связана электропроводность полупроводника с наличием в нем примесей?
12. Описать характер изменения электропроводности в примесном полупроводнике при изменении температуры.
13. Описать характер изменения электропроводности в полупроводнике при изменении напряженности электрического поля.
14. Опишите физическую сущность туннельного эффекта.
15. Описать эффект Зеебека.
16. Описать эффект Пельтье.
17. Описать эффект Томпсона.
18. Описать эффект Холла.
19. Определите тип электропроводности полупроводника с помощью эффекта Зеебека.
20. Определите тип электропроводности полупроводника с помощью эффекта Холла.

21. Описать характер изменения электропроводности полупроводника при изменении освещенности.
22. Дать определения спектра поглощения и спектра отражения.
23. Перечислить механизмы поглощения света полупроводниками.
24. Опишите явление фотопроводимости.
25. Опишите механизм люминесценции полупроводников.
26. Опишите физическую сущность р-п перехода.
27. Перечислите основные типы полупроводниковых материалов.
28. На чём основан принцип работы полупроводникового термистора?
29. Что такое варистор?
30. Описать особенности оксидных полупроводников, область применения.
31. Описать область применения теллура, его область применения.
32. Описать особенности селена, его область применения.
33. Описать особенности кремния, его область применения.
34. Описать особенности германия, его область применения.
35. Опишите метод зонной перекристаллизации.
36. Опишите метод Чохральского.
37. Опишите принцип работы термоэлектрического генератора.
38. Опишите принцип работы термоэлектрического холодильника.
39. Механизм образования термоЭДС.

## **Вопросы к контрольной работе №4 на тему «Диэлектрические материалы»**

1. Какими электрофизическими характеристиками описывается поведение диэлектриков в электрическом поле?
2. Какие вещества относятся к полярным, а какие к неполярным диэлектрикам?
3. Что такое полярность диэлектриков?
4. Что называется собственным, а что индуцированным электрическим моментом?
5. Описать процесс электронной поляризации в диэлектриках.
6. Описать процесс ионной упругой поляризации в диэлектриках.
7. 5. Описать процесс дипольной упругой поляризации в диэлектриках.
8. Описать процесс дипольно-релаксационной поляризации в диэлектриках.
9. Описать процесс ионно-релаксационной поляризации в диэлектриках.
10. Описать процесс миграционной (междуслойной, структурной) поляризации в диэлектриках.
11. Описать процесс спонтанной поляризации в диэлектриках.
12. Как определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика, представляющего собой физическую смесь различных ингредиентов?
13. Виды поляризации диэлектриков.
14. Перечислите быстрые и медленные виды поляризации. Чем они отличаются?
15. В каких диэлектриках наблюдаются быстрые, а в каких – релаксационные виды поляризации?
16. Виды диэлектриков по видам поляризационных процессов.
17. Назвать основные типы носителей заряда и механизм электропроводности в газообразных, жидких и твёрдых диэлектриках.
18. Виды электропроводности диэлектриков.
19. Механизмы собственной и примесной электропроводностей в диэлектриках.
20. Электропроводность в газообразных диэлектриках.

21. Электропроводность в жидких диэлектриках.
22. Электропроводность в твердых диэлектриках.
23. Зависимость электропроводности жидких диэлектриков, не содержащих примеси, от температуры (объяснить зависимость).
24. Влияет ли увлажнение на электропроводность диэлектриков, если да, то каким образом?
25. Что такое энергия диссоциации в твердых диэлектриках?
26. Что такое энергия «перескока» в твердых диэлектриках?
27. Зависимость электропроводности жидких диэлектриков, не содержащих примеси, от температуры (объяснить зависимость).
28. Почему при измерении величины тока, протекающего через диэлектрик, необходимо проводить измерения через некоторое время после подачи напряжения?
29. Дайте определение удельному объёмному и удельному поверхностному сопротивлению. В каких единицах измеряются эти величины?
30. Описать вольт-амперную характеристику газов.
31. Описать вольт-амперную характеристику изоляции.
32. Что такое электрическое старение изоляции?
33. Зависимость плотности тока  $j$  от напряженности  $E$  в газообразных диэлектриках.
34. Кривая ионизации диэлектрика (объяснить приведенную зависимость).
35. Векторная диаграмма токов в диэлектрике конденсатора.
36. Описать характер изменения тока в диэлектрике при подаче на него неизменяющегося во времени напряжения.

37. Ток утечки в диэлектрике.
38. Ток смещения в диэлектрике.
39. Описать характер изменения электропроводности сухого диэлектрика при изменении температуры.
40. Описать характер изменения электропроводности (проводимости) пористых увлажненных диэлектриков при изменении температуры.
41. Описать характер изменения электропроводности (проводимости) непористого примесного диэлектрика при изменении температуры.
42. Влияние полярности жидких диэлектриков на их электропроводность.
43. Зависимость  $\varepsilon$  от температуры для неполярных диэлектриков (дипольно-релаксационная поляризация; объяснить приведенную зависимость).
44. Зависимость  $\varepsilon$  от температуры для полярных диэлектриков (электронная и ионная поляризации; объяснить приведенные зависимости).
45. Зависимость  $\varepsilon$  от частоты приложенного переменного электрического поля (неполярный и полярный диэлектрик; объяснить приведенные зависимости).
46. Описать виды диэлектрических потерь. Дать определение диэлектрических потерь.
47. Диэлектрические потери на сквозную электропроводимость (зависимость  $\operatorname{tg}\delta$  от частоты и температуры).
48. Диэлектрические потери на медленные виды поляризации.
49. Диэлектрические потери на неоднородность структуры.
50. Резонансные диэлектрические потери.
51. Диэлектрические потери в газах.
52. Диэлектрические потери в жидкостях.
53. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках.
54. Тангенс угла диэлектрических потерь (определение, формула, показать на векторной диаграмме токов).
55. Описать характер изменения  $\operatorname{tg}\delta$  неполярного диэлектрика при изменении температуры.
56. Описать характер изменения  $\operatorname{tg}\delta$  неполярного диэлектрика при изменении частоты приложенного электрического поля.
57. Описать характер изменения  $\operatorname{tg}\delta$  полярного диэлектрика при изменении температуры.

58. Описать характер изменения  $\operatorname{tg}\delta$  полярного диэлектрика при изменении частоты приложенного электрического поля.
59. Описать характер изменения  $\operatorname{tg}\delta$  пористого диэлектрика при изменении напряженности электрического поля.
60. Какие существуют виды пробоя диэлектриков?
61. Пробой газообразных диэлектриков.
62. Описать лавинный пробой в газах.
63. Описать лавинно-стримерный пробой в газах.
64. Описать механизм пробоя жидких диэлектриков.
65. Пробой жидкого диэлектрика с эмульгированной влагой (теория Геманта).
66. Пробой жидких диэлектриков с твердыми примесями (теория А.Ф. Вальтера).
67. Пробой твердого диэлектрика.
68. Механизмы пробоя твердых диэлектриков.
69. Электрический и тепловой пробой в твердых диэлектриках.
70. Зависимость  $E_{\text{пр}}$  газа от давления  $P$  и расстояния между электродами  $h$  в однородном поле (объяснить приведенные зависимости).
71. Описать электрический пробой твердых диэлектриков.
72. Описать электротепловой пробой диэлектриков.
73. Описать ионизационный пробой диэлектриков.
74. Дайте классификацию диэлектрических материалов.
75. Полный диэлектрический спектр потерь диэлектрика.

- По дополнительным вопросам писать на почту: [vov3@tpi.ru](mailto:vov3@tpi.ru)