

# Раздел. Проводники

## Лекция №10. Тема: Основные свойства проводниковых материалов

- 1. Основные параметры проводниковых материалов
- 2. Проводниковые материалы и их применение

# 1. Классификация проводниковых материалов

- **Проводник** – вещество, основным свойством которого является электропроводность, т. е. способность проводить электрический ток.
- **материалы с высокой проводимостью**, удельное сопротивление  $\rho$  при нормальной температуре не более **0,1 мкОм·м**
- **материалы (сплавы) с высоким сопротивлением**,  $\rho$  при нормальной температуре не менее **0,3 мкОм·м**
- **сверхпроводники и криопроводники** – материалы, обладающие очень малым удельным сопротивлением при весьма низких (криогенных) температурах.

- - *чистые металлы;*
- - *сплавы (высокого сопротивления, для термопар, припои);*
- - *металлы и сплавы различного назначения;*
- - *тугоплавкие металлы с температурой плавления выше 1700<sup>0</sup>С;*
- - *благородные металлы.*

- Проводники с электронной (металлической) электропроводностью называются **проводниками первого рода**.
- **Проводниками второго рода**, или электролитами, являются растворы (в частности, водные) и расплавы солей, кислот, щелочей и других веществ с ионным строением молекул.

# Основные параметры проводниковых материалов

- удельная проводимость или удельное сопротивление;
- температурный коэффициент сопротивления (ТКС);
- температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР);
- работа выхода;
- теплопроводность;
- плотность;
- температура плавления;
- твердость;
- прочность;
- относительное удлинение при разрыве и др.

# Удельное сопротивление и удельная проводимость проводников

- *Удельное сопротивление* и *удельная проводимость проводников* - количественные характеристики способности проводить электрический ток, т.е. электропроводности вещества.

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \qquad \sigma = 1 / \rho$$

- $R$ - сопротивление;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $l$  – длина проводника
- $1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ .
- $1 \text{ См (сименс)} = 1 \text{ Ом}^{-1}$

# Правило Маттисена

- $\rho_1$  - удельное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на фононных колебаниях кристаллической решетки
- $\rho_2$  - рассеяние электронов на примесях
- $\rho_3$  - рассеяние электронов на пластических деформациях
- $\rho_4$  - рассеяние электронов на свободных поверхностях пленки
- $\rho_5$  - рассеянием электронов на границах микрокристаллитов пленки, разделенных собственными окисными слоями и специально вводимой диэлектрической фазой.

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5$$

- Кристаллы, граничная поверхность которых не представляет собой правильной, характерной для кристаллов формы, называются *кристаллитами*.



# Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов

- *Величина положительная и показывает во сколько раз изменяется удельное сопротивление при изменении температуры на один градус.*

$$TK_{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

# Термоэлектродвижущая сила

- При соприкосновении двух различных металлов (или полупроводников) между ними возникает контактная разность потенциалов, обусловленная различием значений *работы выхода электронов* и различием значений *концентрации свободных носителей* (электронов) соприкасающихся металлов.

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

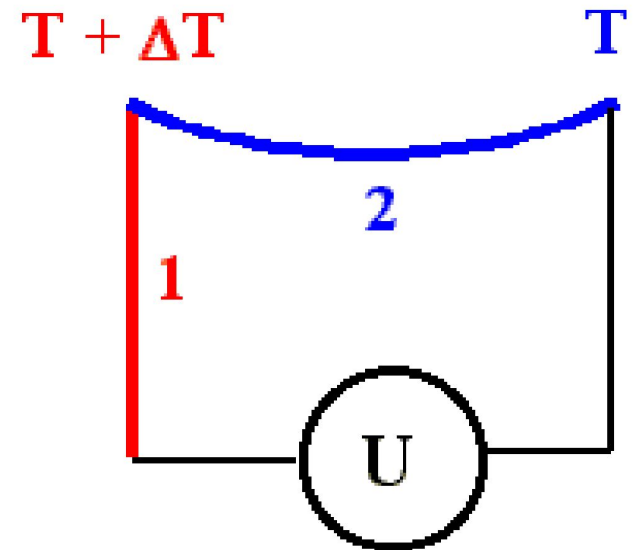
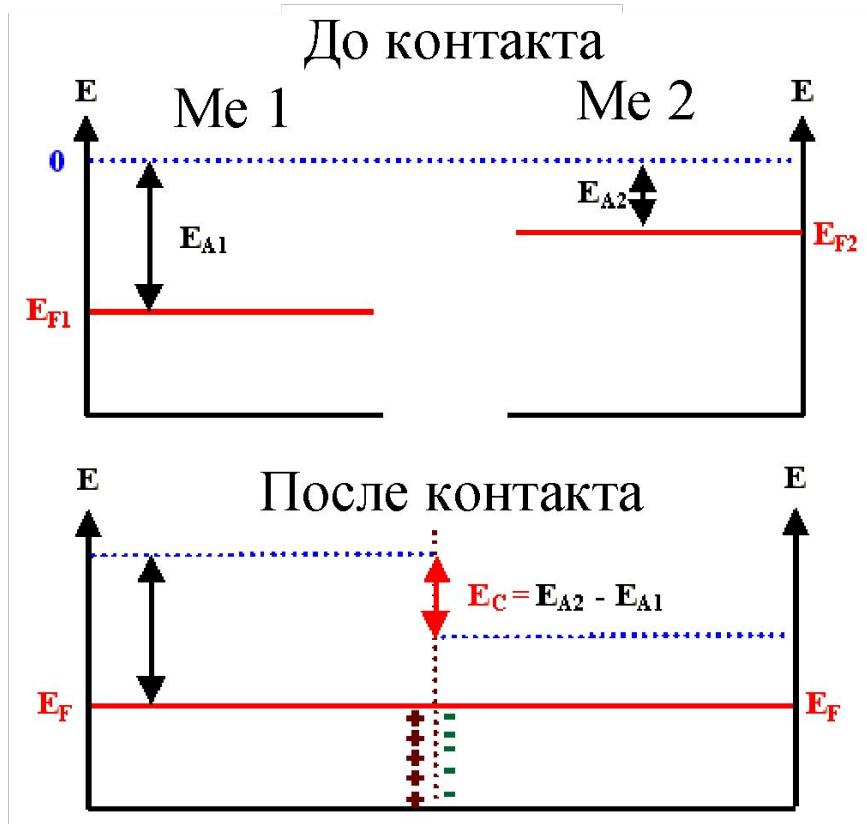
- Если один из спаев (для цепи из двух металлов) имеет температуру  $T_1$ , а другой  $T_2$ , причем  $T_1 \neq T_2$ , между спаями возникает термоЭДС.

$$U = K(T_1 - T_2)$$

- $K$ - коэффициент термоЭДС.

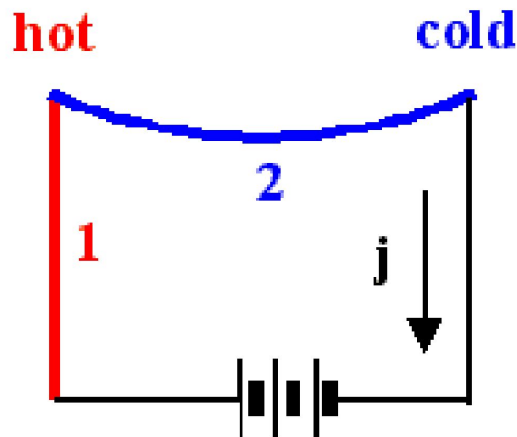
# Термоэлектрические эффекты

- *Эффект Зеебека*



- *Эффект Зеебека* используется для измерения температуры, а также для превращения тепла непосредственно в электрическую энергию.

- *Эффект Пельтье*
- *Эффект обратный эффекту Зеебека*
- *При пропускании электрического тока через контакт (спай) двух различных проводников или полупроводников на контакте происходит выделение тепла (дополнительно к Джоулеву) при одном направлении тока или его поглощение при обратном направлении.*



# Температурный коэффициент линейного расширения проводников

- *Температурный коэффициент линейного расширения* металлов (*ТКЛР*) показывает, во сколько раз изменяется линейный размер (длина) образца материала при изменении температуры на один градус.

$$TKl = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}$$

- Количественные значения *TKl* контактирующих материалов должны быть близки, чтобы не возникали недопустимые напряжения на стыках и в спаях, приводящие к разрушению одного из материалов.

$$\bullet \mathbf{TKR = TK\rho - TKl.}$$



## Работа выхода

- *Работа выхода* численно равна энергии, необходимой для удаления электрона из вещества в вакуум без сообщения ему кинетической энергии - (энергетический интервал между уровнем вакуума и уровнем Ферми).
- *Для проводящего контакта Ме-Ме необходима низкая контактная разность потенциалов.*
- *Для создания термопар необходима наибольшая разница значений работы выхода контактирующих металлов.*

# Теплопроводность металлов

- При прочих равных условиях чем больше удельная электрическая проводимость  $\sigma$  металла, тем больше его коэффициент теплопроводности  $\lambda$ .

# Проводниковые материалы и их применение

- Материалы с высокой проводимостью
- 1) *Медь*
- Преимущества:
  - 1) малое удельное сопротивление (из всех металлов только серебро имеет  $\rho$  несколько меньшее, чем медь);
  - 2) удовлетворительная механическая прочность;
  - 3) удовлетворительная коррозионная стойкость; медь окисляется на воздухе даже в условиях высокой влажности значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах;
  - 4) относительная легкость пайки и сварки.

- **Бронзы** (сплавы меди с оловом, алюминием и легирующими добавками Si, Mn, P, Cr, Be, Cd)
- **Латуни** – сплавы меди с цинком (до 40 %) и легирующими добавками Al, Ni, Pb и др.

- 2) **Алюминий**                      6) **Вольфрам**
- 3) **Никель**                        7) **Молибден**
- 4) **Серебро**                      8) **Платина и ралладий**
- 5) **Золото**                        9) **Индий, галлий**

# Материалы с высоким удельным сопротивлением

Материал, состав	Удельное сопротивление $\rho$ , $\times 10^{-6}$ Ом·м	Температурный коэффициент $TK\rho$ , $K^{-1}$	Предельная температура, $T_m$ , $^{\circ}C$
Манганин: Cu – 33...86 %; Mn – 67...12 %; Добавки Fe, Al	0,4 – 1,88	$\pm 4 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-6}$	200
Константан Cu – 55...60 %; Ni – 45...40 %	0,48 – 0,52	$- 5 \cdot 10^{-6}$	450
Нихром Ni – 55...80 %; Cr – 15...25 %; Добавки Ti, Fe	1,02 – 1,36	$9 - 12 \cdot 10^{-5}$	900 – 1100
Фехраль Cr – 12...27 %; Ni – 0,6 %; Fe – остальное	1,2 – 1,5	$5 - 15 \cdot 10^{-5}$	800 – 1200

# Материалы и сплавы различного назначения

- *Силициды*

Силицид	$\text{MoSi}_2$	$\text{TaSi}_2$	$\text{TiSi}_2$	$\text{CoSi}_2$	$\text{NiSi}_2$	$\text{PtSi}_2$	$\text{PdSi}_2$
$\rho$ , мкОм · см	40-100	38-50	13-16	10-18	~50	28-35	30-35

# Нитриды, карбиды, бориды

Материал	HfN	TiN	TiC	TiB <sub>2</sub>	C (графит)
$\rho$ , (мкОм · см)	30-100	40-150	~ 100	6-10	1000

# Сверхпроводящие материалы

- Явление исчезновения электрического сопротивления, т.е. появление бесконечной удельной проводимости материала называется *сверхпроводимостью*, а критическая температура, при которой совершается переход вещества в сверхпроводящее состояние, — *температурой сверхпроводникового перехода*  $T_{кр}$ .



# Классификация сверхпроводников

- 1. Простые сверхпроводники – (25) – **Hg, Al, Zn, V, Ti, W, Nb, Ir** и т.д.
- 2. Сложные соединения и сплавы **Nb<sub>3</sub>Ge, V<sub>3</sub>Ga, Nb<sub>3</sub>Sn**

# Механизм сверхпроводимости

- 1. Присутствие фермиевских электронов, энергия которых близка к энергии Ферми  $E_F$ .
- 2. Пары могут создавать два электрона, импульсы которых равны по величине и противоположны по направлению – **бозон** -, т.е. *полный импульс пары равен нулю*.
- 3. Пары не могут двигаться независимо друг от друга. Их перемещение происходит, как единого коллектива.
- 4. Для бозонов принципа запрета Паули не существует.
- 5. ***Куперовские пары (бозоны) пока не разорваны, рассеиваться на дефектах решетки не могут.***

- Состояние сверхпроводимости разрушается с ростом температуры
- $h\nu$  - средняя энергия фононов, соизмеримая с дебаевской температурой  $\Theta$ ;  $g$  – постоянная, определяющая силу притяжения между электронами;  $\nu \sim 10^{13}$  Гц;  $\Theta = 100-500$  К,  $g = 1/2$
- $T_{кр} \sim 30-40$  К

$$T_{кр} = 1,14 h \nu e^{-1/g}$$

# Высокотемпературная сверхпроводимость

- *Электронный и экситонный механизмы Гинзбурга*
- *Экситон – возбужденный электрон не теряет связь с дыркой.*
- *Обмен экситонами, так же как и обмен фононами, может приводить к притяжению между электронами. (500К!)*
- *Для реализации этого механизма можно использовать поверхность кристалла или тонкие металлические слои.*

# Новые сверхпроводники

- - ВРВ – барий, свинец, висмут, кислород –  
–  $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$   $-(0 \leq x \leq 0,3)$
- Иттриевая керамика –  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4 \sim 40\text{K}$   
 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O} \sim 102\text{K}$