

# ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Проводниковые материалы* - это материалы, хорошо проводящие электрический ток при приложении внешнего электрического поля  $E$ .

В качестве проводниковых материалов в технике используется, в основном, два класса проводников. *Твердые проводники с электронной проводимостью (проводники первого рода)*. К ним относятся металлы, сплавы, углеродистые материалы.

*Жидкие проводники (проводники второго рода)*. К этому виду проводниковых материалов относятся расплавленные и жидкие металлы (галлий, ртуть), различные электролиты.



## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОВОДНИКАХ.

- *В качестве проводников электрического тока могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях (в состоянии ионизации) и газы.*
- *Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены металлы высокой проводимости, имеющие удельное сопротивление при нормальной температуре не более 0.05 мкОм·м, и сплавы высокого сопротивления с удельным сопротивлением не менее 0.3 мкОм·м.*



- Особый интерес представляют обладающие чрезвычайно малым удельным сопротивлением при весьма низких температурах материалы *сверхпроводники* и *криопроводники*.



- **К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и электролиты.**
- **Для большинства металлов температура плавления высока, только ртуть, имеющая температуру плавления минус  $39^{\circ}\text{C}$ , может быть использована в качестве жидкого металлического проводника при нормальной температуре.**
- **Другие металлы являются жидкими проводниками только при повышенных температурах.**



□ Проводниками – называются материалы с удельным электрическим сопротивлением  $\rho < 10^{-5}$  Ом\*м,

К ним относятся:

- металлы,
- расплавы и растворы электролитов,
- плазма,
- полупроводники.



Проводники электрического тока подразделяются:

- ▣ *проводники первого рода*
- ▣ *проводники второго рода.*



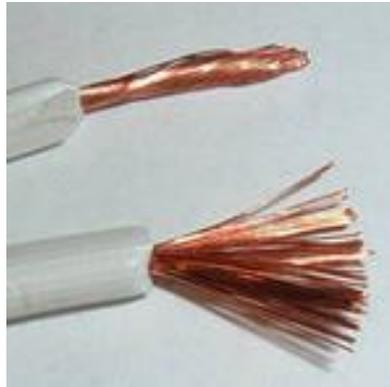
- Механизм прохождения тока в металлах — как в твердом, так и в жидком состоянии — обусловлен движением свободных электронов под воздействием электрического поля; поэтому металлы называют *проводниками с электронной электропроводностью или проводниками первого рода.*



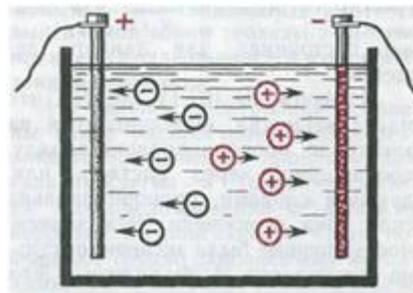
- ▣ *Проводниками второго рода, или электролитами,* являются растворы, в частности, водные, кислот, щелочей и солей.
- ▣ Прохождение тока через эти вещества связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов в соответствии с законами Фарадея, вследствие чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза.
- ▣ Ионные кристаллы в расплавленном состоянии также являются проводниками второго рода. Пример — соляные закалочные ванны с электронагревом.



- **Твердыми проводниками** являются металлы, металлические сплавы и некоторые модификации углерода.



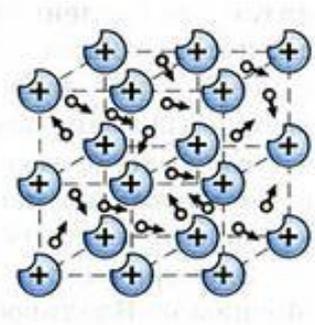
- К **жидким проводникам** относятся расплавленные металлы и различные электролиты.



- Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Однако, если напряженность поля превзойдет некоторое критическое значение, обеспечивающее начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником с электронной и ионной проводимостью.
- Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительно заряженных ионов в единице объема представляет собой особую проводящую среду, называемую *плазмой*.



# СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВ



К важнейшим параметрам, характеризующим свойства проводниковых материалов, относятся:

- удельная проводимость  $\gamma$  или обратная ей величина – удельное сопротивление  $\rho$ ,
- температурный коэффициент удельного сопротивления  $\text{ТК}_{\rho}$  или  $\alpha_{\rho}$ ,
- теплопроводность  $\gamma_{\text{T}}$ ,
- контактная разность потенциалов и термо-Э.д.с.,
- работа выхода электронов из металла,
- предел прочности при растяжении  $\sigma_{\rho}$  и относительное удлинение при разрыве  $\Delta l/l$ .



## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ.

- Классическая электронная теория металлов представляет проводник в виде системы, состоящей из узлов ионной кристаллической решетки, внутри которой находится электронный газ из свободных электронов. В свободное состояние от каждого атома переходит от одного до двух электронов. К электронному газу применялись представления и законы статистики обычных газов. Рассматривая тепловое и направленное под действием электрического поля движение электронов, получили выражение закона Ома.



- При столкновениях электронов с узлами кристаллической решетки энергия, накопленная при ускорении электронов в электрическом поле, передается металлической основе проводника, вследствие чего он нагревается.
- Рассмотрение этого процесса привело к выводу закона Джоуля-Ленца.
- Т.о., электронная теория металлов дала возможность теоретически описать и объяснить найденные ранее экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах.
- Оказалось возможным также объяснить связь между электро- и теплопроводностью металлов.



- Однако появились и противоречия некоторых выводов теории с опытными данными. Они состояли в расхождении кривых температурной зависимости удельного сопротивления, в несоответствии теоретически полученных значений теплоемкости металлов опытным данным.



- Эти трудности удалось преодолеть, встав на позиции квантовой механики. В отличие от классической электронной теории квантовая механика полагает, что электронный газ в металлах при обычных температурах находится в состоянии вырождения. В этом состоянии энергия электронного газа почти не зависит от температуры, т.е. тепловое движение почти не изменяет энергию электронов. Поэтому теплота не затрачивается на нагрев электронного газа, что и обнаруживается при измерениях теплоемкости металлов.



- В состояние, аналогичное обычным газам, электронный газ приходит при температурах порядка тысяч Кельвинов. Представляя металл как систему, в которой положительные ионы скрепляются посредством свободно движущихся электронов, легко понять природу всех основных свойств металлов: пластичности, ковкости, хорошей теплопроводности и высокой электропроводности.



# КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*1. Проводниковые материалы с малым электрическим сопротивлением ( $\rho=(0.015...0.2)\times 10^{-6}$  Ом×м). К ним относятся:*

материалы для точечных изделий, проводного монтажа, печатных и пленочных проводников;

металлы и сплавы для электрических контактов;

припои.

*2. Проводниковые материалы с удельным электросопротивлением более  $0,2\times 10^{-6}$  Ом×м:*

высокоомные сплавы и материалы для проволочных резисторов;

материалы для пленочных резисторов;

сплавы для выводов электровакуумных и полупроводниковых приборов.

*3. Сверхпроводящие материалы:*

чистые металлы;

интерметаллические и химические соединения металлов;

керамические материалы.



# УДЕЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

$$J = E\gamma$$

Здесь  $\gamma$ , См/м – параметр проводникового материала, называемый его *удельной проводимостью*;

в соответствии с законом Ома  $\gamma$  не зависит от напряженности электрического поля при изменении последней в весьма широких пределах.

Величина  $\rho = 1/\gamma$ , обратная удельной проводимости и называемая *удельным сопротивлением*, для имеющего сопротивление  $R$  проводника длиной  $l$  с постоянным поперечным сечением  $S$  вычисляется по формуле:

$$\rho = R \cdot S / l.$$



## ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

С увеличением, температуры выше 0 К на коротком участке происходит быстрый рост электросопротивления по степенному закону, а начиная с характеристической температуры Дебая и до температуры плавления – по линейному закону.

Линейная зависимость  $\rho$  от  $T$  характеризуется температурным коэффициентом электросопротивления  $\alpha_\rho$  :

$$\alpha_\rho = 1/\rho_0 \, d\rho /dT$$



- Зная  $\alpha_\rho$ , легко определить  $\rho$  для определенной температуры по выражению

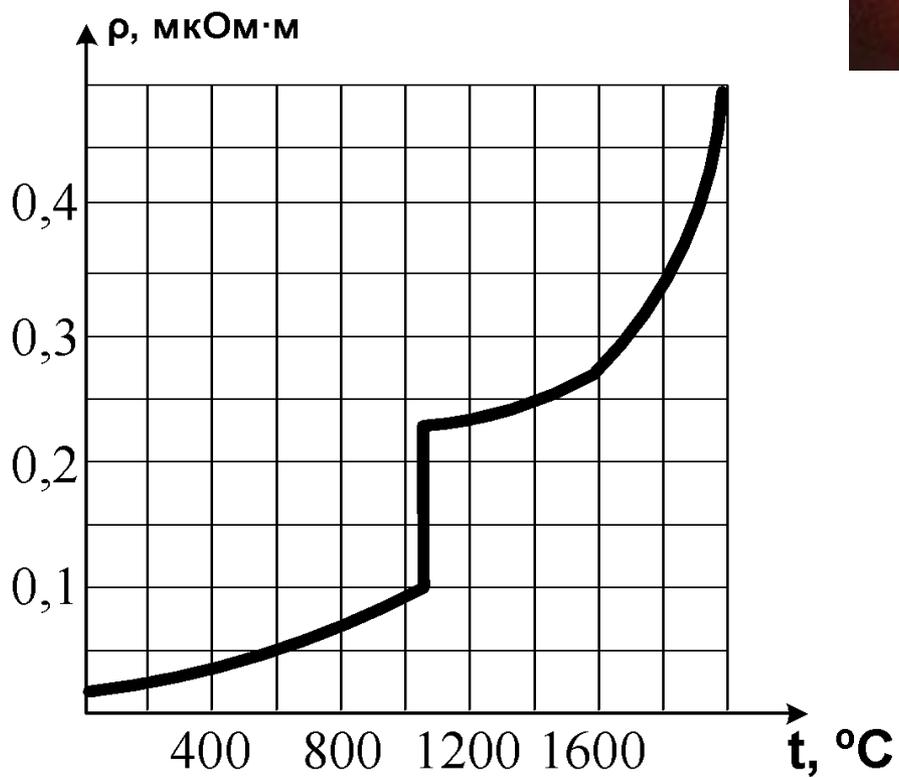
$$\rho = \rho_0 [ 1 + \alpha_\rho ( T - T_0 ) ]$$

Коэффициент  $\alpha_\rho$  имеет размерность 1/К и колеблется для основных металлов в диапазоне от 3 до  $7 \cdot 10^{-3}$  1/К. Исключение составляет марганец, у которого  $\alpha_\rho = 1 \cdot 10^{-3}$  1/К.

В сплавах  $\alpha_\rho$  существенно зависит от состава и может сильно отличаться от соответствующих значений исходных компонентов.



# ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ.



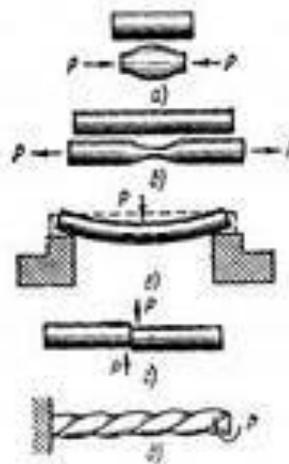
# ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ДЕФОРМАЦИЯХ.

$$\rho = \rho_0(1 \pm \sigma \cdot s)$$

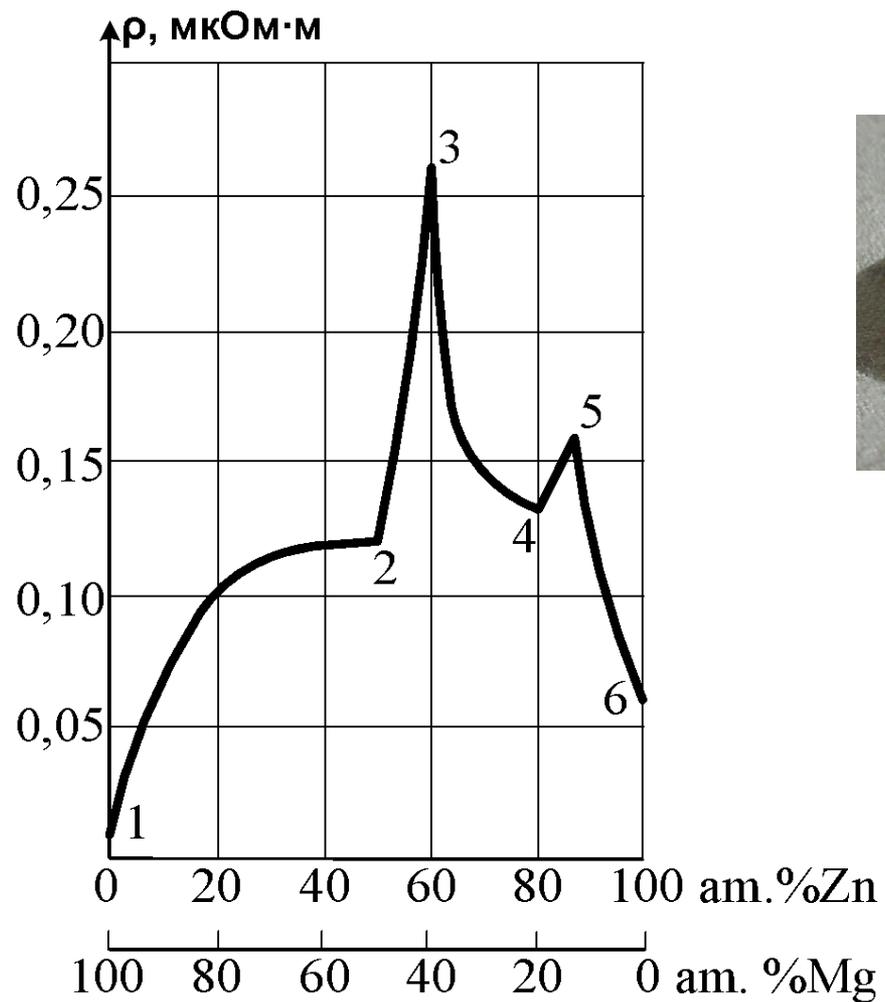
где  $\rho$  – удельное сопротивление металла (Ом\*м) при механическом напряжении  $\sigma$ ,

$\rho_0$  – удельное сопротивление металла, не подверженного механическому воздействию,

$s$  – коэффициент механического напряжения



# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ



ForexAW.com

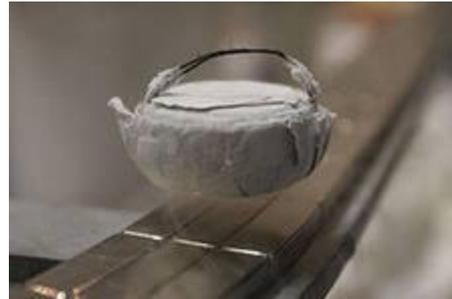


## СВЕРХПРОВОДНИКИ И КРИОПРОВОДНИКИ.

- У многих металлов и сплавов при температурах, близких с  $T=0^{\circ}\text{K}$ , наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления. Это явление получило название **сверхпроводимости**, а температуру  $T_{\text{св}}$ , при которой происходит переход в сверхпроводящее состояние, называют **критической температурой перехода**.



- Максимальную критическую температуру среди чистых металлов имеет технеций (11.2 K), среди сплавов - твердый раствор соединений  $Nb_3Al$  и  $NbGe$  (20.05 K).



- *Свойством сверхпроводимости обладают около половины металлов и несколько сотен сплавов. Одновалентные металлы, ферромагнетики, а также металлы, которые при комнатных температурах являются хорошими проводниками, по-видимому, не обладают сверхпроводимостью. Сверхпроводящие сплавы не обязательно состоят из сверхпроводящих металлов, более того, в их состав могут входить полупроводники (например, GeTe, SrTiO<sub>3</sub>). При обычных температурах проводимость сверхпроводников ниже, чем у несверхпроводящих металлов.*



- *Сверхпроводящие свойства зависят от типа кристаллической структуры. Изменение типа решетки, например, при больших давлениях, может перевести вещество из обычного в сверхпроводящее состояние. Критические температуры изотопов элементов, переходящих в сверхпроводящее состояние ( $T_{ci}$ ), связаны с массами изотопов  $M_{ai}$  соотношением*

$$T_{ci}(M_{ai})^{1/2} = \text{const}$$



- Помимо явления сверхпроводимости в современной электротехнике все шире используется явление *криопроводимости*, т.е. достижение некоторыми металлами весьма малой удельной проводимости при криогенных температурах (но более высоких, чем температура сверхпроводникового перехода, если данный металл вообще принадлежит к сверхпроводникам).
- Материалы, обладающие особо благоприятными свойствами для применения в качестве проводников в условиях криогенных температур, называются *криопроводниками* или *гиперпроводниками*.



- Конечное значение  $\rho$  криопроводника при его рабочей температуре ограничивает допустимую плотность тока в нем, хотя эта плотность может быть намного выше, чем в обычных проводниках при нормальной или повышенной температуре. Криопроводники, у которых при изменении температуры в широких пределах значение  $\rho$  изменяется плавно (без скачков) нельзя использовать в ряде устройств, основанных на триггерном эффекте появления и нарушения сверхпроводимости.



□ В зависимости от удельного электрического сопротивления и применения проводниковые материалы подразделяют на следующие группы:

1) металлы и сплавы высокой проводимости;

2) припой;

3) сверхпроводники;

4) контактные материалы;

5) сплавы с повышенным электрическим сопротивлением.



# *МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ.*

Проводниковые металлы должны иметь:

- достаточную прочность,
- пластичность,
- коррозионную стойкость в атмосферных условиях,
- высокую износостойкость.

Металл должен хорошо свариваться и подвергаться пайке для получения соединения высокой надежности и электрической проводимости.



Практическое применение имеют химически чистые металлы: Cu, Al, Fe.

Эти металлы обладают высокой электрической проводимостью при минимальном содержании примесей и дефектов кристаллической решетки.



- ▣ **Медь-** проводниковый материал . Наиболее чистая бескислородная медь
- ▣ **Получение меди.** Медь получают путем переработки сульфидных руд, чаще других встречающихся в природе.
- ▣ **Свойства меди.** Удельная проводимость меди весьма чувствительна к наличию примесей. Недостатком меди является ее подверженность атмосферной коррозии с образованием окисных и сульфидных пленок. Скорость окисления быстро возрастает при нагревании, однако прочность сцепления окисной пленки с металлом невелика.



***Применение меди.*** Медь применяют в электротехнике для изготовления проводов, кабелей, шин распределительных устройств, обмоток трансформаторов, электрических машин, токоведущих деталей приборов и аппаратов, анодов в гальваностегии и гальванопластике. Медные ленты используют в качестве экранов кабелей.



- ▣ *Алюминий* высокой чистоты используют в электротехнике .
- ▣ Все примеси, так же как и в меди, снижают проводимость алюминия, которая несколько ниже, чем у меди . Добавки таких примесей, как Ni, Si, Zn, Fe, мышьяк As, сурьма Sb, Pb и Bi, в количестве 0,5 % снижают удельную проводимость алюминия в отожженном состоянии не более, чем на 2-3 %.



- Алюминий уступает меди в электрической проводимости и прочности, но он значительно легче, больше распространен в природе.
- При замене медного провода алюминиевым последний должен иметь диаметр в 1,3 раза больше, но масса его и в этом случае будет в 2 раза меньше.



- Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на поверхности защитной оксидной пленки  $Al_2O_3$ . Эта пленка предохраняет алюминий от коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов, что затрудняет пайку алюминиевых проводов обычными методами.



- Преимущества алюминия как контактного материала состоят в том, что этот материал легко напыляется, обладает хорошей адгезией к кремнию и пленочной изоляции из  $\text{SiO}_2$ , широко используемый в полупроводниковых интегральных схемах, обеспечивает хорошее разрешение при фотолитографии.
- Недостатком алюминия является значительная подверженность электромиграции, что приводит к увеличению сопротивления или даже разрыву межсоединения.



- ▣ **Железо** значительно уступает меди и алюминию по проводимости, но имеет большую прочность; что в некоторых случаях оправдывает его применение как проводникового материала
- ▣ Сечение провода определяется не электрической проводимостью, а механической прочностью материала.



- ▣ **Биметаллический провод** (стальной провод, покрытый медью) используют при передаче переменных токов повышенной частоты. Такая конструкция позволяет уменьшить электрические потери, связанные с ферромагнетизмом железа, и расход дефицитной меди.



- ▣ Проводимость определяет металл наружного слоя, так как токи повышенной частоты вследствие скин-эффекта распространяются по наружному слою провода.

