

Материалы электронной техники

к.т.н., доц. Марончук И.И.

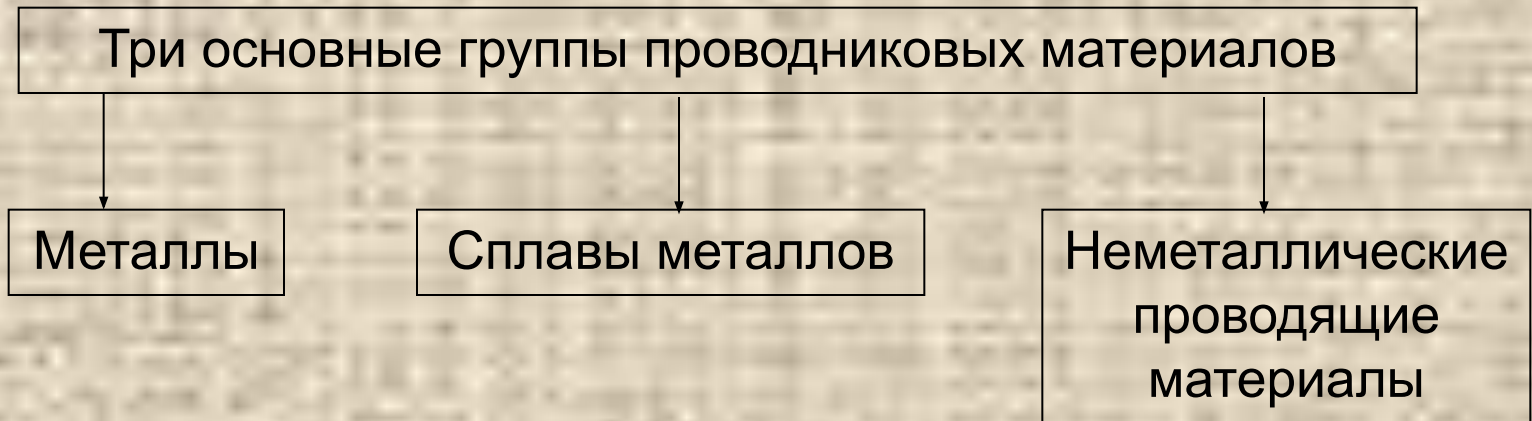
Тема 2 Проводники.

Лекция 4 Проводниковые материалы

Содержание лекции

- Классификация проводниковых материалов
- Металлы с высокой удельной проводимостью
- Благородные металлы
- Тугоплавкие металлы
- Металлы со средним значением температур плавления
- Сплавы
- Сверхпроводящие материалы
- Материалы высокого удельного сопротивления
- Припои и флюсы

Классификация проводниковых материалов



Металлы подразделяют на четыре группы

1. **Металлы с высокой удельной проводимостью.** К ним относят медь и алюминий. У меди $\rho = 0,017$ мкОм·м, у алюминия $\rho = 0,028$ мкОм·м. Они применяются для изготовления радиомонтажных проводов и кабелей, тонких плёнок в интегральных микросхемах.
2. **Благородные металлы.** К ним относят золото, серебро, платину и палладий. Они обладают высокой химической стойкостью. Применяются в качестве контактных материалов и коррозиестойких покрытий
3. **Тугоплавкие металлы** имеют температуру плавления свыше $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вольфрам, молибден, хром, рений и др.
4. **Металлы со средней температурой плавления.** Железо, никель и кобальт. Температура плавления около $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эти металлы имеют сильно выраженные магнитные свойства.

Три группы сплавов металлов

```
graph TD; A[Три группы сплавов металлов] --> B[Сплавы высокого сопротивления.]; A --> C[Сверхпроводящие сплавы]; A --> D[Припои];
```

Сплавы
высокого
сопротивления.

Сверхпроводящие
сплавы

Припои

- 1. Сплавы высокого сопротивления.** Манганин (86% Cu, 12%Mn, 2%Ni), константан (59% Cr, 40%Ni), хромоникелевые сплавы. Эти сплавы имеют удельное электрическое сопротивление более 0,4 мкОм·м. Применяются для изготовления резисторов и нагревательных элементов .
- 2. Сверхпроводящие сплавы.** У них при температурах, близких к абсолютному нулю, наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления. Среди таких сплавов наилучшими параметрами обладают сплавы ниобия (Nb_3Sn , Nb_3Ga , Nb_3Ge).
- 3. Припой.** Низкотемпературные сплавы, применяемые при пайке. Различают мягкие и твёрдые припои. Мягкие припои имеют температуру плавления ниже 300 °С. В их состав входит от 10 (ПОС-10) до 90% (ПОС-90) олова, остальное - свинец. Твёрдые припои имеют температуру плавления выше 300 °С. Наиболее распространёнными являются медно-цинковые (ПМЦ) и серебряные (ПСр)

Три группы неметаллических проводящих материалов

```
graph TD; A[Три группы неметаллических проводящих материалов] --> B[Углеродистые материалы]; A --> C[Композиционные материалы]; A --> D[Проводящие материалы на основе окислов];
```

Углеродистые
материалы

Композиционные
материалы

Проводящие материалы
на основе окислов

1. Углеродистые материалы. Наиболее широкое применение имеет графит. Ценные свойства: малое удельное сопротивление, хорошая теплопроводность, стойкость ко многим агрессивным средам.

2. Проводящие материалы на основе окислов.

подавляющее большинство чистых оксидов являются диэлектриками, однако при неполном окислении или при введении примесей проводимость оксидов резко увеличивается. Такие материалы можно использовать в качестве контактных и резистивных слоёв. Практический интерес представляют тонкие плёнки диоксида олова SnO_2 и оксида индия In_2O_3 .

3. Композиционные материалы. Это механическая смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой. Наибольший интерес - контактолы и керметы. Контакттолы - маловязкие или пастообразные композиции, применяемые в качестве токопроводящего клея или краски. Связующим веществом в них являются синтетические смолы, а токопроводящим наполнителем - мелкодисперсные порошки металлов (серебра, никеля, палладия). Керметы - металлодиэлектрические композиции с неорганическим связующим веществом. Обладают высоким удельным поверхностным сопротивлением, поэтому применяются для изготовления тонкоплёночных резисторов. Наибольшее распространение получила микрокомпозиция Cr-SiO₂, тонкие плёнки которой изготавливают путём напыления в вакууме на диэлектрическую подложку.

Металлы с высокой удельной проводимостью

МЕДЬ

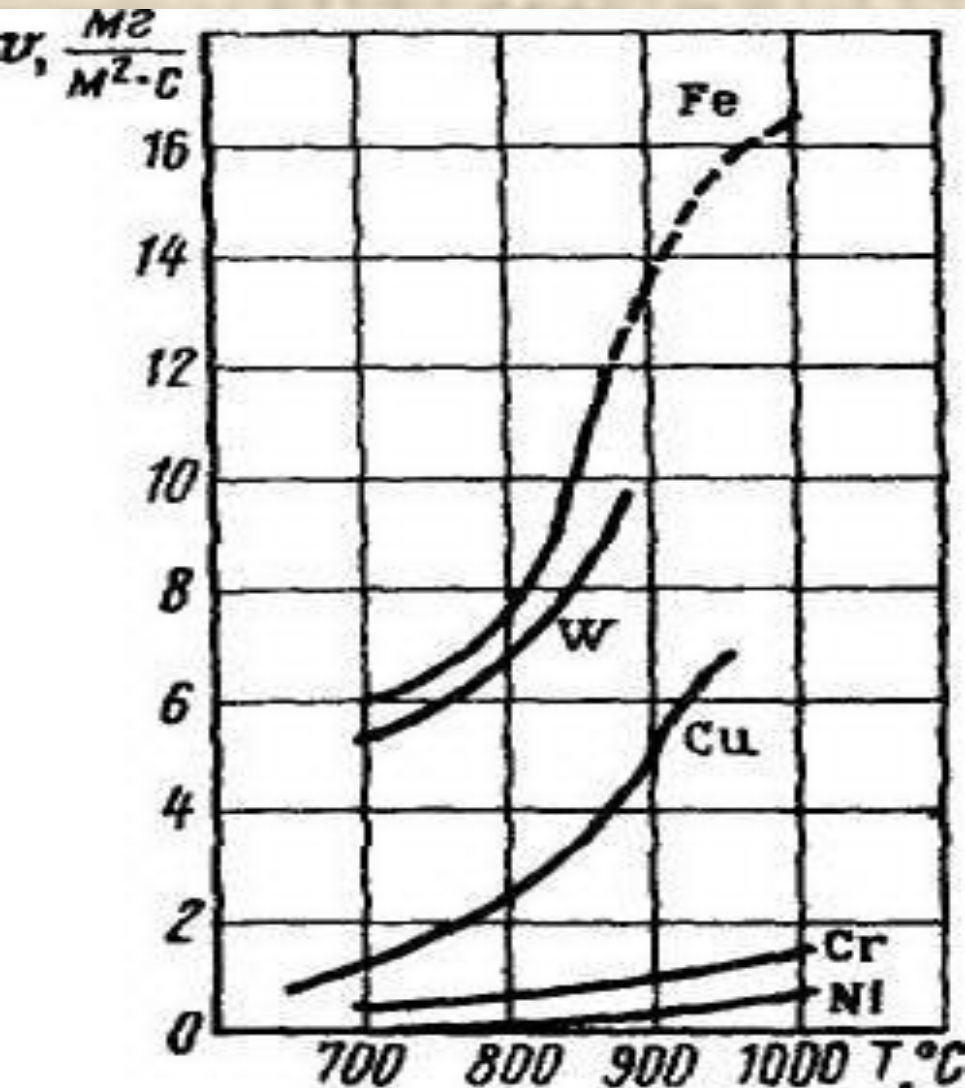
Медь (Cu, от лат. Cuprum) - элемент побочной подгруппы первой группы, четвёртого периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 29. Простое вещество медь - это пластичный металл золотисто-розового цвета (розового цвета при отсутствии оксидной плёнки). Медь на воздухе быстро покрывается оксидной плёнкой, которая придаёт ей характерный интенсивный желтовато-красный оттенок. Тонкие плёнки меди на просвет имеют зеленовато-голубой цвет.

Свойства меди.

Медь обладает высокой тепло- и электропроводностью, занимает второе место по электропроводности после серебра. Удельная проводимость меди $(5,5 \div 5,8) \cdot 10^7$ См/м при 20°C , плотность $8,96$ г/см³, температура плавления $T_{\text{пл}} = 1083$ оС,

Существует ряд сплавов меди: латуни - с цинком, бронзы - с оловом и другими элементами, мельхиор - с никелем, баббиты - со свинцом и другие.

Удельная проводимость меди весьма чувствительна к наличию даже небольшого количества примесей и снижается в зависимости от вида примеси на $5 \div 55$ %. В то же время присадки многих металлов повышают механическую прочность и твердость меди.



Зависимость скорости окисления проводников (U) от температуры (T) для железа, вольфрама, меди, хрома и никеля

Основные достоинства меди :

1. Малое сопротивление $\rho = 0,017241$ мкОм·м при $T = 20^\circ\text{C}$.
2. Высокая механическая прочность.
3. Стойкость к коррозии (в условиях высокой влажности окисляется на воздухе медленнее, чем железо).
4. Интенсивное окисление меди происходит при повышенных температурах (рисунок).

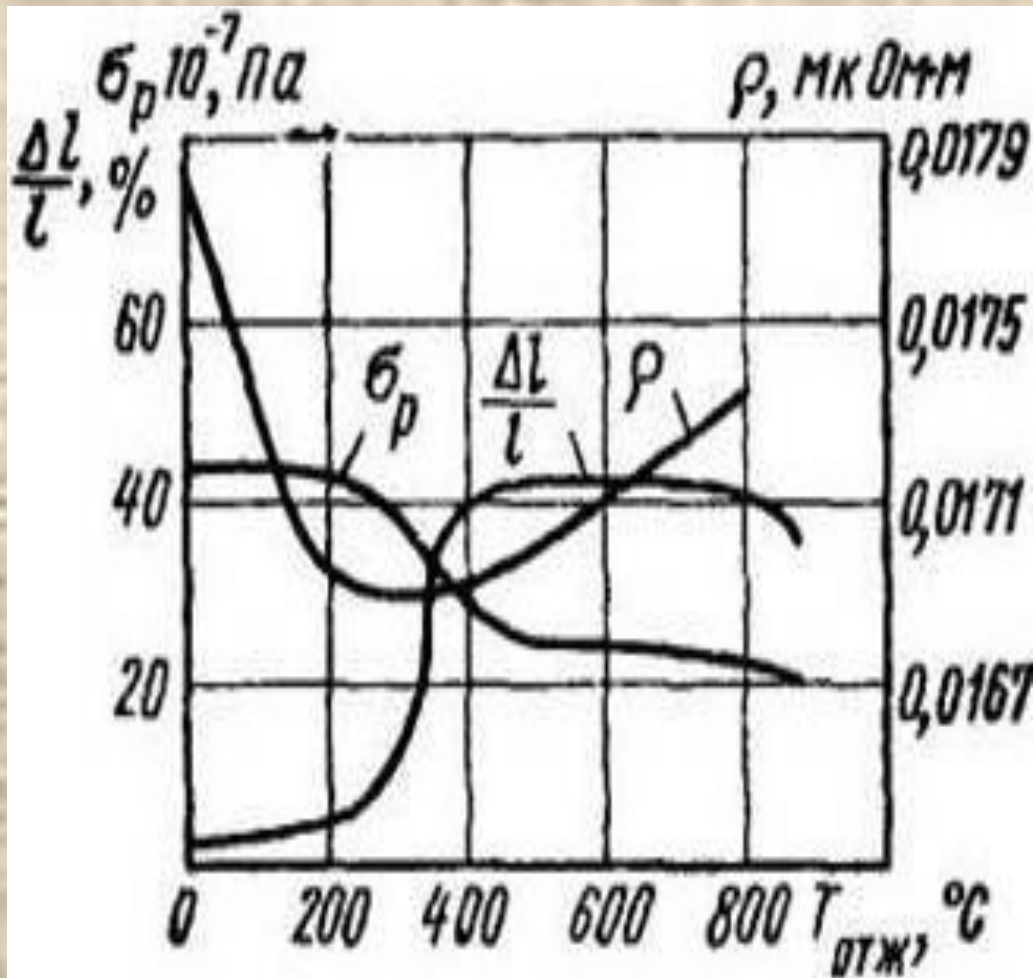
Недостатки Cu:

1. Высокая стоимость.
2. Атмосферная коррозия с образованием окисных и сульфидных пленок.
3. Влияние водорода на механические свойства (водородная болезнь).

Производство Cu.

Производят путем переработки сульфидных руд (плавка и обжиг с интенсивным дутьем) с последующей электролитической очисткой от примесей. Пластины Cu переплавляют в стандартные болванки.

Выполняют прокатку и протяжку в типовую электропроводку и изделия для ЭУ.



Отжиг Si производят в печах без доступа воздуха, чтобы избежать окисления. Влияние отжига на свойства Si показано рисунке.

Зависимости предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и удельного сопротивления Si от температуры отжига

Стандартная медь при $T = 20^{\circ}\text{C}$, имеет удельные электрические:

- проводимость $\gamma = 58 \text{ МОм/м}$;
- сопротивление $\rho = 0,017241 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

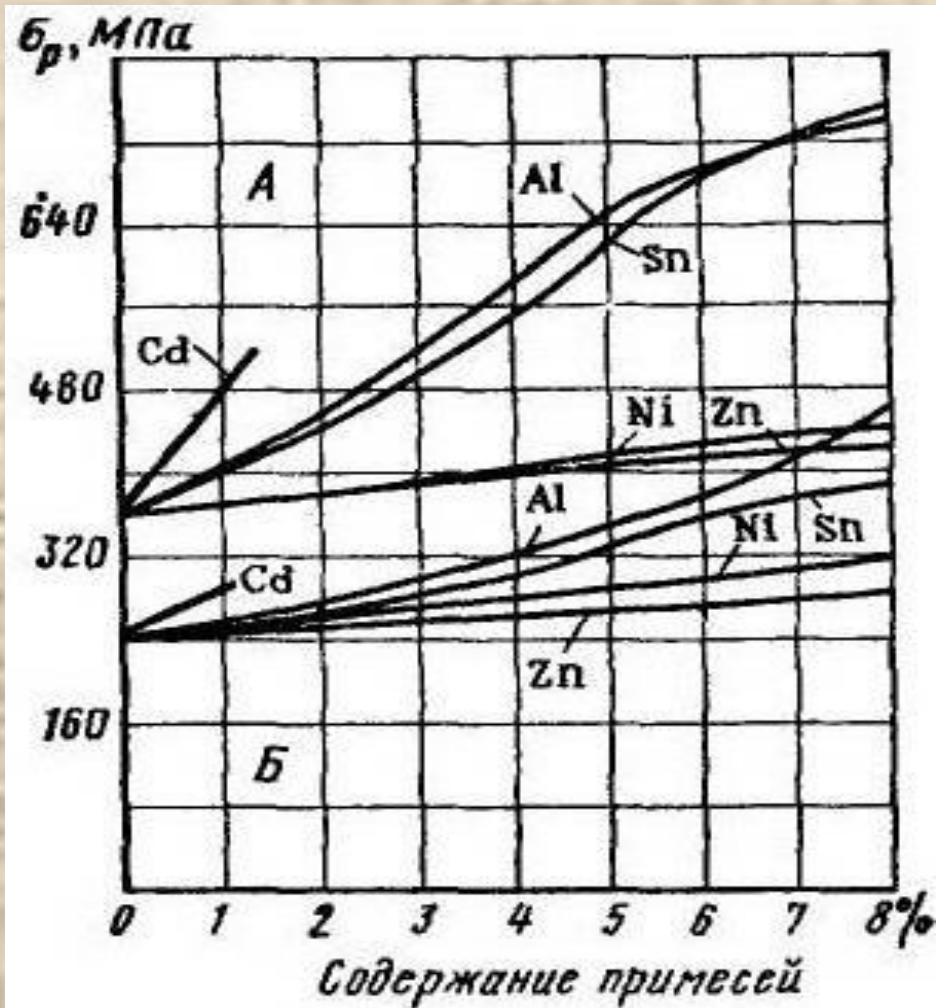
Марки Cu. Проводниковая медь - М1 и М0.

М1 содержит 99,90% Cu, а в общем количестве примесей (0,1%) кислорода не более 0,08%.

Если более 0,1% кислорода, Cu разрушается при обработке давлением.

Лучшими механическими свойствами обладает марка М0 (99,95% Cu и не более 0,05% примесей - не свыше 0,02% кислорода).

Медь чувствительна к примесям. Сильное влияние на свойства меди оказывают примеси *Be, As, Fe, Si* или *P*, снижающие удельную проводимость на 60%.



Присадки металлов повышают механическую прочность и твердость Cu, как в холодотянутом, так и отожженном состояниях (рисунок).

Зависимость предела прочности при растяжении сплавов Cu в холодотянутом (А) и в отожженном (Б) состояниях от примесей

Из-за окисления медь непригодна для слаботочных контактов автоматики ЭУ.

При размыкании контакта образуется электрическая дуга и окись Си диссоциирует, открывая поверхность.

Происходит отслаивание и термическое разложение окисной пленки, а также сильный износ Си контактов.

Медь применяют для изготовления элементов электропроводки, обмоток трансформаторов, электрических машин и т.п.

Медь твердая (МТ) обладает высокой механической прочностью, твердостью и сопротивляемостью к истиранию поверхности.

Из МТ изготавливают контактные провода, коллекторные пластины электрических машин постоянного тока.

Медь мягкая (ММ) обладает хорошей гибкостью и пластичностью.

ММ применяют в качестве внутренней проводки, монтажных проводов, шнуров

Алюминий

Алюминий (Al, от лат. *Aluminium*) - элемент главной подгруппы третьей группы третьего периода периодической системы химических элементов, с атомным номером 13. Относится к группе лёгких металлов. Наиболее распространённый металл и третий по распространённости химический элемент в земной коре (после кислорода и кремния). Простое вещество алюминий - лёгкий, парамагнитный металл серебристо-белого цвета, легко поддающийся формовке, литью, механической обработке. Алюминий обладает высокой тепло- и электропроводностью, стойкостью к коррозии за счёт быстрого образования прочных оксидных плёнок, защищающих поверхность от дальнейшего окисления. Плотность $2,7 \text{ г/см}^3$, $T_{пл} = 660 \text{ }^\circ\text{C}$. Алюминий получают электролизом глинозема Al_2O_3 в расплаве криолита Na_3AlF_6 .

Достоинства Al. Удельное сопротивление Al в 1,6 раза больше удельного сопротивления Cu, но Al в 3,5 раза легче Cu .

При одинаковых сопротивлении и длине Al провода в 2 раза легче Cu, несмотря на большее поперечное сечение. К тому же Al распространен в природе и имеет меньшую стоимость. **Недостаток Al** - низкая механическая прочность. Отожженный Al в 3 раза менее прочен на разрыв, чем отожженная Cu.

Из Al получают тонкую (6 - 7 мкм) фольгу для обкладок в бумажных конденсаторах.

При $T = -196^{\circ}\text{C}$ по величине удельного сопротивления Al почти сравнивается с Cu.

Поверхность Al окисляется и покрывается прочной пленкой окиси с большим удельным сопротивлением.

Пленка предохраняет Al от коррозии и создает большое сопротивление в местах контакта Al проводов, что делает невозможным пайку Al обычными методами.

Для пайки Al применяют специальные пасты-припои и используют ультразвуковые паяльники

Тонкая оксидная изоляция Al стойкая к нагреву и прочная (катушки без дополнительной изоляции).

Недостатки оксидной изоляции - плохая гибкость и гигроскопичность.

Защита от коррозии в местах контакта Al и Cu обязательна (при увлажнении контакта образуется гальваническая пара с большой ЭДС).

Полярность пары - на внешней поверхности ток направлен от Al к Cu, поэтому Al разрушается коррозией. Для защиты от коррозии контакты покрывают лаками

Благородные металлы.

Золото (Au от лат. *Aurum*) - элемент побочной подгруппы первой группы, шестого периода периодической системы Менделеева, с атомным номером 79. Простое вещество золото - **благородный металл жёлтого цвета**. Красноватый оттенок некоторым изделиям из золота, например, монетам, придают примеси других металлов, в частности, меди. В тонких плёнках золото просвечивает зелёным цветом. Золото обладает исключительно высокой теплопроводностью и низким электрическим сопротивлением.

Плотность чистого золота равна **$19,3 \text{ г/см}^3$** , **$T_{пл} = 1063 \text{ оС}$** . Среди металлов по плотности занимает шестое место: после осмия, иридия, рения, платины и плутония. Высокая плотность золота облегчает его добычу. Самые простые технологические процессы, такие, как, например, промывка на шлюзах, могут обеспечить весьма высокую степень извлечения золота из промываемой породы.

Преимуществом контактного Au является стойкость к образованию сернистых и окисных пленок (при 20⁰C и нагреве). Пленки из Au применяют для контактных площадок в пленочных микросхемах.

При контакте Au с алюминием происходит образование соединений с повышенным удельным сопротивлением и хрупкостью. Поэтому контакты тонких пленок золота и алюминия ненадежны

Серебро (Ag, от лат. Argentum) - элемент побочной подгруппы первой группы пятого периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 47. Простое вещество серебро – ковкий, пластичный благородный металл серебристо-белого цвета. Кристаллическая решётка – гранецентрированная кубическая. Температура плавления $T_{пл} = 960 \text{ }^\circ\text{C}$, плотность $10,5 \text{ г/см}^3$

Малая удельная электропроводимость **Ag** обеспечивает слабый нагрев контактов и быстрый отвод теплоты.

Недостаток Ag - миграция внутрь диэлектрика, на который нанесено, в условиях высокой влажности и при высоких температурах окружающей среды.

Ag обладает пониженной химической стойкостью. **Ag** контакты не применяют рядом с резиной, эбонитом и другими материалами с серой. Хорошо паяется обычными припоями. Применение **Ag** ограничено дефицитом.

Платина (Pt, от исп. Platina) - 78 элемент периодической таблицы, атомная масса 195,08; благородный металл серо-стального цвета, практически не соединяющийся с кислородом и весьма стойкий к химическим реагентам. Платина прекрасно поддается механической обработке, вытягивается в очень тонкие нити и ленты. Она практически не растворяет кислород, пропуская его через себя в нагретом состоянии.

Хорошо поддается механической обработке и вытягивается в тонкие нити и ленты.

В отличие от серебра Pt на воздухе не образует сернистых пленок, что обеспечивает Pt контактам стабильное переходное сопротивление. Pt не растворяет водород, пропуская его через себя в нагретом состоянии.

Pt применяют для изготовления термопар, рассчитанных на рабочие температуры до 1600°C

Палладий (Pd, от лат. Palladium) - элемент побочной подгруппы восьмой группы пятого периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, атомный номер 46. Палладий – серебристо-серый металл, по внешнему виду напоминающий платину, с наименьшим удельным весом и температурой плавления из всех платиновых металлов; в чистом виде мягок, пластичен, легко поддается обработке.

По свойствам близок к Pt и служит ее заменителем, т.к. Pd дешевле в 4 - 5 раза.

Pd используют в электровакуумной технике, т.к. способен поглощать водород (850-кратный объем водорода по отношению к собственному объему). Водородом наполняют газоразрядные приборы. Pd и его сплавы с серебром и медью применяют в качестве контактных материалов.

В отожженном состоянии Pd обладает хорошими механическими свойствами.

Тугоплавкие металлы

Тугоплавкие металлы (ТМ) с температурой плавления более 1700°C являются химически устойчивыми при низких температурах и активными при повышенных.

Эксплуатация ТМ при высоких температурах только в среде инертных газов или вакууме.

Получают ТМ методами электровакуумной технологии - зонной очисткой и плазменной обработкой.

Механическая обработка требует подогрева.

ТМ - вольфрам, молибден, тантал, ниобий, хром, ванадий, титан, цирконий и рений.

ТМ при нагревании на воздухе интенсивно окисляются с образованием летучих соединений.

Изготавливают нагревательные элементы, которые работают в вакууме или защитной среде.

Преимущество ТМ - малое давление насыщенного пара при высоких рабочих температурах.

Вольфрам (W) - тяжелый, твердый ТМ серого цвета с высокой температурой плавления, у него высокая прочность при мелкозернистом строении, хрупкость и ломкость.

Температура плавления — 3422 °С. Плотность чистого вольфрама составляет 19,25 г/см³

После механической обработки **W** приобретает волокнистую структуру и не ломается.

Этим объясняется гибкость тонких **W** нитей.

Для улучшения свойств **W**, вводят добавки окислов кремния, алюминия, кальция.

Из непровисающего **W** изготавливают нити для ламп накаливания, которые были разработаны в 1890г. русским изобретателем А. Н. Лодыгиным.

Молибден (Mo) - металл близкий к W.

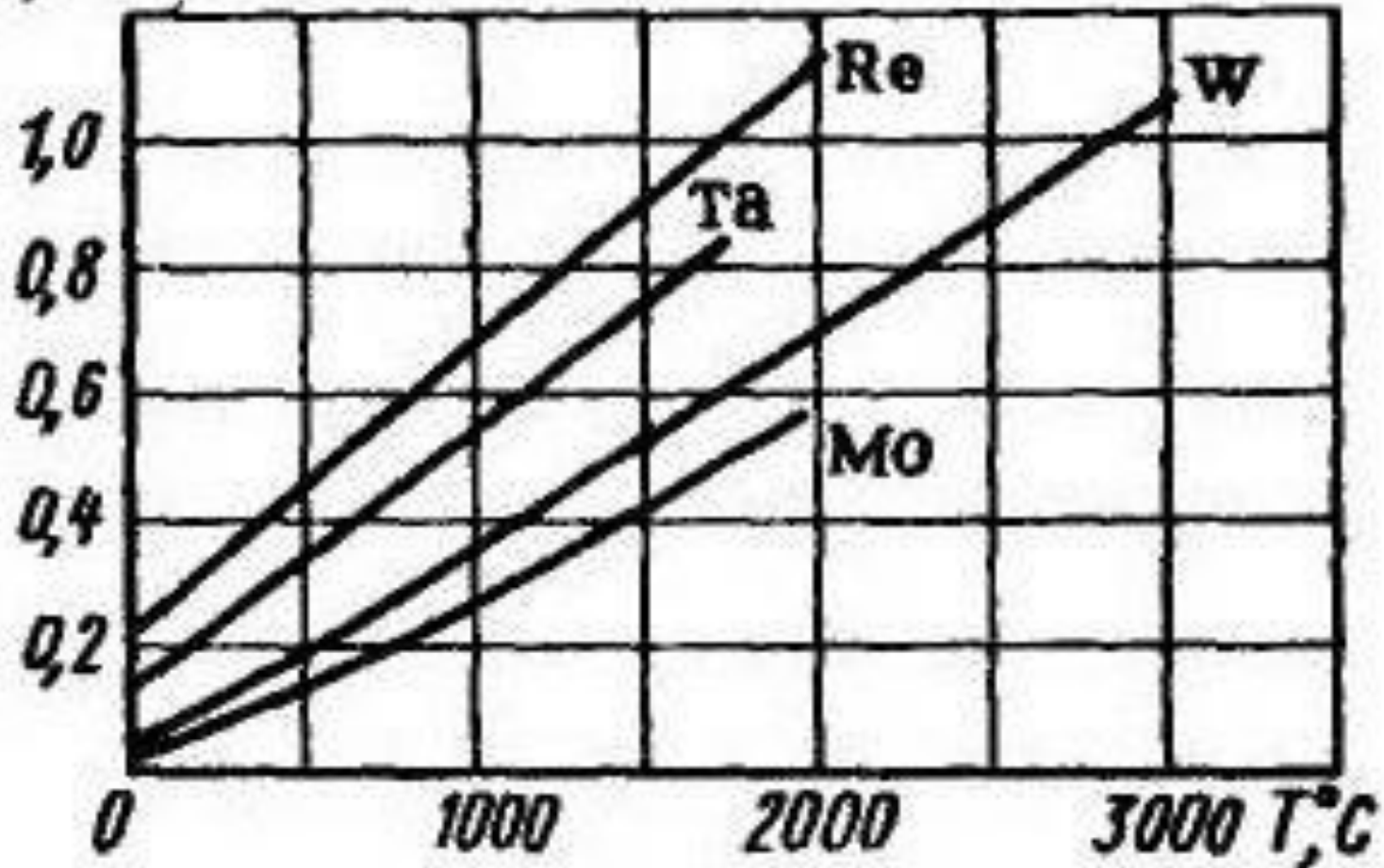
Рекристаллизованный W при 20°C хрупок, а мелкозернистый Mo - пластичен. При 20°C Mo - инертный металл, но более активный, чем W.

Температура плавления — 2620 °C. Плотность чистого молибдена составляет 10,2 г/см³

На воздухе Mo окисляется при 300°C с образованием низших окислов. Поэтому нагреваемые детали из Mo должны работать в вакууме или восстановительной среде.

Среди всех ТМ молибден обладает наименьшим удельным сопротивлением (рисунок).

$\rho, \text{мкОм}\cdot\text{м}$



Зависимость удельного сопротивления вольфрама, молибдена, тантала и рения от температуры

Тантал обладает высокой температурой плавления — 3017 °С; кипит при 5458 °С. Плотность тантала — 16,65 г/см. Несмотря на твёрдость, пластичен, как золото. Чистый тантал хорошо поддаётся механической обработке, легко штампуются, раскатывается в проволоку и тончайшие листы толщиной в сотые доли миллиметра. Тантал является отличным геттером (газопоглотителем), при 800 °С он способен поглотить 740 объёмов газа.

Тантал получают методами порошковой металлургии подобно W и Mo, в виде: проволоки, прутков, листов, лент и фольги.

В противоположность W и Mo тантал не становится хрупким при нагревании в вакууме до высоких температур.

Ввиду высокой стоимости, Ta используют для изделий, работающих в напряжённом тепловом режиме (аноды и катоды электровакуумных приборов, электролитические конденсаторы).

Хром (Cr) элемент с высокой стойкостью к окислению.
Применяют для защитных покрытий изделий, эксплуатируемых при повышенных температурах.
Хромирование выполняют электролитическим методом.

Температура плавления — 1860 °С. Плотность чистого хрома составляет 7,19 г/см³

Из тонких пленок Cr изготавливают резисторы и слои для контактных площадок и проводящих соединений в интегральных микросхемах.

Cr входит в состав сплавов для нагревательных приборов, термопар, конструкций из нержавеющей, жаропрочных сталей и магнитных материалов.

Металлы со средним значением температуры плавления

Часто в ЭУ применяют железо (Fe), никель (Ni) и кобальт (Co) - ферромагнитные металлы с температурным коэффициентом удельного сопротивления в 1,5 раза превышающим коэффициент α_p меди.

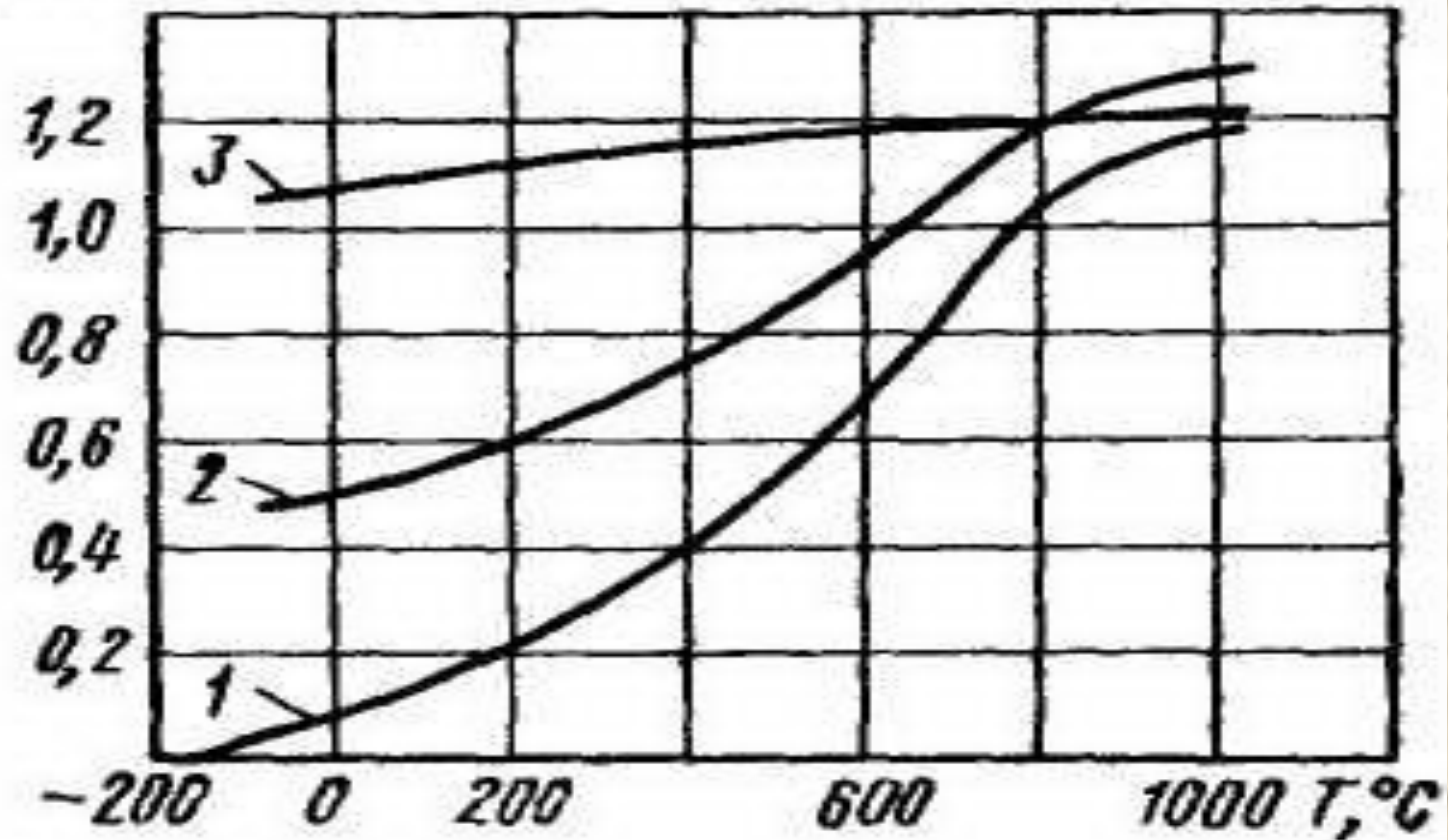
Fe - доступный металл с хорошей механической прочностью. Температура плавления — 1539 °C.

Плотность чистого железа составляет 7,874 г/см³

Чистое Fe имеет более высокое по сравнению с Cu и Al удельное сопротивление (около 0,1 мкОм·м).

Особенность Fe - нелинейная зависимость удельного сопротивления от температуры. Обусловлена изменением спонтанной намагниченности рядом с особой температурой Кюри (T_K), выше которой ферромагнитные свойства отсутствуют (рисунок).

ρ , мкОм·м



Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры:
1 - чистого железа; 2 - электротехнической стали; 3 - ферронихрома

При повышении температуры спиновая упорядоченность в Fe нарушается, что вызывает дополнительное рассеяние электронов проводимости.

Согласно правилу Маттиссена полное сопротивление

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост} + \rho_M$$

где ρ_T и $\rho_{ост}$ - удельные сопротивления от рассеяния электронов Fe на тепловых колебаниях решетки и примесях; ρ_M - магнитный вклад в сопротивление Fe от беспорядка в системе спинов.

Из Fe изготавливают корпуса электровакуумных и полупроводниковых приборов (Т до 500°C).

Газовыделение из Fe мало и не нарушает нормальную эксплуатацию приборов.

Удельное сопротивление Fe, зависит от содержания примесей. Наиболее сильное влияние на электрические свойства Fe оказывает примесь кремния.

Никель (Ni) - серебристый металл с плотностью, равной плотности меди. Применяют для арматуры электронных ламп, некоторых типов катодов.

Температура плавления — 1453 °С. Плотность чистого никеля составляет 8,902 г/см³

Ni легко получить в чистом виде (99,99% Ni) и ввести легирующие присадки кремния, марганца.

Положительные свойства Ni - достаточная механическая прочность после отжига при большом относительном удлинении.

Металл даже в холодном состоянии легко поддается механической обработке: ковке, прессовке, прокатке, штамповке, волочению и т. п.

Из Ni делают сложные по конфигурации изделия с жестко выдержанными допусками.

Наиболее вредная примесь в Ni - сера, резко снижающая механическую прочность.

Ценное свойство Ni - химическая устойчивость к растворам щелочей, которые не действуют на него даже в нагретом состоянии.

Сплавы

Сплавы - материалы, имеющие металлические свойства и состоящие из двух или большего числа химических элементов, из которых хотя бы один является металлом. Многие металлические сплавы имеют один металл в качестве основы с малыми добавками других элементов. Самый распространенный способ получения сплавов - **затвердевание однородной смеси их расплавленных компонентов**. Существуют и другие методы производства - например, **порошковая металлургия**.

Почти все металлы, имеющие промышленное значение, используются в виде сплавов. Так, например, все выплавляемое железо почти целиком идет на изготовление обычных и легированных сталей, а также чугунов. Дело в том, что сплавлением с некоторыми компонентами можно существенно улучшить свойства многих металлов. Если для чистого алюминия предел текучести составляет всего лишь 35 МПа, то для алюминия, содержащего 1,6% меди, 2,5% магния и 5,6% цинка, он может превышать 500 МПа. Аналогичным образом могут быть улучшены электрические, магнитные и термические свойства. Улучшенные характеристики сплава обусловлены распределением и структурой его кристаллов и типом связей между атомами в кристаллах.

Сплавы на основе меди.

В основном это латуни, т.е. медные сплавы, содержащие от 5 до 45% цинка. Латунь с содержанием от 5 до 20% цинка называется красной (томпаком), а с содержанием 20-36% Zn - желтой (альфа-латунью). Латуни применяются в производстве различных мелких деталей, где требуются хорошая обрабатываемость и формуемость. Сплавы меди с оловом, кремнием, алюминием или бериллием называются бронзами. Например, сплав меди с кремнием носит название кремнистой бронзы. Фосфористая бронза (медь с 5% олова и следами фосфора) обладает высокой прочностью и применяется для изготовления пружин и мембран.

Алюминиевые сплавы.

К ним относятся литейные сплавы (Al-Si), сплавы для литья под давлением (Al-Mg) и самозакаливающиеся сплавы повышенной прочности (Al-Cu). Алюминиевые сплавы экономичны, легкодоступны, прочны при низких температурах и легко обрабатываются (куются, штампуются, пригодны для глубокой вытяжки, волочения, экструдирования, литья, хорошо свариваются и обрабатываются на металлорежущих станках). К сожалению, механические свойства всех алюминиевых сплавов начинают заметно ухудшаться при температурах выше приблизительно 175°C. Но благодаря образованию защитной оксидной пленки они проявляют хорошую коррозионную стойкость в большинстве агрессивных сред. Эти сплавы хорошо проводят электричество и тепло, обладают высокой отражательной способностью, немагнитны, безвредны в контакте с пищевыми продуктами (поскольку продукты коррозии не имеют вкуса и нетоксичны), взрывобезопасны (поскольку не дают искр) и хорошо поглощают ударные нагрузки.

Сверхпроводящие материалы.

Известно, что СТ обладают 26 металлов. СТ имеют T ниже $4,0\text{ K}$ ($-277,4^{\circ}\text{C}$), поэтому их применение в обычных ЭУ затруднено.

13 элементов проявляют такие свойства только при высоких давлениях. Это полупроводники - кремний, германий, селен.

СТ не найдена у золота, меди и серебра (малое сопротивление вызывает слабое взаимодействие свободных электронов с кристаллической решеткой).

СТ нет в ЭТМ обладающих ферро- или антиферромагнетизмом (железо, сталь).

Производство. Выпускают в виде проволоки и ленты, из-за технологических трудностей, плохих механических свойств, низкой теплопроводности и сложной структуры.

SrTiO_3 , Cu-Nb , Nb-Ti , Nb_3Sn , YBaCuO-123 , DyBaCuO-123 или HoBaCuO-123 (ВТСТТ).

Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) послужило толчком к развитию нового направления в электроэнергетике. В настоящее время уже введены в эксплуатацию сверхпроводящие электрические кабели, рассчитанные на 13 кВ. Так, проект сверхпроводящего силового кабеля в г. Олбани, столице штата Нью-Йорк, в настоящее время является крупнейшим действующим проектом среди ВТСП силовых кабелей. Кабель конструкции «три в одном» (рисунок 3.2) длиной 350 м изготовлен компанией Сумитомо (Япония) из сверхпроводника первого рода производства той же компании. Кабель установлен 8 июля 2006 г. на территории энергетической компании National Grid штата Нью-Йорк и соединяет две подстанции с напряжением 34,5 кВ. Это первый сверхпроводящий кабель в реальной сети, первый подземный кабель и первый сверхпроводящий кабель, имеющий промежуточную муфту.

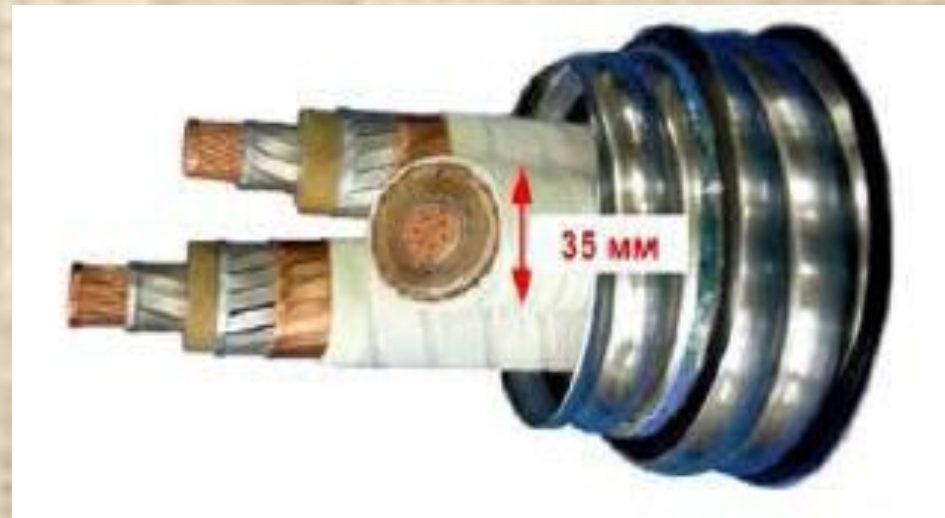
Упрощенно сверхпроводящий кабель устроен так. В центре обычно находится пучок медных проводов диаметром около 20 мм, который является несущим элементом. На этот элемент по окружности укладывают сверхпроводящие ленты (массовое производство таких лент организовано компанией American Superconductor). Они укладываются спиралью, скручиваются под углом. Поверх этого слоя укладывают второй слой сверхпроводящих лент с противоположным направлением скрутки. Затем накладывают изоляцию толщиной от 6 до 12 мм. Далее кладется еще примерно такое же количество сверхпроводящих лент - это так называемый сверхпроводящий экран. Поверх - медный экран, это защита сверхпроводника. Этот кабель упаковывают в длинную гибкую трубу из гофрированной нержавеющей стали. Причем труба эта двойная - внутренняя обмотана так называемой суперизоляцией, и между двумя трубами откачан воздух - это так называемая высоковакуумная термо-изоляция. По внутренней трубе прокачивают жидкий азот. Сверхпроводящий кабель помещается в этот криостат. Главная проблема - это надежность криогенной системы, которую создает жидкий азот и качает его по длинному кабелю.

К 2010 г. в мире было испытано три достаточно больших кабеля: 200 м в штате Огайо, 350 м на севере штата Нью-Йорк в городе Олбани и 600-метровый на Лонг-Айленде в Нью-Йорке. Готов к внедрению российский 200-метровый кабель. 100-метровые кабели сейчас испытывают в Корее и там же изготавливают 500-метровый кабель.

Обычные медные кабели могут пропускать ток не больше тысячи ампер и тоже требуют охлаждения.

Сверхпроводящие кабели легко передают ток 5 кА. До 2009 г. рекорд силы тока в высокотемпературном кабеле (10 кА) принадлежал Всероссийскому НИИ кабельной промышленности.

Но сейчас лидерство перехватили китайцы - 20 кА



Материалы высокого удельного сопротивления

Материалами высокого сопротивления (резистивными) называют проводниковые материалы, у которых значения ρ в нормальных условиях составляют не менее $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

По области применения резистивные материалы разделяют на три основные группы:

1) материалы для резисторов, или резистивные материалы общего назначения (медные, медно-никелевые, никелевые, никель-хромовые; пленочные, проволочные, углеродистые);

2) материалы для электродов термопар и удлиняющих проводов (сплавы на основе Ni, Pt систем, Cu-Ni, Pt-Rh, W-Re; неметаллические порошковые материалы);

3) материалы для нагревателей (сплавы на основе систем Ni-Cr, Fe-Cr-Al, порошковые керамические материалы).

В зависимости от области применения к резистивным материалам предъявляют дополнительные требования, например, по температурному коэффициенту электрического сопротивления α_r , жаростойкости и др.

При использовании сплавов в электроизмерительной технике от них требуется не только высокое удельное сопротивление, но и возможно меньшее значение α_r , а также низкая термоэлектродвижущая сила относительно меди. Проводниковые материалы в электронагревательных приборах должны длительно работать на воздухе при температурах порядка 1000°C .

Материалы для резисторов

Основные требования к материалам для резисторов: **низкий температурный коэффициент электрического сопротивления, низкая термо-эдс в паре с медью, высокая стабильность электрического сопротивления во времени.** Различают сплавы для **проволочных, и ленточных резисторов** (технических и прецизионных) и материалы для **непроволочных резисторов** (пленочные, углеродистые). Резистивные материалы общего назначения широко используют в **приборостроении, электротехнике для изготовления технических резисторов** (регулирующие и пусковые реостаты, нагрузочные элементы), **для прецизионных резисторов** (образцовые сопротивления, различные элементы электроизмерительных приборов, катушки сопротивления, шунты, обмотки потенциометров).

Сплавы для проволочных резисторов.

Для технических резисторов основными являются сплавы на основе системы Cu-Ni (сплав МН16, мельхиор МН19, нейзильбер МНЦ 15-20); для прецизионных резисторов – сплавы на медной основе (манганин МНМц 3-12, МНМцАЖ 3-12-0,3-0,3, константан МНМц 40-1,5) и сплавы на никелевой основе (Х20Н80-ВИ, 80ХЮД-ВИ, Х15Н60, ЭП277-ВИ). Для изготовления высокоточных прецизионных сопротивлений используют резистивные сплавы на основе благородных металлов (Au, Ag, Pt, Pd).

Манганин - основной сплав на медной основе для электроизмерительных приборов и образцовых резисторов.

Манганин отличается желтоватым оттенком, хорошо вытягивается в тонкую проволоку до диаметра 0,02 мм. Из манганина изготавливают также ленту толщиной 0,01 - 1 мм и шириной 10 - 300 мм. Для получения малого α_r и высокой стабильности сопротивления во времени манганин подвергают специальной термической обработке - отжигу при 350 ч 550 °C в вакууме с последующим медленным охлаждением и дополнительной длительной выдержкой при комнатной температуре.

Константан - сплав меди и никеля с небольшим содержанием марганца. Содержание никеля в сплаве примерно соответствует максимуму ρ и минимуму α_r для сплавов Cu-Ni. Константан хорошо поддается обработке; его можно протягивать в проволоку и прокатывать в ленту тех же размеров, что и из манганина. Значение α_r константана близко к нулю и обычно имеет отрицательный знак. Изготавливают нагревательные элементы и реостаты (рабочая температура не превышает 400 - 450°C. Константан с успехом применяют для изготовления термопар, которые служат для измерения температуры, если последняя не превышает нескольких сотен градусов.

Непроволочные резистивные материалы

подразделяют на пленочные металлические и пленочные на основе оксидов, силицидов, карбидов, а также неметаллические – углеродистые. Непроволочные резисторы широко применяют в автоматике, измерительной и вычислительной технике, в различных областях электротехники.

Резистивные металлические плёнки.

Металлические пленки применяют для изготовления тонкопленочных резисторов и обкладок тонкопленочных конденсаторов, а также для создания токопроводящих дорожек и контактных площадок в интегральных микросхемах. Тонкопленочные резисторы (ТПР) представляют собой тонкую пленку резистивного материала на поверхности диэлектрической подложки. Материалами для подложек, используемых для этой цели, являются: **стекла, полированный плавный кварц, керамика и монокристаллические пластины.**

Тонкопленочные резисторы могут быть изготовлены путем напыления жидкого металла через трафарет, электрическим осаждением, испарением в вакууме и некоторыми другими способами. Для этих целей применяют различные металлы и их сплавы.

Материалы тонкопленочных резисторов можно условно разделить на несколько групп: **резистивные материалы на основе чистых металлов**, **резистивные материалы на основе металлических сплавов**, **резистивные материалы на основе микрокомпозиций**, **керметы**, **полупроводниковые материалы** и пр. ТТТР часто выполняют из нихрома (80 % Ni и 20 % Cr), тантала или соединения монооксида кремния с хромом ($R_s = 50 - 300 \text{ Ом}$).

В том случае, когда необходимо получить высокостабильные пленки с большим поверхностным сопротивлением (порядка нескольких тысяч Ом) и низким температурным коэффициентом сопротивления, применяют тантал, вольфрам и рений.

Пленки из оксидов, силицидов и карбидов.

Для изготовления тонкопленочных резисторов широко используются металлосилицидные сплавы и дисилициды металлов.

Многокомпонентные резистивные сплавы для тонкопленочных резисторов, содержащие Si, Fe, Cr, Ni, Al, W, устойчивы к окислению и воздействию химически активных сред. С целью расширения диапазона сопротивлений по сравнению с получаемыми из металлов и сплавов используют керметы.

Керметы (сокр. от «керамико-металлические материалы») – металлокерамические материалы, представляющие собой гетерогенную композицию одной или нескольких керамических фаз с металлами или сплавами, с относительно малой взаимной растворимостью фаз. Керметы сочетают свойства керамики (высокие твердость и сопротивление износу, тугоплавкость, жаропрочность и др.) и металлов (теплопроводность, пластичность), т.е. обладают комплексом свойств, характерных для составляющих их компонентов.

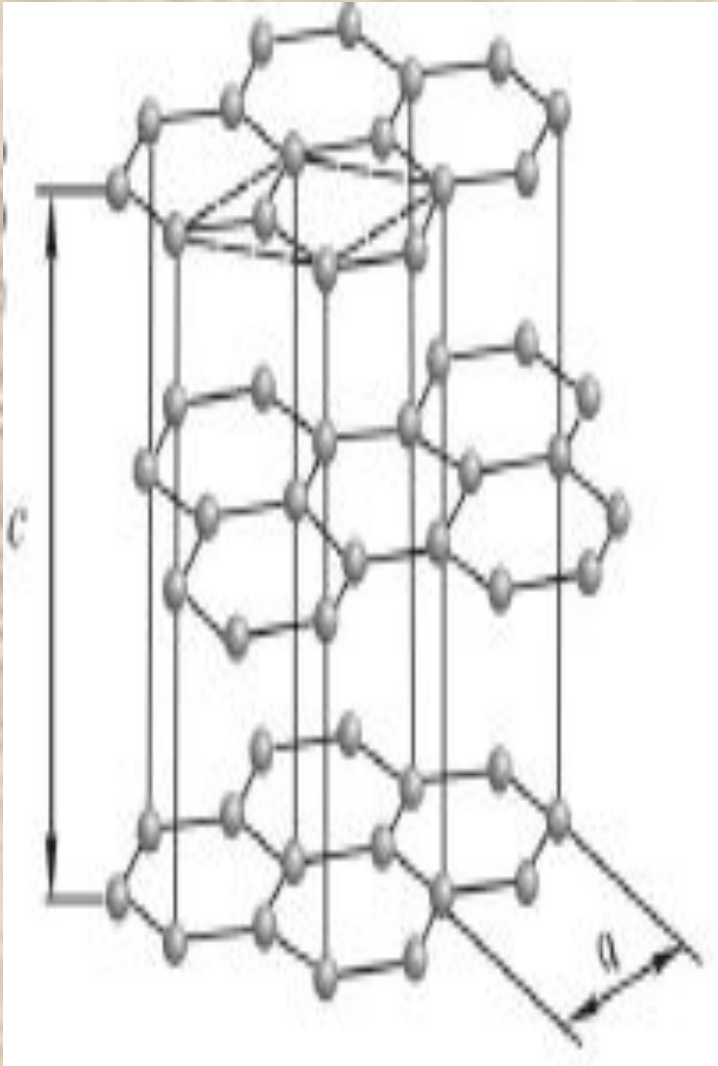
Содержание керамической фазы в керметах колеблется от 15 до 85% (по объему). Металлическая матрица в керметах объединяет твердые частицы в единый композиционный материал, обеспечивая изделиям необходимую прочность и пластичность. В качестве металлических компонентов используют Cr, Ni, Al, Fe, Co, Ti, Zr и сплавы на их основе.

По природе керамической составляющей керметы делят на:

- оксидные (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2),
- карбидные (SiC , Cr_3C_2 , TiC)
- нитридные (TiN),
- боридные (Cr_2B_2 , TiB_2 , ZrB_2),
- на основе силицидов (MoSi) и других тугоплавких соединений и др.

По применению различают керметы жаропрочные, износостойкие, высокоогнеупорные, коррозионно-стойкие и др.

Углеродные резистивные материалы.



Вторым по значению резистивным материалом является графит. Графит - одна из четырех аллотропных модификаций углерода (алмаз, графит, фуллерен, графен). Это непрозрачный, мягкий, электропроводный материал со слоеной структурой.

В каждом слое атомы углерода соединены в бесконечные шестичленные кольца. Каждое единичное кольцо представляет собой аналог бензольного кольца. Удельное сопротивление зависит от направления измерения. Если приложить напряжение поперек слоев, удельное сопротивление достигает 100 мкОм м, в плоскости слоев удельное сопротивление составляет 0,3 - 0,5 мкОм м.

Графит сочетает высокие жаропрочность и кислотостойкость, электропроводность и теплопроводность. Максимальная рабочая температура графита различных марок в инертной среде и вакууме составляет от 1000 до 2500 оС.

Тот факт, что графит имеет повышенное удельное сопротивление по сравнению с металлами, позволяет применять его в промышленности для создания различных сопротивлений, начиная с пленочных сопротивлений в радиоэлектронике, графитовой бумаги и графитовой ткани, и заканчивая композиционными материалами, где частицы графита выступают в роли проводящего наполнителя.

Материалы для электронагревателей

Общие требования к сплавам для электронагревательных элементов: высокая жаростойкость, высокое электрическое сопротивление в сочетании с низким температурным коэффициентом сопротивления, пластичность, необходимая для промышленного получения изделий различного сортамента (проката, проволоки, ленты) и нагревателей.

Количество выделенной теплоты прямо пропорционально квадрату силы тока, времени прохождения тока и величине сопротивления проводника. Следовательно, для изготовления электронагревателей должны использоваться материалы с высоким электрическим сопротивлением. Среди большого количества материалов для указанных целей наиболее распространенными в практике являются сплавы на медной основе – **манганин** и **константан**. К таким материалам, кроме того, обеспечивающими высокотемпературный нагрев до 500 ч 800 °С, относятся **хромоникелевые** и **железохромоалюминиевые сплавы**.

Хромоникелевые сплавы (нихромы) обладают высоким удельным сопротивлением, теплостойкостью, пластичностью, хорошей механической прочностью и низкой окисляемостью, выдерживают большой перепад температур, а поэтому являются лучшими для этих целей материалами. Хромоникелевые сплавы используют для изготовления нагревательных элементов электрических печей, плиток, паяльников и т. д.

Из этих сплавов изготавливают проволоку диаметром 0,02 мм и более и ленту сечением 0,1-1,0 мм и более. **Высокую жаростойкость нихрома можно объяснить значительной стойкостью этого сплава к прогрессирующему окислению на воздухе при высоких температурах.**

Срок службы нагревательных элементов можно увеличить, если поместить спирали в твёрдую инертную среду типа глины-шамота, предохраняющую от механических воздействий и затрудняющую доступ кислорода.

Железохромоалюминиевые сплавы.

Существует целый класс сплавов, называемых **фехралями** или **ферохромалями**, не содержащих ни одного процента никеля, **их основа – железо**. Так как удельное сопротивление железа выше, чем никеля, то и удельное сопротивление сплава, где никель заменяется железом, будет выше.

Фехрали более ломки по сравнению с нихромом.

Спирали из них можно навивать только в нагретом состоянии – при температурах не менее 300°C.

Рекристаллизационный порог фехралей находится в диапазоне температур 600 - 650 °C, существенно ограничивая количество возможных циклов включения-выключения нагревательных элементов до их разрушения.

Поверхностный окисел, образующийся у сплавов с железом, имеет гораздо более высокое удельное сопротивление по сравнению с нихромом.

Фехраль незаменим для достижения температур до 1400°C , хромоникелевый сплав Х20Н80 применяется вплоть до 1200°C и имеет температуру плавления 1400°C . Фехраль более устойчива в серосодержащей атмосфере, чем нихромовая проволока и лента. Замена никеля на железо означает сокращение возможных циклов включений-выключений при преодолении барьера в 600°C .

Материалы для термопар

Термопара - два различных проводника, один конец которых спаян и помещен в место измерения температуры (**горячий контакт**), а свободные концы помещены в термостат (**холодный контакт**).

Термопары служат датчиками для измерения температуры.

Компенсационные провода - термопарная проволока, которая служит для передачи термо-эдс от свободных концов термопары к измерительным устройствам. **В качестве компенсационных проводов используется более дешевая термопарная проволока с не столь строго контролируемыми параметрами.**

подавляющее большинство термопар изготавливают из следующих сплавов: копель, алюмель, хромель, константан, платинородий (90% Pt и 10% Rh).

Алюмель (95% Ni, остальное - Al, Si и Mn) имеет удельное электрическое сопротивление $3,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, температурный коэффициент линейного расширения $13,7 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, плотность 8,48 г/см³, температуру плавления 1430 - 1450 °С.

Копель (56% Cu, 44% Ni) имеет плотность 8,9 г/см³, температуру плавления 1220 - 1290 °С, температурный коэффициент линейного расширения $14 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, удельное электрическое сопротивление $0,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, жаростоек до 600 °С.

Хромель (90% Ni, 10% Cr) обладает плотностью 8,71 г/см³, температура плавления 1400 - 1500 °С, температурный коэффициент линейного расширения $12,8 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, удельное электрическое сопротивление $0,66 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, отличается большой жаростойкостью

Константан (40% Ni, 1,5% Mn, остальное - Cu) имеет высокое удельное электрическое сопротивление (около $0,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м), низкое значение температурного коэффициента электрического сопротивления, температурный коэффициент линейного расширения $14,4 \cdot 10^{-6}$ °K⁻¹, плотность константана 8,8 ч 8,9 г/см³, температура плавления около 1260 °C. Для константана характерна высокая термо-ЭДС в паре с медью, железом, хромелем и низкая термо-ЭДС по отношению к меди.

Платинородий (90% Pt, 10% Rh) используется в паре с платиной для измерения высоких температур, поверки рабочих термопар и как эталонная термопара. При длительном применении пределы измерения температуры составляют от -20 до 1300 °C, при кратковременном — от -20 до 1600 °C. Недостатком термопары платинородий-платина является сравнительно небольшая развиваемая термо-ЭДС.

Термопары можно применять для измерения следующих температур: платина-родий - платина до 1600°C ; медь - константан и медь - копель до 350°C ; железо - константан, железо - копель и хромель - копель до 600°C ; хромель - алюмель до $900 - 1000^{\circ}\text{C}$. Из применяемых в практике термопар наибольшую термо-эдс при данной разности температур имеет термопара хромель - копель.

Причины нестабильной работы:

- активная среда;
- загрязнения примесями из атмосферы;
- летучесть компонентов;
- резкие перегибы и деформации, которые вносят внутренние напряжения и создают физическую неоднородность.

Припои и флюсы

Припои - специальные сплавы, применяемые при пайке (прочный шов и электрический контакт с малым переходным сопротивлением).

Припой смачивает металл, растекается по нему и заполняет зазоры между деталями. Компоненты припоя диффундируют в основной металл. Прослойка из припоя соединяет детали в одно целое.

Припои делят на мягкие и твердые. К мягким относятся припои с температурой плавления до 300°C , к твердым - выше 300°C .

Мягкие припои: оловянно-свинцовые сплавы (ПОС) с содержанием олова от 10 (ПОС-10) до 90% (ПОС-90), остальное свинец. Проводимость составляет 9 - 15% проводимости чистой меди.

Твердые припои: медно-цинковые (ПМЦ) и серебряные (П Сr) с различными добавками.

Флюсы - вспомогательные материалы для получения надежной пайки.

Они должны:

- 1) растворять и удалять окислы и загрязнения с поверхности спаиваемых металлов;
- 2) защищать в процессе пайки поверхность, а также расплавленный припой от окисления;
- 3) уменьшать поверхностное натяжение расплавленного припоя;
- 4) улучшать растекаемость припоя и смачивание им соединяемых поверхностей.

Активные, или кислотные, флюсы готовят на основе активных веществ - соляной кислоты, хлористых и фтористых металлов и т. д. Эти флюсы интенсивно растворяют окисные пленки на поверхности металла, благодаря чему обеспечивается хорошая адгезия, а следовательно - высокая механическая прочность соединения.

К бескислотным флюсам относят канифоль и флюсы, изготовленные на ее основе с добавлением неактивных веществ (спирта, глицерина), а также активизаторов - небольших количеств солянокислого или фосфорнокислого анилина, салициловой кислоты, солянокислого диэтиламина и т. п. Высокая активность некоторых активированных флюсов позволяет производить пайку без предварительного удаления окислов после обезжиривания.

Антикоррозийные флюсы получают на основе фосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений и растворителей, а также на основе органических кислот. Остатки флюсов не вызывают коррозии.

Контрольные вопросы.

1. Классифицируйте проводниковые материалы, используемые в электронной технике.
2. Расскажите о металлах с высокой удельной проводимостью.
3. Расскажите, что Вы знаете о благородных металлах?
4. Опишите тугоплавкие металлы, используемые в электронной технике.
5. Что Вы можете рассказать о металлах подгруппы железа?
6. Расскажите о сплавах на основе меди и алюминия.
7. Расскажите, что Вы знаете о сверхпроводящих материалах и их применении?
8. Классифицируйте материалы высокого удельного сопротивления.
9. Какие материалы используются для производства термопар Вы знаете?
10. Какие припои и флюсы используют в электронной технике?