

Лекция 3

МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

3.1 Классификация проводников

К группе проводниковых материалов принято относить проводники с удельным электрическим сопротивлением в нормальных условиях $\rho \leq 10^{-7}$ Ом·м. В электронной технике в качестве проводниковых используют три основные группы материалов: металлы, сплавы металлов и неметаллические проводящие материалы.

Металлы подразделяют на четыре группы:

1) Металлы с высокой удельной проводимостью (т.е. с низким значением удельного сопротивления). К ним относят медь и алюминий, у меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, у алюминия $\rho = 2,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Это наиболее широко применяемые в электронике металлы. Они применяются для изготовления радиомонтажных проводов и кабелей, а также в качестве 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. Эти металлы имеют температуру плавления, превышающую 1700 °С. К ним относят вольфрам, молибден, хром, рений и др.

4) Металлы со средним значением температуры плавления. К ним относят железо, никель и кобальт, обладающие температурой плавления около 1500 °С. Эти металлы имеют сильно выраженные магнитные свойства.

Основные физические свойства некоторых металлов приведены в *Приложении 1*.

Сплавы металлов подразделяют на три группы:

1) Сплавы высокого сопротивления. К ним относят манганин (86 % Cu, 12 % Mn, 2 % Ni), константан (60 % Cu, 40 % Ni), хромоникелевые сплавы. Эти сплавы имеют удельное электрическое сопротивление более $4 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Они применяются для изготовления резисторов и электронагревательных элементов.

2) Сверхпроводящие сплавы. Это сплавы, у которых при температурах, близких к абсолютному нулю, наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления. Среди таких сплавов наилучшими параметрами обладают сплавы ниобия (Nb_3Ga , Nb_3Ge).

3) Припой. Это низкотемпературные сплавы, применяемые при пайке. Различают мягкие и твёрдые припои. Мягкие припои имеют температуру плавления ниже 300 °С. В их состав входит от 10 до 90 % олова, остальное – свинец. Наиболее распространенными твёрдыми припоями, имеющими температуру плавления более 300 °С, являются медно-цинковые и серебряные.

Неметаллические проводящие материалы подразделяют на три группы:

1) Углеродистые материалы. Наиболее широкое применение среди этих материалов имеет графит – одна из разновидностей чистого углерода. К ценным свойствам графита относятся малое удельное сопротивление, хорошая теплопроводность, а также стойкость ко многим агрессивным химическим средам.

2) Композиционные проводящие материалы. Они представляют собой механическую смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой. Наибольший интерес представляют контактолы и керметы. Контакттолами называют 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). Керметами называют металлодиэлектрические композиции с неорганическим связующим веществом. Они обладают высоким удельным поверхностным сопротивлением, поэтому применяются для изготовления тонкопленочных резисторов. Наибольшее распространение получила микрокомпозиция $Cr-SiO_2$, тонкие пленки которой изготавливают путём напыления в вакууме на диэлектрическую подложку.

3) Проводящие материалы на основе оксидов. Подавляющее большинство чистых оксидов являются диэлектриками, однако при неполном окислении или при введении примесей проводимость оксидов резко повышается. Такие материалы можно использовать в качестве контактных и резистивных слоёв. Практический интерес представляют тонкие пленки диоксида олова SnO_2 и оксида индия In_2O_3 .

3.2 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. Преимущества меди, обеспечивающие её широкое применение в качестве проводникового материала, следующие:

- 1) малое удельное сопротивление (из всех металлов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь);
- 2) достаточно высокая механическая прочность;
- 3) удовлетворительная в большинстве случаев стойкость к коррозии (даже в условиях повышенной влажности медь окисляется на воздухе значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах);
- 4) хорошая обрабатываемость: медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра;
- 5) относительная легкость пайки и сварки.

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 °С, плотность 8,96 г/см³, температура плавления $T_{пл} = 1083$ °С,

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 ÷ 55 %. В то же время присадки многих металлов повышают механическую прочность и твердость меди.

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. Вследствие окисления медь не пригодна для слабых контактов. При высокой

температуре в электрической дуге окись меди диссоциирует, обнажая металлическую поверхность. Механическое отслаивание и термическое разложение вызывает повышенный износ медных контактов при сильных токах.

Получение меди. Медь получают путем переработки сульфидных руд, чаще других встречающихся в природе. После ряда плавок руды и обжигов с интенсивным дутьем, медь обязательно подвергают электролитической очистке. Можно получить различную по физическим свойствам медь:

- методом холодной протяжки получают твердую медь (ТМ), которая имеет высокий предел прочности при растяжении, твердость и упругость при изгибе; проволока из твердой меди несколько пружинит, имеет малое относительное удлинение при изгибе;

- методом отжига получают мягкую медь (ММ), которая пластична, обладает малой твердостью и прочностью, весьма большим относительным удлинением при разрыве, более высокой удельной проводимостью.

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. Твердую медь употребляют в тех случаях, когда необходимо обеспечить особенно высокую механическую прочность, твердость и сопротивляемость истиранию, например, для изготовления изолированных проводов. Если же требуется хорошая гибкость и пластичность, а предел прочности на растяжение не имеет существенного значения, то предпочтительнее мягкая медь (например, для монтажных проводов и шнуров).

Из специальных электровакуумных сортов меди изготавливают детали клистронов, магнетронов, аноды мощных генераторных ламп, выводы энергии приборов СВЧ, некоторые типы волноводов и резонаторов. Кроме того, медь используют для изготовления фольгированного ретинакса и применяют в микроэлектронике в виде осажденных на подложки пленок, играющих роль проводящих соединений между функциональными элементами схемы. Несмотря на большой коэффициент линейного расширения по сравнению с коэффициентом расширения стекол, медь применяют для спаев со стеклами, поскольку она обладает рядом замечательных свойств: низким пределом текучести, мягкостью и высокой теплопроводностью. Для впаивания в стекла медному электроду придают специальную форму в виде тонкого рантика, благодаря чему такие спаи называют рантовыми.

3.3 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 $2,7 \text{ г/см}^3$, $T_{\text{пл}} = 660 \text{ }^\circ\text{C}$. Алюминий получают электролизом глинозема Al_2O_3 в расплаве криолита Na_3AlF_6 .

Алюминий – второй по значению (после меди) проводниковый материал, важнейший из так называемых легких металлов. Удельное сопротивление алюминия в 1,6 раза больше удельного сопротивления меди, но алюминий в 3,5 раза легче меди. Благодаря малой плотности алюминия обеспечивается большая проводимость на единицу массы, т. е. при одинаковом сопротивлении и одинаковой длине алюминиевые провода в два раза легче медных, несмотря на большее поперечное сечение. К тому же по сравнению с медью алюминий намного больше распространен в природе и характеризуется меньшей стоимостью. Отмеченные обстоятельства обуславливают широкое применение алюминия в электротехнике.

Пленки алюминия широко используют в интегральных микросхемах в качестве контактов и межсоединений. Последние обеспечивают связь между отдельными элементами схемы и внешние присоединения. Нанесение пленок на кремниевые пластинки обычно производят методом испарения и конденсации в вакууме. Требуемый рисунок межсоединений создается с помощью фотолитографии. Преимущества алюминия как контактного материала состоит в том, что он легко напыляется, обладает хорошей адгезией к кремнию и плёночной изоляции из SiO_2 , широко используемой в полупроводниковых интегральных схемах, обеспечивает хорошее разрешение при фотолитографии.

Недостатком алюминия является значительная подверженность электромиграции, что приводит к увеличению сопротивления или даже разрыву межсоединения. Кроме того, у алюминия низкая механическая прочность, отожженный алюминий в три раза менее прочен на разрыв, чем отожженная медь.

Поверхность алюминиевых изделий активно окисляется, покрываясь тонкой пленкой оксида с большим электрическим сопротивлением. Такая пленка предохраняет алюминий от коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов, что делает невозможным пайку алюминия обычными методами. Поэтому для пайки алюминия используют ультразвуковые паяльники или пасты-припои. Более толстый слой оксида, который создает надежную электрическую изоляцию на сравнительно высокие напряжения, получают с помощью электрохимической обработки алюминия. Наиболее широкое применение оксидная изоляция получила в электролитических конденсаторах. Ее используют также в некоторых типах выпрямителей и разрядников. На практике важное значение имеет вопрос защиты от гальванической коррозии в местах контакта алюминия и меди. Если область контакта подвергается воздействию влаги, то возникает местная гальваническая пара с довольно высоким значением ЭДС, причем полярность этой пары такова, что на внешней поверхности контакта ток направлен от алюминия к меди, вследствие чего алюминиевый проводник может быть сильно разрушен коррозией. Поэтому места соединения медных проводников с алюминиевыми должны быть тщательно защищены от влаги.

3.4 Золото

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 $19,3 \text{ г/см}^3$, $T_{\text{пл}} = 1063 \text{ }^\circ\text{C}$. 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.

Золото – очень мягкий металл: твёрдость по шкале Мооса $\sim 2,5$ (сравнима с твёрдостью ногтя). Золото также высокопластично: оно может быть проковано в листки толщиной до $\sim 0,1 \text{ мкм}$ (сусальное золото); при такой толщине золото полупрозрачно и в отражённом свете имеет жёлтый цвет, в проходящем – окрашено в синевато-зеленоватый. Золото может быть вытянуто в проволоку с линейной плотностью до 500 м/г .

В электронной технике золото используют как контактный материал, материал для коррозионно-устойчивых покрытий резонаторов СВЧ, внутренних поверхностей волноводов. Существенным преимуществом золота как контактного материала является его стойкость против образования сернистых и окисных плёнок в атмосферных условиях, как при комнатной температуре, так и при нагревании. Тонкие плёнки золота применяют в качестве полупрозрачных электродов в фоторезисторах и полупроводниковых фотоэлементах, а также в качестве межсоединений и контактных площадок в плёночных микросхемах. В последнем случае из-за плохой адгезии к диэлектрическим подложкам плёнки золота наносят обычно с адгезионным подслоем (чаще всего хрома). В контактах золота с алюминием происходит постепенное образование ряда интерметаллических соединений, обладающих повышенным удельным сопротивлением и хрупкостью. Поэтому контакты тонких плёнок золота и алюминия ненадежны.

3.5 Серебро

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 – гранцентрированная кубическая. Температура плавления $T_{\text{пл}} = 960 \text{ }^\circ\text{C}$, плотность $10,5 \text{ г/см}^3$.

Чистое серебро – довольно тяжёлый (легче свинца, но тяжелее меди), необычайно пластичный серебристо-белый металл (коэффициент отражения света близок к 100%). Тонкая серебряная фольга в проходящем свете имеет фиолетовый цвет. С течением времени металл тускнеет, реагируя с содержащимися в воздухе следами сероводорода и образуя налёт сульфида. Обладает высокой теплопроводностью. При комнатной температуре имеет самую высокую электропроводность среди всех известных металлов – $6,25 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ (удельное сопротивление $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Серебро применяется в широкой номенклатуре контактов в аппаратуре разных мощностей. Высокие значения удельных теплоемкости, теплопроводности и электрической проводимости серебра обеспечивают по сравнению с другими металлами наименьший нагрев контактов и быстрый отвод теплоты от контактных точек. Серебро применяют также для непосредственного нанесения на диэлектрики в качестве электродов, в производстве керамических и слюдяных конденсаторов. Для этого применяют метод вжигания или испарения в вакууме. Серебром покрывают внутренние

поверхности волноводов для получения слоя высокой проводимости. С этой же целью серебрению подвергают проводники высокочастотных катушек.

Недостатком серебра является склонность к миграции внутрь диэлектрика, на который оно нанесено, в условиях высокой влажности, а также при высоких температурах окружающей среды. По сравнению с другими благородными металлами серебро обладает пониженной химической стойкостью. В частности, серебро обладает склонностью к образованию непроводящих темных пленок сульфида Ag_2S в результате взаимодействия с сероводородом, следы которого всегда присутствуют в атмосфере. Наличие влаги ускоряет протекание реакции. Поэтому серебряные контакты не рекомендуется применять по соседству с резиной, эбонитом и другими материалами, содержащими серу. Серебро хорошо паяется обычными припоями. Широкое применение серебра сдерживается его большим природным дефицитом.

3.6 Хром

Хром (Cr, от лат. *Chromium*) – элемент побочной подгруппы шестой группы четвертого периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 24. В свободном виде – голубовато-белый металл с кубической объемно-центрированной решеткой, $a = 0,28845$ нм. При температуре 39°C (точка Нееля) переходит из парамагнитного состояния в антиферромагнитное. Хром (с примесями) является одним из самых твердых металлов, уступая лишь вольфраму (твердость по шкале Мооса 8,5). Очень чистый хром достаточно хорошо поддается механической обработке.

Хром – весьма распространенный в земной коре элемент, обладающий высокой стойкостью к окислению, а потому используемый для защитных покрытий изделий, в том числе эксплуатируемых при повышенных температурах. Хромирование производят электролитически или с помощью насыщения хромом поверхностных слоев стальных изделий диффузией из внешней среды.

Из тонких пленок хрома изготавливают резисторы и адгезионные подслои для контактных площадок и токопроводящих соединений в интегральных микросхемах, а также светонепроницаемые слои фотошаблонов. Электрические свойства хромовых пленок очень чувствительны к условиям нанесения из-за поглощения остаточных газов в процессе охлаждения. Однако хром обладает хорошей адгезией к стеклянным, ситалловым и керамическим подложкам. Кроме того, хром хорошо совместим с любым проводящим материалом. Дополнительным преимуществом хрома является легкость сублимации при получении пленок. Обычно для этих целей используют вольфрамовый или молибденовый испаритель. Термообработка пленок хрома в вакууме вызывает понижение сопротивления вследствие эффектов отжига, отсутствующих у пленок из более тугоплавких металлов, таких, например, как тантал. Хром входит в состав большого количества сплавов для нагревательных приборов, термодар, конструкционных нержавеющей, жаропрочных сталей и магнитных материалов.

3.7 Молибден

Молибден (Mo, от лат. *Molybdenum*) – элемент побочной подгруппы шестой группы пятого периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, атомный номер 42. Молибден – светло-серый металл с кубической

объёмноцентрированной решёткой типа α -Fe ($a = 3,14 \text{ \AA}$), парамагнитен, твердость по шкала Мооса 5,5 баллов. Механические свойства, как и у большинства металлов, определяются чистотой металла и предшествующей механической и термической обработкой (чем чище металл, тем он мягче). Обладает крайне низким коэффициентом теплового расширения. Молибден является тугоплавким металлом с температурой плавления $2620 \text{ }^\circ\text{C}$ и температурой кипения $4639 \text{ }^\circ\text{C}$.

Молибден используется для легирования сталей, как компонент жаропрочных и коррозионностойких сплавов. Молибденовая проволока (лента) служит для изготовления нагревательных элементов высокотемпературных печей, вводов электрического тока в лампочках. Соединения молибдена – сульфид, оксиды, молибдаты – являются катализаторами химических реакций, пигментами красителей, компонентами глазурей. Гексафторид молибдена применяется при нанесении металлического Mo на различные материалы, MoS_2 используется как твердая высокотемпературная смазка. Mo входит в состав микроудобрений. Радиоактивные изотопы ^{93}Mo (период полураспада $T_{1/2} = 6,95 \text{ ч}$) и ^{99}Mo ($T_{1/2} = 66 \text{ ч}$) – изотопные индикаторы.

Молибден – один из немногих легирующих элементов, способных одновременно повысить прочностные и вязкие свойства стали, ее коррозионную стойкость. Обычно при легировании одновременно с увеличением прочности растет и хрупкость металла.

Чистый монокристаллический молибден используется для производства зеркал для мощных газодинамических лазеров. Теллурид молибдена является очень хорошим термоэлектрическим материалом для производства термоэлектродвигателей (термо-эдс 780 мкВ/К). Трехокись молибдена (молибденовый ангидрид) широко применяется в качестве положительного электрода в литиевых источниках тока.

Молибден применяется в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления в качестве нагревательных элементов и теплоизоляции. Дисульфид молибдена применяется в качестве нагревателей в печах с окислительной атмосферой, работающих до $1800 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.8 Платина

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. В отличие от серебра, платина не образует сернистых плеток при взаимодействии с атмосферой, что обеспечивает платиновым контактам стабильное сопротивление. Она практически не растворяет кислород, пропуская его через себя в нагретом состоянии.

Платину применяют для изготовления термопар, рассчитанных на рабочие температуры до $1600 \text{ }^\circ\text{C}$. Особо тонкие нити из платины диаметром около $0,001 \text{ мм}$ для подвесок подвижных систем в электрометрах и других чувствительных приборах получают многократным волочением (способ обработки металлов давлением) биметаллической проволоки платина-серебро с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте (на платину азотная кислота не действует). Вследствие малой твердости платина редко используется для контактов в чистом виде, но служит основой для некоторых контактных сплавов. Наиболее распространенными являются сплавы платины с иридием; они не окисляются, имеют высокую твердость, малый механический износ, допускают большую частоту включений, однако дороги и

применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую надежность контактов.

3.9 Палладий

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. Палладий по ряду свойств близок к платине и часто служит ее заменителем, так как дешевле в 4–5 раз.

Использование палладия в электровакуумной технике обусловлено его способностью интенсивно поглощать водород. Последний, в отличие от других газов, диффундирует в палладий при сравнительно низких температурах ($150\div 300$ °С) и избыточном давлении $0,015\div 0,1$ МПа, а затем вновь выделяется в чистом виде при нагревании палладия в вакууме до температур $350\div 500$ °С. Твердый палладий поглощает более чем 850-кратный объем водорода по отношению к собственному объему. Выделенным из палладия чистым водородом наполняют некоторые типы газоразрядных приборов. Палладий и его сплавы с серебром и медью применяют в качестве контактных материалов. В отожженном состоянии палладий обладает хорошими механическими свойствами: предел прочности при растяжении – порядка 200 МПа, относительное удлинение при разрыве – до 40%.

3.10 Сплавы на основе меди и алюминия

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. В принципе, четкую границу между металлами и сплавами трудно провести, так как даже в самых чистых металлах имеются «следы» (малые количества) примесей других элементов. Однако обычно под металлическими сплавами понимают материалы, получаемые целенаправленно добавлением к основному металлу других компонентов.

Почти все металлы, имеющие промышленное значение, используются в виде сплавов. Так, например, все выплавленное 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. Благодаря такому сочетанию свойств алюминиевые сплавы служат хорошими материалами для легких поршней, применяются в вагоно-, автомобиле- и самолетостроении, в пищевой промышленности, в качестве архитектурно-отделочных материалов, в производстве осветительных отражателей, технологических и бытовых кабелей и проводов, при прокладке высоковольтных линий электропередачи.

Примесь железа, от которой трудно избавиться, повышает прочность алюминия при высоких температурах, но снижает коррозионную стойкость и пластичность при комнатной температуре. Кобальт, хром и марганец ослабляют охрупчивающее действие железа и повышают коррозионную стойкость. При добавлении лития к алюминию повышаются модуль упругости и прочность, что делает такой сплав весьма привлекательным для авиакосмической промышленности. К сожалению, при превосходной удельной прочности (отношение предела прочности к массе) сплавы алюминия с литием обладают низкой пластичностью.

3.11 Сверхпроводящие материалы

Явление сверхпроводимости при криогенных температурах достаточно широко распространено в природе. Сверхпроводимостью обладают 26 металлов. Большинство из них являются сверхпроводниками I рода с критическими температурами перехода ниже 4,2 К. В этом заключается одна из причин того, что большинство сверхпроводящих металлов для электротехнических целей применить не удастся. Еще 13 элементов проявляют сверхпроводящие свойства при высоких давлениях. Среди них такие полупроводники, как кремний, германий, селен, теллур, сурьма и др. Следует заметить, что сверхпроводимостью не обладают металлы, являющиеся наилучшими проводниками в нормальных условиях, каковыми являются золото, медь и серебро. Малое сопротивление этих материалов указывает на слабое взаимодействие электронов с решеткой. Такое слабое взаимодействие не создает вблизи абсолютного нуля достаточного

межэлектронного притяжения, способного преодолевать кулоновское отталкивание. Поэтому и не происходит их переход в сверхпроводящее состояние.

Кроме чистых металлов сверхпроводимостью обладают многие интерметаллические соединения и сплавы. Общее количество наименований известных в настоящее время сверхпроводников составляет около 2000. Среди них самыми высокими критическими параметрами обладают сплавы и соединения ниобия. Некоторые из них позволяют использовать для достижения сверхпроводящего состояния вместо жидкого гелия более дешёвый хладагент – жидкий водород. Все интерметаллические соединения и сплавы относятся к сверхпроводникам II рода. Однако деление веществ по их сверхпроводящим свойствам на два вида не является абсолютным. Любой сверхпроводник I рода можно превратить в сверхпроводник II рода, если создать в нем достаточную концентрацию дефектов кристаллической решетки. Например, у чистого олова $T_k = 3,7$ К, но если вызвать в олове резко неоднородную механическую деформацию, то критическая температура возрастет до 9 К, а критическая напряженность магнитного поля увеличится в 70 раз.

Сверхпроводимость никогда не наблюдается в системах, в которых существует ферро- или антиферромагнетизм. Образованию сверхпроводящего состояния в полупроводниках и диэлектриках препятствует малая концентрация свободных электронов. Однако в материалах с большой диэлектрической проницаемостью силы кулоновского отталкивания между электронами в значительной мере ослаблены. Поэтому некоторые из них также проявляют свойства сверхпроводников при низких температурах. Примером может служить титанат стронция (SrTiO_3), относящийся к группе сегнетоэлектриков. Ряд полупроводников удается перевести в сверхпроводящее состояние добавкой легирующих примесей (GeTe , SnTe , CuS , и др.) в больших концентрациях.

В настоящее время промышленность выпускает широкий ассортимент сверхпроводящих проволок и лент для самых различных целей. Изготовление таких проводников связано с большими технологически трудностями. Они обусловлены плохими механическими свойствами многих сверхпроводников, их низкой теплопроводностью и сложной структурой проводов. Особенно большой хрупкостью отличаются интерметаллические соединения с высокими критическими параметрами. Поэтому вместо простых проволок и лент приходится создавать композиции из двух (обычно сверхпроводник с медью) и даже нескольких металлов. Для получения многожильных проводов из хрупких интерметаллидов особенно перспективен бронзовый метод (или метод твердофазной диффузии), освоенный промышленностью. По этому методу прессованием и волочением создается композиция из тонких нитей ниобия в матрице из оловянной бронзы. При нагреве олово из бронзы диффундирует в ниобий, образуя на его поверхности тонкую сверхпроводящую пленку станнида ниобия Nb_3Sn . Такой жгут может изгибаться, но пленки остаются целыми.

Применение сверхпроводников. Сверхпроводящие элементы и устройства находят все более широкое применение в самых различных областях науки и техники. Разработаны крупномасштабные долгосрочные программы промышленного использования сильноточной сверхпроводимости.

Одно из главных применений сверхпроводников связано с получением сверхсильных магнитных полей. Сверхпроводящие соленоиды позволяют получать однородные магнитные поля напряженностью свыше 10^7 А/м в достаточно большой области пространства, в то время как пределом обычных электромагнитов с железными

сердечниками являются напряженности порядка 10^6 А/м. К тому же в сверхпроводящих магнитных системах циркулирует незатухающий ток, поэтому не требуются внешних источников питания.

Сильные магнитные поля необходимы при проведении научных исследований. Сверхпроводящие соленоиды позволяют в значительной мере уменьшить габариты и потребление энергии в синхрофазотронах и других ускорителях элементарных частиц. Перспективно использование сверхпроводящих магнитных систем для удержания плазмы в реакторах управляемого термоядерного синтеза, в магнитогидродинамических (МГД) преобразователях тепловой энергии в электрическую, в качестве индуктивных накопителей энергии для покрытия пиковых мощностей в масштабах крупных энергосистем. Широкое развитие получают разработки электрических машин со сверхпроводящими обмотками возбуждения.

Применение сверхпроводников позволяет исключить из машин сердечники из электротехнической стали, благодаря чему уменьшаются в $5 \div 7$ раз их масса и габаритные размеры при сохранении мощности. Экономически обосновано создание сверхпроводящих трансформаторов, рассчитанных на высокий уровень мощности (десятки-сотни мегаватт). Значительное внимание в разных странах уделяется разработке сверхпроводящих линий электропередач на постоянном и переменном токах. Разработаны опытные образцы импульсных сверхпроводящих катушек для питания плазменных пушек и систем накачки твердотельных лазеров. В радиотехнике начинают использовать сверхпроводящие объёмные резонаторы, обладающие, благодаря ничтожно малому электрическому сопротивлению, очень высокой добротностью. Принцип механического выталкивания сверхпроводников из магнитного поля положен в основу создания сверхскоростного железнодорожного транспорта на «магнитной подушке».

Нарушение сверхпроводимости материала внешним магнитным полем используется в конструкции прибора, который называют криотроном. На рис. 3.1 схематически изображено устройство пленочного криотрона. В условиях $T < T_k$ пленка из олова остается сверхпроводящей до тех пор, пока магнитное поле, создаваемое током, пропущенным через свинцовый сверхпроводник, не превысит критического для олова значения.

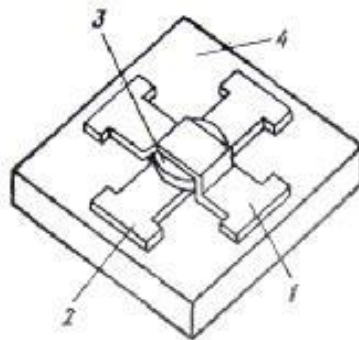


Рис. 3.1 Схема пленочного криотрона: 1 - управляющая пленка из свинца; 2 - вентильная пленка из олова; 3 - изоляционный слой; 4 – подложка

Широкие перспективы применения сверхпроводников открываются в измерительной технике. Дополняя возможности имеющихся измерительных средств, сверхпроводящие элементы позволяют регистрировать очень тонкие физические эффекты, измерять с высокой точностью и обрабатывать большое количество информации. На криотронных элементах можно выполнить ячейки вычислительных машин. Из

криотронов можно собрать любую схему памяти или переключения. Два состояния с нулевым и конечным сопротивлениями естественно отождествить с позициями 0 и 1 в двоичной системе счисления. Достоинствами ячеек на пленочных криотронах являются высокое быстродействие, малые потери и чрезвычайная компактность. Уже сейчас на основе сверхпроводимости созданы высокочувствительные болометры для регистрации ИК-излучения, магнитометры для измерения слабых магнитных потоков, индикаторы сверхмалых напряжений и токов. Круг этих приборов непрерывно расширяется.

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» (рис. 3.2) длиной 350 м изготовлен компанией Сумитомо (Япония) из сверхпроводника 1-го рода производства той же компании. Кабель установлен в 8 июля 2006 года 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.

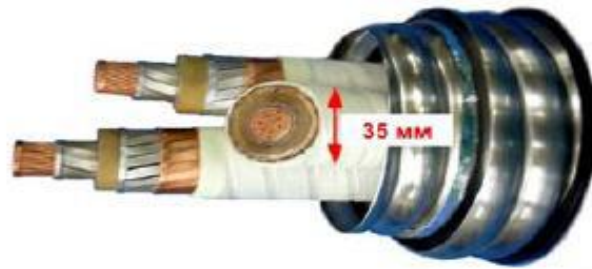


Рис. 3.2 Электрический кабель из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП)

Упрощенно сверхпроводящий кабель устроен так. В центре обычно находится пучок медных проводов диаметром около 20 миллиметров, 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. Десятка два лент – это первый, так называемый, повив или слой. Поверх этого слоя укладывают второй слой сверхпроводящих лент с противоположным направлением скрутки. Затем накладывают изоляцию толщиной от 6 до 12 миллиметров. 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 термоизоляция. 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 году в мире было испытано три достаточно больших кабеля: 200 метров в штате Огайо, 350 метров 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. года рекорд силы тока в высокотемпературном кабеле (10 кА) принадлежал Всероссийскому НИИ кабельной промышленности. Но сейчас лидерство перехватили китайцы, испытавшие кабель на 20 кА. Показателен пример Южной Кореи, где существует специальная государственная программа развития сверхпроводящих кабельных сетей. Каждый год на нее выделяется около 10 миллионов долларов. Все говорит о том, что в скором будущем нас ждет переход на сверхпроводящие кабели, по крайней мере, в узловых точках электроэнергетической инфраструктуры.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ