

ВАКУУМНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

БНТУ, Минск

Научный руководитель Вегера И.И.

Сверхпроводимость – способность материалов не оказывать сопротивления электрическому току при температурах ниже характерной для них критической температуры T_k . С понижением температуры наблюдается монотонное падение электрического сопротивления материалов. Вблизи абсолютного нуля у многих металлов и сплавов происходит резкое падение электрического сопротивления, и они становятся сверхпроводниками.

Впервые сверхпроводимость обнаружил в 1911 г. голландский ученый Гейке Камерлинг-Оннес, который наблюдал скачкообразное исчезновение сопротивления ртути до неизмеримо малой величины при температуре 4,2 К.

К настоящему времени сверхпроводимость обнаружена у большинства чистых металлов, причем сверхпроводящее состояние легче всего возникает в металлах с низкой обычной проводимостью. Открыто и изучено около трех тысяч сверхпроводящих сплавов и интерметаллических соединений, и их число непрерывно растет. Чистые металлы принято относить к сверхпроводникам первого рода, а сплавы и соединения – к сверхпроводникам второго рода.

Напряженность магнитного поля в объеме сверхпроводников при температурах ниже критической равна нулю. Металл становится диамагнетиком – материалом, приобретающим во внешнем магнитном поле магнитный момент, направленный против намагничивающего поля. Поэтому при переходе материала в сверхпроводящее состояние внешнее магнитное поле «выталкивается» из его объема и остается лишь в тонком поверхностном слое толщиной около 10^{-5} мм. Это явление называется эффектом Мейснера.

Перевод материала в сверхпроводящее состояние связан с фазовым переходом. Новое фазовое состояние характеризуется тем, что свободные электроны перестают взаимодействовать с ионами кристаллической решетки и вступают во взаимодействие между собой.

Электроны с противоположными спинами объединяются в пары, и результирующий спиновый момент становится равным нулю. Электронные пары называют куперовскими по имени Леона Купера, впервые показавшего, что сверхпроводимость в металлах связана с их образованием. В обычном, неспаренном состоянии электроны рассеиваются на примесях, имеющихся в металле, или на тепловых колебаниях кристаллической решетки – фононах.

Рассеивание электронов приводит к возникновению электрического сопротивления. Куперовские пары не рассеиваются, так как энергия фононов, которую пара может получить от взаимодействия с ними или дефектами решетки при криогенных температурах, слишком мала. Не испытывая рассеяния, куперовские пары движутся сквозь решетку кристалла без сопротивления, что и приводит к явлению сверхпроводимости.

Сверхпроводящее состояние может быть разрушено как при нагреве материала до температуры выше критической, так и в результате воздействия сильных внешних магнитных полей с напряженностью H_k , превышающей критическое значение.

Критическое магнитное поле подобно критической температуре является основной характеристикой сверхпроводящего материала.

При превышении T_k или H_k происходит скачкообразное восстановление электрического сопротивления, и магнитное поле проникает в металл.

Одним из главных преимуществ сверхпроводников является возможность достижения высоких плотностей тока. Чем выше плотность тока, тем компактнее приборы, меньше расход дорогостоящих сверхпроводящих материалов и меньше масса, которую необходимо охлаждать. Высокая плотность тока позволяет снизить капитальные и эксплуатационные расходы установок на сверхпроводниках.

Проводниковые металлы и сплавы должны обладать высокой электропроводностью, достаточно высокими механическими свойствами, сопротивляемостью к атмосферной коррозии, способностью поддаваться обработке давлением в горячем и холодном состоянии.

Наиболее высокой электропроводностью обладают медь и алюминий. Они и являются наиболее распространенными

проводниковыми материалами. Проводимость отожженного проводникового алюминия составляет приблизительно 62% проводимости стандартной меди. Но плотность алюминия мала, поэтому проводимость 1 кг алюминия составляет 214% проводимости 1 кг меди. Следовательно, алюминий экономически более выгоден для использования в качестве проводникового материала.

Применяемые в настоящее время проводниковые материалы можно разделить на следующие группы: проводниковая медь, проводниковый алюминий, проводниковые сплавы, проводниковое железо, сверхпроводники.

На сегодняшний день одними из методов получения сверхпроводящих материалов являются методы осаждения. Процесс нанесения пленки физическими методами включает следующие основные стадии: генерация газовой фазы; направленный массоперенос частиц вещества от источника к подложке; конденсация частиц на поверхности подложки и образование пленочного покрытия.

Рассмотрим подробнее некоторые из них.

1. Резистивное термическое испарение (Resistive Thermal Evaporation). Этот процесс использует электрическую энергию для нагрева испаряемого материала до такой температуры, при которой его атомы достаточно быстро испаряются. Процесс осуществляется в высоком вакууме (до 10^{-8} Па), что позволяет увеличить длину свободного пробега атомов и получать наиболее чистые пленки. Различают испарители с непосредственным и косвенным нагревом испаряемого материала.

2. Индукционное испарение (High Frequency Induction Spraying). В технологии индукционного испарения образование паров осуществляется в результате нагрева при прохождении через резистивный элемент или испаряемый металл индукционных токов, создаваемых внешним высокочастотным магнитным полем. Для осаждения пленок методом индукционного испарения требуется высокий вакуум.

3. Электронно-лучевое испарение (Electron Beam Physical Vapor Deposition). В основе метода лежит принцип испарения материала мишени-анода за счет воздействия на него потока электронов, эмитируемого катодом электронно-лучевого испарителя. Поток электронов фокусируется на мишени при помощи магнита.

Электронный луч нагревает мишень до температуры плавления, а затем и испарения. Испарение происходит в высоком вакууме (до 10^{-8} Па), что обеспечивает высокую чистоту процесса.

4. Электродуговое испарение (Cathodic Arc Deposition). В данном методе используется электрическая дуга для испарения материала из мишени-катода, затем атомы из газовой фазы конденсируются на подложке, образуя пленку. Осаждение происходит в высоком вакууме (до 10^{-8} Па). Температура в области катодных пятен достигает $15\ 000\ ^\circ\text{C}$, в результате чего материал катода в виде атомов, ионов, расплавленных гранул (капель) испаряется и движется со скоростью до $10\ \text{км/с}$, оставляя кратер на поверхности мишени. Наличие капель в газовой фазе является одним из основных недостатков электродугового нанесения покрытий.

5. Лазерное испарение (Pulsed Laser Deposition). Метод основан на использовании монохроматического электромагнитного (лазерного) излучения для воздействия на мишень, приводящего к уносу вещества с ее поверхности. Этот процесс уноса вещества с поверхности твердого тела под воздействием лазерного излучения и возникающего плазменного факела получил название «лазерная абляция», а плазменный факел называется абляционной лазерной плазмой. Напыление может проводиться как в условиях сверхвысокого вакуума, так и в контролируемой газовой атмосфере, например, в присутствии кислорода при получении пленок оксидов.

6. Методы нанесения пленок, основанные на распылении мишени, классифицируют на ионно-лучевые и ионно-плазменные. Характерной особенностью ионно-лучевых методов является отсутствие необходимости подачи на распыляемую мишень электрического потенциала, выбивание атомов мишени происходит под действием бомбардировки ее поверхности ионными пучками определенной энергии. При ионно-плазменном распылении мишень находится в сильно ионизированной плазме под отрицательным потенциалом относительно плазмы.

Поиск новых сверхпроводников продолжается, хотя пока проблема остается чисто научной. В перспективе необходимо разработать технологию производства и применения высокотемпературных сверхпроводников.