

**СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Сверхпроводниками являются металлы и сплавы, способные проводить ток без заметного сопротивления при низких температурах (ниже 18 ° К).

Superconductors are metals and alloys that provide electric current with almost no resistance at low temperatures (usually at 18 ° K below 0)

Особую группу материалов высокой электрической проводимости представляют сверхпроводники. При низких температурах (ниже 18 ° К) определенные металлы и сплавы приобретают способность проводить ток без сколько-нибудь заметного сопротивления, их называют сверхпроводниками. Переход в сверхпроводящее состояние обычно происходит очень резко: сопротивление падает от своего нормального значения до нуля в интервале порядка 0,05 ° К.

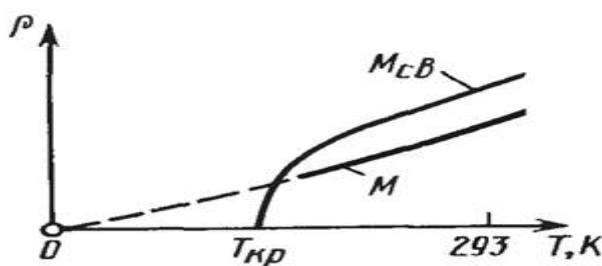


Рисунок 1 — Изменение электрического сопротивления в металлах и сверхпроводниках в области низких температур

С понижением температуры электрическое сопротивление всех металлов монотонно падает (рисунок 1). Однако есть металлы и сплавы, у которых электрическое сопротивление при критической температуре резко падает до нуля — материал становится сверхпроводником. Сверхпроводимость обнаружена у 30 элементов и около 1 000 сплавов. Сверхпроводящие свойства обнаруживают многие сплавы со структурой упорядоченных твёрдых растворов и промежуточных фаз. При обычных температурах эти вещества не обладают высокой проводимостью [1].

Электрическое сопротивление проводника на участке 1-2 вычисляется по формуле

$$R = \int_1^2 \frac{dl}{yS} z \partial e$$

— электрическое сопротивление;  $l$  — длина проводника;  $y$  ( $y = \frac{1}{R}$ ) — электропроводность; — площадь сечения.

Электрическое сопротивление однородного проводника с постоянным сечением рассчитывается следующим образом:

$$R = \frac{l}{yS};$$

Удельное сопротивление  $P$  проводника вычисляется по формуле:

$$P = \frac{1}{y}$$

Полное и удельное сопротивление проводников зависит от температуры. Эта зависимость имеет сложный вид. Для металлов можно пользоваться приближенными формулами:

$$R = R_0 \zeta;$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

- температурный коэффициент сопротивления.

Наиболее общим свойством сверхпроводников является существование критической температуры сверхпроводимости, ниже которой электросопротивление вещества становится исчезающе малым. Согласно последним оценкам, верхний предел электросопротивления вещества в сверхпроводящем состоянии составляет 10-26 Ом·м. Некоторые элементы могут претерпевать аллотропические превращения под действием высоких давлений. Образующиеся при этом кристаллографические модификации при охлаждении переходят в сверхпроводящее состояние, хотя при обычных давлениях эти элементы не являются сверхпроводниками. Например, сверхпроводником является модификация теллура, образующаяся при давлении 56 тыс. атмосфер, висмута — 25 тыс. атмосфер и критической температуре, равной 3,9 ° К. Фазы высокого давления галлия и сурьмы остаются сверхпроводниками и после снятия высокого давления, и при атмосферном давлении критические температуры сверхпроводящего перехода этих фаз равны соответственно 7,2 и 2,6 ° К. В обычном состоянии бериллий и галлий не являются сверхпроводниками, однако становятся таковыми при осаждении на подложках в виде тонких пленок. Появление сверхпроводимости при осаждении пленок из паровой фазы наблюдали также у празеодима, неодима, европия, иттербия. Характерно, что металлы подгрупп IA, IB и IIA при комнатной температуре, являющиеся хорошими проводниками электричества, не являются сверхпроводниками (за исключением бериллия в тонкоплёночном состоянии). Сверхпроводящие характеристики таких элементов, как молибден, иридий и вольфрам, весьма чувствительны к чистоте металла, что даёт основания предполагать, что с развитием методов рафинирования металлов сверхпроводящие свойства будут обнаружены и у других элементов. Переход из нормального состояния (с ненулевым электросопротивлением) в сверхпроводящее наблюдается не только в чистых элементах, но также в сплавах и интерметаллических соединениях. Б. Маттиас сформулировал правила, связывающие существование сверхпроводимости с валентностью  $Z$ : сверхпроводимость существует только при  $2 < Z < 8$ ; у переходных металлов, их сплавов и соединений при  $Z$ , равном 3, 5 или 7, наблюдаются максимальные температуры перехода в сверхпроводящее состояние (рисунок 2); для каждого данного значения  $Z$  предпочтительны определенные кристаллические решетки (для получения максимальной критической температуры) причём критическая температура быстро растёт с атомным объёмом сверхпроводника и падает с увеличением массы атома.

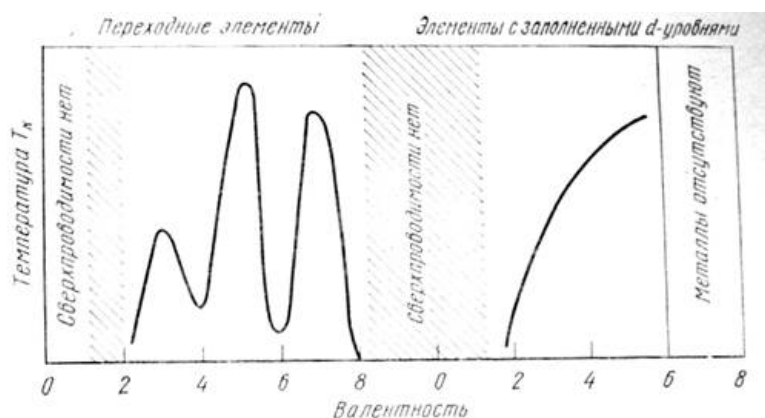


Рисунок 2 — Наличие сверхпроводимости и  $T_k$  переходных и простых металлов

Наиболее перспективными с точки зрения технического применения являются сверхпроводники с высокой критической температурой. Наиболее высокой критической температурой обладают сплавы и соединения переходных металлов ниобия и ванадия. Эти сверхпроводящие материалы делятся на три группы: 1) сплавы (твёрдые растворы) с объёмно центрированной кубической решёткой; 2) соединения с решёткой каменной соли; 3) соединения ниобия и ванадия с элементами подгрупп алюминия и кремния, имеющие кристаллическую решетку [2].

Критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние и другие сверхпроводящие характеристики весьма чувствительны к структурному состоянию образца, дефектов кристаллического строения, степени дальнего порядка. В частности, критическая температура интерметаллического соединения ниобия и германия в результате резкой закалки была повышена от 11 до 17 ° К. На тонкоплёночных образцах, полученных распылением, достигнуты значения критической температуры, равные 22 ° К и 23 ° К. Сверхпроводящие материалы на основе твёрдых растворов имеют определённые преимущества.

Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают специфическими магнитными свойствами. В первую очередь это проявляется в зависимости критической температуры сверхпроводимости от напряжённости внешнего магнитного поля. Критическая температура максимальна в отсутствие внешнего магнитного поля и снижается при увеличении его напряжённости. При некоторой напряжённости внешнего поля, критическая температура равна нулю. Другими словами, в полях, превышающих максимальное значение напряжённости, сверхпроводящее состояние в веществе не возникает ни при каких температурах.

Одним из важных магнитных свойств сверхпроводников является их диамагнетизм. Внутри сверхпроводника, помещённого в магнитное поле, индукция равна нулю. Если же сверхпроводник помещён в

магнитное поле при температуре выше критической, то при охлаждении ниже критической температуры магнитное поле «выталкивается» из сверхпроводника и его индукция в этом случае также равна нулю. Разрушение сверхпроводимости внешним магнитным полем и идеальный диамагнетизм сверхпроводников связаны с тем, что для сохранения сверхпроводящего состояния суммарный импульс (кинетическая энергия) электронов должен быть меньше определённого значения. В силу этого существует определённая предельная плотность тока, выше которой сверхпроводимость нарушается и появляется конечное электросопротивление.

Диамагнетизм сверхпроводника объясняется тем, что приложенное магнитное поле индуцирует на поверхности сверхпроводника токи, не испытывающие сопротивления. Эти токи циркулируют таким образом, что магнитный поток внутри сверхпроводника уничтожается. Таким образом, внешнее магнитное поле проникает в сверхпроводник только на очень небольшую глубину (глубина проникновения) порядка 8-10 м. При увеличении внешнего магнитного поля экранирующие токи должны возрастать, для того чтобы сохранить диамагнетизм сверхпроводника. Если внешнее поле достаточно сильно, токи достигнут критического значения и вещество перейдёт в нормальное состояние. Экранирующие токи исчезают, и магнитное поле проникает в вещество. Глубина проникновения магнитного поля (при постоянном поле) возрастает с температурой и стремится к бесконечности при  $T \rightarrow T_c$ , что соответствует переходу в нормальное состояние. Сверхпроводники с малой глубиной проникновения (резкое затухание магнитного поля у поверхности) называются мягкими сверхпроводниками, или сверхпроводниками I рода. Имеются также жёсткие сверхпроводники (II рода). Для мягких сверхпроводников (олово, ртуть, цинк, свинец) температурный интервал перехода в сверхпроводящее состояние составляет около  $0,05^\circ \text{K}$ , тогда как для жёстких сверхпроводников (ниобий, рений) температурный интервал сверхпроводящего перехода составляет около  $0,5^\circ \text{K}$ . Фундаментальным различием между сверхпроводниками I и II рода является знак поверхностной энергии между нормальной и сверхпроводящей фазами. В сверхпроводниках II рода эта энергия отрицательна. В силу этого в таких сверхпроводниках в полях, меньших критического, возможно возникновение нормальных (несверхпроводящих) областей, отделённых от сверхпроводящих областей границами, параллельными внешнему магнитному полю. Появление таких нормальных областей (линий магнитного потока) может привести к снижению свободной энергии, если граничная энергия отрицательна. В сверхпроводниках I рода с положительной граничной энергией появление нормальных областей энергетически невыгодно, поэтому сверхпроводники I рода остаются полностью в сверхпроводящем состоянии в полях, меньших критического. Сверхпроводник II рода при некотором минимальном внешнем магнитном поле распадается на смесь нормальных и сверхпроводящих областей. Такое состояние сверхпроводника называется смешанным. Размер областей сверхпроводника в смешанном состоянии составляет около 8-10 м. Напряжённость внешнего поля, до которого сохраняется смешанное состояние сверхпроводника, называется верхним критическим полем. Среди чистых металлов сверхпроводниками II рода являются ниобий и ванадий, остальные металлы — сверхпроводники I рода [3].

Использование явления сверхпроводимости открывает широкие возможности в технике. Широкое применение находят источники мощных постоянных магнитных полей в виде соленоидов с обмотками из сверхпроводящих материалов. Возможно использование сверхпроводников для линий электропередач и во многих других электротехнических устройствах. Способность сверхпроводников, являющихся диамагнетиками, используют в магнитных насосах, позволяющих генерировать магнитные поля колоссальной напряжённости, а также в криогенных гироскопах. Якорь гироскопа, изготовленный из сверхпроводника, «плавает» в магнитном поле. Отсутствие опор и подшипников устраняет трение и повышает долговечность гироскопа. Достигнуты значительные успехи в получении высокотемпературной сверхпроводимости. На базе металлокерамики получены вещества, для которых температура перехода в сверхпроводящее состояние превышает  $77^\circ \text{K}$  (температуру сжижения азота).

Явление сверхпроводимости используется для получения сильных магнитных полей, поскольку при прохождении по сверхпроводнику сильных токов, создающих сильные магнитные поля, отсутствуют тепловые потери. Однако в связи с тем, что магнитное поле разрушает состояние сверхпроводимости, для получения сильных магнитных полей применяются сверхпроводники II рода, в которых возможно сосуществование сверхпроводимости и магнитного поля. Используются сверхпроводниковые однофотонные детекторы для регистрации единичных фотонов инфракрасного диапазона [4].

Сверхпроводник наименьшего размера был создан в 2010 году на основе органического сверхпроводника (соединение галлия с хлором). Созданный сверхпроводник состоит всего из четырёх пар молекул этого вещества при общей длине образца порядка 3,76 нм.

#### Список цитируемых источников

1. Савельев И. В. Курс общей физики. — 3-е изд. — 1987 — 320с.
2. Аксенович Л. А. Физика в университете : Теория. Задания. 2004. — С. 442-443.
3. Геворкян Р. Г. Курс общей физики / Р. Г. Геворкян, В. В. Шепель — Изд. 3-е, — 1972. — 600с.
4. Яворский Б. М. Основы физики / Б. М. Яворский, А. А. Пинский — Т. 2. — 1981.

Материал поступил в издание 18.03.2013 г.