НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Физика и технология материалов и компонентов электронной техники».

Реферат №3

Выполнил:

Ст. гр. 05-МТЭ-2

Суворова С.А.

Нижний Новгород

2007

### Содержание

### Сверхпроводимость

### Сверхпроводники 1 и 2 рода

### Природа сверхпроводимости

### Теория БКШ

### Сверхпроводящие материалы

### Применение

### Сверхпроводимость

Сверхпроводимость, свойство многих проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже определённой критической температуры Тк, характерной для данного материала. Сверхпроводимость обнаружена у более чем 25 металлических элементов, у большого числа сплавов и интерметаллических соединений, а также у некоторых полупроводников. Рекордно высоким значением Тк (около 23 К) обладает соединение Nb3Ge.

Основные явления.

Скачкообразное исчезновение сопротивления при понижении температуры впервые наблюдал X. [Камерлинг-Оннес](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/058/251.htm) (1911) на ртути. Он пришёл к выводу, что ртуть при Т = 4,15 К переходит в новое состояние, которое вследствие его необычных электрических свойств может быть названо сверхпроводящим. Несколько позднее Камерлинг-Оннес обнаружил, что электрическое сопротивление ртути восстанавливается при включении достаточно сильного магнитного поля (его называют [критическим магнитным полем](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/066/443.htm) Нк). Измерения показали, что падение сопротивления до нуля происходит на протяжении очень узкого, но конечного интервала температур. Ширина этого интервала для чистых образцов составляет 10-3 — 10-4 К и возрастает при наличии примесей и других дефектов структуры.

Отсутствие сопротивления в сверхпроводящем состоянии с наибольшей убедительностью демонстрируется опытами, в которых в сверхпроводящем кольце возбуждается ток, практически не затухающий с течением времени. В одном из вариантов опыта используются два кольца из сверхпроводящего металла. Большее из колец неподвижно закрепляется, а меньшее концентрически подвешивается на упругой нити таким образом, что когда нить не закручена, плоскости колец образуют между собой некоторый угол. Кольца охлаждаются в присутствии магнитного поля ниже температуры Тк, после чего поле выключается. При этом в кольцах возбуждаются токи, взаимодействие между которыми стремится уменьшить первоначальный угол между плоскостями колец. Нить закручивается, а наблюдаемое постоянство угла закручивания показывает, что токи в кольцах являются незатухающими. Опыты такого рода позволили установить, что сопротивление металла в сверхпроводящем состоянии меньше чем 10-20 омсм (сопротивление чистых образцов меди или серебра составляет около 10-9 омсм при температуре жидкого гелия). Однако сверхпроводник не является просто идеальным проводником, как это считалось ещё в течение более чем 20 лет после открытия сверхпроводимости. Существование значительно более глубокого различия между нормальным и сверхпроводящим состояниями металла стало очевидным, после того как нем. физики В. Мейснер и Р. Оксенфельд (1933) установили, что слабое магнитное поле не проникает в глубь сверхпроводника. Особенно важно, что это имеет место независимо от того, было ли поле включено до или после перехода металла в сверхпроводящее состояние. В отличие от этого, идеальный проводник (т. е. проводник с исчезающе малым сопротивлением) должен захватывать пронизывающий его магнитный поток. Это различие иллюстрирует рис. 2 (а, б, в), на котором схематически изображено распределение поля вблизи односвязного металлического образца на трёх последовательных этапах опыта: а) образец находится в нормальном состоянии, внешнее поле свободно проникает в глубь металла; б) образец охлаждается ниже Тк, магнитное поле выталкивается из сверхпроводника (верхний рисунок), тогда как в случае идеального проводника распределение поля оставалось бы неизменным (нижний рисунок); в) внешнее поле выключается, при этом исчезает и намагниченность сверхпроводника. В случае идеального проводника поток магнитной индукции через образец сохранил бы свою величину, и картина поля была бы такой же, как у постоянного магнита.

Выталкивание магнитного поля из сверхпроводящего образца (это явление обычно называют эффектом Мейснера) означает, что в присутствии внешнего магнитного поля такой образец ведёт себя как идеальный [диамагнетик](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/027/089.htm) той же формы с [магнитной восприимчивостью](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/072/348.htm) = —1/4. В частности, если образец имеет форму длинного сплошного цилиндра, а внешнее поле Н однородно и параллельно оси цилиндра, то магнитный момент, отнесённый к единице объёма, будет равен М = —Н/4. Это примерно в 105 раз больше по абсолютной величине, чем удельная намагниченность диамагнитного металла в нормальном состоянии. Эффект Мейснера связан с тем, что при Н < Нк в поверхностном слое сверхпроводящего цилиндра появляется круговой незатухающий ток, сила которого как раз такова, что магнитное поле этого тока компенсирует внешнее поле в толще сверхпроводника. Эффект Мейснера - полное вытеснение магнитного поля из металлического проводника, когда последний становится сверхпроводящим (при напряжённости приложенного магнитного поля ниже критического значения Hk). М. э. впервые наблюдался в 1933 немецкими физиками В. Мейснером и Р. Оксенфельдом. В недостаточно чистых металлах, а особенно в сплавах наблюдается частичное «замораживание» магнитного поля в объёме сверхпроводника. Опыт показывает, что в случае больших образцов слабое магнитное поле в условиях эффекта Мейснера проникает в металл на глубину  ~ 10-5—10-6 см.

### Сверхпроводники 1 и 2 рода

По своему поведению в достаточно сильных полях сверхпроводники подразделяются на две большие группы, т. н. сверхпроводники 1-го и 2-го рода. Сверхпроводники 1-го рода, которыми являются все достаточно чистые сверхпроводящие металлические элементы (за исключением V и Nb), теряют С. при поле Н = Нк, когда поле скачком проникает в металл и он во всём объёме переходит в нормальное состояние. При этом удельный магнитный момент также скачком уменьшается примерно в 105 раз. Критическому полю Нк можно дать простое термодинамическое истолкование. При температуре Т < Тк и в отсутствии магнитного поля [свободная энергия](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/100/355.htm) в сверхпроводящем состоянии Fc ниже, чем в нормальном Fн. При включении поля свободная энергия сверхпроводника возрастает на величину H 2/8, равную работе намагничивания, и при Н = Нк сравнивается с Fн (в силу малости магнитного момента в нормальном состоянии Fн практически не изменяется при включении поля). Т. о., поле Нк определяется из условия равновесия в точке перехода:

Fc + Н 2к/8 = Fн. (1)

Критическое поле Нк зависит от температуры: оно максимально при Т = 0 и монотонно убывает до нуля по мере приближения к Тк. Из формулы (1) непосредственно получается (при дифференцировании по температуре) выражение для [теплоты фазового перехода](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/109/952.htm) в сверхпроводящее состояние:

, (2)

где S — [энтропия](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/126/734.htm) единицы объёма. Знак Q таков, что теплота поглощается сверхпроводником при переходе в нормальное состояние. Поэтому если разрушение С. магнитным полем производится при адиабатической изоляции образца, то последний будет охлаждаться.

Скачкообразный характер фазового перехода в магнитном поле наблюдается только в случае весьма специальной геометрии опыта: длинный цилиндр в продольном поле. При произвольной форме образца и др. ориентациях поля переход оказывается растянутым по более или менее широкому интервалу значений Н: он начинается при Н < Нк и заканчивается, когда поле во всех точках образца превысит Нк. В этом интервале значений Н сверхпроводник 1-го рода находится в т. н. [промежуточном состоянии](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/093/314.htm). Он расслаивается на чередующиеся области нормальной и сверхпроводящей фаз, причём так, что поле в нормальной фазе вблизи границы раздела параллельно этой границе и равно Нк. По мере увеличения поля возрастает доля нормальной фазы и происходит уменьшение магнитного момента образца. Структура расслоения и характер кривой намагничивания существенно зависят от геометрических факторов. В частности, для пластинки, ориентированной перпендикулярно магнитному полю, расслоение начинается уже в слабом поле, гораздо меньшем, чем Нк.

С магнитными свойствами сверхпроводников тесно связаны и особенности протекания в них тока. В силу эффекта Мейснера ток является поверхностным, он сосредоточен в тонком слое, определяемом глубиной проникновения магнитного поля. Когда ток достигает некоторой критической величины, достаточной для создания критического магнитного поля, сверхпроводник 1-го рода переходит в промежуточное состояние и приобретает электрическое сопротивление.

К сверхпроводникам 2-го рода относится большинство сверхпроводящих сплавов. Кроме того, сверхпроводниками 2-го рода становятся и сверхпроводящие металлические элементы (сверхпроводники 1-го рода) при введении в них достаточно большого количества примесей. Картина разрушения сверхпроводимости магнитным полем является у этих сверхпроводников более сложной. Как видно из рис. 4, даже в случае цилиндрического образца в продольном поле происходит постепенное уменьшение магнитного момента на протяжении значительного интервала полей от Нк, когда поле начинает проникать в толщу образца, и до поля Нк, при котором происходит полное разрушение сверхпроводящего состояния. В большинстве случаев кривая намагничивания такого типа является необратимой (наблюдается магнитный [гистерезис](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/010/750.htm)). Величина гистерезиса очень чувствительна к технологии приготовления образцов, и в некоторых случаях путём специальной обработки удаётся получить образцы с почти обратимой кривой намагничивания. Поле Нк часто оказывается весьма большим, достигая сотен тысяч [эрстед](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/127/112.htm). Что же касается термодинамического критического поля Нк, определяемого соотношением (1), то оно для сверхпроводников 2-го рода не является непосредственно наблюдаемой характеристикой. Однако его можно рассчитать, исходя из найденных опытным путём значений свободной энергии в нормальном и сверхпроводящем состояниях в отсутствии магнитного поля. Оказывается, что вычисленное таким способом значение Нк попадает в интервал между  и  Т. о., проникновение магнитного поля в сверхпроводник 2-го рода начинается уже в поле, меньшем, чем Нк, когда условие равновесия (1) ещё нарушено в пользу сверхпроводящего состояния. Понять это парадоксальное на первый взгляд явление можно, если принять во внимание поверхностную энергию границы раздела нормальной и сверхпроводящей [фаз](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/115/145.htm). В случае сверхпроводников 1-го рода эта энергия положительна, так что появление границы раздела приводит к проигрышу в энергии. Это существенно ограничивает степень расслоения в промежуточном состоянии. Аномальные магнитные свойства сверхпроводников 2-го рода можно качественно объяснить, если принять, что в этом случае поверхностная энергия отрицательна. Именно к такому выводу приводит современная теория сверхпроводимости. При отрицательной поверхностной энергии уже при Н < Нк энергетически выгодным является образование тонких областей нормальной фазы, ориентированных вдоль магнитного поля. Возможность реализации такого состояния сверхпроводника 2-го рода была предсказана А. А. [Абрикосовым](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/011/744.htm) (1952) на основе теории сверхпроводимости В.Л. [Гинзбурга](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/010/484.htm) и Л.Д. [Ландау](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/068/590.htm). Позднее им же был произведён детальный расчёт структуры этого состояния. Оказалось, что нормальные области зарождаются в форме нитей, пронизывающих образец и имеющих толщину, грубо говоря, сравнимую с глубиной проникновения магнитного поля. При увеличении внешнего поля концентрация нитей возрастает, что и приводит к постепенному уменьшению магнитного момента. Т. о., в интервале значений поля от  до , сверхпроводник находится в состоянии, которое принято называть смешанным.

Фазовый переход в сверхпроводящее состояние в отсутствии магнитного поля. Прямые измерения [теплоёмкости](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/109/913.htm) сверхпроводников при Н = 0 показывают, что при понижении температуры теплоёмкость в точке перехода Тк испытывает скачок до величины, которая примерно в 2,5 раза превышает её значение в нормальном состоянии в окрестности Тк. При этом теплота перехода Q = 0, что следует, в частности, из формулы (2) (Нк = 0 при Т = Тк). Т. о., переход из нормального в сверхпроводящее состояние в отсутствии магнитного поля является фазовым переходом 2-го рода. Из формулы (2) можно получить важное соотношение между скачком теплоёмкости и углом наклона кривой Нк (Т) в точке Т = Тк:

,

где Сс и Сн— значения теплоёмкости в сверхпроводящем и нормальном состояниях. Это соотношение с хорошей точностью подтверждается экспериментом.

Температура перехода в сверхпроводящее состояние, критическое магнитное поле для ряда металлов, полупроводников, сплавов и соединений

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   | Вещество | Критическая температура ТК, К | Критическое поле Н0, э |
| Сверхпроводники 1 рода | Свинец | 7,2 | 800 |
| Тантал | 4,5 | 830 |
| Олово | 3,7 | 310 |
| Алюминий | 1,2 | 100 |
| Цинк | 0,88 | 53 |
| Вольфрам | 0,01 | 1,0 |
| Сверхпроводники 2 рода | Ниобий | 9,25 | 4000 |
| Сплав 65 БТ (Nb-Ti-Zr) | 9,7 | 100000 |
| Сплав NiTi | 9,8 | 100000 |
| V3Ga | 14,5 | 350000 |
| Nb3Sn | 18,0 | 250000 |
| (Nb3AI)4Nb3Ge | 20,0 | — |
| Nb3Ge | 23 | — |
| GeTe\* | 0,17 | 130 |
| SrTiO3\* | 0,2—0,4 | 300 |
| Pb1,0Mo5,1S6 | 15 | 600000 |

\* Выше Тк: эти соединения [полупроводники](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/091/164.htm). 1 э = 79,6 а/м.

### Природа сверхпроводимости

Совокупность экспериментальных фактов о сверхпроводимости убедительно показывает, что при охлаждении ниже Тк проводник переходит в новое состояние, качественно отличающееся от нормального. Исследуя различные возможности объяснения свойств сверхпроводника, особенно эффекта Мейснера, немецкие учёные, работавшие в Англии, Г. и Ф. Лондоны (1934) пришли к заключению, что сверхпроводящее состояние является макроскопическим квантовым состоянием металла. На основе этого представления они создали феноменологическую теорию, объясняющую поведение сверхпроводников в слабом магнитном поле — эффект Мейснера и отсутствие сопротивления. Обобщение теории Лондонов, сделанное Гинзбургом и Ландау (1950), позволило рассмотреть вопросы, относящиеся к поведению сверхпроводников в сильных магнитных полях. При этом было объяснено огромное количество экспериментальных данных и предсказаны новые важные явления. Убедительным подтверждением правильности исходных предпосылок упомянутых теорий явилось открытие эффекта [квантования магнитного потока](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/060/297.htm), заключённого внутри сверхпроводящего кольца. Из уравнений Лондонов следует, что магнитный поток в этом случае может принимать лишь значения, кратные кванту потока Фо = hc/e\*, где е\* — заряд носителей сверхпроводящего тока, h — [Планка постоянная](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/089/602.htm), с — [скорость света](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/102/991.htm). В 1961 Р. Долл и М. Небауэр и, независимо, Б. Дивер и У. Фейроенк (США) обнаружили этот эффект. Оказалось, что е\* = 2e, где е — заряд электрона. Явление квантования магнитного потока имеет место и в случае упомянутого выше состояния сверхпроводника 2-го рода в магнитном поле, большем, чем Нк1. Образующиеся здесь нити нормальной фазы несут квант потока Фо. Найденная в опытах величина заряда частиц, создающих своим движением сверхпроводящий ток (е\* = 2e), подтверждает [Купера эффект](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/067/511.htm), на основе которого в 1957 Дж. [Бардин](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/096/877.htm), Л. [Купер](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/067/508.htm) и Дж. [Шриффер](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/124/505.htm) (США) и Н. Н. [Боголюбов](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/124/139.htm) (СССР) построили последовательную микроскопическую теорию сверхпроводимости согласно Куперу, два электрона с противоположными [спинами](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/105/261.htm) при определённых условиях могут образовывать связанное состояние (куперовскую пару). Заряд такой пары равен 2e. Пары обладают нулевым значением спина и подчиняются [Бозе-Эйнштейна статистике](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/125/376.htm). Образуясь при переходе металла в сверхпроводящее состояние, пары испытывают бозе - конденсацию, поэтому система куперовских пар обладает свойством [сверхтекучести](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/100/169.htm). Т. о., С. представляет собой сверхтекучесть электронной жидкости. При Т = 0 связаны в пары все электроны проводимости. Энергия связи электронов в паре весьма мала: она равна примерно 3,5 kTk, где k — [Больцмана постоянная](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/127/740.htm). При разрыве пары, происходящем, например, при поглощении кванта электромагнитного поля или кванта звука ([фонона](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/116/912.htm)), в системе возникают возбуждения. При отличной от нуля температуре имеется определённая равновесная концентрация возбуждений, она возрастает с температурой, а концентрация пар соответственно уменьшается. Энергия связи пары определяет т. н. щель в энергетическом спектре возбуждений, т. е. минимальную энергию, необходимую для создания отдельного возбуждения. Природа сил притяжения между электронами, приводящих к образованию пар, вообще говоря, может быть различной, хотя у всех известных сверхпроводников эти силы определяются взаимодействием электронов с фононами. Тем не менее, развитие теории сверхпроводимости стимулировало интенсивные теоретические поиски других механизмов сверхпроводимости. В этом плане особое внимание уделяется нитевидным (одномерным) и слоистым (двумерным) структурам, обладающим достаточно большой проводимостью, в которых имеются основания ожидать более интенсивного притяжения между электронами, чем в обычных сверхпроводниках, а следовательно, — и более высокой температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Явления, родственные сверхпроводимости, по-видимому, могут иметь место и в некоторых космических объектах, например в [нейтронных звёздах](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/080/929.htm).

Практическое применение сверхпроводимости интенсивно расширяется. Наряду с [магнитами сверхпроводящими](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/072/344.htm), [сверхпроводящими магнитометрами](http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/100/166.htm) существует ряд других технических устройств и измерительных приборов, основанных на использовании различных свойств сверхпроводников. Построены сверхпроводящие резонаторы, обладающие рекордно высокой (до 1010) добротностью, сверхпроводящие элементы для ЭВМ, перспективно применение сверхпроводников в крупных электрических машинах и т. д.

### Теория БКШ

Сверхпроводимость — вещь странная и, в некоторой мере, даже противоречащая здравому смыслу. Когда электрический ток течет по обычному проводу, то, в результате наличия у провода электрического сопротивления, ток совершает некую работу, направленную на преодоление этого сопротивления со стороны атомов, в результате чего выделяется тепло. При этом каждое соударение электрона — носителя тока — с атомом тормозит электрон, а сам атом-тормоз при этом разогревается — вот почему спираль электрической плитки становится такой красной и горячей. Всё дело в том, что спираль обладает электрическим сопротивлением, и, вследствие этого, при протекании по ней электрического тока, выделяет тепловую энергию (см. [Закон Ома](http://elementy.ru/../trefil/ohm_law)).

В 1911 году нидерландский физик-экспериментатор Хейке Камерлинг Оннес (Heike Kammerlingh Onnes, 1853–1926) сделал удивительное открытие. Погрузив провод в жидкий гелий, температура которого составляла не более 4° выше абсолютного нуля (который, напомним, составляет –273°С по шкале Цельсия или –460°F по шкале Фаренгейта), он выяснил, что при сверхнизких температурах электрическое сопротивление падает практически до нуля. Почему такое происходит, он, собственно, не мог даже и догадываться, но факт оказался налицо. При сверхнизких температурах электроны практически не испытывали сопротивления со стороны атомов кристаллической решетки металла и обеспечивали сверхпроводимость.

Но почему всё так происходит? Это оставалось тайной вплоть до 1957 года, когда еще три физика-экспериментатора — Джон Бардин (John Bardeen, 1908–1991), Леон Купер (Leon Cooper, р. 1930) и Джон Роберт Шриффер (John Robert Schrieffer, р. 1931) придумали объяснение этому эффекту. Теория сверхпроводимости теперь так и называется в их честь «теорией БКШ» — по первым буквам фамилий этих физиков.

А суть ее заключается в том, что при сверхнизких температурах тяжелые атомы металлов практически не колеблются в силу их низкого теплового движения, и их можно считать фактически стационарными. Поскольку любой металл только потому и обладает присущими металлу электропроводящими свойствами, что отпускает электроны внешнего слоя в «свободное плавание» (см. [Химические связи](http://elementy.ru/../trefil/chemical_bonds)), мы имеем, что имеем: ионизированные, положительно заряженные ядра кристаллической решетки и отрицательно заряженные электроны, свободно «плавающие» между ними. И вот проводник попадает под действие разности электрических потенциалов. Электроны — волей или неволей — движутся, будучи свободными, между положительно заряженными ядрами. Всякий раз, однако, они вяло взаимодействуют с ядрами (и между собой), но тут же «убегают». Однако, в то самое время, пока электроны «проскакивают» между двумя положительно заряженными ядрами, они как бы «отвлекают» их на себя. В результате, после того как между двумя ядрами «проскочил» электрон, они на недолгое время сближаются. Затем два ядра, конечно же, плавно расходятся, но дело сделано — возник положительный потенциал, и к нему притягиваются всё новые отрицательно заряженные электроны. Тут самое важное — понять: благодаря тому, что один электрон «проскакивает» между атомами, он, тем самым, создает благоприятные энергетические условия для продвижения еще одного электрона. В результате электроны перемещаются внутри атомно-кристаллической структуры парами — по-другому они просто не могут, поскольку это им энергетически не выгодно. Чтобы лучше понять этот эффект можно привлечь аналогию из мира спорта. Велосипедисты на треке нередко используют тактику «драфтинга» (а именно, «висят на хвосте» у соперника) и, тем самым, снижают сопротивление воздуха. То же самое делают и электроны, образуя куперовские пары.

Тут важно понять, что при сверхнизких температурах все электроны образуют куперовские пары. Теперь представьте себе, что каждая такая пара представляет собой связку наподобие вермишели, на каждом конце которой находится заряд-электрон. Теперь представьте себе, что перед вами целая миска подобной «вермишели»: она вся состоит из переплетенных между собой куперовских пар. Иными словами, электроны в сверхпроводящем металле попарно взаимодействуют между собой, и на это уходит вся их энергия. Соответственно, у электронов просто не остается энергии на взаимодействие с ядрами атомов кристаллической решетки. В итоге доходит до того, что электроны замедляются настолько, что им больше нечего терять (энергетически), а окружающие их ядра «остывают» настолько, что они более не способны «тормозить» свободные электроны. В результате электроны начинают перемещаться между атомами металла, практически не теряя энергии в результате соударения с атомами, и электрическое сопротивление сверхпроводника устремляется к нулю. За открытие и объяснение эффекта сверхпроводимости Бардин, Купер и Шриффер в 1972 году получили Нобелевскую премию.

С тех пор прошло немало лет, и сверхпроводимость из разряда явлений уникальных и лабораторно-курьезных превратилась в общепризнанный факт и источник многомиллиардных доходов предприятий электронной индустрии. А дело всё в том, что любой электрический ток возбуждает вокруг себя магнитное поле (см. [Закон электромагнитной индукции Фарадея](http://elementy.ru/../trefil/faraday_law_of_induction)). Поскольку сверхпроводники долгое время проводят ток практически без потерь, если поддерживать их при сверхнизких температурах, они представляют собой идеальный материал для изготовления электромагнитов. И, если вы когда-нибудь подвергались медико-диагностической процедуре, которая называется электронная томография и проводится на сканере, использующем принцип ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), то вы, сами того, возможно, не подозревая, находились в считанных сантиметрах от сверхпроводящих электромагнитов. Именно они создают поле, позволяющее врачам получать высокоточные образы тканей человеческого тела в разрезе без необходимости прибегать к скальпелю.

Современные сверхпроводники сохраняют свои уникальные свойства при нагревании вплоть до температур порядка 20 K (двадцать градусов выше абсолютного нуля). Долгое время это считалось температурным пределом сверхпроводимости. Однако в 1986 году сотрудники швейцарской лаборатории компьютерной фирмы IBM Георг Беднорц (Georg Bednorz, р. 1950) и Александр Мюллер (Alexander Müller, р. 1927) открыли сплав, сверхпроводящие свойства которого сохраняются и при 30K. Сегодня же науке известны материалы, остающиеся сверхпроводниками даже при 160К (то есть чуть ниже –100°C). При этом общепринятой теории, которая объясняла бы этот класс высокотемпературной сверхпроводимости, до сих пор не создано, но совершенно ясно, что в рамках теории БКШ ее объяснить невозможно. Практического применения высокотемпературные сверхпроводники на сегодняшний день не находят по причине их крайней дороговизны и хрупкости, однако разработки в этом направлении продолжаются.

### 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 удается. 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. К ним относятся золото, медь, серебро. Малое сопротивление этих материалов указывает на слабое взаимодействие электронов с решеткой. Такое слабое взаимодействие не создает вблизи абсолютного нуля достаточного межэлектронного притяжения, способного преодолеть кулоновское отталкивание. Поэтому и не происходит их переход в сверхпроводящее состояние. Кроме чистых металлов сверхпроводимостью обладают многие ть терметаллические 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 (табл. 3.1). Некоторые из них позволяют использовать для достижения сверхпроводящего состояния вместо жидкого гелия более дешевый 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 7\.в = 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 с1 большой диэлектрической проницаемостью силы кулоновского оттал-1 кивания между электронами в значительной мере ослаблены. Поэтому некоторые из них также проявляют свойства сверхпроводников при низких температурах. Примером может служить титанат стронция (SrTiO3), относящийся к группе сегнетоэлектриков. Ряд полупроводников удается перевести в сверхпроводящее состояние добавкой большой концентрации легирующих примесей {GeTe, SnTe, CuS и др.)

В настоящее время промышленность выпускает широкий ассортимент сверхпроводящих проволок и лент для самых различных целей. Изготовление таких проводников связано с большими технологическими 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, этому 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 Nb3Sn. Такой жгут может изгибаться, но пленки остаются целыми.

###

### Применение

Керамические сверхпроводники весьма перспективны в плане крупномасштабных применений, главным образом по той причине, что их можно изучать и использовать при охлаждении сравнительно недорогим жидким азотом.

Лабораторные применения

Первым промышленным применением сверхпроводимости было создание сверхпроводящих магнитов с высокими критическими полями. Доступные сверхпроводящие магниты позволили получить к середине 1960-х годов магнитные поля выше 100 кГс даже в небольших лабораториях. Ранее создание таких полей с помощью обычных электромагнитов требовало очень больших количеств электроэнергии для поддержания электрического тока в обмотках и огромного количества воды для их охлаждения.

Следующее практическое применение сверхпроводимости относится к технике чувствительных электронных приборов. Экспериментальные образцы приборов с контактом Джозефсона могут обнаруживать напряжения порядка 10–15 Вт. Магнитометры, способные обнаруживать магнитные поля порядка 10–9 Гс, используются при изучении магнитных материалов, а также в медицинских магнитокардиографах. Чрезвычайно чувствительные детекторы вариаций силы тяжести могут применяться в различных областях геофизики.

Техника сверхпроводимости и особенно контакты Джозефсона оказывают все большее влияние на метрологию. С помощью джозефсоновских контактов создан стандарт 1 В. Был разработан также первичный термометр для криогенной области, в которой резкие переходы в некоторых веществах используются для получения реперных (постоянных) точек температуры. Новая техника используется в компараторах тока, для измерений радиочастотной мощности и коэффициента поглощения, а также для измерений частоты. Она применяется также в фундаментальных исследованиях, таких, как измерение дробных зарядов атомных частиц и проверка теории относительности.

Сверхпроводимость будет широко использоваться в компьютерных технологиях. Здесь сверхпроводящие элементы могут обеспечивать очень малые времена переключения, ничтожные потери мощности при использовании тонкопленочных элементов и большие объемные плотности монтажа схем. Разрабатываются опытные образцы тонкопленочных джозефсоновских контактов в схемах, содержащих сотни логических элементов и элементов памяти.

Промышленные применения.

Наиболее интересные возможные промышленные применения сверхпроводимости связаны с генерированием, передачей и использованием электроэнергии. Например, по сверхпроводящему кабелю диаметром несколько дюймов можно передавать столько же электроэнергии, как и по огромной сети ЛЭП, причем с очень малыми потерями или вообще без них. Стоимость изготовления изоляции и охлаждения криопроводников должна компенсироваться эффективностью передачи энергии. С появлением керамических сверхпроводников, охлаждаемых жидким азотом, передача электроэнергии с применением сверхпроводников становится экономически очень привлекательной.

Еще одно возможное применение сверхпроводников – в мощных генераторах тока и электродвигателях малых размеров. Обмотки из сверхпроводящих материалов могли бы создавать огромные магнитные поля в генераторах и электродвигателях, благодаря чему они были бы значительно более мощными, чем обычные машины. Опытные образцы давно уже созданы, а керамические сверхпроводники могли бы сделать такие машины достаточно экономичными. Рассматриваются также возможности применения сверхпроводящих магнитов для аккумулирования электроэнергии, в магнитной гидродинамике и для производства термоядерной энергии.

Инженеры давно уже задумывались о том, как можно было бы использовать огромные магнитные поля, создаваемые с помощью сверхпроводников, для магнитной подвески поезда (магнитной левитации). За счет сил взаимного отталкивания между движущимся магнитом и током, индуцируемым в направляющем проводнике, поезд двигался бы плавно, без шума и трения и был бы способен развивать очень большие скорости. Экспериментальные поезда на магнитной подвеске в Японии и Германии достигли скоростей, близких к 300 км/ч.