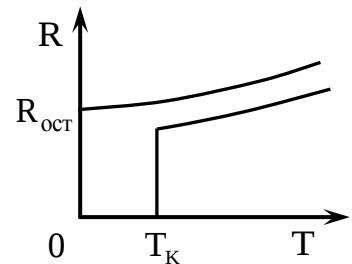


СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХПРОВОДНИКА (ЭФФЕКТ МЕЙСНЕРА).

Величина остаточного электрического сопротивления металла $R_{\text{ост}}$ на зависимости $R(T)$ (при $T = 0$ К), в сильной степени зависит от чистоты материала, наличия механических напряжений и других свойств.

Для абсолютной чистоты металла (без примесей) с идеальной кристаллической решеткой значение величины электрического сопротивления $R_{\text{ост}}$ может быть равным нулю.

Этот вывод следует из квантовой теории, но это явление не нужно смешивать с другим квантово механическим явлением – *сверхпроводимостью*.



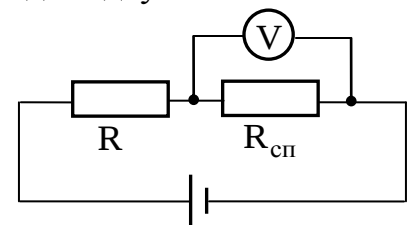
В 1911 году голландский физик Камерлинг-Оннес обнаружил, что сопротивление ртути при температуре ниже 4,15 К скачком падает до нуля, т.е. ртуть полностью теряет сопротивление электрическому току. Это явление было названо *сверхпроводимостью*.

Экспериментальные исследования показали, что у большой группы металлов и сплавов при низких температурах от 0,01 К (у вольфрама) до 23,3 К (соединение Nb_3Ge) электрическое сопротивление скачком обращается в нуль – то есть полностью исчезает в области температур порядка $\Delta T \sim 10^{-1} \div 10^{-3}$ К. Это явление наблюдалось у более 100 веществ: в чистых металлах (Hg, Al, Ta, Sn, Pb, Nb), в интер-металлических сплавах (Ni-Ti, Ni-Ti-Sr), в вырожденных полупроводниках (GeTe, SnTe, SrTiO_3), в некоторых полимерах. Не все металлы являются сверхпроводящими, так для щелочных и благородных металлов это явление не обнаружено. Удельное сопротивление ρ проводников в сверхпроводящем состоянии меньше 10^{-20} Ом·см.

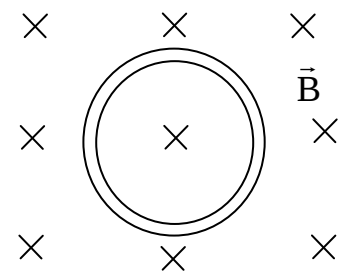
Температура, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние называется *критической температурой* T_K .

Сверхпроводимость можно экспериментально наблюдать двумя способами.

1. Если в электрической цепи имеется сверхпроводник, то при переходе в сверхпроводящее состояние на его концах разность потенциалов становится равной нулю.



2. Поместив кольцо из сверхпроводника в перпендикулярное магнитное поле и охладив его до T_K , выключив магнитное поле, мы будем наблюдать индуцированный в кольце, незатухающий электрический ток.



Различные опыты по изучению свойств сверхпро-

водников показывают, что структура их кристаллической решётки, их механические и оптические свойства не изменяются. Вместе с тем при T_K наряду со скачкообразным изменением электрических свойств качественно меняются его магнитные и тепловые свойства. В частности при $\vec{B} \neq 0$ скачкообразно изменится и теплопроводность и теплоёмкость. Такие явления характерны для фазовых переходов второго рода.

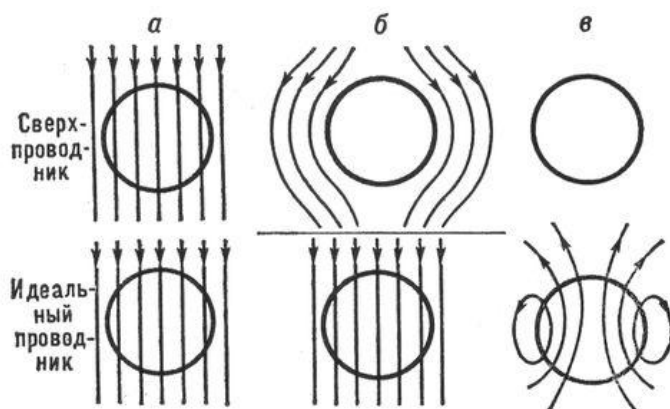
Следует учитывать, что идеальная кристаллическая решетка металлов при температуре $T \rightarrow 0 \text{ К}$ не должна рассеивать электроны, следовательно, сопротивление таких металлов должно падать до нуля, но это не есть сверхпроводящее состояние:

- во первых, сверхпроводимость не зависит от наличия дефектов;
- во вторых, у сверхпроводников сопротивление падает скачком до нуля;
- в третьих сверхпроводники обладают еще одним важным свойством – идеальным диамагнетизмом, т.е. в слабых магнитных полях магнитная проницаемость равна нулю $\mu = 0$, т.е. в сверхпроводящем состоянии магнитное поле выталкивается из толщины проводника. Этот эффект называется явлением Мейснера – Оксенфельда.

В 1933 году (немецкие ученые) Мейснер и Оксенфельд обнаружили, что внутри сверхпроводимого тела, полностью отсутствует магнитное поле.

Распределение поля вблизи однородного металлического образца на трёх последовательных этапах опыта:

- нормальное состояние, внешнее поле свободно проникает вглубь металла;*
- образец охлаждается ниже T_K , магнитное поле выталкивается из сверхпроводника (верхний рисунок), в идеальном проводнике распределение поля остается неизменным (нижний рисунок);*
- 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.*

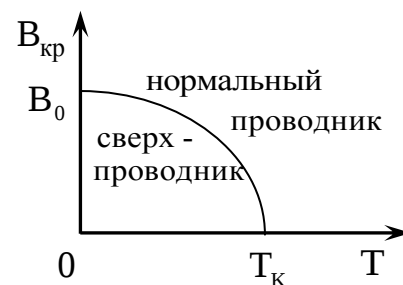


Достаточно сильное внешнее магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние, и сверхпроводник становится обычным проводником. Это поле называется **критическим** $B_{кр}$, его значение уменьшается с увеличением температуры и становится равным нулю при T_K .

Температурную зависимость $B_{кр}$ можно представить математически в виде параболического закона:

$$B_{кр} = B_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_K} \right)^2 \right],$$

где B_0 – индукция критического поля при 0 К.



Когда магнитное поле электрического тока протекающего по сверхпроводнику достигнет критического значения $B_{кр}$, сверхпроводимость исчезнет. Соответствующая плотность тока называется **критической плотностью тока**.

Явление Мейснера – Оксенфельда объясняется тем, что при помещении сверхпроводника в слабое магнитное поле в нем возникает незатухающий круговой ток в тонком приповерхностном слое. Этот ток физически реален и поэтому протекает в некотором тонком слое вблизи поверхности. Толщина слоя имеет порядок $\sim 10^{-8}$ м.

Магнитное поле этого тока компенсирует внутри сверхпроводника внешнее магнитное поле, благодаря чему полное поле внутри проводника становится равным нулю. Сверхпроводник не является идеальным диамагнетиком, так как намагниченность $\vec{J}$ внутри него равна нулю.

Эффект Мейснера наблюдается у чистых металлов, а у соединений частичный эффект Мейснера, то есть магнитное поле полностью не вытесняется. На этом основании сверхпроводники разделяют на сверхпроводники I рода (с полным эффектом Мейснера) и II рода (частичным эффектом).

Как же объяснить явление сверхпроводимости?

В 30-х годах была предложена двух жидкостная феноменологическая модель. Предполагалось, что вся совокупность электронов распадается на две взаимопроникающие жидкости, состоящие из нормальных и сверхпроводящих электронов. Однако объяснение возникновения сверхпроводящих электронов не давалось.

В дальнейшем эта идея была успешно применена для объяснения сверхтекучести жидкого гелия-II, атомы которого подчиняются статистике Бозе-Энштейна. Согласно которой в одном квантовом состоянии (в частности с минимальной энергией) может находиться сколь угодно атомов. Не движущихся без трения (Бозе-конденсация).

Электроны имеют полуцелый спин и подчиняются статистике Ферми-Дирака. Для них Бозе-конденсация – невозможна. Фермионы отталкивают друг друга, а бозоны стараются как бы втянуть в себя другие бозоны.

В 1957 году была выдвинута идея, что электроны могут спариваться, когда между ними находится положительный заряд узла кристаллической решетки, как результат электрон-фотонного взаимодействия.

Пара электронов, она называется куперовской парой, по фамилии выдвинувшего эту идею американского ученого Купера, обладает целочисленным спином и, следовательно, может испытывать Бозе-конденсацию, то есть получает сверхтекучую компоненту электронной жидкости.

Микроскопическая теория сверхпроводимости основанная на идее Бозе-конденсации куперовских пар, была разработана Бардиным, Купером и Шриффером (теория БКШ), которая качественно объясняет сверхпроводимость (дополнительно см. И. В. Савельев Курс физики 1988г., т.3, §41, стр. 191 – 194).

ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА

Эффект Джозефсона – явление протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. Такой ток называют джозефсоновским током, а такое соединение сверхпроводников – джозефсоновским контактом. В первоначальной работе Джозефсона предполагалось, что толщина диэлектрического слоя много меньше длины сверхпроводящей когерентности, но последующие исследования показали, что эффект сохраняется в гораздо более широком классе контактов

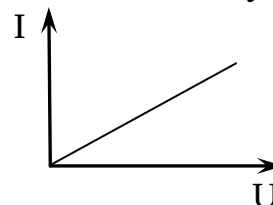
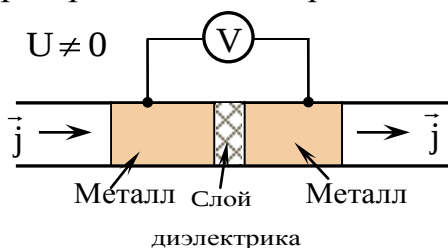
Эффект Джозефсона был предсказан английским физиком Брайном Джозефсоном в 1962 на основе теории БКШ. Джозефсон теоретически предсказал существование двух явлений, получивших название эффектов Джозефсона.

Экспериментально эффект был обнаружен американскими физиками П. Андерсоном и Дж. Роуэллом в 1963.

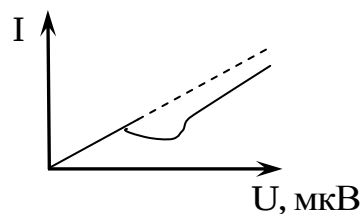
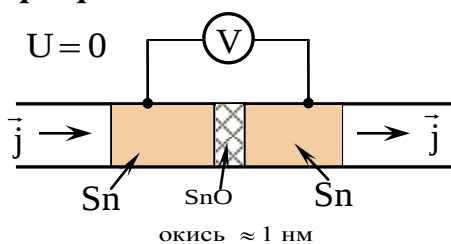
СТАЦИОНАРНЫЙ ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА.

Через тонкий диэлектрический контакт сверхпроводящий ток может протекать и при отсутствии разности потенциалов на контакте. То есть кроме нормального туннелирования отдельных электронов, которое было осуществлено в 1957-1960-х годах японским физиком Л. Эсаки и американским ученым А. Джейверсом, существует другая составляющая туннельного тока обусловленная спаренными электронами.

Для **нормальных металлов** (малые токи и напряжения) туннельный ток наблюдается при прикладывании разности потенциалов к контакту.



Для **сверхпроводников**



При наличии сверхпроводящего тока по обе стороны контакта в сверхпроводящем проводнике существуют взаимно когерентные волны *куперовских пар* с одинаковой частотой $\omega = \frac{E}{\hbar}$.

При туннелировании изменяется лишь фаза волны, поэтому прошедшая через контакт волна интерферирует с волной на другой стороне контакта и сила тока зависит от разности фаз, то есть течет постоянный сверхпроводящий ток. В этом и состоит *стационарный эффект Джозефсона*.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА

Нестационарный эффект Джозефсона состоит в том, что при наличии постоянной разности потенциалов через контакт протекает переменный ток.

Этот эффект объясняется биениями возникающими при интерференции когерентных волн с близкими частотами. Частоты отличаются на

$$\Delta\omega = \frac{2eU}{\hbar}.$$

Это означает, что через контакт протекает переменный сверхпроводящий ток частоты $\Delta\omega$.

Так напряжению в 1 мкВ соответствует частота

$$\nu = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = 483,6 \text{ МГц}.$$

Переменный ток на контакте излучает фотоны с энергией $\hbar\Delta\omega = 2eU$, которые можно детектировать. Следовательно, можно с большой точностью изучить зависимость частоты излучения от разности потенциалов и вычислить с той же точностью отношение $\frac{e}{\hbar}$ (чего не дают другие методы).

Для осуществления эффектов Джозефсона не обязательно создавать контакт из диэлектрика. Аналогичный эффект наблюдается когда сверхпроводники соединены тонкой перемычкой (мостиком или контактом) или тонким слоем нормального проводника или полупроводника. Такие связи называют *слабыми*, т. е. имеем слабосвязанные сверхпроводники.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА

Используя нестационарный эффект Джозефсона, можно измерять напряжение с очень высокой точностью.

Эффект Джозефсона используется в сверхпроводящих интерферометрах, содержащие два параллельных контакта Джозефсона. При этом сверхпроводящие токи, проходящие через контакт могут интерферировать. Оказывается, что критический ток для такого соединения чрезвычайно зависит от внешнего магнитного поля, что позволяет использовать устройство для очень точного измерения магнитных полей.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ.

В 1986 г. весной Беднордз и Мюллер сообщили об открытии ими сверхпроводимости в соединении оксида лантана, бария и меди с температурой Кюри порядка 33 К. Наиболее важным в этом открытии было открытие новых сверхпроводящих металлов на основе керамик. Исследования керамических материалов позволили открыть оксид иттрия, бария и меди с температурой Кюри порядка 90 К.

Важнейшие экспериментальные факты для высокотемпературных сверхпроводников:

1. Высокотемпературная сверхпроводимость свойственна материалам с содержанием меди.
2. Высокотемпературная сверхпроводимость обусловлена спаренными носителями зарядов – дырками.
3. Высокотемпературная сверхпроводимость очень чувствительна к содержанию кислорода в материалах и не допускает замены меди другими элементами.
4. Исследование изотопического эффекта ставит под вопрос фотонный механизм спаривания.

В 1988 г. удалось поднять температуру до 125 К.

В 1989 г. группа японских учёных объявила об открытии нового класса сверхпроводников, в отличие от сверхпроводников Беднордза и Мюллера, носителями заряда являлись электроны, а не дырки.

НЕМНОГО ИСТОРИИ:

- В 1986г. Беднордз и Мюллер обнаружили способность керамики на основе оксидов меди, лантана и бария ($La_{2-x}Ba_xCuO_4$) переходить в СП состояние при 30 К. Электропроводность этих образцов была измерена до температуры кипения жидкого азота (77 К), что не позволило обнаружить эффект сверхпроводимости.
- февраль 1987г. – Чу синтезирует, используя идею "химического сжатия" для модифицирования структуры, СП керамику из оксидов бария, иттрия и меди $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с критической температурой 93 К.
- в январе 1988г. Маеда синтезирует серию соединений состава $Bi_2Sr_2Ca_{x-1}Cu_xO_{2x+4}$, $T_c = 108$ К.
- в феврале 1989г. Шенг и Херман получили сверхпроводник $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ с $T_c = 125$ К.
- в 1993г. Антипов, Путилин и др. открыли ряд ртуть содержащих сверхпроводников (135 К), причем при внешнем давлении 350 тысяч атмосфер температура перехода возрастает до 164 К.

Всего к настоящему времени известно более 50 оригинальных слоистых ВТСП-купратов.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

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 так называемые сверхпроводники II рода, в которых возможно сосуществование сверхпроводимости и магнитного поля. В таких сверхпроводниках магнитное поле вызывает появление тонких нитей нормального металла, пронизывающих образец, каждая из которых несёт квант магнитного потока. Вещество же между нитями остаётся сверхпроводящим. Поскольку в сверхпроводнике II рода нет полного эффекта Мейснера, сверхпроводимость существует до гораздо больших значений магнитного поля. В технике применяются, в основном, следующие сверхпроводники:

Соединение	T_c , К	j_c , А/см ² (Тл), при 4,2 К	B_c , Тл (Т, К)
NbTi	9,5-10,5	$(3-8) \cdot 10^4$ (5)	12,5-16,5 (1,2) 12 (4,2)
Nb ₃ Sn	18,1-18,5	$(1-8) \cdot 10^5$ (0)	24,5-28 (0)
NbN	14,5-17,8	$(2-5) \cdot 10^7$ (18)	25 (1,2) 8-13 (4,2)

(дополнительно ищите информацию в инете)