

Министерство образования РФ
Нижнетагильский технологический институт УГТУ – УПИ
Кафедра Общей физики

Реферат

Тема: Сверхпроводимость. Эффекты Джозефсона

Преподаватель:

Студент:

Группа:

Нижний Тагил

2003 г.

ВЕДЕНИЕ

Сверхпроводимость - физическое явление, заключающееся в том, что у многих химических элементов, соединений и сплавов (называемых сверхпроводниками), при охлаждении их ниже определенной критической температуры T_c (характерной для данного материала) наблюдается переход из нормального в так называемое сверхпроводящее состояние, в котором их электрическое сопротивление постоянному току полностью отсутствует. При этом переходе структурные и оптические (в области видимого света) свойства сверхпроводников остаются практически неизменными. Электрические и магнитные свойства вещества в сверхпроводящем состоянии резко отличаются от этих же свойств в нормальном состоянии (где они, как правило, являются металлами) или от свойств других материалов, которые при тех же температурах в сверхпроводящее состояние не переходят. За исключением благородных (Cu, Ag, Au, Pt), щелочных (Li, Na, K и др.), щелочноземельных (Be, Mg и др.) и ферромагнитных (Fe, Co, Ni) металлов, большая часть остальных металлических элементов являются сверхпроводниками. Элементы Si, Ge, Bi, Te становятся сверхпроводниками при охлаждении под давлением. Явление сверхпроводимости открыто в 1911 г. Х. Каммерлинг-Оннесом при исследовании низкотемпературного хода сопротивления ртути. Он обнаружил, что при охлаждении ртутной проволоки ниже 4,2 К её сопротивление скачком обращается в нуль. Нормальное состояние может быть восстановлено при пропускании через образец достаточно сильного тока (превышающего критический ток $I_c(T)$) или помещением его в достаточно сильное внешнее магнитное поле (превышающее критическое магнитное поле $H_c(T)$). По величине T_c в силу исторических причин сверхпроводники делятся на классические (у которых $T_c < 30$ К) и высокотемпературные.

Наряду с потерей сопротивления важнейшим свойством сверхпроводников является вытеснение магнитного поля из массивного образца. По своему поведению в магнитном поле сверхпроводники делятся на две группы: сверхпроводники первого рода и второго рода. Далее учёными был открыт ряд других важнейших свойств, характерных для сверхпроводников, на основе которых и была построена теория сверхпроводимости.

Практическое использование сверхпроводников ограничилось низкими значениями критических полей и температур. Интерес к вопросу

практического использования сверхпроводников появился в 50-х гг, когда были открыты сверхпроводники второго рода с высокими критическими параметрами как по значению плотности тока, так и по величине магнитной индукции. В настоящее время использования явления сверхпроводимости приобретает все больше практическое значение. Применение сверхпроводников потребовало решения ряда новых задач, в частности, интенсивного развития материаловедения в области низких температур. При этом исследовались не только сверхпроводники собственно, но и конструкции и изоляционные материалы.

Открытие явления сверхпроводимости

Явление сверхпроводимости впервые наблюдал Камерлинг-Оннес в Лейдене в 1911 г. Эта проблема исследовалась и ранее, опыты показывали, что с понижением температуры, сопротивление металлов падало. Одним из первых его исследований в области низких температур было изучение зависимости электрического сопротивления от температуры в ходе опыта с ртутной цепью. Ртуть тогда считалась самым чистым металлом, которым можно было получить дистилляционной перегонкой. Для этого он использовал аппарат (рис. 1), который состоял из семи U-образных сосудов, соединённых перевёрнутыми Y-образными сосудами сечением $0,005 \text{ мм}^2$. Такая форма сосудов нужна была для свободного сжатия и разжатия ртути без нарушения непрерывности ртутной нити. В точках 1 и 2 по трубкам 3 и 4 подводился ток, в точках 5 и 6 измерялось падение напряжения на участках ртутной цепи.

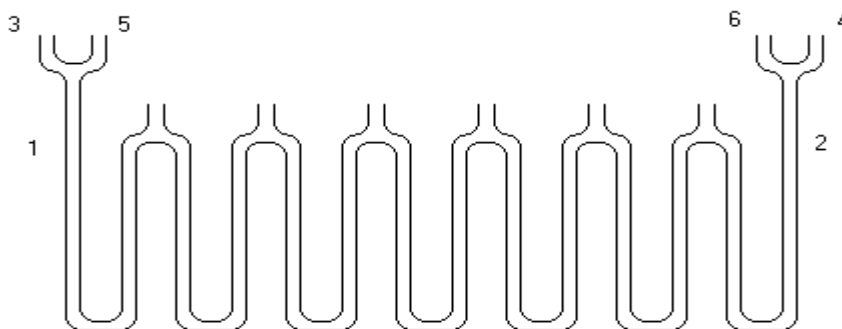


Рис. 1

На рис.2 приведены результаты его экспериментов со ртутью. Следует обратить внимание на то, что температурный интервал, в котором сопротивление уменьшалось до нуля, чрезвычайно узок.

Рис. 2

Точка 1 на графике соответствует температуре замерзания ртути, точка 2 – температуре жидкого воздуха, точка 3 – температуре жидкого водорода. После дальнейшего снижения температуры сопротивление резко исчезло. Электрическое сопротивление в сверхпроводящем состоянии точно равно нулю или, по крайней мере, так близко к нулю, что не наблюдалось ослабления тока в сверхпроводящем кольце в течение более чем года вплоть до прекращения эксперимента.

Теория сверхпроводимости

Далее оказалось, что при крайне низких температурах целый ряд веществ обладает сопротивлением, по крайней мере, в 10-12 раз меньше, чем при комнатной температуре. Эксперименты показывают, что если создать ток в замкнутом контуре из сверхпроводников, то этот ток продолжает циркулировать и без источника ЭДС. Токи Фуко в сверхпроводниках сохраняются очень долгое время и не затухают из-за отсутствия джоулева тепла (токи до 300А продолжают течь много часов подряд). Изучение прохождения тока через ряд различных проводников показало, что сопротивление контактов между сверхпроводниками также равно нулю. Отличительным свойством сверхпроводимости является отсутствие явления Холла. В то время, как в обычных проводниках под влиянием магнитного поля ток в металле смещается, в сверхпроводниках это явление отсутствует. Ток в сверхпроводнике как бы закреплен на своем месте.

Сверхпроводимость исчезает под действием следующих факторов:

- 1) повышение температуры;
- 2) действие достаточно сильного магнитного поля;

3) достаточно большая плотность тока в образце.

С повышением температуры до некоторой T_c почти внезапно появляется заметное омическое сопротивление. Переход от сверхпроводимости к проводимости тем круче и заметнее, чем однороднее образец (наиболее крутой переход наблюдается в монокристаллах).

Переход от сверхпроводящего состояния в нормальное можно осуществить путем повышения магнитного поля при температуре ниже критической T_c . Минимальное поле B_c , в котором разрушается сверхпроводимость называется критическим магнитным полем. Зависимость критического поля от температуры описывается эмпирической формулой.

$B_c = B_0 [1 - (T/T_c)^2]$, где B_0 - критическое поле, экстраполированное к абсолютному нулю температуры.

Для некоторых веществ, по-видимому, имеет место зависимость от T в первой степени. При действии магнитного поля на сверхпроводник наблюдается особого вида гистерезис, а именно если повышая магнитное поле уничтожить сверхпроводимость при $H = H_t$ (H - сила поля, H_t - повышенная сила поля:

$$H_t = a(T_c^2 - T^2) \text{) , то с понижением интенсивности поля}$$

сверхпроводимость появится вновь при поле $H_t' < H_t$, $dH = H_t - H_t'$ меняется от образца к образцу и обычно составляет 10% H_t . Повышение силы тока также приводит к исчезновению сверхпроводимости, то есть при этом понижается T_c . Чем ниже температура, тем выше та предельная сила тока i_t при которой сверхпроводимость уступает место обычной проводимости.

Сверхпроводимость наблюдается как у элементов, так и у сплавов и металлических соединений. Сверхпроводимость есть у Hg, Sn(белое), Pb, Tl, Tn, Ga, Ta, Th, Ti, Nb (иногда Cd).

Туннельный эффект

Туннельный эффект – это типичная задача квантовой механики. Частица (например, электрон в металле) подлетает к барьеру (например, к слою диэлектрика), преодолеть который она по классическим представлениям никак не может, так как ее кинетическая энергия недостаточна, хотя в области за барьером она со своей кинетической энергией вполне могла бы существовать. Напротив, согласно квантовой механике, прохождение барьера возможно. Частица с некоторой вероятностью может, как бы пройти по туннелю через

классически запрещенную область, где ее потенциальная энергия как бы больше полной, то есть классическая кинетическая энергия как бы отрицательна. На самом деле с точки зрения квантовой механики для микрочастицы (электрона) справедливо соотношение неопределенностей $\Delta x \Delta p > \hbar$ (x – координата частицы, p – ее импульс). Когда малая неопределенность ее координаты в диэлектрике $\Delta x = d$ (d – толщина слоя диэлектрика) приводит к большой неопределенности ее импульса $\Delta p \geq \hbar/\Delta x$, а, следовательно, и кинетической энергии $p^2/(2m)$ (m – масса частицы), то закон сохранения энергии не нарушается. Опыт показывает, что действительно между двумя металлическими обкладками, разделенными тонким слоем диэлектрика (туннельный переход), может протекать электрический ток тем больший, чем тоньше диэлектрический слой.

Эффекты Джозефсона

Если два сверхпроводника разделены между собой достаточно тонким слоем диэлектрика (например, два металлических слоя, разделенных окислом), то проникновение через барьер макроскопических волновых функций приводит к их перекрытию или к туннелированию электронных пар. Связанные с этим эффекты были количественно исследованы Брайаном Джозефсоном в 1962г. Он показал, что если имеется разность фаз между этими двумя волновыми функциями, то ток может протекать в отсутствие какой-либо разности потенциалов.

Слой диэлектрика – не единственно возможный тип “слабого звена”, среди других типов можно отметить точечный контакт двух хорошо отшлифованных сверхпроводников, или же микромостик, образованный путем травления сверхпроводящей пленки. На практике при нулевом напряжении через контакт можно пропустить ток только вплоть до некоторого порогового значения, выше которого появится напряжение. Это напряжение затем возрастает при росте тока. Такое явление называется стационарным эффектом Джозефсона. Нестационарный эффект Джозефсона возникает, когда к контакту прикладывается напряжение и через него начинает течь переменный ток.

Эффект Джозефсона может иметь много приложений, но он может быть и паразитным. Он возникает на границах зерен в поликристаллических образцах новых сверхпроводников и препятствует, например, попыткам измерения лондоновской глубины проникновения.

Сверхпроводники первого рода

Проанализируем протекание тока по проволоке круглого сечения, находящейся в сверхпроводящем состоянии. В отличие от экранирующего

Приложение

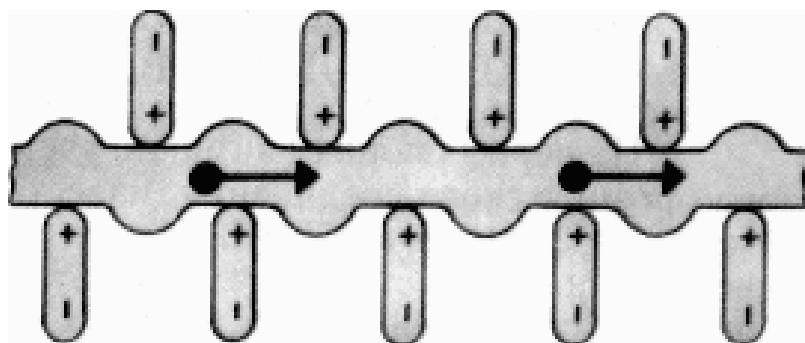


Рис. 6

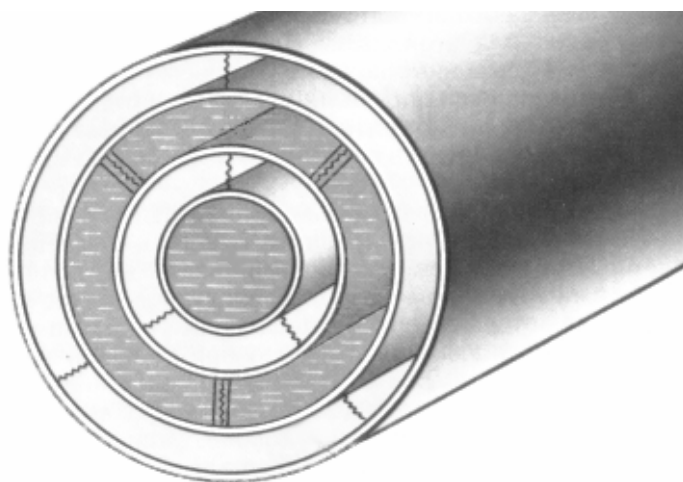


Рис. 7

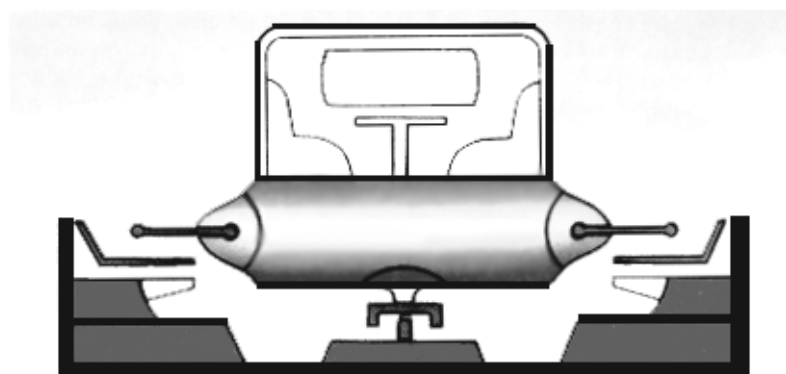


Рис. 8