РЕФЕРАТЫ

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ *

Классический опыт Дьюара и Флеминга (1898) с измерением электрической проводимости металлов, охлажденных при помощи жидкого воздуха и жидкого водорода, привел их к предположению, что электрическое сопротивление всех чистых металлов должно исчезать при абсолютном нуле. Дальнейшие опыты Камерлин-Оннеса (1911) с жидким гелием показали, что таким сверхпроводником электричества ртуть становится уже при 4°,2 К. Если в кольце из охлаждаемого таким образом металла индуцировать сильный ток, то последний, повидимому, сохраняет свою интенсивность до тех пор, пока не начнет возрастать температура металла. Например, в свинцовом кольце, помещенном в жидком гелие, удавалось поддерживать ток в 200 А в продолжение многих часов.

При достаточном охлаждении такую сверхпроводимость показывают и другие металлы, причем температура перехода от состояния обычной проводимости к сверхпроводимости для различных металлов различна. В качестве примера можно привести следующую табличку:

Галлий	1°,05 К	Олово	3°,7 К
Торий	1°,5 „	Ртуть	4°,22 „
Титан	1°,75 „	Тантал	4°,4 „
Таллий	2°,37 „	Свинец	7°,2 „
Индий	3°,37 „	Ниобий	8°,2 „

Свойство сверхпроводимости обнаруживают не только чистые металлы, но также их сплавы и некоторые химические соединения. В качестве примера можно привести сернокислую медь, которая обладает таким свойством, хотя ни один из входящих в ее состав проводников не является сверхпроводником. То же самое наблюдается у целого ряда других солей, например у азотно-угле-борно-и кремнекислых солей молибдена, вольфрама, тантала, циркония и ниобия.

Указанная выше температура перехода, вообще говоря, повышается у тех металлов, к которым добавлены металлы группы висмута. Например, висмут повышает эту температуру для свинца с 7°,2 К до 8°,8 К или углерод повышает температуру для ниобия с 8°,2 до 10°,5 К. Далее, хотя ни чистое золото, ни чистый висмут не обладают свойством сверхпроводимости даже при самых низких температурах, их сплав становится сверхпроводником при 1°,94 К.

Переход от обычного состояния к сверхпроводящему для чистых металлов происходит в интервале нескольких сотых градуса. Для сплавов или химических соединений этот интервал обычно бывает шире.

---

* Настоящая статья представляет собой сокращенное изложение отчета Мак Леннана (McLennann „Nature" 130, 879, 1932) о дискуссии по электрической сверхпроводимости металлов. Дискуссия, в которой принимали участие Салде-Гааз, В. Мейснер и О. В. Ричардсон, состоялась на Конференции британской ассоциации в Иорке 2 сентября 1932 г.

Произведенные в последнее время исследования различных сплавов Ag — Sn, Au — Sn и Au — Pb привели к следующим результатам. Во-первых, в сплавах со сверхпроводящими элементами золото и серебро понижают температуру перехода, т. е. ведут себя противоположно висмуту, сурьме и мышьяку. Во-вторых, бинарные сплавы из сверхпроводника и не сверхпроводника не всегда имеют только одну температуру перехода. В-третьих, для указанных выше трех систем сплавов температуры перехода оказываются более высокими для эвтектических смесей, чем для химических соединений данных двух металлов.

Механические воздействия, например закручивание и растяжение, повышают температуру перехода. Коэфициент расширения, как показывают наблюдения на свинце, не показывает разрыва сплошности при прохождении через температуру перехода, т. е. 7°,2 K.

Под действием магнитного поля сверхпроводимость возникает при более низкой температуре, чем при нормальных условиях. Для того чтобы вернуть металл из сверхпроводящего состояния к нормальному, требуется некоторая критическая величина напряжения поля; например, для сплава висмута со свинцом при 1°,2 K требуется поле в 20 000 гаусс, а для чистого таллия при той же температуре поле около 15 гаусс.

Так как из-за отсутствия сопротивления у сверхпроводящих металлов при прохождении тока не выделяется никакого тепла, то через тонкие проволоки можно пропускать очень большие токи, например, более 1000 A. Наибольшая допустимая сила тока определяется тем магнитным полем, которое возникает за счет самого тока и которая влечет за собой восстановление сопротивления.

Недавно Мак Леннаном с сотрудниками производились наблюдения силы тока в различных сверхпроводниках одинаковых размеров. При этом токи в кольцах металлов индуцировались при помощи магнитного поля катушки, которая помещалась вблизи сверхпроводящих колец. Оказалось, что при слабых магнитных полях (от нуля до 25 гаусс) одинаковые изменения потока вызывают токи одинаковой силы в Ta, Pb и Sn. Отсюда следует, что сила тока в сверхпроводнике зависит не от рода металла, но только от его размеров и от формы и величины магнитного поля. Это и понятно, так как индуцированный ток при данном потоке определяется только величиной самоиндукции, которая благодаря одинаковым размерам колец была одна и та же, и величиной сопротивления, которое во всех трех случаях, конечно, было исчезающе мало. Выше 25 гаусс начинается отклонение кривой для олова от общей вначале прямой, а при 43 гауссах сила тока в олове начинает быстро убывать. Объясняется это тем, что магнитное поле для олова переходит указанное выше критическое значение, и сопротивление благодаря этому восстанавливается. Для тантала и свинца точка (130 гаусс, 245 A) все еще лежит на прежней прямой.

Для объяснения явлений сверхпроводимости были предложены теории (Дж. Дж. Томсон, О. В. Ричардсон и др.), согласно которым сверхпроводящее состояние зависит от какой-то ориентации. Если бы такое допущение было правильным, то в случае токов высокой частоты можно было бы ожидать наступления каких-либо новых явлений. Понятно, что всякие такие явления могли бы возникать только в том случае, если бы период колебаний поля был меньше так называемого „периода релаксации", т. е. того времени, которое требуется для установления такой ориентации. Примером такого рода может служить быстрое уменьшение диэлектрической постоянной для электрических полей высокой частоты, причем для льда при 0° C высокочастотные измерения позволяют установить, что „период релаксации" имеет порядок 10^{-6} сек. Аналогичные опыты, произведенные недавно Мак Леннаном с сотрудниками, привели к обнаружению у Pb, Sn и Ta в сверхпроводящем состоянии некоторых характеристических явлений, которые позволяют заключить, что „период релаксации" в данном случае имеет порядок 10^{-7} — 10^{-8} сек.

В качестве одного из таких явлений было взято поглощение сверхпроводниками β-лучей (от мезотория) тонким слоем свинца при температурах немного выше и немного ниже критической температуры перехода 7°,2 K. В этом случае не было обнаружено никакого скачка в коэфициенте поглощения во всем этом

интервале температур. Быстрые электроны от мезотория, повидимому, встречают в сверхпроводящем свинце такое же сопротивление, как и в свинце с нормальной проводимостью. Отсюда следует, что в то время как сопротивление в сверхпроводящем металле равно нулю для тока медленных электронов, в случае быстрых электронов оно сохраняет нормальную величину. Если этот результат толковать на основании волновой механики, то оказывается, что при самых низких температурах свинец не будет обнаруживать сверхпроводимости в случае электрических полей частоты порядка 10^{21} периодов.

Другой ряд опытов был произведен с фотоэлектронами, причем тонкие пленки свинца располагались на стеклянных или кварцевых пластинках. Интервал температур здесь был, примерно, такой же, как и в первой серии опытов. Измерения показали, что здесь также отсутствует скачок фотоэлектрического эффекта или коэфициента поглощения света при прохождении через температуру 7°,2 К. Теория здесь показывает, что сверхпроводимость свинца не может обнаруживаться, когда частота переменного электрического поля будет равна или больше 10^{14} периодов. Надо, однако, полагать, что, если сверхпроводимость существует для постоянного электрического поля, т. е. для поля нулевой частоты, то должно существовать какое-то критическое поле, которое будет иметь частоту между нулем и 10^{14} периодов, и при котором сверхпроводимость как раз будет исчезать.

Дальнейшие опыты и были произведены с электрическими полями радиочастот, причем оказалось, что при частоте $1{,}1 \cdot 10^7$ периодов свинцовая проволока показывает резкую потерю сопротивления при температуре, несколько более низкой, чем критическая температура 7°,2 К, характеризующая переход к сверхпроводимости той же проволоки при постоянном токе. В случае олова, где этот переход при постоянном токе начинается при температуре 3°,76 К и заканчивается при 3°,70 К, соответствующие температуры при высокой частоте понижаются до 6°,67 К и 3°,61 К. Дальнейшие опыты с высокой частотой позволили установить зависимость этого понижения температуры от частоты. Экстраполяция этой кривой, которая протекает почти линейно, дает для 0° К частоту 10^9 периодов в секунду. Аналогичные результаты были получены и с проволоками из сплава Bi — Pb. Весьма интересно, что наблюдаемое понижение критической температуры не зависит от силы высокочастотных токов, почему его, повидимому, нельзя приписывать ни нагреванию проволоки выше температуры окружающего гелия, ни влиянию магнитного поля токов. Опыты с проволоками различных размеров при одной и то же частоте показывают, что понижение температуры перехода не является непосредственной функцией „скин-эффекта", так что явление частоты тока в самом металле приходится считать несомненным.

С точки зрения объяснения явлений сверхпроводимости очень большой интерес представляют собой опыты с пропусканием через сверхпроводник одновременно постоянного тока и переменного тока высокой частоты. Один из таких опытов был произведен с танталом. Оказывается, что, если измерять сопротивление постоянному току, то кривые зависимости этого сопротивления от температуры в присутствии переменного тока показывают отставание в появлении сверхпроводимости. Однако наличие тока высокой частоты в проволоке не сказывается на той температуре, при которой переход в сверхпроводящее состояние заканчивается. Несомненно, что здесь играет роль именно „скин-эффект", так как разрушающее действие токов высокой частоты при температурах проволоки, достаточно низких для того, чтобы она была сверхпроводником при измерениях проводимости постоянного тока, ограничивается только внешними слоями проволоки.

Поэтому, в другом опыте была взята константановая проволока диаметром 0,16 *мм*, „натертая" оловом, слой которого при средней толщине в 0,002 *мм* уменьшал сопротивление проволоки при комнатной температуре, примерно, на 7%. При температуре, немного более высокой, чем критическая температура, сопротивление константана по вычислениям было, примерно, в тридцать раз больше, чем у слоя олова. Здесь, как и в предыдущем случае, сопротивление

слоя олова постоянному току изменялось так, что кривая в присутствии токов высокой частоты смещалась в сторону низких температур. При увеличении отношения силы тока высокой частоты к силе постоянного тока это смещение делается больше. С такой же покрытой оловом проволокой производились наблюдения сопротивления оболочки токам высокой частоты. Здесь, наоборот, оказывается, что, если к току высокой частоты добавлять постоянный ток, то сопротивление токам высокой частоты частично или полностью исчезает. Все эти опыты с переменными токами высокой частоты, повидимому, подтверждают заключение, что возникновение сверхпроводящего состояния в металлах связано с какими-то явлениями поляризации или ориентации.

Для объяснения явлений сверхпроводимости де-Гааз предполагает, что, когда металлы переходят в сверхпроводящее состояние, электроны переходят в новую фазу. Этот взгляд подтверждается некоторыми опытами по проводимости однокристаллов. Де-Гааз находит, что область температур, на протяжении которой происходит переход к сверхпроводящему состоянию, не превосходит 0°,0005. Далее сплавы золота с висмутом становятся сверхпроводниками, хотя ни чистое золото, ни чистый висмут в сверхпроводящее состояние не переходят; рентгеновские исследования показывают, что эти сплавы имеют свою собственную кристаллическую решетку. Такое же влияние оказывает форма и в случае серого и белого олова, из которых сверхпроводником бывает только последнее.

Исследования теплопроводности сверхпроводников указывают на существование связи между этим свойством и сверхпроводимостью. Например, индий показывает внезапное увеличение теплопроводности вблизи критической точки. То же самое наблюдается и в случае олова.

Сходство между сверхпроводимостью и ферромагнетизмом заставило искать аномалии в удельной теплоемкости сверхпроводников вблизи критической точки. Правда, здесь не удалось обнаружить ожидавшейся аномалии, но это объясняется тем, что число электронов, с которыми связано существование сверхпроводимости, по сравнению с общим их числом или с числом атомов слишком мало, чтобы они могли оказать заметное влияние на удельную теплоемкость. Возможно также существование какого-то компенсирующего влияния атомов, которое уравновешивает всякие изменения в удельной теплоемкости, возникающие за счет изменения энергии электронов.

Наконец, определение удельной теплоты электричества (эффект Томсона) на основании термоэлектрических измерений на свинце и золоте указывает на существование аномалии, правда, охватывающей несколько более широкий интервал температур, чем переход к состоянию сверхпроводимости. Эта аномалия совершенно сходна с соответствующей аномалией в случае ферромагнитных веществ вблизи точки Кюри, так что, если считать, что она действительно связана с наступлением сверхпроводимости, то естественным будет заключение, что мы имеем дело с изменением энергии электрона при переходе его от несверхпроводящего состояния к сверхпроводящему. На основании величин магнитного поля и частоты, которые требуются для нарушения сверхпроводящего состояния, это изменение электронной энергии удается приближенно вычислить.

Такого рода опыты привели к созданию теории, согласно которой сверхпроводящие электроны в металле образуют собственную кристаллическую решетку в дополнение к той решетке, которая образована атомными ионами металла, причем движение этой электронной решетки через решетку металла может происходить без рассеяния энергии даже в том случае, когда решетка металла находится в состоянии теплового движения. Температуру перехода металла от сверхпроводящего состояния к обычному можно рассматривать как точку плавления электронной решетки. При помощи этой теории удается объяснить многие явления, связанные со сверхпроводимостью в металлах. Окончательного подтверждения теории можно будет ожидать, вероятно, после изучения сверхпроводимости монокристаллов металлов, в каком направлении сейчас и начаты соответствующие исследования.

Н. А. Шишаков