

Поглощение энергии электромагнитного поля частоты ν наступает при выполнении условия

$$h\nu = g_N \mu_N \mu_0 H_0, \quad (10.62)$$

аналогичного условию (10.60) для ЭПР. Так как масса ядра примерно в 10^3 раз больше массы электрона, $\mu_N \approx 10^{-3} \mu_B$. Это приводит к тому, что резонансная частота ЯМР заметно меньше частоты ЭПР. В случае протона, например, в поле $\mu_0 H_0 = 1$ Тл, она составляет 42,6 МГц.

Метод ЯМР нашел наиболее широкое применение не в физике твердого тела, а в органической химии, где он успешно применяется в основном для определения структуры сложных молекул.

Кроме ЭПР и ЯМР в твердых телах могут существовать еще и другие типы магнитных резонансов: циклотронный резонанс, электронный ферромагнитный резонанс, электронный антиферромагнитный резонанс. Подробное описание этих явлений можно найти в книге С. В. Вонсовского.

ГЛАВА 11

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

В 1911 г., проводя эксперименты по исследованию влияния примесей на остаточное сопротивление металлов, голландский физик Г. Камерлинг-Оннес обнаружил новое явление, получившее название *сверхпроводимости*. Изучая зависимость сопротивления ртути от температуры, он установил, что при очень низких температурах сопротивление образца обращалось в нуль. Сам по себе этот факт не казался неожиданным. Согласно существовавшим в то время представлениям, и как оказалось правильным, сопротивление очень чистых металлов определяется движением атомов. Поэтому в чистых металлах следовало ожидать плавного уменьшения сопротивления до нуля при понижении температуры до 0 К. Неожиданным оказалось то, что исчезновение сопротивления происходило скачком в температурном интервале в несколько сотых долей градуса. Как выяснилось впоследствии, такое «сверхпроводящее» состояние при низких температурах наблюдается примерно у половины металлических элементов, большого числа металлических соединений, у ряда полупроводников и оксидов.

Почти полвека обнаруженное Камерлинг-Оннесом явление оставалось загадкой. Микроскопическая теория сверхпроводимости была создана Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером только в 1957 г. Эта теория, получившая название теории БКШ, достаточно сложна, и в рамках настоящей книги мы приведем лишь краткий обзор физических идей, лежащих в ее основе, а также основные результаты. Прежде, однако, целесо-

образно остановиться на обсуждении свойств сверхпроводников, изученных в различных экспериментах.

11.1. НУЛЕВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

В предыдущих главах (гл. 6, 8) мы обсуждали механизм электропроводности металлов. Ток в металле переносится электронами проводимости, которые описываются функцией Блоха. Эти блоховские электроны, представляющие собой плоские волны, модулированные с периодом решетки, обладают свойством проходить через идеальную периодическую решетку без рассеяния. Это означает, что если через идеальный кристалл пропустить ток (т. е. сообщить электронам проводимости суммарный импульс в определенном направлении), он будет течь без сопротивления. Однако любые нарушения идеальной периодичности кристалла приводят к рассеянию электронов, т. е. к появлению некоторого сопротивления. Основным механизмом рассеяния при высоких температурах ($T \gg \theta_D$) является рассеяние на фононах. При понижении температуры концентрация фононов уменьшается, процессы рассеяния происходят реже и сопротивление кристалла уменьшается линейно. При

$T \lesssim \frac{\theta_D}{3}$ сопротивление изменяется, как T^5 . В области низких температур ($T \ll \theta_D$) основной вклад в сопротивление дает рассеяние на примесях и дефектах, не зависящее от температуры.

Таким образом, при изучении температурных зависимостей удельного сопротивления металлов следовало ожидать получения кривых $\rho(T)$, подобных изображенному на рис. 11.1. Однако то, что наблюдал Г. Камерлинг-Оннес при низких температурах для ртути было не похоже на ожидаемое снижение сопротивления. При температуре 4,2 К удельное сопротивление скачком обращалось в нуль (рис. 11.2).

Неожиданным также оказалось и то, что добавление примесей к ртути не приводило к появлению остаточного сопротивления ρ_{pp} , т. е. образцы также переходили в сверхпроводящее состояние. Температура T_c , при которой сопротивление резко обращается в нуль, получила название *температуры сверхпроводящего перехода* или *критической температуры*.

Мы уже несколько раз использовали выражения «сопротивление обращается в нуль» или «исчезновение сопротивления». Однако встает вопрос, насколько правомерно говорить об исчезновении сопротивления? Ясно, что в любом эксперименте невозможно совершенно точно доказать равенство сопротивления нулю. Можно лишь говорить, что сопротивление становится ниже предела чувствительности аппаратуры и таким образом его не удается измерить.

В первых экспериментах по сверхпроводимости, когда ис-

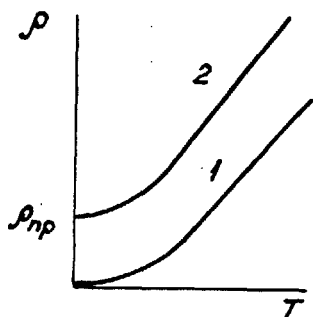


Рис. 11.1. Ожидаемые зависимости удельного сопротивления металлов от температуры: 1 — для идеального металла. 2 — для металла с примесями или дефектами

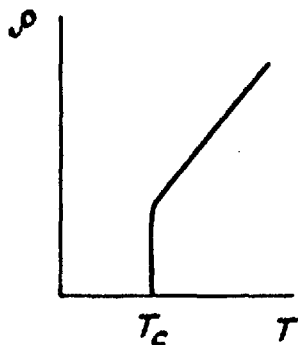


Рис. 11.2. Исчезновение сопротивления при низких температурах

пользовалась обычная методика измерения сопротивления (измерялось падение напряжения на образце при протекании через него электрического тока) было лишь установлено, что сопротивление при $T=T_c$ уменьшается более чем в тысячу раз. Однако уже в 1914 г. Камерлинг-Оннес применил более чувствительную методику. Он измерял затухание тока в замкнутом сверхпроводящем кольце*. Если проводник, из которого сделано кольцо, обладает сопротивлением, то энергия, запасенная в таком кольце, постепенно превращается в джоулево тепло. Ток при этом уменьшается в соответствии с выражением (11.1):

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L} t\right), \quad (11.1)$$

где L — индуктивность кольца, R — его сопротивление, t — время, I_0 — начальный ток.

Таким образом, надо лишь следить за изменением тока. Обычно для этого измеряют магнитное поле, созданное циркулирующим током, и таким образом, определяют затухание тока со временем. Измерение магнитного поля не ведет к потере энергии в кольце и поэтому можно увидеть, будет ли ток протекать по кольцу бесконечно.

По оценкам Кеммерлинг-Оннеса удельное сопротивление

* Ток в кольце можно создать следующим образом. Поместим кольцо из сверхпроводящего материала при $T > T_c$ в магнитное поле. Затем охладим кольцо до $T < T_c$ и выключим поле. Возникающее при этом изменение магнитного потока через кольцо приведет к возникновению в нем индукционного тока.

свинца в сверхпроводящем состоянии не превышало 10^{-18} Ом·см, тогда как при T , превышающей T_C , т. е. в нормальном состоянии, свинец имел $\rho=10^{-9}$ Ом·см. В настоящее время с использованием очень чувствительных методов измерения тока в сверхпроводящем кольце установлено, что скачок сопротивления составляет по крайней мере 14 порядков. Удельное сопротивление металла в сверхпроводящем состоянии оценивается не более чем 10^{-23} Ом·см, т. е. оно в 10^{17} раз меньше удельного сопротивления меди при комнатной температуре. Время, требуемое для затухания тока, наведенного в таком сверхпроводящем кольце, составляет не менее 100000 лет. Таким образом, можно с полным правом считать, что в сверхпроводящем состоянии электрическое сопротивление действительно исчезает. Следует заметить однако, что на переменном токе при $T < T_C$ небольшие потери существуют на всех частотах.

Заметим в заключение, что нулевое сопротивление, которым при $T=0$ К должен был бы обладать гипотетический идеальный кристалл, не является сверхпроводимостью. Введение в такой кристалл примесей приводит к возникновению остаточного сопротивления. Переход в сверхпроводящее состояние может произойти и в сильно загрязненном кристалле.

11.2. ТЕМПЕРАТУРА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПЕРЕХОДА

В течение короткого времени после открытия явления сверхпроводимости Камерлинг-Оннесу удалось показать, что не только ртуть, но и другие металлы, например, свинец и олово, переходят при низких температурах в сверхпроводящее состояние. Как уже отмечалось выше, в настоящее время сверхпроводимость обнаружена примерно у половины металлических элементов и огромного числа соединений и сплавов. Измеренные значения критических температур T_C для металлических элементов приведены в таблице 11.1. Видно, что T_C для таких сверхпроводников лежат в интервале от нескольких тысячных Кельвина до температуры несколько меньших 10 К.

Многие металлические элементы не переходили в сверхпроводящее состояние вплоть до самых низких температур, при которых проводились измерения (несколько тысячных Кельвина). Так, сверхпроводимость пока не обнаружена у всех металлов первой группы, кроме цезия, который становится сверхпроводником при $T_C=1,5$ К под давлением 110 кбар. Под давлением переходят в сверхпроводящее состояние и ряд других элементов, например, As, Ba, Bi, Ce, Ge, Sb, P, Se и др.

Есть теоретические предсказания, что натрий и калий могут быть сверхпроводниками при температурах меньше, чем 10^{-5} К. Однако до настоящего времени нет достаточно обоснованного ответа на вопрос: могут ли все металлы (немагнитные) пере-