

§ 20.8. Явление сверхпроводимости

1. В § 8.7 и 13.1 мы говорили о том, что удельное электрическое сопротивление чистых металлов пропорционально их абсолютной температуре. Однако, как показывают опыты, эта зависимость справедлива лишь при средних температурах. При достаточно низких температурах удельное сопротивление металлов стремится к некоторому пределу, называемому **остаточным удельным сопротивлением**.

Характер зависимости удельного сопротивления ρ металлического проводника от его температуры T показан на рис. 20.21, где ρ_0 — удельное сопротивление этого же проводника при 0°C . На рис. 20.22 приведены температурные зависимости удельного сопротивления различных образцов золота. Кривые на рис. 20.22 отличаются друг от друга лишь величинами остаточного сопротивления и могут быть переведены одна в другую параллельным переносом вдоль оси ординат.

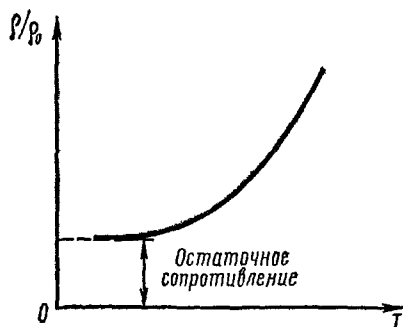


Рис. 20.21

Чем химически чище металл и чем меньше в нем различных неоднородностей, обусловленных внутренними напряжениями, тем меньше его остаточное сопротивление. Для идеально чистого, ненапряженного металла с неискаженной кристаллической решеткой остаточное сопротивление должно обратиться в нуль, т. е. $\rho \rightarrow 0$ при $T \rightarrow 0$. К такому же выводу приводит квантовая теория электрических свойств металлов (см. § 13.1).

2. Измерение сопротивления при очень низких температурах представляет собой сложную задачу. Трудность ее заключается прежде всего в необходимости осуществления крайне низких температур. Температура до $0,7\text{ K}$ была достигнута испарением жидкого гелия при пониженном давлении. Более низкие температуры получаются методом адиабатического размагничивания парамагнитных солей. Наиболее низкая температура, достигнутая таким способом, составляет $0,003\text{ K}$.

В 1911 г. голландский ученый Х. Камерлинг-Оннес провел эксперимен-

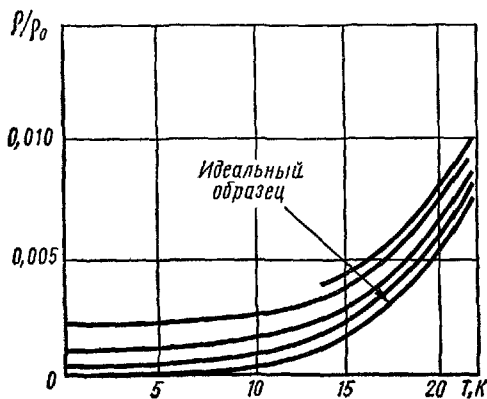


Рис. 20.22

тальное исследование удельного сопротивления чистой ртути при низких температурах. Опыты Камерлинг-Оннеса проводились следующим образом. Замкнутый проводник из твердой ртути помещался между полюсами электромагнита. При выключении тока из обмотке электромагнита в проводнике возникал индукционный ток, который при обычных условиях весьма быстро затухал. Однако при охлаждении ртути жидким гелием до температуры ниже 4,21 К сопротивление ртути резко уменьшалось и индукционный ток продолжал идти по проводнику в течение многих часов без сколько-нибудь заметного ослабления. По уточненным данным, резкое падение сопротивления ртути наступает при $T = 4,15$ К. Это явление получило название **сверхпроводимости**, а вещества, обладающие таким свойством, были названы **сверхпроводниками**. Явление сверхпроводимости было обнаружено еще у двадцати двух металлов (свинца, цинка, алюминия и др.). Известно также большое число сверхпроводящих сплавов (сплав висмута и золота, карбиды молибдена и вольфрама, нитрид ниобия и др.).

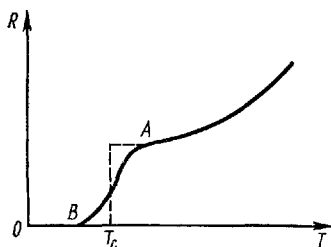


Рис. 20.23

Температурная зависимость сопротивления сверхпроводников изображена на рис. 20.23. Температурный интервал, соответствующий переходной области AB возникновения сверхпроводимости, зависит от неоднородности металла и в первую очередь от наличия примесей и внутренних напряжений. Для химически чистых образцов он не превышает тысячных долей градуса. Поэтому можно говорить о вполне определенном значении температуры перехода в сверхпроводящее состояние T_c , которую часто называют также критической температурой. При заметной ширине области AB под T_c обычно понимают температуру, при которой сопротивление равно половине сопротивления соответствующей точке A . Температуры T_c у чистых металлов лежат в пределах от 0,35 К (для гафния) до 9,2 К (для ниобия), а у сплавов — от 0,155 К (Bi_2Pt) до 23,2 К (Nb_3Ge).

3. Одновалентные металлы, являющиеся наилучшими проводниками, не переходят в сверхпроводящее состояние вплоть до предельно низких температур, при которых проводились опыты (например, для золота — до 0,0204 К, для меди — до 0,0156 К). В настоящее время нет оснований для установления связи между явлением сверхпроводимости чистых металлов и их расположением в периодической системе элементов Менделеева, хотя известно, что сверхпроводники образуют в этой системе несколько компактных групп.

Прямой связи между строением кристаллической решетки и сверхпроводимостью не обнаружено. Однако установлено, что строение решетки играет роль в явлении сверхпроводимости. Так, например, белое олово является сверхпроводником, а серое — нет. Для лантана с кубической гранцентрированной решеткой температура перехода T_c сов-

тавляет 5,4 К, а для модификации лантана с гексагональной решеткой она равна 3,9 К. Влияние кристаллической структуры на температуру перехода было обнаружено также при исследовании более 30 сверхпроводящих химических соединений, которые можно было получить при низкой температуре в различных кристаллических модификациях.

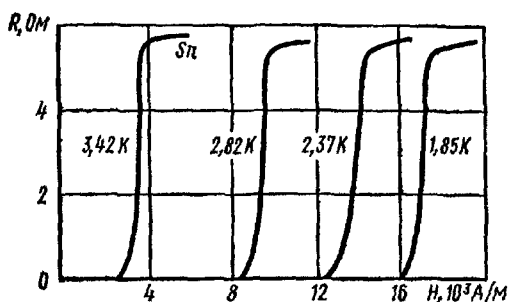


Рис. 20.24



Рис. 20.25

Большое значение для выяснения природы сверхпроводимости имеет **изотопический эффект**, заключающийся в том, что температуры T_c перехода в сверхпроводящее состояние у различных изотопов одного и того же металла неодинаковы. В первом приближении можно считать, что температуры T_c обратно пропорциональны квадратным корням из атомных масс изотопов.

4. В 1914 г. Камерлинг-Оннес экспериментально установил, что при постоянной температуре сверхпроводящее состояние вещества нарушается при внесении его в достаточно сильное магнитное поле. Дальнейшие исследования показали, что влияние магнитного поля на явление сверхпроводимости сводится к понижению температуры, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние. На рис. 20.24 изображены кривые зависимости сопротивления R образца, изготовленного из белого олова, от напряженности H магнитного поля при различных температурах. Магнитное поле, вызывающее при данной температуре переход вещества из сверхпроводящего состояния в нормальное, называется **критическим полем**. Его напряженность обозначается через H_c . С понижением температуры сверхпроводника напряженность критического поля увеличивается (рис. 20.25). В первом приближении можно считать, что

$$H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2].$$

Область под кривой соответствует сверхпроводящему состоянию металла, а область над кривой — его нормальному состоянию.

Сверхпроводящие свойства проводника исчезают при пропускании через него достаточно сильного электрического тока, что связано с действием на проводник магнитного поля этого тока.

5. Через 20 лет после открытия сверхпроводимости были экспериментально установлены существенные различия магнитных свойств

вещества в нормальном и сверхпроводящем состояниях. Выяснилось, что внешнее магнитное поле не проникает в толщу сверхпроводника, т. е. магнитная индукция B внутри сверхпроводника всегда равна нулю. Это справедливо только в случае полей, более слабых, чем критическое.

На рис. 20.26 и 20.27 показаны расположения линий магнитной индукции вблизи цилиндрического сверхпроводника, внесенного в одно-

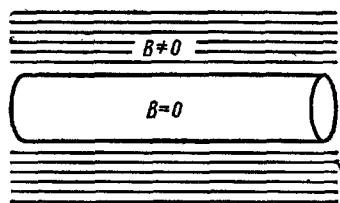


Рис. 20.26

родное внешнее магнитное поле, направленные в первом случае вдоль оси сверхпроводника, а во втором — перпендикулярно ей. Таким образом, сверхпроводник как бы «выталкивает» магнитное поле из занимаемой им части пространства, т. е. ведет себя как идеальный диамагнетик с магнитной восприимчивостью $\chi = -1$. Действительно, согласно (20.29) при этом значении χ относительная магнитная проницаемость $\mu = 0$ и $B = \mu \mu_0 H = 0$. В реальных сверхпроводниках существует некоторая глубина проникновения δ магнитного поля. Экспериментально установлено, что распределение поля по глубине сверхпроводника зависит от геометрической формы образца и его температуры. При температурах, которые на 1—2 К ниже температуры перехода, глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводники имеет величину порядка 10^{-5} см. Поэтому в тонких сверхпроводящих пленках толщиной в 10^{-5} см и меньше магнитное поле нигде не равно нулю. Такие пленки сверхпроводников нельзя рассматривать как идеальные диамагнетики.

6. Переход в сверхпроводящее состояние сопровождается не только существенным изменением магнитных свойств вещества, но и изменением его тепловых свойств. Так, в отсутствие магнитного поля при температуре перехода T_c скачкообразно изменяется теплоемкость. При наличии магнитного поля изотермический переход из сверхпроводящего состояния в нормальное связан как со скачкообразным изменением теплоемкости, так и с поглощением теплоты, а обратный переход — с ее выделением. Кроме того, при этом скачкообразно изменяется теплопроводность вещества.

Указанные экспериментальные факты легли в основу термодинамической теории сверхпроводимости, в которой сверхпроводящее и нормальное состояния рассматриваются как две различные фазы вещества. Эти фазы переходят одна в другую при определенных значениях параметров состояния: температуры T и напряженности H магнитного поля, соответствующих кривой $H_c = f(T)$ на рис. 20.25. Здесь имеет место известная аналогия с переходом вещества из жидкого состояния в газообразное (см. т. I, § 15.5). Переход сверхпроводника в нормальное со-

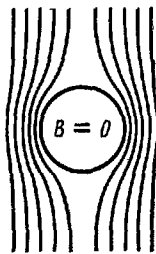


Рис. 20.27

стояние под действием магнитного поля, т. е. при $T < T_c$, подобен фазовому переходу первого рода, наблюдающемуся в жидкости при докритической температуре ($T < T_k$). Переход сверхпроводника в нормальное состояние при отсутствии магнитного поля, т. е. при $T = T_c$, соответствует фазовому переходу второго рода, происходящему в жидкости при ее нагревании до критической температуры T_k .

7. Термодинамическая теория сверхпроводимости позволила формально объяснить основные экспериментальные факты. Однако основной вопрос о природе явления сверхпроводимости остался открытым. Выяснить это удалось лишь в самое последнее время благодаря созданию законченной микроскопической (статистической) теории сверхпроводимости, решающий вклад в которую был внесен в 1957 г. советским физиком Н. Н. Боголюбовым. Мы кратко остановимся лишь на качественной стороне теории сверхпроводимости, так как для ее полного рассмотрения необходимо применение квантовой механики.

8. Очень малое значение удельного сопротивления вещества в сверхпроводящем состоянии свидетельствует о том, что электроны проводимости движутся в сверхпроводнике беспрепятственно — без «трения» об узлы кристаллической решетки. Таким образом, между явлениями сверхпроводимости и сверхтекучести гелия II (см. т. I, §13.6) имеется глубокая аналогия: **сверхпроводимость есть не что иное, как сверхтекучесть электронов в металле.**

В §13.1 мы говорили о том, что электрическое сопротивление металлических проводников обусловлено рассеянием электронов на тепловых колебаниях кристаллической решетки. Эти колебания эквивалентны распространению в кристалле звуковых волн, которые, как показывается в квантовой механике, можно заменить совокупностью «частиц» — фононов, движущихся в кристалле со скоростью звука. Фононы обладают энергией $h\nu$, где h — постоянная Планка и ν — частота колебаний узлов решетки, а также импульсом (количеством движения), численно равным $h\nu/u$, где u — скорость звука. Таким образом, электрическое сопротивление кристаллических проводников является результатом рассеяния электронов проводимости на фононах.

В 1950 г. была высказана важная идея о том, что при некоторых условиях взаимодействие электронов с фононами может явиться причиной перехода вещества в сверхпроводящее состояние. Дело в том, что это взаимодействие приводит к возникновению обменного взаимодействия между самими электронами, которое имеет квантовомеханическую природу и состоит в их **взаимном притяжении**. Математическое решение этой весьма сложной задачи квантовой статистики было дано в 1957 г. Н. Н. Боголюбовым, который, кроме того, учел электростатическое отталкивание между электронами. Оказалось, что обменное взаимодействие особенно велико для пар электронов, имеющих противоположные спины и импульсы. При некоторых условиях взаимное притяжение между такими электронами может значительно превышать их электростатическое отталкивание. Благодаря этому

сильному взаимодействию электроны проводимости в металле образуют связанный коллектив, который не может отдавать энергию малыми частями. Поэтому соударения с узлами решетки не изменяют энергию электронов проводимости и металл ведет себя как идеальный сверхпроводник с нулевым удельным сопротивлением.

Чтобы нарушить связь какого-либо электрона с другими электронами коллектива, необходимо затратить определенную энергию, соответствующую средней энергии тепловых колебаний узлов решетки при температуре перехода T_c . Поэтому при $T > T_c$ сверхпроводящее состояние не существует.

Последовательное проведение этих идей позволило построить теорию сверхпроводимости, в которой нашли свое объяснение все свойства сверхпроводников. Особенно необходимо отметить следующий результат: теоретически получены критерии того, что в системе взаимодействующих электронов могут возникать связанные состояния, т. е. будет иметь место сверхпроводимость. К сожалению, эти критерии не имеют прямой связи с такими простейшими характеристиками элементов, как атомная масса, порядковый номер, валентность и др.

Найденные теоретическим путем зависимость температуры перехода от атомных масс различных изотопов сверхпроводящего металла и зависимость напряженности критического магнитного поля от температуры хорошо согласуются с данными экспериментов. Получили истолкование магнитные и тепловые свойства сверхпроводников.

Вопросы для повторения

1. Как действует внешнее магнитное поле на орбитальный магнитный момент электрона в атоме?
2. Какие вещества называются диамагнетиками? Что происходит с диамагнетиком при его внесении в магнитное поле?
3. Какие вещества называются парамагнетиками? Что происходит с парамагнетиком при его внесении в магнитное поле?
4. Что называется вектором намагниченности и как он связан с индукцией магнитного поля?
5. Чем различаются магнитные свойства диа- и парамагнетиков?
6. Как связаны между собой векторы магнитной индукции, напряженности магнитного поля намагниченности? Каково соотношение между относительной магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью диа- и парамагнетиков?
7. Чему равна циркуляция вдоль замкнутого контура: а) вектора напряженности магнитного поля; б) вектора намагниченности; в) вектора магнитной индукции?
8. Изложите метод исследования ферромагнетиков, предложенный А. Г. Столетовым. Каковы результаты его опытов?
9. Каковы особенности магнитных свойств ферромагнетиков?
10. В чем состоял опыт Эйнштейна и де-Гааза и каково его значение для выяснения природы ферромагнетизма?
11. Изложите основы классической теории ферромагнетизма и приведите опыты, подтверждающие доменную структуру ферромагнетиков.
12. В чем состоит явление сверхпроводимости? Изложите основные результаты экспериментальных исследований этого явления.