

даже при температурах в тысячи градусов. Только у незначительной части электронов при достаточно высоких температурах энергии оказываются распределенными по закону, близкому к закону Максвелла — Больцмана, что проявляется при «испарении» электронов из металлов (§ 50).

Вследствие того, что энергия подавляющего большинства электронов в металле не зависит от температуры, их доля в теплоемкости, очевидно, равна нулю, так как теплоемкость является не чем иным, как приращением внутренней энергии при повышении температуры на один градус.

Вычисление по принципам квантовой статистики средней длины свободного пробега λ электронов в металле обнаружило, что $\frac{1}{\lambda}$ изменяется для разных металлов так, как показано на рис. 96. Поэтому электрическое сопротивление, пропорциональное величине $\frac{1}{\lambda}$, при

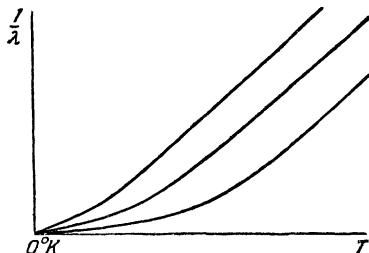


Рис. 96. Зависимость между длиной λ свободного пробега электронов в металле и абсолютной температурой (по выводам квантовой статистики)

высоких температурах растет примерно пропорционально абсолютной температуре, а при низких — несколько медленнее. Для константы закона Видемана — Франца Зоммерфельд получил вместо коэффициента 3 коэффициент $\frac{\pi^2}{3}$, что лучше соответствует данным опыта.

Последующее развитие квантовой теории электропроводности позволило с единой точки зрения (на основе представления об энергетических зонах) объяснить разнообразные электрические свойства проводников, изоляторов и полупроводников. Об этом рассказано в § 35.

§ 31. Сверхпроводимость

В 1911 г. голландский ученый Камерлинг-Оннес, изучая электропроводность ртути при весьма низких температурах, открыл интереснейшее явление — *сверхпроводимость*. Явление сверхпроводимости заключается в том, что ртуть, свинец, цинк, алюминий и некоторые другие металлы при глубоком охлаждении до весьма низкой температуры внезапно при 2—8° К полностью утрачивают свое сопротивление электрическому току.

Электрическое сопротивление при понижении температуры уменьшается плавно и в области весьма низких температур обычно

с определенным замедлением (рис. 97). Но у некоторых металлов при характерной для каждого из них температуре — при «точке превращения в сверхпроводник» — сопротивление вдруг скачком убывает по меньшей мере в десятки миллиардов раз, вероятно до полного исчезновения (рис. 98). Во всяком случае, несмотря на исключительную чувствительность применяемых методов измерения, электрическое сопротивление в состоянии сверхпроводимости оказывается необнаружимо малым и, возможно, нулевым.

Когда через тонкую свинцовую проволоку, находящуюся в состоянии сверхпроводимости, проходит ток плотностью в тысячи

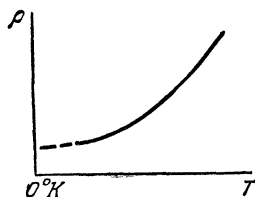


Рис. 97. Обычный характер зависимости сопротивления от температуры в области низких температур.

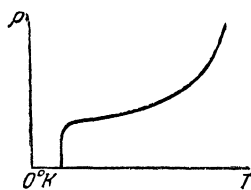


Рис. 98. Скачок исчезновения сопротивления для сверхпроводника.

ампер на квадратный сантиметр, никакого падения потенциала между концами проволоки не замечается. Не замечается также никакого выделения тепла током.

Ток, однажды возбужденный в замкнутом сверхпроводящем кольце, не уменьшается в величине десятки часов — все время, пока сохраняется состояние глубокого охлаждения, обеспечивающее сверхпроводимость.

Переход в состояние сверхпроводимости не сопровождается какими-либо резкими изменениями других свойств металла (не считая магнитных). Исследованиями Кеезома и де Гааза установлено, что переход в состояние сверхпроводимости не связан с какими-либо изменениями в строении кристаллической решетки. Установлено, что в момент возникновения сверхпроводимости (в немагнитном металле) не происходит ни выделения, ни поглощения тепла; коэффициент теплового расширения не изменяется; только теплоемкость (весьма малая при низких температурах) испытывает небольшой скачок в сторону возрастания.

Опыты, проведенные Шенбергом (1937 г.), показали, что интенсивное намагничивание сверхпроводника способно разрушить его сверхпроводимость. Это обстоятельство налагает ограничение на допустимую плотность тока в сверхпроводнике: магнитное поле чрезмерно большого тока вызывает исчезновение сверхпроводимости. Однако при уменьшении величины тока или при более глу-

боком охлаждении состояние сверхпроводимости вновь восстанавливается.

Ряд исследований показал, что в совершенно чистом металле в состоянии сверхпроводимости весь ток проходит по поверхности металла, сам же металл становится непроницаемым для магнитного и электрического полей. Таким образом, термин «сверхпроводимость» оказалось возможным рассматривать как имеющий даже геометрический смысл, а именно смысл такого состояния металла, когда ток проходит «сверх» (или «поверх») металла, не проникая внутрь. Естественно, что физические и химические особенности металла не сказываются в виде сопротивления току, который протекает «поверх» металла. Но это, конечно, еще не объясняет сущности явления.

Тонкие эксперименты, осуществленные членом-корр. Академии наук СССР А. И. Шальниковым, доказали, что глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник составляет десятитысячные доли миллиметра. Последующие опыты А. И. Шальникова (1947 г.) обнаружили, что переход к сверхпроводимости куска металла при глубоком охлаждении происходит через промежуточное состояние, когда (в согласии с теорией, развитой акад. Л. Д. Ландау) наблюдается расслоение металла на тонкие слои сверхпроводимости, чередующиеся со слоями нормальной проводимости.

Явление сверхпроводимости обнаружено у 23 металлов и у многих сплавов. Температуры, при которых металл, когда его охлаждают, внезапно обнаруживает сверхпроводимость, — точки превращения в сверхпроводник — для некоторых металлов приведены в помещенной здесь таблице.

Точки превращения в сверхпроводник по шкале абсолютной температуры

Металл	°К	Металл	°К
Технеций	11,7	Олово	3,69
Ниобий	9,22	Алюминий	1,14
Свинец	7,26	Уран	1,30
Ванадий	4,3	Цинк	0,79
Ртуть	4,19	Гафний	0,35

Рис. 99 показывает, как происходит падение сопротивления, когда металл охлажден до точки превращения в сверхпроводник.

Металлы, которые при глубоком охлаждении становятся сверхпроводниками, при комнатной температуре отнюдь не являются лучшими проводниками. Напротив, у лучших проводников — меди,

серебра и золота — состояние сверхпроводимости не обнаружено, несмотря на то, что их охлаждение доводилось до температур, предельно близких к абсолютному нулю.

Все металлы, превращающиеся при глубоком охлаждении в сверхпроводники, составляют в периодической системе элементов Д. И. Менделеева компактную группу, очерченную на рис. 100 рамкой.

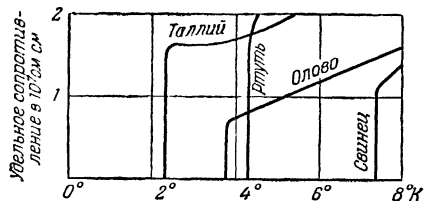


Рис. 99. Температурный ход удельного сопротивления металлов близ абсолютного нуля (сверхпроводимость).

Явление сверхпроводимости наблюдается также у многих сплавов. Замечательно, что сверхпроводящими сплавами при низких температурах оказываются не только сплавы металлов-сверхпроводников, но также некоторые сплавы с преобладанием металла,

который в чистом виде не обнаруживает сверхпроводимости. Имеются даже такие сверхпроводящие сплавы и соединения, которые

Период	Ряд	Группы								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0
I	1	H								He
II	2	Li	Be	B	C	N	O	F		Ne
III	3	Na	Mg	Al 1,14°	Si	P	S	Cl		Ar
IV	4	K	Ca	Sc	Ti 0,53°	V 4,3°	Cr	Mn	Fe Co Ni	
	5	Cu	Zn 0,79°	Ga 1,06°	Ge	As	Se	Br		Kr
V	6	Rb	Sr	Y	Zr 0,7°	Nb 9,2°	Mo	Tc 11,7°	Ru Rh Pd	
	7	Ag	Cd 0,54°	In 3,37°	Sn 3,69°	Sb	Te	J		Xe
VI	8	Cs	Ba	La 4,71°	Hf 0,35°	Ta 4,38°	W	Re 0,85°	Os Ir Pt	
	9	Au	Hg 4,12°	Tl 2,39°	Pb 7,26°	Bi	Po			Rn
VII	10	Fr	Ra	Ac	Th 1,37°	Pa	U 1,30°			

Рис. 100. Положение сверхпроводящих элементов в периодической системе Менделеева. Цифры под символами элементов — температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

полностью состоят из элементов, не принадлежащих к сверхпроводникам. Таковы сплавы висмута и золота Au_2Bi , карбиды молибдена и вольфрама (MoC , Mo_2C , WC). Полупроводник CuS при $1,6^\circ K$ становится сверхпроводником.

Самыми высокими точками превращения в состояние сверхпроводимости обладают: ниобий Nb ($9,2^{\circ}$ К), карбид ниобия NbC ($10,1^{\circ}$ К), сплав олова и ниобия (18° К), и наивысшей точкой — нитрид ниобия NbN (23° К).

Почти полвека явление сверхпроводимости оставалось малопонятным. Только в 1957 г. американским физикам Бардину, Куперу, Шрифферу и в более полной форме академику Николаю Николаевичу Боголюбову удалось, наконец, создать удовлетворительную теорию сверхпроводимости.

Оказалось, что сверхпроводимость объясняется во многих отношениях аналогично явлению *сверхтекучести* жидкостей. Как было упомянуто в т. I на стр. 367, сверхтекучесть наблюдается у жидкого гелия II при температурах ниже $2,18^{\circ}$ К; жидкий гелий вследствие сверхтекучести обладает аномально большой теплопроводностью (почти в полтора миллиона раз больше, чем вода, в две тысячи раз больше, чем медь, взятые при комнатной температуре).

В одной из своих статей (1958 г.) Н. Н. Боголюбов пишет:

«...Выяснилась следующая картина движения сверхтекучей жидкости: в противоположность движению обычной жидкости или газа, в которых отдельные частицы движутся беспорядочно, движение сверхтекучей жидкости проявляет высокую степень упорядоченности. Это обусловлено тем, что частицы сверхтекучей жидкости сильно взаимодействуют друг с другом. Особенно сильным это взаимодействие оказывается для частиц с противоположно направленными скоростями. Правильный учет этого взаимодействия составлял особую трудность при создании теории сверхтекучести, Аналогичную трудность таила в себе и теория сверхпроводимости...»

До сих пор в физике существовало общее мнение, что вряд ли возможно глубокое сходство в поведении системы, состоящей из атомов гелия, и системы, образованной из электронов. Дело в том, что статистические свойства этих частиц, которые и определяют поведение составленных из них систем, весьма различны: ядра гелия подчиняются статистике Бозе, а электроны подчиняются статистике Ферми ¹⁾.

Общую картину поведения электронов в сверхпроводящем состоянии можно представить себе следующим образом. Свободные электроны металла образуют в этом состоянии связанный «коллектив», по своим свойствам подобный тому, который в теории сверхтекучести называется конденсатом.. Движение такого коллектива в целом является устойчивым. При дополнительной стабилизации действием магнитного поля это движение (электрический ток в металле) не встречает сопротивления».

Н. Н. Боголюбов, в прошлые годы усовершенствовавший теорию сверхтекучести жидкостей, применил созданный им математический метод к анализу условий возникновения и характера движения упомянутого «коллектива-конденсата» электронов. Н. Н. Боголюбов показал, что хотя электрическое отталкивание электронов препятствует их сочленению в связанный «коллектив», но в меньшей мере, чем считали Бардин, Купер и Шриффер. Американские физики, придерживаясь предположения, что электроны группируются парами, получили ряд формул для величин, характеризующих состояние сверхпроводимости; те же формулы, наряду с некоторыми новыми заключениями, дает более строгая теория Н. Н. Боголюбова.

§ 32. Термоэлектрические явления и их применение

Как было пояснено в § 12, на границе соприкосновения разнородных тел, как правило, возникает контактная разность потенциалов. Напомним, что разность электрических потенциалов

¹⁾ См. т. I, § 85.