

проводимость). Сверхпроводящие флуктуации определяют тонкую структуру аномалий вольт-амперных характеристик туннельных и джозефсоновских контактов, длинные «хвосты» в диамагн. восприимчивости и др. явления в сверхпроводящих системах вблизи  $T_c$ .

Лит.: Де Жен П., Сверхпроводимость металлов и сплавов, пер. с англ., М., 1968; Шриффер Дж., Теория сверхпроводимости, пер. с англ., М., 1970; Вонсовский С. В., Изюмов Ю. А., Курмаев Э. З., Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений, М., 1977; Тинкхам М., Введение в сверхпроводимость, пер. с англ., М., 1980; Шмидт В. В., Введение в физику сверхпроводников, М., 1982; Абрикосов А. А., Основы теории металлов, М., 1987; Superconductivity, ed. by R. D. Parks, v. 1—2, N. Y., 1969. А. А. Варламов.

**СВЕРХПРОВОДНИКИ** — вещества, у к-рых при охлаждении ниже определённой критич. тем-ры  $T_c$  электрич. сопротивление падает до нуля, т. е. наблюдается *сверхпроводимость*. За исключением благородных (Cu, Ag, Au, Pt), щелочных (Li, Na, K и др.), щёлочноземельных (Be, Mg и др.) и ферромагнитных (Fe, Co, Ni) металлов, б. ч. остальных металлич. элементов является С. (см. табл. в ст. *Металлы*). Элементы Si, Ge, Bi, Te становятся С. при охлаждении под давлением. Переход в сверхпроводящее состояние обнаружен у неск.

С ростом тем-ры значения всех критич. магн. полей монотонно падают и обращаются в нуль при  $T = T_c$ . Макс. значения  $H_c = H_0$  (или  $H_{c2} = H_0$ ), определённые из эксперим. данных путём экстраполяции к  $T = 0$ , для нек-рых С. приведены в табл.

Предельная величина постоянного электрич. тока, протекающего в С. без диссипации энергии, наз. *критическим током*  $I_c$ . В массивном С. 1-го рода величина  $I_c$  определяется током, создающим на поверхности С. поля  $H_c$ . В С. 2-го рода значение  $I_c$  определяется образованием и движением вихревых токов.

Все чистые металлы, за исключением V и Nb, и нек-рые сплавы с низким содержанием одного компонента являются С. 1-го рода. Группа С. 2-го рода гораздо многочисленнее. Сюда относятся классические С. с высокими значениями  $T_c$  и ВТСП.

Среди С. 2-го рода выделяют группу т. н. жёстких С. Для них характерно большое кол-во дефектов структуры (неоднородности состава, вакансии, дислокации и др.), к-рые возникают благодаря спец. технологии изготовления. В жёстких С. движение магн. потока сильно затруднено дефектами и кривые намагничивания обнаруживают сильный гистерезис. В этих материалах сильные сверхпроводящие токи (плотностью до  $10^5 - 10^6$  А/см<sup>2</sup>) могут протекать вплоть до полей, близких к верхнему критич. полю  $H_{c2}$  при любой ориентации тока и магн. поля. В идеальном С. 2-го рода, полностью лишённом дефектов (к этому состоянию можно приблизиться в результате длительного отжига сплава), при любой ориентации поля и тока, за исключением продольной, сколь угодно малый ток будет проводиться потерями на движение магн. потока уже при  $H > H_{c1}$ . Такие С. 2-го рода наз. мягкими. Значение  $H_{c1}$  обычно во много раз меньше  $H_{c2}$ . Поэтому именно жёсткие С., у к-рых электрич. сопротивление практически равно нулю вплоть до очень сильных полей, представляют интерес с точки зрения техн. приложений. Их применяют для изготовления обмоток *сверхпроводящих магнитов* и др. целей. Существ. недостатком жёстких С. является их хрупкость, сильно затрудняющая изготовление из них проволок или лент. Особенно это относится к классич. соединениям с самыми высокими значениями  $T_c$  и  $H_c$  типа  $V_3Ga$ ,  $Nb_3Sn$ ,  $PbMo_6S_8$ . Изготовление сверхпроводящих магн. систем из этих материалов — сложная технол. задача.

Огромные значения критич. полей  $H_0$  для ВТСП, определённые путём экстраполяции результатов измерений при высоких тем-рах, открывают принципиально новые перспективы использования этих материалов, однако техн. проблемы, связанные с их применением, ещё не решены.

Лит.: Сверхпроводящие материалы. Сб. ст., пер. с англ., М., 1965; Металловедение сверхпроводящих материалов, М., 1969; Физико-химия сверхпроводников, М., 1976; Высокотемпературные сверхпроводники, пер. с англ., М., 1988. И. П. Крылов.

**СВЕРХПРОВОДНИКИ ВТОРОГО РОДА** — сверхпроводящие материалы, составляющие один из двух классов, на к-рые подразделяются все сверхпроводники в зависимости от поведения в магн. поле.

Длинный цилиндр из С. в. р., помещённый в продольное магн. поле, обнаруживает полый *Мейснера эффект* лишь в полях, не превосходящих ниж. критич. поля  $H_{c1}$  (см. *Критическое магнитное поле, Сверхпроводимость*). В полях с напряжённостью выше  $H_{c1}$  и ниже  $H_{c2}$  (верх. критич. поле) магн. поток начинает проникать в цилиндр, образец, однако даже при установлении термодинамич. равновесия поток, проходящий через цилиндр, имеет меньшую величину, чем в случае, когда образец находится в нормальном состоянии (неполный эффект Мейснера). Это указывает на наличие незатухающих токов в образце, к-рый, следовательно, находится ещё в сверхпроводящем состоянии. Образец полностью переходит в нормальное состояние в полях с напряжённостью выше  $H_{c2}$  (рис. 1). Вблизи поверхности образца из С. в. р. возможно об-

Вещество	Критическая температура, $T_c$ , К	Критическое поле, $H_0$ , Э
Сверхпроводники 1-го рода		
Свинец	7,2	800
Таллал	4,5	830
Олово	3,7	310
Алюминий	1,2	100
Цинк	0,88	53
Вольфрам	0,012	1,0
Сверхпроводники 2-го рода		
Ниобий	9,2	2000
Сплав НТ-50 (Nb—Ti—Zr)	9,7	100000
$V_3Ga$	14	210000
$PbMo_6S_8$	15	600000
$Nb_3Sn$	18	250000
$YBa_2Cu_3O_7$	93	1500000

соединениям металлич. сплавов и соединений и у нек-рых *силколегированных полупроводников*. Ряд сверхпроводящих сплавов состоит из компонент, не являющихся С. Открыты *органические сверхпроводники* и полимеры, напр.  $(SN)_x$ ,  $T_c = 0,34$  К. По величине  $T_c$  в силу истории причин С. делятся на классические, у к-рых  $T_c < 30$  К, и высокотемпературные С. (ВТСП) с характерными значениями  $T_c \sim 100$  К (см. *Оксидные высокотемпературные сверхпроводники*).

Наряду с потерей сопротивления важнейшим свойством С. является вытеснение магн. поля из массивного образца (*Мейснера эффект*). В силу этого все С. являются *диамагнетиками*. Слабое магн. поле проникает лишь в тонкий поверхностный слой  $\approx 1000$  Å и менее. По своему поведению в магн. поле С. делятся на две группы: С. 1-го и 2-го рода. В С. 1-го рода проникновение магн. поля в глубь образца и восстановление сопротивления происходят в определённом критич. поле  $H_c$ . При  $H \geq H_c$  С. 1-го рода переходит в нормальное — несверхпроводящее состояние. В С. 2-го рода проникновение магн. поля (в виде вихревых нитей, т. е. вихрей сверхпроводящего тока, каждый из к-рых несёт *квант магнитного потока*) начинается в ниж. критич. поле  $H_{c1}$  и заканчивается в верхнем  $H_{c2}$ . Электрич. сопротивление восстанавливается в осн. вблизи  $H_{c2}$ . При  $H \geq H_{c2}$  вещество становится полностью нормальным (см. также *Критическое магнитное поле, Сверхпроводники первого рода, Сверхпроводники второго рода, Решётка вихрей Абрикосова*).