

систем, синтезированы органические сверхпроводники и магнитные сверхпроводники, однако до 1986 макс. критич. темп-ра наблюдалась у сплава Nb_3Ge ($T_c \approx 23$ К). В 1986 И. Г. Беднорцем (J. G. Bednorz) и К. А. Мюллером (K. A. Müller) был открыт новый класс металлоксидных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) (см. *Оксидные высокотемпературные сверхпроводники*), критич. темп-ра к-рых в течение двух последующих лет была «поднята» от 30—35 К до 120—125 К. Эти сверхпроводники интенсивно изучаются, ведутся поиски новых, улучшаются технол. свойства существующих, на основе к-рых уже создаются нек-рые приборы.

Важным достижением в области С. стало открытие в 1962 Джозефсона эффекта туннелирования куперовских пар между двумя сверхпроводниками через тонкую диэлектрич. прослойку. Это явление легло в основу новой области применений сверхпроводников (см. *Слабая сверхпроводимость, Криоэлектронные приборы*).

Природа сверхпроводимости. Явление С. обусловлено возникновением корреляции между электронами, в результате к-рой они образуют куперовские пары, подчиняющиеся бозевской статистике, а электронная жидкость приобретает свойство сверхтекучести. В фоновой модели С. спаривание электронов происходит в результате специфического, связанного с наличием кристаллич. решётки фононного притяжения. Даже при абс. нуле темп-р решётка совершает колебания (см. *Нулевые колебания, Динамика кристаллической решётки*). Эл.-статич. взаимодействие электрона с ионами решётки изменяет характер этих колебаний, что приводит к появлению дополнит. силы притяжения, действующей на др. электрон. Это притяжение можно рассматривать как обмен виртуальными фононами между электронами. Такое притяжение связывает электроны в узком слое вблизи границы ферми-поверхности. Толщина этого слоя в энергетич. масштабе определяется макс. энергией фонона $\hbar\omega_D \sim \hbar v_s/a$, где ω_D — дебаевская частота, v_s — скорость звука, a — постоянная решётки (см. *Дебая температура*); в импульсном пространстве это соответствует слою толщиной $\Delta r \sim \hbar\omega_D/v_F$, где v_F — скорость электронов вблизи поверхности Ферми. Соотношение неопределённостей даёт характерный масштаб области фононного взаимодействия в координатном пространстве:

$$\Delta r \sim \hbar/\Delta r \sim v_F/\omega_D \sim v_F a/v_s \sim (M/m)^{1/2} a,$$

где M — масса иона остова, m — масса электрона. Величина $\Delta r \sim 10^{-6} \div 10^{-5}$ см, т. е. фононное притяжение оказывается дальнедействующим (по сравнению с межатомными расстояниями). Кулоновское отталкивание электронов обычно несколько превышает по величине фононное притяжение, но благодаря экранированию на межатомных расстояниях оно эффективно ослабляется и фононное притяжение может преобладать, объединяя электроны в пары. Сравнительно небольшая энергия связи куперовской пары оказывается существенно меньше кинетической энергии электронов, поэтому, согласно квантовой механике, связанные состояния не должны были бы возникнуть. Однако в данном случае речь идёт об образовании пар не из свободных изолиров. электронов в трёхмерном пространстве, а из квазичастиц ферми-жидкости при заполненной большой поверхности Ферми. Это приводит к фактич. замене трёхмерной задачи на одномерную, где связанные состояния возникают при сколь угодно слабом притяжении.

В модели БКШ спариваются электроны с противоположными импульсами p и $-p$ (полный импульс куперовской пары равен 0). Орбитальный момент и суммарный спин пары также равны 0. Теоретически при нек-рых нефононных механизмах С. возможно спаривание электронов и с ненулевым орбитальным моментом. По-видимому, спаривание в такое состояние осу-

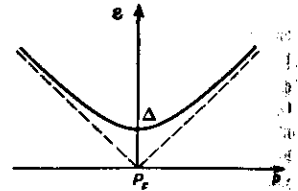
ществляется в сверхпроводниках с тяжёлыми фермионами (напр., $CeCu_2Si_2$, $CeCu_3$, UB_{13} , $CeAl_3$).

В сверхпроводнике при темп-ре $T < T_c$ часть электронов, объединённых в куперовские пары, образует бозе-конденсат (см. *Бозе — Эйнштейна конденсация*). Все электроны, находящиеся в бозе-конденсате, описываются единой когерентной волновой ф-цией Ψ . Остальные электроны пребывают в возбуждённых надконденсатных состояниях (фермиевские квазичастицы), причём их энергетич. спектр перестраивается по сравнению со спектром электронов в нормальном металле. В изотропной модели БКШ зависимость энергии электронов ϵ от импульса p в сверхпроводнике имеет вид (p_F — ферми-импульс):

$$\epsilon(p) = \sqrt{\Delta^2 + v_F^2 (p - p_F)^2}.$$

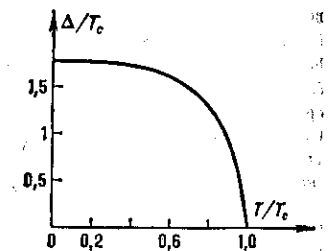
Т. о., вблизи уровня Ферми (рис. 1) в спектре возникает энергетическая щель Δ . Дад

Рис. 1. Перестройка энергетического спектра электронов в сверхпроводнике (сплошная линия) по сравнению с нормальным металлом (пунктир).



того чтобы возбудить электронную систему с таким спектром, необходимо разорвать хотя бы одну куперовскую пару. Поскольку при этом образуются два электрона, то на каждый из них приходится энергия не меньшая Δ , так что 2Δ имеет смысл энергии связи куперовской пары. Величина щели существенно зави-

Рис. 2. Температурная зависимость энергетической щели в модели БКШ.



сит от темп-ры (рис. 2), при $T_c - T \ll T_c$ она ведёт себя как $\Delta(0)/k = 3,06\sqrt{T_c(T_c - T)}$, а при $T = 0$ достигает макс. значения $\Delta(0)/k \approx 1,76T_c$, причём

$$\Delta(0) = \hbar\omega_D \exp(-2/\rho g),$$

где $\rho = mp_F/2\pi^2\hbar^3$ — плотность одноэлектронных состояний вблизи поверхности Ферми, g — эфф. константа межэлектронного притяжения.

В модели БКШ связь между электронами предполагается слабой ($\rho g \ll 1$) и критич. темп-ра оказывается малой по сравнению с характерными фононными частотами ($kT_c \ll \hbar\omega_D$). Однако для ряда веществ (напр., Pb) это условие не выполняется и параметр $\rho g \sim 1$ (сильная связь). В литературе обсуждается даже приближение $\rho g \gg 1$. Сверхпроводники с сильной связью между электронами описываются т. н. уравнениями Элиашберга (Г. М. Элиашберг, 1968), из к-рых видно, что на величину T_c не возникает никаких принципиальных ограничений.

Наличие щели в спектре электронов приводит к экспоненц. зависимости [$\sim \exp(-\Delta(0)/kT)$] в области низких темп-р всех величин, определяющих число этих электронов (напр., электронной теплоёмкости и теплопроводности, коэффициентов поглощения звука и низкочастотного [$\hbar\omega \ll \Delta(0)$] эл.-магн. излучения). Вдали от ферми-уровня ($v_F|p - p_F| \gg \Delta$) выражение (1) описывает энергетич. спектр электронов нормаль-