

обладает высокой (для чистых металлов) критической температурой. Благородные металлы являются прекрасными проводниками. У них слабое электрон-фононное взаимодействие. Они не переходят в сверхпроводящее состояние даже при самых низких температурах, достигнутых в настоящее время.

Теперь зададим вопрос: все ли электроны притягиваются друг к другу? Чтобы понять это, вернемся к нашим электронам. В процессе испускания фонона первый электрон переходит из состояния k_1 в состояние

k_1' . Очевидно, что последнее должно быть свободно. Вследствие принципа Паули такое возможно лишь вблизи поверхности

Ферми, представляющей собой сферу радиуса k_F в k -пространстве. Таким образом, могут взаимодействовать через фононы лишь электроны, лежащие в достаточно узком сферическом слое $2\Delta k$ около поверхности Ферми (рис. 11.17). Остальные электроны не взаимодействуют. Толщина этого слоя $2\Delta k$ определяется дебаевской энергией $\hbar\omega_D$:

$$\frac{\Delta k}{k_F} \sim \frac{\hbar\omega_D}{E_F} \quad (11.30)$$

где
$$E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m}.$$

Для электронов, имеющих энергию вне этого интервала, решетка движется слишком медленно и не успевает откликаться на поляризующее действие движущегося электрона.

11.14. КУПЕРОВСКИЕ ПАРЫ

Следующий, очень важный шаг на пути создания микроскопической теории сверхпроводимости был сделан в 1956 г. Л. Купером.

Прежде чем говорить о результатах, полученных Купером, еще раз напомним об основном состоянии нормального металла. В нормальном металле при $T=0$ К наименьшей энергией обладает состояние, при котором все электроны проводимости в k -пространстве занимают ячейки внутри сферы Ферми. Все ячейки k -пространства вне сферы Ферми свободны. Такое состояние всего коллектива электронов имеет место для электронов, не взаимодействующих друг с другом.

Зная, что обмен фононами может привести к притяжению электронов, Купер рассмотрел задачу о взаимодействии друг с

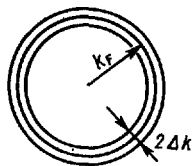


Рис. 11.17. Через фононы взаимодействуют лишь электроны, лежащие в слое толщиной $2\Delta k$ около поверхности Ферми.

другом только двух электронов из всего коллектива. При этом считалось, что остальные электроны образуют основное состояние, т. е. в соответствии с принципом Паули заполняют всю сферу Ферми. Предполагалось, что при взаимодействии сохраняется полный импульс и спин пары.

Расчет показал, что в этом случае поведение взаимодействующих электронов резко отличается от поведения таких же электронов, если последние изолированы от всех других электронов. При наличии заполненной сферы Ферми образуется связанное состояние взаимодействующих электронов при любом сколь угодно слабом притяжении. (Для образования связанного состояния из электронов, взаимодействующих в отсутствие других электронов, необходимо, чтобы притяжение было больше некоторого минимального значения). Оказалось, что наименьшей энергией связанная пара будет обладать в том случае если составляющие ее электроны имеют антипараллельные спины и равные, но противоположно направленные импульсы. Такая пара электронов, получившая название куперовской пары обозначается $\{\vec{k}\uparrow, -\vec{k}\downarrow\}$.

Если предположить, что сверхпроводимость каким-то образом связана с куперовскими парами, то естественно считать, что энергия связи пары составляет величину $\Delta \sim \kappa_B T_C$, где, как и раньше, T_C — температура сверхпроводящего перехода. Учитывая соотношение неопределенностей $\delta x \cdot \delta p \sim \hbar$, где δp — разброс импульса электронов, участвующих в формировании пары, δx — неопределенность координаты, можно оценить размер пары. Для этого заметим, что волновая функция пары представляет собой суперпозицию одноэлектронных волновых функций с соответствующими энергиями, лежащими в области Δ вблизи E_F . Поэтому разброс импульсов плоских волн, участвующих в образовании пары, задается условием

$$\Delta \approx \kappa_B T_C = \delta E = \delta \left(\frac{p^2}{2m^*} \right) = \left(\frac{p_F^2}{m^*} \right) \delta p \approx v_F \delta p. \quad (11.31)$$

Таким образом,

$$\delta x \equiv \xi_0 \sim \frac{\hbar}{\delta p} \sim \frac{\hbar v_F}{\Delta} \sim \frac{1}{\kappa_F} \frac{E_F}{\kappa_B T_C}. \quad (11.32)$$

Для типичных значений $E_F \sim 10$ эВ, $\kappa_F \sim 10^8$ см⁻¹ и $T_C = 10$ К получаем $\xi_0 = 10^{-4}$ см. Это означает, что электроны в куперовской паре разнесены на макроскопически большие расстояния порядка $10^3 \div 10^4$ периодов кристаллической решетки. Если теперь допустить, что другие электроны тоже могут образовывать куперовские пары, то становится ясно, что при плотности электронов в металле $\sim 10^{22}$ см⁻³ внутри области, занимаемой любой парой, т. е. внутри сферы с радиусом ξ_0 , окажутся центры многих миллионов других куперовских пар. Величина ξ_0 получила название *длины когерентности*.