

ставляют собой «сверхпроводящие» электроны и т. д. Оставаясь, по существу, в рамках классической физики, Лондоны не могли ответить на эти вопросы. Выше было отмечено, что в сверхпроводимости важную роль играют квантовые эффекты.

11.12. ТЕОРИЯ ГИНЗБУРГА—ЛАНДАУ

В 1950 году В. Л. Гинзбург и Л. Д. Ландау построили теорию сверхпроводимости, основанную на квантовой механике. Их теория также является феноменологической, поскольку в ней принимаются определенные предположения, доказательством справедливости которых является то, что они правильно описывают некоторые свойства сверхпроводников.

Полное описание этой теории выходит за рамки данной книги. Поэтому здесь, так же как и при дальнейшем обсуждении микроскопической теории Бардина — Купера — Шриффера, мы остановимся только на основных идеях и полученных результатах.

В теории Гинзбурга — Ландау предполагается, что вся совокупность сверхпроводящих электронов описывается волновой функцией $\Psi(\vec{r})$ от одной пространственной координаты. Выше мы отмечали, что, вообще говоря, волновая функция n электронов в твердом теле есть функция n координат $\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n)$.

Введением функции $\Psi(\vec{r})$ устанавливалось когерентное согласованное поведение всех сверхпроводящих электронов. Действительно, если все n_s электронов ведут себя совершенно одинаково, согласованно, то для описания их поведения достаточно той же самой волновой функции, что и для описания поведения одного электрона, т. е. функции от одной переменной. Величину $|\Psi(\vec{r})|^2$ можно рассматривать как плотность сверхпроводящих электронов, которая обращается в нуль при $T=T_c$.

Теория Гинзбурга — Ландау исходит далее из того, что переход из нормального состояния в сверхпроводящее в отсутствие внешнего поля является фазовым переходом II рода (см. § 11.6). Теория таких переходов была разработана Ландау несколько раньше. В этой теории присутствовал некоторый параметр порядка, который в новой фазе (в нашем случае — в сверхпроводящей фазе) должен монотонно возрастать от нуля при $T=T_c$ до единицы при $T=0$ К. В качестве этого параметра Гинзбург и Ландау выбрали функцию $\Psi(\vec{r})$.

Далее задача сводилась к нахождению функции $\Psi(\vec{r})$ и векторного потенциала поля $\vec{A}(\vec{r})$, которые соответствуют ми-

нимому свободной энергии сверхпроводящей фазы при определенных граничных условиях. В результате минимизации свободной энергии по Ψ и по \vec{A} были получены уравнения, получившие название уравнений Гинзбурга — Ландау.

На основе решения этих уравнений были объяснены и предсказаны многие свойства сверхпроводников, в том числе идеальный диамагнетизм, квантование магнитного потока и ряд других.

Несмотря на то, что теория Гинзбурга — Ландау, получившая дальнейшее развитие в работах А. А. Абрикосова и Л. П. Горькова, описывала многие свойства сверхпроводников, она не могла дать понимания явления сверхпроводимости на микроскопическом уровне.

11.13. ПРИТЯЖЕНИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОНАМИ

В 1957 году Дж. Бардин, Л. Купер и Дж. Шриффер опубликовали теорию (теорию БКШ), раскрывшую микроскопический механизм сверхпроводимости. Исходным пунктом этой теории является возникновение *притяжения между электронами* вблизи поверхности Ферми.

Из приведенных выше свойств сверхпроводников следует, что сверхпроводимость связана с какими-то изменениями в поведении электронов проводимости. Эти изменения проявляются в том, что в энергетическом спектре электронов появляется энергетическая щель шириной 2Δ . «Сверхпроводящие» электроны представляют, по существу, частицы с зарядом $2e$. Поведение «сверхпроводящих» электронов является определенным образом скоррелированным. При этом кристаллическая решетка участвует в создании сверхпроводящего состояния.

Одна из основных трудностей в создании теории сверхпроводимости заключалась в том, что было неясно, какое взаимодействие в системе электронов проводимости приводит к согласованному поведению электронов. Мы знаем, что электроны проводимости в металле обладают энергиями в несколько электронвольт ($\sim E_F$), а сверхпроводящее состояние в большинстве сверхпроводников разрушается при $k_B T \approx 10^{-4}$ эВ. Таким образом, нужно было найти весьма слабое взаимодействие с участием решетки, которое способно привести к упорядочению электронной системы, несмотря на большие энергии электронов.

Теоретический анализ показал, что таким взаимодействием является притяжение между электронами, которое осуществляется через колебания решетки. На возможность возникновения притяжения между электронами за счет обмена фононами указал в 1950 г. Г. Фрелих. Как представить себе такое взаимо-