

## § 6. Электроны и дырки как элементарные возбуждения многоэлектронной системы в полупроводнике

Последовательное обоснование зонной теории твердого тела можно получить с позиций современной теории многих тел. Ведущую роль здесь играет представление об элементарных возбуждениях квантовой системы многих частиц [М9].

Суть дела удобно пояснить, рассматривая уже известный нам пример явного решения задачи многих тел — задачу о малых колебаниях кристаллической решетки. Как мы видели в гл. XII, энергия слабо возбужденных состояний такой системы представляется как энергия газа квазичастиц — элементарных возбуждений системы, — называемых фононами. Идеальность этого газа обусловлена только малостью возбуждения — т. е. малостью амплитуд колебаний атомов по сравнению с постоянной решетки — и никак не связана с какими-либо предположениями о характере взаимодействия между атомами. Ангармоничность колебаний приводит к слабой неидеальности фононного газа.

Этот пример иллюстрирует общую ситуацию: слабо возбужденные состояния любой квантовой системы многих тел можно представить как идеальный или слабо неидеальный газ (или газы) квазичастиц — элементарных возбуждений того или иного типа. Эти квазичастицы могут подчиняться статистике Ферми—Дирака или Бозе—Эйнштейна — независимо от типа статистики, которой подчиняются сами частицы системы \*). Соответственно говорят о фермиевской и бозевской ветвях спектра элементарных возбуждений. В зависимости от природы системы квазичастицы могут обладать импульсом или квазиимпульсом (последнее — в кристаллах). Они могут также нести электрический заряд, спин и т. д. Полное число квазичастиц данной ветви бывает как постоянным, так и переменным. Очевидно, что если переменным оказывается число заряженных квазичастиц, то среди них должны быть как положительно, так и отрицательно заряженные. При этом из закона сохранения заряда вытекает, что они могут возникать и исчезать только парами.

Перемещаясь по кристаллической решетке, квазичастицы могут переносить заряд, энергию и т. д. Естественно возникает мысль, что носители заряда в полупроводнике — электроны проводимости и дырки — следует рассматривать как элементарные возбуждения системы многих электронов. Наглядно их можно представлять себе как состояния с избытком или недостатком, отрицательного заряда («лишние» электроны и дырки). Чтобы убедиться в справедливости сказанного, надо исследовать структуру энергетического спектра полупроводника, показать, что такие квазичастицы ведут себя во

\*) Так, какой бы статистике ни подчинялись атомы кристаллической решетки, статистика фононного газа оказывается бозевской.

внешних электрическом и магнитном полях (в том числе в поле примеси), как этого следует ожидать от электронов проводимости и дырок, и т. д. Эту программу действительно удастся реализовать.

Таким образом, обоснование ряда важнейших представлений зонной теории твердого тела оказывается несколько своеобразным: выясняется, что на самом деле эти представления носят строгий многоэлектронный характер. Подчеркнем, однако, что это относится не ко всем зонам. Точное обоснование получают представления о зоне (зонах) проводимости и о дырочной зоне, но отнюдь не о валентной зоне, трактуемой как совокупность одноэлектронных энергий. Иначе говоря, удается обосновать как раз те понятия, которые фактически используются для обработки и интерпретации экспериментальных данных: точный многоэлектронный смысл придается зонной энергетической схеме (с локальными уровнями). Известное обоснование получает также и аппарат зонной теории: уравнения, определяющие энергетический спектр рассматриваемых элементарных возбуждений, приближенно сводятся к уравнениям самосогласованного поля с обменом. Вместе с тем в рамках данного приближения учитывается и ряд многоэлектронных эффектов. С одним из них мы уже встречались в § XIII. 9. Речь идет о коллективных колебаниях плотности газа носителей заряда. Как и в случае колебаний решетки, плазменным волнам можно сопоставить кванты колебаний с энергией  $\hbar\omega_p$ . Эти кванты иногда называют плазмонами.

Отметим, что кулоновское взаимодействие между носителями заряда (в том числе между электронами и дырками) все же не полностью учитывается с помощью самосогласованного поля. В результате газ носителей заряда оказывается неидеальным. Связанные с этим эффекты называются *корреляционными*. Один из них рассматривается в § 7.

Полярны также представляют собой элементарные возбуждения, возникающие благодаря кулоновскому взаимодействию свободных электронов и дырок с колеблющимися гонами решетки.

До тех пор, пока мы не рассматриваем явлений, существенно связанных с неидеальностью газа носителей заряда, и не вычисляем параметры энергетического спектра, разница между «невзаимодействующими электронами» зонной теории и «квазичастицами» многоэлектронной теории носит словесный характер. Можно пользоваться и тем и другим языком. Посмотрим, как на этих двух языках описываются одни и те же явления — поглощение и испускание света в беспримесном полупроводнике. Для наглядности изобразим это в виде таблицы. В средней части таблицы (в виде подзаголовков) будем указывать то или иное состояние (или процесс) или наблюдаемую величину. Слева дается их описание на языке одноэлектронной теории, справа — на языке элементарных возбуждений.

Таблица 17.1

Язык одноэлектронной теории		Язык элементарных возбуждений
<p>Зона проводимости пуста, валентная зона полностью заполнена</p>	<p>Основное состояние полупроводника</p>	<p>Нет ни электронов проводимости, ни дырок</p>
<p>Наименьшее энергетическое расстояние между нижним краем зоны проводимости и верхним краем валентной зоны</p>	<p>Ширина запрещенной зоны</p>	<p>Минимальная работа, необходимая для создания пары «электрон проводимости — дырка»</p>
<p>Зона проводимости частично заполнена, в валентной зоне имеются вакантные места</p>	<p>Возбужденное состояние полупроводника</p>	<p>Имеется некоторое количество электронов проводимости и дырок. Энергии их изменяются, соответственно, в пределах зоны проводимости и дырочной</p>
<p>Переход электрона из валентной зоны в зону проводимости</p>	<p>Поглощение светового кванта</p>	<p>Образование пары «электрон проводимости — дырка»</p>
<p>Переход электрона из зоны проводимости в валентную с испусканием светового кванта</p>	<p>Рекомбинационное излучение</p>	<p>Аннигиляция электрона проводимости и дырки с испусканием светового кванта</p>

Таким же образом можно рассматривать и задачи с участием примеси и т. д. Эквивалентность двух языков имеет место до тех пор, пока мы интересуемся только описанием процесса, но не расчетом его вероятности. Так, например, при одноэлектронном подходе теряется эффект взаимодействия между электроном проводимости и дыркой, образующимися при поглощении светового кванта. Вместе с тем, как мы увидим в следующем параграфе и в гл. XVIII, он может оказаться существенным.