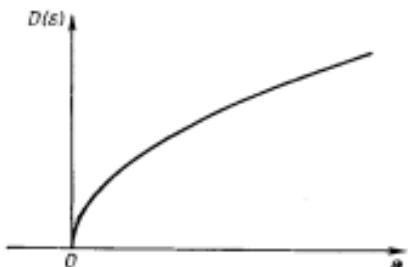


Плотность состояний электронов в кристаллическом твердом теле описывается более сложной функцией, так как на нее влияет периодичность структуры кристалла. В результате кривая плотности состояний распадается на большое число различных участков, как схематически показано на фиг. 78. Такой тип структуры плотности состояний называется зонной структурой спектра



Ф и г. 77. Кривая плотности состояний для свободных электронов



Ф и г. 78

электронов в кристалле. Вид зонной структуры определяется конкретными свойствами данного твердого тела.

Подробное объяснение причин возникновения зонной структуры выходит за рамки данной книги, так что мы добавим к сказанному лишь несколько слов. Как известно, электроны в изолированном атоме имеют дискретные энергетические уровни. Когда атомы сближаются друг с другом, образуя кристаллы, определенный электрон перестает принадлежать отдельному атому, а распределяется, так сказать, между всеми атомами кристалла. Это и обуславливает двоякую природу электронов кристалла: они одновременно являются как атомными, так и свободными. В результате дискретные атомные энергетические уровни размываются. Таким образом можно качественно объяснить возникновение зон, имеющих некоторую конечную ширину. Вообще говоря, установить соответствие между определенным атомным уровнем и зоной можно лишь для низколежащих энергетических зон. Напротив, более высокие зоны часто перекрываются, так что установить такое соответствие не всегда просто.

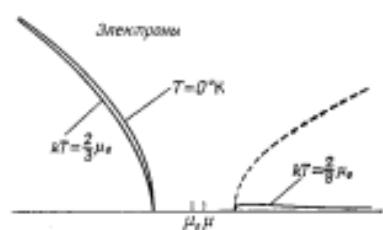
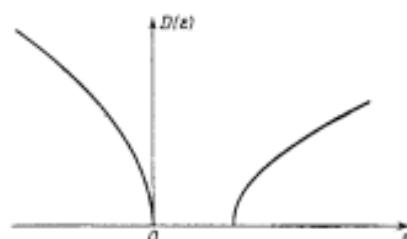
§ 4. Дырки

Величина

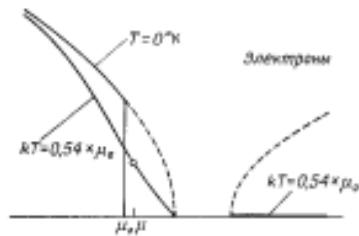
$$\bar{n}_\tau = 1 - \bar{n}_\tau = \frac{1}{e^{-(E_\tau - \mu)/kT} + 1} \quad (4.10)$$

представляет собой вероятность того, что одиночестичное состояние τ не занято. Принимая за основу такую ситуацию, когда все состояния заняты электронами, мы будем говорить, что состояние τ занято дыркой, если оно не занято электроном. Таким образом, если частицы являются фермионами, то дырки можно рассматривать как определенный сорт частиц.

Если одноэлектронное состояние с импульсом p и энер-



Фиг. 79



Фиг. 80

гней e (p) не занято, то мы будем говорить, что в системе электронов существует дырка, у которой заряд, импульс, энергия и потенциал Ферми определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} e' &= +|e|, \\ p' &= -p, \\ \epsilon'(p') &= \text{const} - \epsilon(p), \\ \mu' &= \text{const} - \mu. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Статистическое распределение дырок описывается, таким образом, функцией распределения Ферми

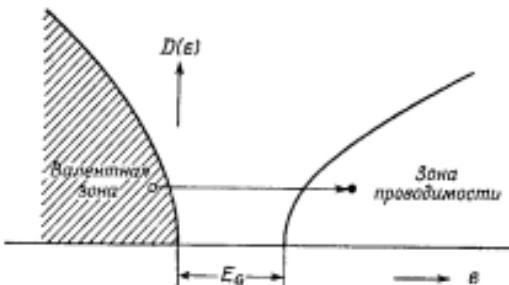
$$\bar{n}_{p'} = \frac{1}{e^{(\epsilon_{p'} - \mu)/kT} + 1}. \quad (4.12)$$

На фиг. 79 и 80 изображены случаи, когда некоторая зона при 0°K полностью заполнена или почти пуста. При более высоких температурах электроны распределены как в нижней, так и в верхней энергетических зонах. На схемах приведены как распределения электронов, так и распределения дырок. При рассмотрении верхней зоны удобнее пользоваться представлением о распределении электронов, а при рассмотрении нижней — распределением дырок.

§ 5. Полупроводники

Теория полупроводников — одна из важнейших областей применения статистики Ферми. В задачах мы предложим рассмотреть ряд соответствующих примеров. Однако основные положения будут приведены здесь¹⁾.

Полупроводниками с собственной проводимостью (собственными полупроводниками) называют такие материалы, в которых при



Фиг. 81. Полупроводник с собственной проводимостью

0°K имеются целиком заполненные зоны (называемые *валентными зонами*) и совершенно пустые зоны (часто называемые *зонами проводимости*). При конечных температурах возбужденные электроны переходят из нижней зоны в верхнюю. Как электроны, так и дырки, появившиеся при таких переходах в верхней и нижней зонах, обусловливают возникновение электропроводности. В результате кристалл, который был диэлектриком при 0°K , при более высоких температурах становится проводником. Температура, при которой появляется проводимость, зависит от ширины запрещенной зоны E_g между валентной зоной и зоной проводимости (фиг. 81).

¹⁾ С современной теорией полупроводников можно ознакомиться по монографии Шокли [8]. — Прим. ред.