

с понижением температуры. Изображая графически зависимость  $\ln nT^{-3/4}$  от  $1/T$ , мы получим прямую линию, наклон которой равен  $\mathcal{J}/2k$ , т. е. отвечает половине энергии ионизации доноров  $\mathcal{J}$ .

При достаточно высоких температурах ( $4N_d/n_1 \ll 1$ ) из (15.3) получается

$$n = N_d. \quad (15.36)$$

Этот случай соответствует полной ионизации доноров. Зависимость  $n(T)$  для одного конкретного случая показана ниже на рис. 5.11 (кривая 1).

Чтобы найти зависимость положения уровня Ферми  $F$  от температуры, нам не нужно заново решать уравнение (15.1), а можно воспользоваться соотношением (5.1), справедливым для невырожденных полупроводников. Это дает

$$F - E_c = kT \ln \frac{n_1}{2N_c} \left( \sqrt{1 + \frac{4N_d}{n_1}} - 1 \right). \quad (15.4)$$

Эта зависимость показана на рис. 5.10.

При низких температурах (определяемых тем же условием, что и выше) формула (15.4) дает

$$F - E_c = \frac{1}{2} (E_d - E_c) + \frac{1}{2} kT \ln \left( \frac{g_0}{g_1} \frac{N_d}{N_c} \right).$$

При  $T \rightarrow 0$  уровень Ферми  $F$  располагается посередине между  $E_c$  и  $E_d$ .

В случае некомпенсированных акцепторов справедливы аналогичные соотношения.

## § 16. Взаимная компенсация доноров и акцепторов

Случай примеси одного типа, когда влиянием других примесей можно пренебречь, встречается сравнительно редко. Дело в том, что современная техника очистки полупроводниковых материалов, несмотря на очень высокий уровень разработки, даже для такого хорошо освоенного полупроводника, как германий, позволяет снизить концентрацию остаточных примесей до  $\sim 10^{10} \div 10^9 \text{ см}^{-3}$ , но не устранить их вовсе. Поэтому в реальных полупроводниках мы обычно имеем, кроме умышленно введенных доноров, некоторую концентрацию компенсирующих их акцепторов (или наоборот). Наличие же даже малой концентрации компенсирующей примеси

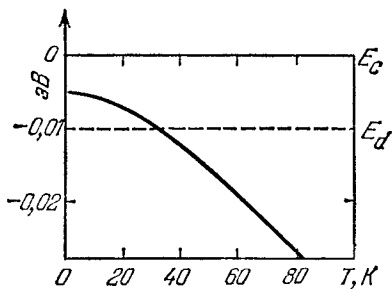


Рис. 5.10. Зависимость уровня Ферми от температуры в Ge с некомпенсированными донорами V группы (для данных кривой 1 на рис. 5.11).

может при известных условиях существенно изменить температурную зависимость концентрации носителей заряда и положения уровня Ферми. Поэтому мы рассмотрим случай полупроводника, содержащего одновременно доноры и акцепторы.

Однако, прежде чем рассматривать общий случай, мы остановимся на одном простом, но практически важном примере, когда в полупроводнике имеются мелкие доноры (с уровнями вблизи зоны проводимости) и мелкие акцепторы (с уровнями вблизи дырочной зоны). Кроме того, мы предположим, что рассматриваемые интервалы температур и концентраций таковы, что уровень Ферми лежит между уровнями доноров и акцепторов и удален от тех и других по крайней мере на несколько  $kT$ . Такое положение, в частности, мы имеем в германии и кремнии, содержащих доноры V группы и акцепторы III группы, при концентрациях, меньших  $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$ , и в области температур примерно от комнатной и до температуры твердого азота ( $\sim 60$  К). В этом случае все доноры практически полностью лишены электронов (так как уровень Ферми лежит ниже уровня доноров) и заряжены положительно, а все акцепторы практически полностью заполнены электронами (так как уровень Ферми расположен выше их уровней) и заряжены отрицательно. Поэтому условие нейтральности принимает простой вид:

$$n - p = N_d - N_a. \quad (16.1)$$

Если  $N_d > N_a$ , то  $n > p$  и мы будем иметь полупроводник  $n$ -типа. Если при этом еще температура не слишком велика, так что концентрацией неосновных носителей можно пренебречь, то

$$n \simeq N_d - N_a. \quad (16.1a)$$

Концентрация электронов в зоне оказывается такой, как если бы в полупроводнике имелись одни доноры, но с меньшей концентрацией, так как часть  $N_a$  полной концентрации доноров компенсирована акцепторами.

Если концентрация акцепторов больше концентрации доноров, то мы будем иметь полупроводник  $p$ -типа и концентрация дырок в примесной области будет  $p \simeq N_a - N_d$ .

Если, наконец, концентрации доноров и акцепторов равны друг другу, то равенство (16.1) дает  $n = p$ . Так как, кроме того, для невырожденного полупроводника всегда  $np = n_i^2$ , то

$$n = p = n_i, \quad (16.2)$$

т. е. концентрация электронов и дырок будет такая же, как и при полном отсутствии каких бы то ни было примесей. В этом случае носители возникают только за счет возбуждений зона — зона.

Полученные результаты показывают, что при суждении о степени чистоты полупроводниковых материалов по измерению концентрации носителей необходимо соблюдать осторожность, так как

эта концентрация может быть мала не вследствие чистоты материала, а в результате взаимной компенсации доноров и акцепторов. Поэтому для окончательного решения вопроса приходится прибегать к дополнительным исследованиям, например к измерению подвижности.

### § 17. Компенсированные полупроводники

Рассмотрим опять полупроводник  $n$ -типа, содержащий простые доноры с концентрацией  $N_d$  и компенсирующие акцепторы с концентрацией  $N_a < N_d$ . Будем по-прежнему считать полупроводник невырожденным и рассмотрим область примесной проводимости, однако будем теперь рассматривать широкую область температур, включая и очень низкие температуры, когда ионизация доноров может быть неполной.

Условие нейтральности (13.4) для этого случая принимает вид

$$\frac{N_d}{1 + \frac{g_1}{g_0} \exp \frac{F - E_d}{kT}} = n + N_a. \quad (17.1)$$

Выражая, как и выше, экспоненту через концентрацию электронов  $n$ , это условие можно представить в виде

$$\frac{n(n + N_a)}{N_d - N_a - n} = n_1(T), \quad (17.2)$$

где  $n_1(T)$  по-прежнему выражается формулой (9.5). При  $N_a = 0$  это уравнение переходит в ранее полученное (15.2). Оно опять приводит к квадратному уравнению относительно  $n$ . Для очень низких температур, когда  $n \ll N_a$ ,  $N_d - N_a$ , уравнение (17.2) дает

$$n = \frac{N_d - N_a}{N_a} \frac{g_0}{g_1} N_c \exp \left( - \frac{\mathcal{I}_d}{kT} \right). \quad (17.3)$$

Следовательно, в координатах  $\ln(nT^{-3/2})$  и  $1/T$  зависимость  $n(T)$  имеет опять вид прямой линии. Однако, в отличие от случая одних некомпенсированных доноров, наклон этой прямой равен  $\mathcal{I}/k$ , т. е. соответствует не половине, а полной энергии ионизации  $\mathcal{I}$ . Из выражения (17.3) также видно, что концентрация компенсирующих акцепторов сильно влияет на концентрацию электронов в зоне и может изменять ее на много порядков.

В общем случае примесной проводимости квадратное уравнение (17.2) дает

$$n = \frac{1}{2} (N_a + n_1) \left( \sqrt{1 + \frac{4(N_d - N_a)n_1}{(N_a + n_1)^2}} - 1 \right). \quad (17.4)$$

При достаточно высоких температурах, когда  $\frac{(N_d - N_a)n_1}{(N_a + n_1)^2} \ll 1$  и, кроме того,  $n_1 \gg N_a$ , мы имеем

$$n \simeq N_d - N_a,$$