

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

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

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{J}/k , т. е. соответствует не половине, а полной энергии ионизации \mathcal{J} . 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

$$n \simeq N_d - N_a,$$

т. е. полученную ранее формулу (16.1а). Эту область температур иногда называют «областью истощения» доноров.

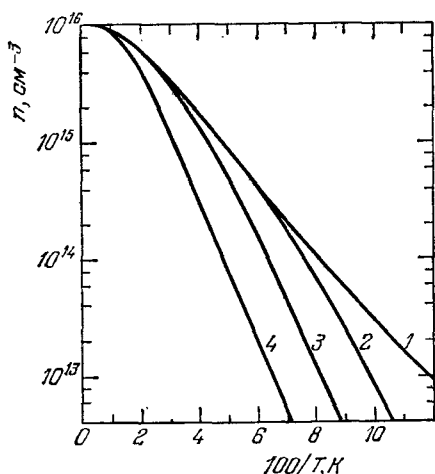


Рис. 5.11. Зависимость концентрации электронов от температуры в германии, содержащем доноры V группы (принято $E_c - E_d = 0,01$ эВ), частично компенсированные акцепторами III группы [1]. Для всех кривых $N_d - N_a = 10^{16}$ см $^{-3}$. 1 — $N_a = 0$; 2 — $N_a = 10^{14}$ см $^{-3}$; 3 — $N_a = 10^{15}$ см $^{-3}$; 4 — $N_a = 10^{16}$ см $^{-3}$. При расчетах положено $m_n = 0,25 m_0$, $g_0/g_1 = \frac{1}{2}$.

Зависимость n от T для конкретного случая германия с донорами V группы, частично компенсированными акцепторами III группы, показана на рис. 5.11. Для случая некомпенсированных доноров кривая 1 при низких температурах имеет наклон, соответствующий половине энергии ионизации доноров (ср. § 15). При наличии компенсации наклон соответствует полной энергии ионизации. Следует подчеркнуть, однако, что при малой степени компенсации (кривая 2) имеется область температур (она соответствует условию $N_a \ll n \ll N_d$), в которой наклон отвечает тоже половине энергии ионизации и лишь при достаточном понижении температуры этот наклон удваивается.

Чтобы найти температурный ход уровня Ферми, мы, как и раньше, воспользуемся соотношением (5.1). Это дает

$$F - E_c = kT \ln \frac{N_a + n_1}{2N_c} \left(\sqrt{1 + \frac{4(N_d - N_a)n_1}{(N_a + n_1)^2}} - 1 \right). \quad (17.5)$$

Зависимость $F - E_c$ от T для тех же четырех степеней компенсации, что на рис. 5.11, показана на рис. 5.12. Из рисунка видно, что в частично компенсированном полупроводнике при низких температурах ход уровня Ферми существенно отличается от такового в некомпенсированном полупроводнике. При низких температурах (количественное условие см. выше) формула (17.5) дает

$$F = E_d - kT \ln \left(\frac{N_a}{N_d - N_a} \frac{g_1}{g_0} \right).$$

При $T \rightarrow 0$ F стремится к E_d , в то время как в некомпенсированном полупроводнике F располагается посередине между уровнями E_c и E_d .

Для полупроводника p -типа с акцепторами, частично компенсированными донорами, мы получили бы

$$\frac{p(N_d + p)}{N_a - N_d - p} = p_1(T), \quad (17.6)$$

где $p_1(T)$ дается формулой (9.13). В частности, при низких температурах концентрация дырок выражается формулой, аналогичной (17.3):

$$p = \frac{g_1}{g_0} \frac{N_a - N_d}{N_d} N_v \exp\left(-\frac{\mathcal{I}_a}{kT}\right). \quad (17.7)$$

Здесь $\mathcal{I}_a = E_a - E_v$ есть энергия ионизации акцептора (энергия отщепления дырки от него). При очень низких температурах уровень Ферми стремится к уровню энергии основной примеси, т. е. к E_a .

Рассуждая, как и выше, легко найти температурную зависимость концентрации электронов (дырок) для двух других возможных случаев: частично компенсированных акцепторов в полупроводнике n -типа и частично компенсированных доноров в полупроводнике p -типа.

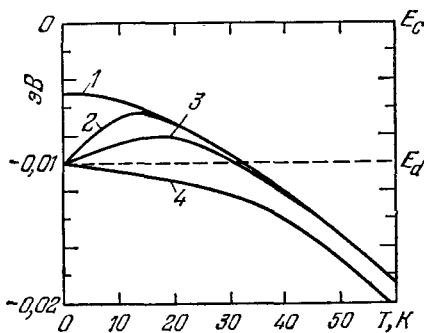


Рис. 5.12. Зависимость уровня Ферми от температуры в германии с частично компенсированными донорами V группы для тех же образцов, что на рис. 5.11.

§ 18. Определение энергетических уровней примесных атомов

Результаты предыдущего параграфа лежат в основе важного метода определения локальных энергетических уровней, создаваемых примесными атомами и структурными дефектами. Для этого изготавливают образцы, содержащие исследуемую примесь и, кроме того, компенсирующую примесь, концентрацию последней подбирают так, чтобы исследуемый уровень энергии был компенсирован частично. В этом случае при достаточном понижении температуры уровень Ферми располагается на частично компенсированном уровне (ср. рис. 5.12), а зависимость концентрации основных носителей от температуры в координатах $\ln(nT^{-3/2})$ и $1/T$ описывается прямой линией, наклон которой дает энергию ионизации.

Подобным образом можно исследовать и многозарядные центры. Рассмотрим возможные при этом случаи.

а. Многозарядные акцепторы в полупроводнике n -типа. Создаваемые ими энергетические уровни $E_1, E_2, \dots, E_j, \dots, E_M$ здесь и везде в дальнейшем мы будем нумеровать в порядке следования уровней от валентной зоны к зоне прово-