§ 15. Полупроводник с примесью одного типа

Рассмотрим полупроводник, содержащий простые доноры с энергетическим уровнем E_d. Далее, будем считать, что температура не слишком велика, так что собственной проводимостью можно пренебречь. В этом случае электроны в зоне проводимости возникают только за счет тепловой ионизации доноров. Найдем концентрацию электронов в зоне и положение уровня Ферми в зависимости от температуры.

Условие нейтральности (13.4) для этого случая ($p \ll n$, $p_t = 0$), при учете выражений (9.3) и (4.4), дает

$$\frac{N_d}{1+\frac{g_1}{g_0}\exp\frac{F-E_d}{kT}} = N_c\Phi_{1/2}\left(\frac{F-E_c}{kT}\right). \tag{15.1}$$

Уравнение (15.1) позволяет определить положение уровня Ферми F. Однако для общего случая решение этой задачи требует численных методов расчета. Поэтому мы рассмотрим только случай невырожденного полупроводника, когда

$$\Phi_{1/2}\left(\frac{F-E_c}{kT}\right) \simeq \exp\frac{F-E_c}{kT}.$$

Замечая, что $\exp\frac{F-E_d}{kT}$ можно представить в виде

$$\exp\frac{F-E_d}{kT} = \frac{n}{N_c}\exp\frac{\mathcal{J}}{kT},$$

где $\mathcal{J} = E_c - E_d$ есть энергия ионизации донора, условие нейтральности (13.4) можно переписать в виде

$$\frac{n^2}{N_d-n} = n_1(T). \tag{15.2}$$

Здесь n_1 — введенная нами ранее величина, определяемая формулой (9.5). Соотношение (15.2) приводит к квадратному уравнению относительно n, положительный корень которого есть

$$n = \frac{n_1}{2}\left(\sqrt{1+\frac{4N_d}{n_1}}-1\right). \tag{15.3}$$

При достаточно низких температурах, определяемых условием $(4N_d/n_1)^{1/2} \gg 1$,

$$n = \left(\frac{g_0}{g_1}N_dN_c\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{\mathcal{J}}{2kT}\right). \tag{15.3a}$$

В этом случае мы имеем частичную ионизацию доноров и концентрация электронов в зоне уменьшается по экспоненциальному закону 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

$$n = N_d. \qquad (15.3б)$$

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

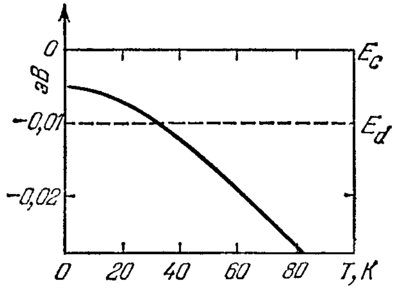

Рис. 5.10. Зависимость уровня Ферми от температуры в Ge с некомпенсированными донорами V группы (для данных кривой *1* на рис. 5.11).

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

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

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 $T \to 0$ 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 $\sim 10^{10} \div 10^{9}$ 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