

Лекция 9. Концентрация подвижных носителей заряда

Собственный полупроводник

В единичном объеме конкретного полупроводника при данной температуре находится определенное количество свободных носителей, которое называется концентрацией. Для нахождения концентрации носителей необходимо учесть число имеющихся в разрешенной зоне (зона проводимости для электронов и валентная зона для дырок) свободных энергетических уровней $N(\varepsilon)$, принимая во внимание принцип Паули.

В теории твердого тела показано, что плотность энергетических уровней N (плотность состояний), приходящихся на единичный интервал энергии, зависит от энергии (рис. 3.4а):

$$N_c(\varepsilon) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_n^*)^{3/2} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_c} \quad (0.1)$$

$$N_v(\varepsilon) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_p^*)^{3/2} \sqrt{\varepsilon_v - \varepsilon} \quad (0.2)$$

В системах частиц, описываемых антисимметричными волновыми функциями, осуществляется распределение Ферми-Дирака. Этой статистикой описывается поведение систем *фермионов* (электронов, протонов, нейтронов) – частиц, подчиняющихся принципу Паули и имеющих полуцелый спин ($\pm 1/2$). Вероятность заполнения разрешенных уровней определяется функцией Ферми-Дирака (рис. 3.4б), содержащей в качестве параметров состояния температуру и энергию уровня Ферми:

$$f_n(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (0.3)$$

$$f_p(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_F - \varepsilon}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (0.4)$$

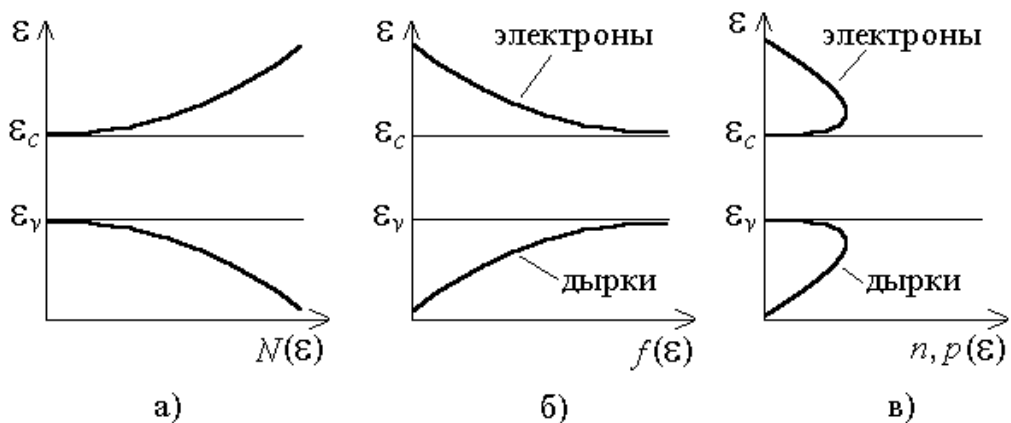


Рис. 3.4. Зависимости плотности энергетических состояний (а), вероятностей заполнения уровней свободными носителями (б) и концентраций свободных носителей (в) от энергии в беспримесном полупроводнике

Если число электронов (или дырок), приходящихся на любой энергетический интервал, меньше числа возможных состояний, то такой полупроводник называется невырожденным. Невырожденными полупроводниками являются нелегированные и слабо легированные полупроводники. Полупроводники становятся вырожденными при высоких концентрациях примесей, когда число подвижных носителей превышает число возможных состояний. В невырожденных полупроводниках электроны и дырки имеют энергию, значительно отличающуюся от энергии Ферми. Разность $\varepsilon - \varepsilon_F$, как правило, более чем в три раза превышает значение kT . Поэтому единицей в знаменателях формул 1.12 и 1.13 можно пренебречь. Тогда вероятность заполнения энергетических уровней в зоне проводимости будет распределением Максвелла-Больцмана классической статистики

$$f_n(\varepsilon) \approx \exp\left(-\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) \quad (0.5)$$

А вероятность возникновения дырки будет равна

$$f_p(\varepsilon) \approx \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon}{kT}\right) \quad (0.6)$$

Энергетическая плотность электронов и дырок равна

$$n(\varepsilon) = N_c(\varepsilon)f_n(\varepsilon) \quad (0.7)$$

$$p(\varepsilon) = N_v(\varepsilon)f_p(\varepsilon) \quad (0.8)$$

Для определения концентрации электронов и дырок в полупроводнике надо проинтегрировать по энергии энергетическую плотность электронов и дырок соответственно

$$n = \int_{\varepsilon_c}^{\infty} N_c(\varepsilon)f_n(\varepsilon)d\varepsilon = N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_F}{kT}\right) \quad (0.9)$$

$$p = \int_0^{\varepsilon_v} N_v(\varepsilon)f_p(\varepsilon)d\varepsilon = N_v \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_v}{kT}\right) \quad (0.10)$$

Здесь N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, а N_v – эффективная плотность состояний в валентной зоне.

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad (0.11)$$

$$N_v = 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad (0.12)$$

В собственном полупроводнике $n_i = p_i$, следовательно

$$N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_F}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_v}{kT}\right) \quad (0.13)$$

Логарифмируя и решая относительно ε_F , получаем

$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (0.14)$$

Величина $\frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$ значительно меньше, чем $\frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2}$, поэтому уровень Ферми в собственном полупроводнике расположен приблизительно посередине запрещенной зоны.

Примесные полупроводники

Концентрация равновесных носителей заряда зависит от положения уровня Ферми. В электронном полупроводнике концентрация электронов в основном обусловлена переходом электронов с энергетических уровней ε_d на энергетические уровни зоны проводимости. Поэтому концентрация n_n должна быть равна концентрации ионизированных доноров:

$$n_n = N_d [1 - f(\varepsilon_d)] \quad (0.15)$$

$1 - f(\varepsilon_d)$ – вероятность отсутствия электрона на уровне ε_d , следовательно

$$n_n = N_d \exp \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_F}{kT} \quad (0.16)$$

Приравнивая правые части уравнений (1.18) и (1.25) получаем:

$$N_c \exp \left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_F}{kT} \right) = N_d \exp \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_F}{kT} \quad (0.17)$$

Решая это равенство относительно ε_F получаем выражение

$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_d + \varepsilon_c}{2} - \frac{kT}{2} \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (0.18)$$

Из полученного выражения следует, что положение уровня Ферми зависит от температуры и концентрации примеси. Можно показать, что

$$n_n = n_i \exp \frac{\varepsilon_F - \varepsilon_i}{kT} \quad (0.19)$$

$$p_p = n_i \exp \left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_i}{kT} \right) \quad (0.20)$$

Умножая полученные соотношения друг на друга получим

$$n_n p_p = n_i^2 \quad (0.21)$$

Таким образом, при любой концентрации примесей произведение концентраций электронов и дырок остается постоянной величиной.

В дырочном полупроводнике концентрация дырок в основном обусловлена переходом электронов с энергетических уровней валентной зоны на энергетический уровень акцепторов. Поэтому концентрация дырок должна быть равна концентрации ионизированных примесей, то есть

$$p_p = N_a \exp \left(-\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_F}{kT} \right) = n_i \exp \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_F}{kT} \quad (0.22)$$

$$n_p = n_i \exp\left(-\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_F}{kT}\right) \quad (0.23)$$

Из изложенного можно сделать выводы:

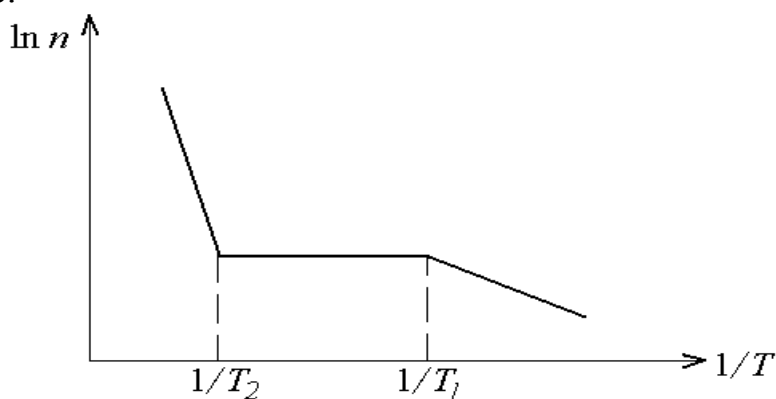
концентрация как основных, так и неосновных носителей заряда зависит от положения уровня Ферми;

введение в полупроводник примесей сдвигает уровень Ферми относительно середины запрещенной зоны в электронном полупроводнике вверх, а в дырочном – вниз;

повышение температуры полупроводника сдвигает уровень Ферми к середине запрещенной зоны;

увеличение концентрации примесей повышает концентрацию основных носителей заряда и уменьшает концентрацию неосновных носителей заряда.

Зависимость концентрации электронов и дырок от температуры показана на рис.



В зависимости концентрации подвижных носителей от температуры можно выделить три характерных участка. В области достаточно низких температур концентрация носителей изменяется в основном за счет переходов электронов с донорного уровня в зону проводимости или за счет переходов электронов из валентной зоны на акцепторный уровень с образованием свободных дырок. Это область вымораживания, которая заканчивается при достижении некоторой температуры $T_1 \approx 100$ К, когда происходит полная ионизация примесных уровней. Дальнейшее увеличение температуры не приводит к увеличению концентрации подвижных носителей (область истощения примесей). Начиная с некоторой более высокой температуры $T_2 \approx 400$ К концентрация подвижных носителей снова начинает возрастать вследствие процесса образования электронно-дырочных пар при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости. Этот участок относится к собственной проводимости. Практически полупроводниковые приборы работают в основном в области истощения примесей.