рожденные полупроводники). Тогда равенства (2.40) упрощаются:

$$n = n_0 \exp\left(\frac{\mu - E_C}{k_B T}\right), \quad p = p_0 \exp\left(\frac{E_V - \mu}{k_B T}\right), \qquad \left.\begin{matrix} n_0 \\ p_0 \end{matrix}\right\} = 2\left(\frac{m_{n,p} k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}. \tag{2.49}$$

Если n или p превышают концентрации n_0, p_0, то электронный или дырочный газы становятся вырожденными.

1) Диссоциация донора: $D^+ + \ominus \rightleftharpoons D^\times$.

Закон действующих масс, с одной стороны, дает

$$\frac{n n_{D^+}}{n_{D^\times}} = \frac{n^0 n^0_{D^+}}{n^0_{D^\times}} \exp\left[-(E_- + E_{D^+} - E_{D^\times})/k_B T\right]. \tag{2.50}$$

С другой стороны, из (2.49) и (2.41) с помощью использования условия нейтральности $n = n_{D^+}$ и исключения химического потенциала, получаем, что

$$\frac{n^2}{n_D - n} = \frac{n_0}{g} \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{k_B T}\right). \tag{2.51}$$

Одно уравнение ведет к другому. Левые части согласуются вследствие условия нейтральности. $E_{D^+} - E_{D^\times}$ есть энергия, необходимая для превращения заряженного донора в незаряженный, т. е. равная энергии, требуемой для переноса электрона из бесконечности в донор. Но это как раз энергия $-E_D$ в зонной модели. E_- равна энергии нижнего края зоны проводимости E_C. Показатели экспонент, следовательно, соответствуют друг другу. Наконец, коэффициенты справа и слева равны, если в качестве стандартной концентрации выбирается n_0, а в качестве коэффициента g — отношение стандартных концентраций $n^0_{D^\times}/n^0_{D^+}$.

2) Образование и рекомбинация пары электрон — дырка: $\ominus + \oplus \rightleftharpoons 0$.

Закон действующих масс дает

$$np = n^0 p^0 \exp\left[-(E_- + E_+)/k_B T\right]. \tag{2.52}$$

Величина E_- есть энергия, необходимая для перевода электрона с края зоны проводимости в бесконечность, т. е. равная E_C. Величина E_+ есть энергия, необходимая для перевода дырки с края валентной зоны в бесконечность, или — для переноса электрона из бесконечности на край зоны: $E_+ = -E_V$. Если снова концентрации n_0 и p_0 выбираются в качестве стандартных, (2.52) принимает вид

$$np = n_0 p_0 \exp\left[-(E_C - E_V)/k_B T\right] = n_0 p_0 \exp\left(-\frac{E_G}{k_B T}\right). \tag{2.53}$$