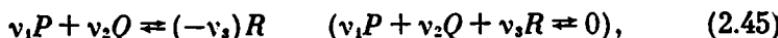


тогда, чтобы свободная энергия  $F$  имела экстремальное значение

$$\delta F = \sum_p \mu_p \delta n_p = 0. \quad (2.44)$$

Рассматриваем специальную «реакцию»



где  $|v_i|$  дает число частиц коллективов  $P$ ,  $Q$  или  $R$ , принимающих участие в реакции, с различием по знаку между исчезающими и образующимися в реакции частицами. Условие равновесия тогда таково:

$$v_1 \mu_P + v_2 \mu_Q + v_3 \mu_R = 0. \quad (2.46)$$

В равновесном состоянии сумма химических потенциалов, умноженных на числа участвующих в реакции частиц, равна нулю. При представлении этого условия равновесия в явном виде обычно разделяют химические потенциалы на зависящую и не зависящую от концентрации части:

$$\mu_p = E_p + k_B T \ln \frac{n_p}{n_p^0}, \quad (2.47)$$

где  $n_p^0$  — первоначально непозвестная стандартная концентрация. Такое разделение возможно, конечно, только пока  $n_p \ll n_p^0$ , и ограничено, таким образом, как мы позднее увидим, невырожденными полупроводниками с не слишком высокой концентрацией дефектов.

В качестве  $E_p$  выбираются энергии, требуемые для перевода частицы из наиболее глубокого коллективного состояния в бесконечность и разложения там на ее независимые составные части. Разделение (2.47) дает при подстановке в обобщенное уравнение (2.46)  $\left( \sum_p \mu_p v_p = 0 \right)$

$$\prod_p \left( \frac{n_p}{n_p^0} \right)^{v_p} = \exp \left( - \frac{1}{k_B T} \sum_p v_p E_p \right). \quad (2.48)$$

Это — закон действующих масс, который описывает равновесие между различными коллективами. Константа равновесия (за исключением множителя, образованного из  $n_p^0$ ) является экспоненциальной функцией, показатель которой содержит энергию, размещающую в реакции.

Рассмотрим два примера и сравним при этом результаты, следующие из зонной модели и из кинетики реакций. Ограничимся, согласно (2.47), малыми концентрациями электронов и дырок (невы-