

## СТАТИСТИКА РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК

## § 1. Различные типы процессов рекомбинации

Рассматривая неравновесные электронные состояния в гл. VII, мы ввели понятия о средних временах жизни избыточных электронов и дырок в зонах  $\tau_n$  и  $\tau_p$ . Однако мы не интересовались тем, от чего зависят эти времена. Между тем опыт показывает, что  $\tau_n$  и  $\tau_p$  могут изменяться в чрезвычайно широких пределах — от многих часов до  $10^{-8}$  с и меньше. В настоящей главе мы рассмотрим подробнее процессы рекомбинации и генерации неравновесных электронов и дырок и выясним физические причины, влияющие на времена их жизни.

Процессы рекомбинации удобно разделить на два класса: 1) прямую рекомбинацию зона — зона и 2) рекомбинацию с участием примесей и дефектов. В первом случае свободный электрон из зоны проводимости рекомбинирует со свободной дыркой в валентной зоне в одном элементарном акте. В процессах второго класса свободные электроны рекомбинируют со связанными дырками на примесях или дефектах, а свободные дырки — со связанными электронами. Мы остановимся сначала на прямой рекомбинации зона — зона.

При переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону всегда должны выполняться законы сохранения энергии и квазиимпульса. Поэтому если  $E'$  и  $k'$  — энергия и квазиволновой вектор электрона в начальном состоянии в зоне проводимости, а  $E$  и  $k$  — их значения в конечном состоянии в валентной зоне, то должны выполняться соотношения

$$E'(k') = E(k) + \Delta E, \quad (1.1)$$

$$\hbar k' = \hbar k + \Delta p. \quad (1.2)$$

Здесь  $\Delta E$  и  $\Delta p$  — энергия, освобождаемая в элементарном акте рекомбинации и, соответственно, изменение квазиимпульса электрона при переходе. Поскольку квазиимпульсы в начальном и конечном состояниях системы должны лежать в пределах первой зоны Бриллюэна (§ III.3), правая часть уравнения (1.2) может содержать еще слагаемое  $\hbar b$ , которое мы не выписываем. Прямая рекомбина-

ция электрона и дырки возможна только в тех случаях, когда от электрона может быть отведена освобождающаяся энергия  $\Delta E$  и обеспечено изменение квазиимпульса  $\Delta p$ , определяемые законами сохранения (1.1) и (1.2).

Процессы, обеспечивающие выполнение законов сохранения, могут быть различны. Это может быть испускание кванта электромагнитного излучения — фотона определенной частоты  $\omega$ , тогда \*)

$$\Delta E = \hbar\omega, \quad |\Delta p| = \frac{\hbar\omega}{c}. \quad (1.3)$$

В этом случае мы говорим об *излучательной рекомбинации*. Избыточные энергия и квазиимпульс могут быть переданы колебаниям решетки, или фононам. Известны и процессы, при которых энергия и квазиимпульс, освобождаемые при рекомбинации, передаются третьей свободной частице — электрону (в электронных полупроводниках) или дырке (в дырочных полупроводниках). Процессы такого типа получили название *ударной рекомбинации* (или *Оже-рекомбинации*). Очевидно, что вероятность таких процессов возрастает при увеличении концентрации носителей заряда, и поэтому ударная рекомбинация проявляется обычно в сильно легированных полупроводниках. Принципиально возможны и другие типы элементарных актов рекомбинации (см. § XVII.9). В случаях, когда фотоны не участвуют в обмене энергией и квазиимпульсом, говорят о *безызлучательной рекомбинации*.

Вероятность различных типов элементарных актов зависит от энергетической структуры кристалла, а также от концентрации электронов и дырок. При этом процессы разного типа могут сосуществовать.

В настоящей главе мы будем рассматривать только статистику рекомбинации и получим соотношения, справедливые при любом механизме рекомбинации. Конкретная природа рекомбинационных процессов будет определять лишь значения фигурирующих в дальнейшем вероятностей электронных переходов (эффективных сечений рекомбинации).

## § 2. Темп рекомбинации зона — зона

Рассмотрим группу состояний 1 (рис. 9.1) в зоне проводимости с энергией в интервале  $(E', E' + dE')$  и группу состояний 2 в валентной зоне с энергией  $(E, E + dE)$ . Число переходов  $1 \rightarrow 2$ , рассчитанное на единицу времени и единицу объема, должно быть пропорционально количеству электронов в состояниях 1, т. е.

\*) Строго говоря, второе из соотношений (1.3) нуждается в дополнительном доказательстве, ибо  $\hbar\omega/c$  есть импульс, а не квазиимпульс фотона (см. гл. XVIII).