

1.10. НЕРАВНОВЕСНЫЕ НОСИТЕЛИ И УРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ

Цель лекции: ознакомление с неравновесными носителями и уравнением непрерывности.

1.10.1. НЕРАВНОВЕСНЫЕ НОСИТЕЛИ, РЕКОМБИНАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ

Наряду с процессом тепловой генерации электронов и дырок вследствие перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости в полупроводниках протекает процесс рекомбинации свободных носителей. Если бы процесс генерации был единственным, то концентрация свободных носителей непрерывно возрастала с течением времени. Процесс генерации носителей уравнивается рекомбинацией носителей. Электрон в зоне проводимости может потерять энергию и перейти вновь в валентную зону. При этом ликвидируется как электрон проводимости, так и дырка в валентной зоне.

При любой температуре в полупроводниках устанавливается равновесие между процессом тепловой генерации носителей и процессом рекомбинации. Этому равновесию соответствует равновесная концентрация носителей. Такие носители называются равновесными. Закон действующих масс применим только к равновесным носителям.

Если генерация носителей заряда осуществляется под действием других факторов, а не вследствие повышения температуры, таких как облучение светом, введение носителей заряда извне за счет электрического поля и т. п., то концентрация носителей будет отличаться от равновесной концентрации. В полупроводнике появятся избыточные носители, называемые неравновесными носителями. Концентрации таких носителей обозначают Δn и Δp . Полная концентрация носителей заряда

$$n = n_0 + \Delta n;$$

$$p = p_0 + \Delta p,$$

где n_0 , p_0 — равновесные концентрации.

Каждый неравновесный носитель, возникнув в полупроводнике, существует в нем определенное время, ограниченное его рекомбинацией. Для отдельных носителей это время различно, поэтому вводят среднее время жизни носителей: τ_n — для электронов, τ_p — для дырок.

Процесс генерации характеризуется скоростью генерации G , которая равна числу носителей, появляющихся в единицу времени в единичном объеме

полупроводника. Аналогично процесс рекомбинации характеризуют скоростью рекомбинации:

$$R_n = -\frac{dn}{dt} = -\frac{d(n_0 + \Delta n)}{dt} = -\frac{d(\Delta n)}{dt}; \quad R_p = -\frac{d(\Delta p)}{dt},$$

знак «минус» указывает на то, что в процессе рекомбинации концентрация носителей уменьшается.

Виды рекомбинации. Процесс рекомбинации носителей, т. е. переход электрона из зоны проводимости в валентную зону, может происходить двумя путями. При межзонной рекомбинации электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону. Возможен второй способ перехода электрона — сначала он переходит на примесный уровень E_n , а затем с примесного уровня — в валентную зону. Этот тип рекомбинации называется *рекомбинацией через примесный уровень*. В обоих случаях выделяется одна и та же энергия. Только в первом случае она выделяется сразу, а во втором — постепенно (рис. 1.23).

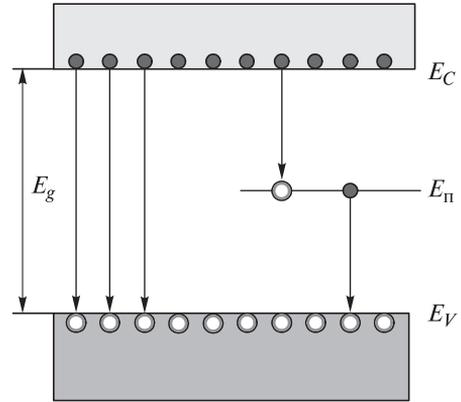


Рис. 1.23. Межзонная рекомбинация и рекомбинация через примесный уровень

Выделение энергии может происходить в виде квантов света $h\nu$ или в виде фотонов. Тепловые колебания кристаллической решетки квантованы, соответствующие им квазичастицы (аналогичны квантам света) называются фотонами $h\nu_g$, где ν_g — частота нормальных колебаний решетки. Если при рекомбинации происходит выделение кванта света, то она называется излучательной. Если вся энергия электронов при рекомбинации переходит в тепловую энергию, то она называется безызлучательной.

1.10.2. ПОВЕРХНОСТНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ

Процессы рекомбинации как в приповерхностном слое, так и в объеме полупроводника в принципе не отличаются. Однако, так как на поверхности полупроводника имеются добавочные поверхностные уровни, то возможности рекомбинации носителей на поверхности увеличиваются по сравнению с объемом. Поскольку активные области полупроводниковых приборов расположены вблизи поверхности полупроводника, влияние поверхности необходимо учитывать при их проектировании и анализе работы.

Обозначим поверхностное время жизни носителей τ_s , объемное — τ_v . Если рабочий участок полупроводникового прибора расположен частично

в объеме и частично в приповерхностном слое, используют эффективное время жизни носителей τ , которое определяется из выражения

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_S} + \frac{1}{\tau_V}.$$

Поскольку $\tau_S < \tau_V$, эффективное время жизни ближе к τ_S .

Поверхностное время жизни трудно определить экспериментально или рассчитать, поэтому для характеристики поверхностной рекомбинации используется параметр s — скорость поверхностной рекомбинации, который впервые был введен Шокли.

Скорость поверхностной рекомбинации представляет собой коэффициент, определяющий скорость потока носителей заряда к поверхности. Направленные потоки носителей из объема к поверхности полупроводника возникают вследствие более высокой интенсивности рекомбинации у его поверхности:

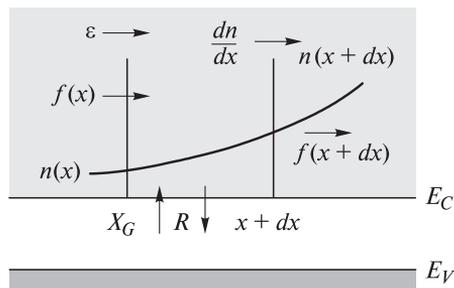
$$\begin{aligned} J_n &= qs\Delta n; \\ J_p &= qs\Delta p, \end{aligned}$$

где J_n , J_p — плотность тока соответственно электронов и дырок, текущего к поверхности полупроводника.

Данные токи являются паразитными, и их следует уменьшать, снижая скорость поверхностной рекомбинации всеми возможными средствами. Скорость поверхностной рекомбинации существенно зависит от способа и качества обработки кристалла и составляет $10^2 \dots 10^4$ см/с.

1.10.3. УРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ

Рассмотрим локальный объем полупроводника с одиночной площадью $S = 1 \text{ см}^2$ и толщиной dx . Объем такой области $V = Sdx = dx$ (рис. 1.24). Пусть $n_{(x,t)}$ — концентрация электронов в данной области. Общее число электронов при этом составит $n_{(x,t)}dx$. Изменение числа электронов в этой локальной области за время dt



$$\left[n_{(x,t+dt)} - n_{(x,t)} \right] dx = \left(\frac{dn}{dt} \right) dt dx.$$

Изменение числа электронов может происходить вследствие процессов:
– термической генерации

$$n_G = Gdt dx,$$

Рис. 1.24. Потоки носителей в полупроводнике

где G — скорость генерации;

– рекомбинации носителей

$$n_R = -R \cdot dt dx;$$

– разности входящего и выходящего потоков электронов в локальную область и из нее под действием электрического поля и градиента концентрации

$$[f_n(x, t) - f_n(x + dx, t)] dt = - \left(\frac{df_n}{dx} \right) dx dt.$$

Общее изменение концентрации электронов

$$\left(\frac{dn}{dt} \right) dt dx = G dt dx - R dt dx - \left(\frac{df_n}{dx} \right) dx dt,$$

тогда

$$\left(\frac{dn}{dt} \right) = G - R - \left(\frac{df_n}{dx} \right).$$

Плотность тока электронов $j_n = -f_n q$, где q — заряд электрона, следовательно, $f_n = -j/q$, тогда

$$\left(\frac{dn}{dt} \right) = G - R + \frac{1}{q} \frac{dj_n}{dx}.$$

Это выражение называется уравнением непрерывности. Плотность тока j_n в общем случае складывается из дрейфовой и диффузионных составляющих.

Пусть $j_n = 0$, тогда

$$\frac{dn}{dt} = G - R.$$

В равновесном состоянии $G = R$ $dn/dt = 0$. В неравновесном состоянии $G \neq R$. Обозначим $G - R = -\Delta n(t)/\tau_n$, где $\Delta n(t)$ — избыточная концентрация электронов, являющаяся функцией времени. Подставив ее в выражение для dn/dt , получим

$$\frac{dn}{dt} = - \frac{\Delta n(t)}{\tau_n}.$$

Решение этого уравнения будет иметь вид

$$\Delta n(t) = \Delta n(0) e^{-t/\tau_n},$$

где $\Delta n(0)$ — избыточная концентрация в начальный момент времени.

Величину τ_n называют временем жизни носителей, в данном случае электронов. Это среднее время, в течение которого избыточная концентрация уменьшается в e раз вследствие рекомбинации.

Тесты к лекции 1.10

1. *Какие носители в полупроводнике называются неравновесными?*

- а) избыточные;
- б) основные;
- в) неосновные.

2. *Что называется генерацией носителей?*

- а) переход электронов из валентной зоны в зону проводимости;
- б) переход электронов из зоны проводимости в валентную зону;
- в) переход дырок из валентной зоны в запрещенную зону.

3. *От чего зависит скорость поверхностной рекомбинации носителей в полупроводнике?*

- а) от способа и качества обработки полупроводникового кристалла;
- б) от концентрации носителей;
- в) от наличия примесей.

4. *Что такое межзонная рекомбинация носителей?*

а) рекомбинация непосредственно между зоной проводимости и валентной зоной;

- б) рекомбинация через один примесный уровень;
- в) рекомбинация через два примесных уровня.

5. *Что такое излучательная рекомбинация?*

- а) выделение кванта света;
- б) выделение донорных носителей;
- в) выделение акцепторных носителей.

6. *Перечислите все процессы, в результате которых в полупроводнике может происходить изменение числа носителей:*

а) термическая генерация, рекомбинация носителей, действие электрического поля и градиента концентрации;

б) термическая генерация, действие электрического поля и градиента концентрации;

в) термическая генерация и действие электрического поля.

7. *Что такое время жизни носителей в полупроводнике?*

а) среднее время, в течение которого избыточная концентрация уменьшается в e раз вследствие рекомбинации;

б) время между взаимными столкновениями носителей;

в) время между столкновениями носителей с атомами кристаллической решетки.