

### § 8. Зависимость поверхностной рекомбинации от поверхностного потенциала

Опыт показывает, что скорость поверхностной рекомбинации  $s$  чрезвычайно сильно зависит от обработки поверхности. Так, например, для тонко шлифованной поверхности германия, протравленной в водном растворе  $H_2O_2$  или в специальных смесях кислот (уксусной, азотной, фтористоводородной), при комнатной температуре  $s \sim 1 \div 10$  см/с. Но после грубой шлифовки поверхности или помещения образца в вакуум  $s$  может возрасти до  $10^4 \div 10^5$  см/с. Соответственно время жизни неравновесных носителей в тонких пластинках и в массивных слитках того же самого материала может сильно различаться. Если в очень чистых кристаллах германия  $\tau$  может достигать  $\sim 10^{-1}$  с, то в непротравленных пластинках толщиной  $\sim 1$  мм оно падает до  $10^{-6}$  с и меньше.

Величина  $s$  сильно зависит от свойств окружающей среды: состава окружающих газов или имеющихся на поверхности различных покрытий, а также от температуры. Она сильно изменяется под действием внешнего поперечного электрического поля. Это показывает, что скорость поверхностной рекомбинации сильно зависит от поверхностного потенциала  $Y_s$ .

Зависимость  $s$  от  $Y_s$  можно получить, исследуя эффект поля и измеряя одновременно с  $Y_s$  (ср. § 3) еще и  $s$  (например, по скорости затухания фотопроводимости, § 7). Пример такой зависимости для германия показан на рис. 10.21. Величина  $s$  имеет максимум при некотором значении  $Y_{sm}$  и быстро убывает по обе стороны максимума. Кривые  $s(Y_s)$  оказываются различными при разной обработке поверхности.

Для объяснения наблюдаемых экспериментальных фактов рассмотрим подробнее процесс рекомбинации через поверхностные уровни. Для простоты положим, что только один из уровней является эффективным уровнем рекомбинации (в то время как другие уровни участвуют только в искривлении зон). Тогда, как и при рекомбинации в объеме, мы должны учесть четыре типа элементарных актов, показанных на рис. 10.22. Рассуждая так же, как и в § IX.4, мы найдем, что темп захвата электронов из объема на поверхность

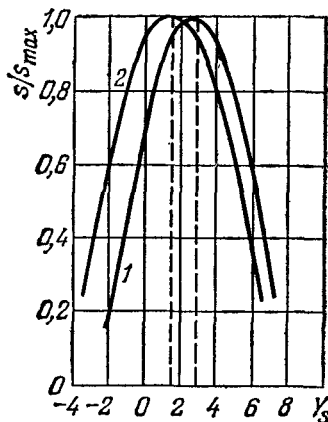


Рис. 10.21. Пример зависимости скорости поверхностной рекомбинации  $s/s_{\max}$  от поверхностного потенциала в германии. 1 — вакуум, 2 — сухой кислород; 300 К [1].

можно выразить формулой

$$R_{sn} = \alpha_n \nu [(1 - f_s) n_s - n_1 f_s]. \quad (8.1)$$

Различие по сравнению с формулой (IX.4.7) заключается в том, что слева теперь стоит суммарный темп захвата на поверхность (на  $1 \text{ см}^2$  в 1 с), а  $\nu$  обозначает число поверхностных рекомбинационных уровней на  $1 \text{ см}^2$  поверхности;  $f_s$  есть (неравновесная) степень заполнения поверхностного уровня электронами, а  $n_s$  — полная концентрация свободных электронов возле поверхности,  $\alpha_n$  — коэффициент

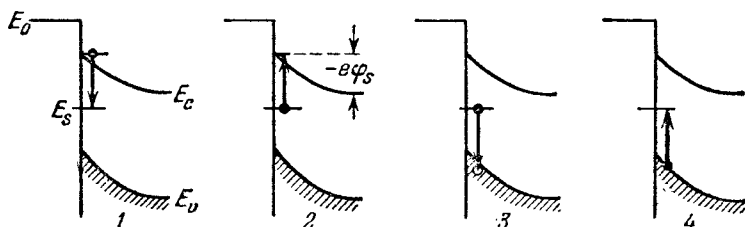


Рис. 10.22. Элементарные акты при рекомбинации через поверхностный уровень энергии. 1 — захват электрона, 2 — эмиссия электрона, 3 — захват дырки, 4 — эмиссия дырки.

захвата поверхностного уровня для электронов, а  $n_1$  по-прежнему выражается формулой (V.9.5), где теперь, однако,  $(E_c - E_i)$  есть энергия ионизации поверхностного уровня.

Для захвата дырок справедливо аналогичное выражение:

$$R_{sp} = \alpha_p \nu [f_s p_s - (1 - f_s) p_1], \quad (8.2)$$

где  $\alpha_p$  — коэффициент захвата для дырок, а  $p_1$ , как и раньше, определяется формулой (V.9.13).

Ограничиваясь стационарными состояниями, мы имеем  $R_{sn} = R_{sp} = R_s$ . Отсюда определяется  $f_s$ :

$$f_s = \frac{\alpha_n n_s + \alpha_p p_1}{\alpha_n (n_s + n_1) + \alpha_p (p_s + p_1)}. \quad (8.3)$$

Подставляя это в одну из формул (8.1) или (8.2), мы находим

$$R_s = \nu \alpha_n \alpha_p \frac{p_s n_s - p_1 n_1}{\alpha_n (n_s + n_1) + \alpha_p (p_s + p_1)}, \quad (8.4)$$

где  $n_1 p_1 = n_0 p_0 = n_i^2$ , а  $n_0$  и  $p_0$  — концентрации в объеме, за пределами слоя объемного заряда.

В дальнейшем мы будем считать, что а) полупроводник не вырожден и концентрации неравновесных дырок и электронов подчиняются закону Больцмана (5.3); соответственно  $p_s n_s = p n$ , где  $p$  и  $n$  — полные концентрации на границе объемного заряда (в плоскости  $x = 0$ , рис. 10.18); б)  $\delta p = \delta n$  (концентрация уровней мала); в) нару-

шение равновесия мало,  $\delta n / (n_0 + p_0) \ll 1$ . Тогда, полагая  $n = n_0 + \delta n$ ,  $p = p_0 + \delta p$  и удерживая только малые первого порядка, находим

$$p_s n_s - p_1 n_1 = pn - p_0 n_0 \simeq (n_0 + p_0) \delta n,$$

$$R_s = v \alpha_n \alpha_p \frac{n_0 + p_0}{\alpha_n (n e^{Y_s} + n_1) + \alpha_p (p e^{-Y_s} + p_1)} \delta n. \quad (8.4a)$$

Если при этом полупроводник не очень близок к собственному, то при малом нарушении равновесия можно еще заменить  $n$  и  $p$  на  $n_0$  и  $p_0$ . Тогда для скорости поверхностной рекомбинации получаем

$$s = \frac{R_s}{\delta n} = v \alpha_n \alpha_p \frac{n_0 + p_0}{\alpha_n (n_0 e^{Y_s} + n_1) + \alpha_p (p_0 e^{-Y_s} + p_1)}. \quad (8.5)$$

Формула (8.5) в ряде случаев удовлетворительно описывает общий характер зависимости  $s$  от  $Y_s$ . В частности, она показывает, в соответствии с экспериментальными данными, что  $s$  имеет максимум при некотором значении  $Y_s = Y_{sm}$ . Приравнявая нулю производную от знаменателя по  $Y_s$  в формуле (8.5), находим

$$Y_{sm} = \ln \left( \frac{p_0}{n_0} \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \right)^{1/2}. \quad (8.6)$$

Определяя на опыте  $Y_{sm}$  и зная отношение  $p_0/n_0 = n_i^2/n_0^2 = p_0^2/n_i^2$  в объеме (которое легко измеряется), можно найти отношение коэффициентов захвата  $\alpha_p/\alpha_n$  для данного поверхностного уровня. А отсюда можно сделать заключение и о том, является ли данный уровень акцепторным или донорным. Действительно, так как захваты при наличии кулоновского притяжения обычно характеризуются большими значениями  $\alpha$ , то значения  $\alpha_p/\alpha_n \gg 1$ , скорее всего указывают на то, что возможные зарядные состояния уровня — отрицательное и нейтральное, а следовательно, уровень является акцепторным. Напротив, значения  $\alpha_p/\alpha_n \ll 1$  являются указанием на донорный характер уровня.

Анализ данных по поверхностной рекомбинации показывает, что из всей совокупности поверхностных уровней только часть участвует в процессах рекомбинации. Остальные же уровни могут обмениваться носителями заряда только с одной из зон и являются «уровнями прилипания» для электронов или для дырок.

## § 9. Ток насыщения диодов

Поверхностная рекомбинация может сильно влиять на параметры полупроводниковых приборов с  $p-n$ -переходами. Поясним это на простейшем примере диода. Его мы будем представлять (как это часто делают практически) в виде тонкой пластинки полупроводника, для определенности  $n$ -типа, в которую вплавлена капля металла