

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 α_p/α_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 α , 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

(радиуса a), являющегося акцептором (рис. 10.23). Толщину пластинки $2A$ будем считать намного меньшей эффективной длины диффузии дырок $\lambda_p = \sqrt{D_p \tau}$. Здесь τ — результирующее время жизни, определяемое формулой (7.3а).

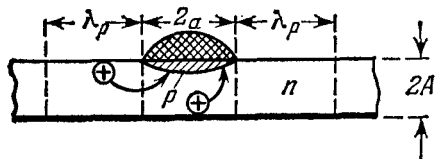


Рис. 10.23. К вычислению тока насыщения диода при учете поверхностной рекомбинации.

Как мы знаем (§ VIII.1), обратный ток насыщения диодов образован тепловой генерацией неосновных носителей. Однако в данном случае это будут не только дырки, возникающие в объеме пластинки, но и дырки, генерируемые с поверхностных уровней на обеих поверхностях пластинки (рис. 10.23). Из формулы (5.4) следует, что с каждой единицы поверхности в единицу времени генерируется $s\rho_0$ дырок. Поэтому дополнительный ток насыщения, обусловленный поверхностью, есть

$$i'_s = es\rho_0 [2\pi (\lambda_p + a)^2 - \pi a^2]. \quad (9.1)$$

В случае тонких пластинок τ_s может быть значительно меньше $\tau_{об}$. Так, например, при $s \sim 10^3$ см/с и $A \sim 10^{-2}$ см мы имеем $\tau_s \sim 10^{-5}$ с, в то время как $\tau_{об}$ часто бывает в десятки раз больше. Поэтому в формуле (9.1) обычно можно считать, что $\lambda_p \simeq \sqrt{D_p \tau_s}$. Тогда весь избыточный обратный ток определяется только свойствами поверхности. Оценки, в согласии с опытом, показывают, что избыточный ток i'_s в диодах с тонкой базой может быть намного больше тока насыщения, обусловленного генерацией носителей в объеме.

Так как s зависит от поверхностного потенциала Y_s , то избыточный ток насыщения изменяется при изменении обработки поверхности и свойств окружающей среды.

Поверхностная рекомбинация существенно влияет на свойства и других полупроводниковых приборов, например на свойства транзисторов с $p-n$ -переходами. А изменение состояния поверхности со временем приводит к нестабильности параметров приборов. Поэтому надежная стабилизация поверхности и ее защита от внешних влияний является одной из важных задач технологии полупроводниковых приборов.