

ными авторами. Они показали, что формула Эйнштейна хорошо выполняется и для неравновесных носителей, что является экспериментальным подтверждением возможности введения квазиуровней Ферми.

### § 10. $n^+ - n$ - и $p^+ - p$ -переходы

При инжекции в  $p$ - $n$ -переходах концентрация неравновесных носителей на границе  $(\delta p)_0 > 0$  и полупроводник обогащается электронами и дырками. Однако нарушение равновесных концентраций носителей при наличии тока через контакт может быть и таким, что  $(\delta p)_0 < 0$ .

Рассмотрим контакт двух полупроводников одинакового типа проводимости, но различающихся по степени легирования примесями. Такие контакты получили название  $n^+ - n$ - и, соответственно,

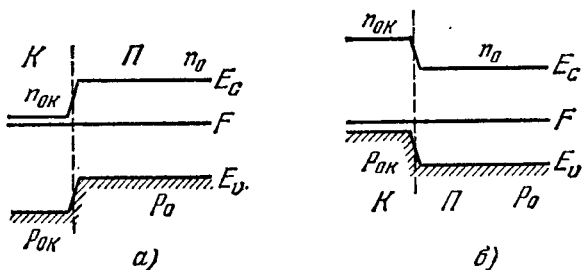


Рис. 7.19. Контакты  $n^+ - n$  (а) и  $p^+ - p$  (б).

$p^+ - p$ -контактов. Их энергетическая диаграмма в отсутствие тока показана на рис. 7.19. Такие переходы иногда образуются и при изготовлении контакта полупроводника с металлами за счет диффузии металла (например, при сплавлении), термической обработки и т. п. Будем условно называть одну из областей «контактным электродом», а другую — «полупроводником» и будем говорить, для определенности, о переходе  $n^+ - n$ . Участие неосновных носителей (дырок) в образовании тока различно в обеих областях. Его можно охарактеризовать коэффициентами  $\xi$  (в полупроводнике) и  $\xi_k$  (в контактном электроде):

$$\xi = \frac{j_p}{j} = \frac{\mu_p p_0}{\mu_0 p_0 + \mu_n n_0}, \quad \xi_k = \frac{j_{pk}}{j} = \frac{\mu_p p_{0k}}{\mu_p p_{0k} + \mu_n n_{0k}}. \quad (10.1)$$

Решающую роль для знака  $(\delta p)_0$  играет разность между «коэффициентом инжекции»  $\xi_k$  и коэффициентом  $\xi$ . Если  $\xi_k > \xi$ , то  $(\delta p)_0 > 0$ . Если при этом внешнее напряжение положительно (минус на полупроводнике), то обогащенная область будет затягиваться в глубь полупроводника. При наложении прямоугольного импульса напряжения эта область будет перемещаться со скоростью  $\mu \mathcal{E}$ . Через

время порядка пролетного времени  $d/\mu \xi$ , где  $d$  — длина образца, установится стационарное экспоненциальное распределение концентрации с длиной затягивания  $l(\xi)$ , определяемой формулой (9.4). Мы получим инжекцию неосновных носителей, которая принципиально не отличается от инжекции в  $p$ - $n$ -переходах.

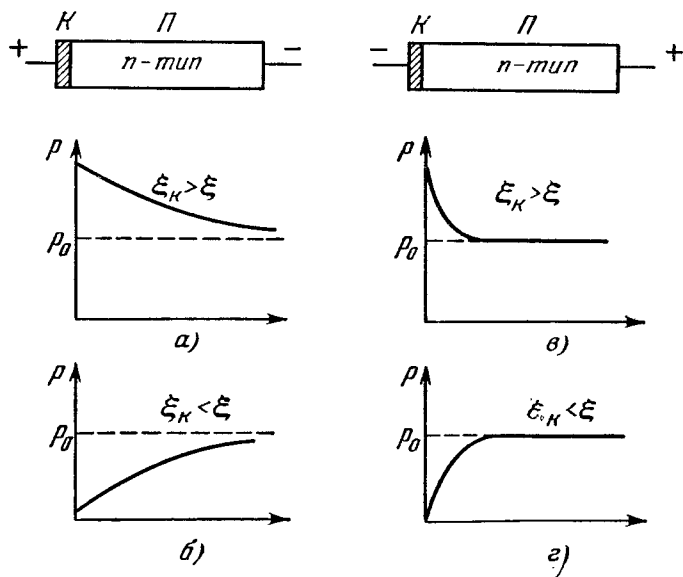


Рис. 7.20. Инжекция (а), эксклюзия (б), аккумуляция (в) и экстракция (г) носителей заряда.

При  $\xi_k > \xi$ , но отрицательном внешнем напряжении, образуется также обогащенная область. Она, однако, будет локализована в тонком слое у электрода, с толщиной, определяемой формулой (9.7). Это явление известно как *аккумуляция* неосновных носителей.

Если  $\xi_k < \xi$ , то возникает обедненная область с  $(\delta\rho)_0 < 0$ . И здесь возможны два случая. Если внешнее напряжение положительно, то обедненная область затягивается в полупроводник и распределение «дефицита» носителей  $\delta\rho$  определяется той же длиной затягивания (9.4), что и при инжекции. При длине дрейфа  $\geq$  длине образца обедненная область охватывает весь образец. Этот тип нарушения равновесия получил название *эксклюзии* неосновных носителей.

Однако, в отличие от инжекции, изменение электропроводности образца при эксклюзии ограничено. Действительно, в равновесии электропроводность

$$\sigma_0 = e\rho_0\mu_p + e n_0\mu_n.$$

В предельном случае эксклюзии мы имеем  $p_{\min} = 0$ . Однако  $n_{\min} \neq 0$ , так как часть электронов не может быть удалена из образца без нарушения компенсации заряженных примесей и электрической нейтральности. Для случая полностью ионизованных доноров и акцепторов

$$p + N_d = n + N_a.$$

Поэтому

$$\sigma_{\min} = e\mu_n n_{\min} = e\mu_n (N_d - N_a). \quad (10.2)$$

Отсюда

$$\frac{(\Delta\sigma)_{\max}}{\sigma_0} = - \frac{\rho_0 (b+1)}{\rho_0 + b n_0}, \quad (10.3)$$

где  $b = \mu_n / \mu_p$ .

И, наконец, при  $\xi_k < \xi$ , но отрицательном внешнем напряжении возникает обедненный слой, локализованный у контакта. Его характерная длина, как и в случае аккумуляции, выражается формулой (9.7). Этот тип нарушения равновесия известен как *экстракция* неосновных носителей. На рис. 7.20 показаны для сравнения все четыре типа возможных нарушений равновесия по концентрации у контакта.