

где разность потенциалов теперь была бы, вообще говоря, другой, так как распределения неравновесных электронов и дырок различны и сторонние силы \mathcal{E}_{nx}^* и \mathcal{E}_{px}^* неодинаковы.

Выберем теперь сечения A и B в таких частях полупроводника, где концентрации избыточных носителей $\delta p = \delta n = 0$. Тогда $F_{nB} = F_{pB} = F_B$, $F_{nA} = F_{pA} = F_A$ и, следовательно, $(\varphi_B - \varphi_A) = (\varphi_B - \varphi_A)'$. Поэтому

$$F_B - F_A = -e(\varphi_B - \varphi_A), \quad (5.8)$$

где $(\varphi_B - \varphi_A)$ есть приложенное внешнее напряжение. Таким образом, разность квазиуровней Ферми есть та величина, которую мы непосредственно измеряем вольтметром.

§ 6. Электронно-дырочные переходы

Для создания неравновесных носителей заряда широко применяют электронно-дырочные переходы (p — n -переходы), о которых мы уже говорили в § VI.9. Чтобы избежать сложного и неконтролируемого влияния микрогеометрии поверхности, такие переходы осуществляют не механическим соединением двух полупроводников,

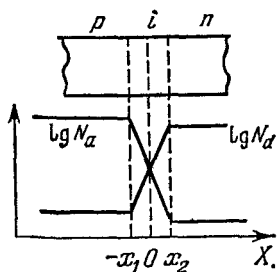


Рис. 7.8. p — n -переход.

а внутри единого монокристалла, в котором создают подходящее распределение донорной и акцепторной примесей, например показанное на рис. 7.8. Если эти примеси полностью ионизованы (например, элементы III и V групп в германии и кремнии при комнатных температурах), то в левой части кристалла будет дырочная проводимость с концентрацией основных носителей $p \simeq N_a - N_d$, а в правой части — электронная ($n \simeq N_d - N_a$). Между ними расположен переходный слой («технологический» переход), в котором концентрация примесей быстро изменяется. В некоторой тонкой области этого слоя доноры и акцепторы компенсируют друг друга ($N_d \simeq N_a$) и имеет место собственная проводимость (i).

Нужное распределение доноров и акцепторов можно осуществить различными технологическими приемами: добавлением одной из примесей в расплав в процессе роста кристалла; диффузией из газовой фазы одной из примесей (например, донорной в кристалл, уже имеющий акцепторы); сплавлением полупроводника p - (или n -) типа с металлом, являющимся донором (или, соответственно, акцептором), и другими, на которых мы не будем останавливаться.

Распределение концентраций электронов и дырок в p — n -переходе в отсутствие тока показано на рис. 7.9 (внизу) сплошными линиями 1 и 2. При обозначении концентраций мы будем использо-

вать дополнительный индекс (p или n), указывающий, к какой области перехода относится данная концентрация. Так, концентрация дырок в дырочной области p_p (основные носители) постоянна и велика, она уменьшается (на много порядков) в переходной области и принимает малое значение p_n в n -области (неосновные носители). Аналогично, концентрация электронов изменяется от большого значения n_n в n -области до малой величины n_p в p -области.

Положим теперь, что к переходу приложено внешнее напряжение так, что на p -области находится «+» источника (как и в гл. VI, напряжение такого знака мы будем считать положительным). При этом дырки из p -области устремятся в n -область, где они станут неосновными носителями. Так как $p_p \gg p_n$, эти дырки будут рекомбинировать с электронами. Однако, вследствие конечности времени жизни дырок τ_p , рекомбинация произойдет не сразу, и поэтому в некоторой области за пределами перехода концентрация дырок будет оставаться больше p_n . Одновременно с этим увеличится и концентрация электронов в n -области, так как дополнительные электроны войдут из электрода для компенсации объемного заряда пришедших дырок. Аналогично, основные носители в n -области — электроны — будут переходить в p -область, становясь там неосновными носителями, и постепенно рекомбинировать с основными носителями — дырками. Поэтому и слева от перехода концентрация электронов увеличится, а также увеличится и концентрация дырок, которые войдут из левого электрода для компенсации объемного заряда электронов. Это явление получило название *инъекции неосновных носителей*. Однако, как мы видим, в действительности оно заключается в увеличении концентрации носителей обоого знака по обе стороны от перехода, т.е. в возникновении *квазинейтральных областей повышенной проводимости*. Распределение концентрации неосновных носителей при инжекции показано на рис. 7.9 пунктиром (кривые 3 и 4). Из сказанного ясно, что инжекция неосновных носителей возможна только в полупроводниках со *смешанной* (биполярной) проводимостью.

Для количественных расчетов электронных явлений, связанных с инжекцией, необходимо знать неравновесные концентрации дырок и электронов на границах перехода x_2 и $-x_1$. Они выражаются особенно просто, если а) полупроводники не вырождены и, кроме того, б) толщина переходной области $d = x_1 + x_2$ достаточно мала, так что рекомбинацией в этой области можно пренебречь. Количественно

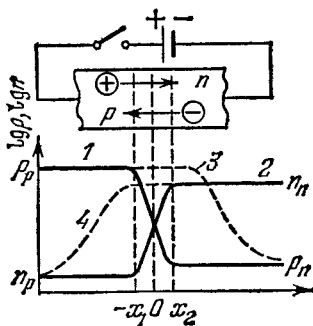


Рис. 7.9. Инжекция в $p-n$ -переходе.

второе условие означает, что длины диффузии (см. § 9) дырок L_p и электронов $L_n \gg d$. Тогда, следуя Шокли, искомые концентрации можно непосредственно получить из сопоставления хода квазиуровней Ферми F_n и F_p и краев энергетических зон. Если внешнее напряжение $u = 0$, то $F_n = F_p = F$ (рис. 7.10, а) и концентрации неосновных носителей на границах имеют равновесные значения

$$p(x_2) = p_n, \quad n(-x_1) = n_p \quad (u = 0).$$

При наличии внешнего напряжения $u > 0$, во-первых, края зон E_c и E_v в n -области поднимаются относительно p -области на величину eu и, во-вторых, в окрестности перехода $F_n \neq F_p$ (рис. 7.10, б). Однако вдали от переходной области мы имеем:

$$x \rightarrow \infty: \quad F_p = F_n = F_2,$$

$$p = p_n, \quad n = n_n;$$

$$x \rightarrow -\infty: \quad F_p = F_n = F_1,$$

$$p = p_p, \quad n = n_p.$$

При этом, согласно формуле (5.8),

$$F_1 = F_2 - eu.$$

Теперь учтем соотношения (5.6) и (5.7), которые показывают, что если концентрация носителей велика, то F_p и F_n меняются в пространстве слабо. Если рекомбинация в переходной области мала, то p

имеет в ней большое значение p_p , и поэтому можно считать, что уровень F_p в этой области горизонтален. Или, иначе,

$$F_p(x_2) \simeq F_1 = F_2 - eu.$$

Аналогично, для электронов

$$F_n(-x_1) \simeq F_2 = F_1 + eu.$$

Тогда, подставляя эти выражения для F_p и F_n в формулы (5.3) и (5.4), получаем окончательно

$$p(x_2) = N_v \exp \frac{E_v - F_p(x_2)}{kT} = N_v \exp \frac{E_v - F_2}{kT} \cdot \exp \frac{eu}{kT} = p_n \exp \frac{eu}{kT},$$

$$n(-x_1) = N_c \exp \frac{F_n(-x_1) - E_c}{kT} = n_p \exp \frac{eu}{kT}.$$

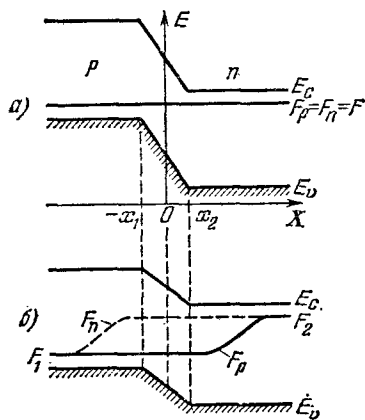


Рис. 7.10. Ход квазиуровней Ферми в $p-n$ -переходе: а) $u = 0$; б) $u > 0$.

Отметим, что при $T = 300 \text{ К}$, $e/kT = 39 \text{ В}^{-1}$. Поэтому, прикладывая даже небольшое напряжение, можно очень сильно менять концентрацию неосновных носителей на границах. Например, при $u = 0,2 \text{ В}$ она изменяется в $e^8 \approx 10^3$ раз.

§ 7. Обнаружение неравновесных носителей заряда

Избыточные электроны и дырки могут быть обнаружены по изменению электропроводности. Они могут быть также зарегистрированы с помощью p — n -перехода. Когда вблизи перехода появляются избыточные носители, то электрическое поле, существующее внутри перехода, затягивает электроны в n -область, а дырки — в p -область (рис. 7.11). Поэтому при разомкнутой цепи n -область заряжается отрицательно, а p -область — положительно, т. е. в p — n -переходе возникает эдс. При замыкании цепи в ней возникает ток.

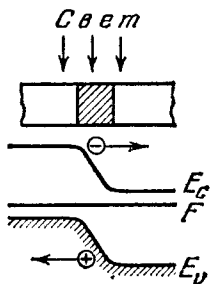


Рис. 7.11. При возникновении в окрестности p — n -перехода неравновесных электронов и дырок появляется эдс.

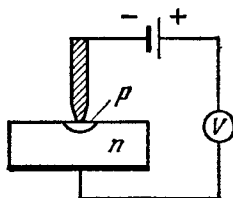


Рис. 7.12. p — n -переход в точечном контакте металл — полупроводник.

Микроскопические p — n -переходы часто образуются в контактах металлической заостренной проволоки с полупроводником, в особенности после «формовки» контакта импульсами сильного тока. Причины образования переходов могут быть различны: диффузия материала проволоки внутрь полупроводника, изменение концентрации электрически активных примесей при местном разогреве вследствие формовки (образование так называемых «термических» донорных или акцепторных центров) и другие. Для увеличения потенциального барьера внутри перехода на контакт иногда накладывают отрицательное напряжение (рис. 7.12).

На рис. 7.13, а показана одна из схем для исследования явления инжекции. Образец полупроводника (который для определенности положен n -типа) имеет форму тонкого и длинного стержня («нитевидный» образец). Инжекция осуществляется в точечном контакте Э («эммиттер»), к которому прикладывают короткие импульсы напряже-