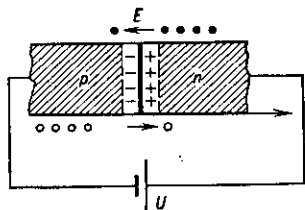


ния донорной и акцепторной примесью одного и того же полупроводника (напр., Si), и *гетеропереход*, в к-ром *p*-область и *n*-область принадлежат разл. *полупроводникам*. Термин «*p* — *n*-П.» как правило, применяют к гомопереходам.

Обеднённый слой. Из-за большого градиента концентрации электронов (*n*) и (обратного ему по знаку) градиента концентрации дырок (*p*) в *p* — *n*-П. происходит диффузионное перетекание электронов из *n*-области в *p*-область и дырок в обратном направлении. Его следствием является накопление избыточного положительн. заряда в *n*-области и отрицательного — в *p*-области (рис. 1). При этом появляется электрич. поле,

Рис. 1. Схематическое изображение *p* — *n*-перехода; чёрные кружки — электроны, светлые — дырки.



направленное из *n*-области в *p*-область, действие к-рого на электроны и дырки (при термодинамич. равновесии) компенсирует действие градиентов концентрации, т. е. диффузионные потоки электронов и дырок уравновешиваются дрейфовыми потоками во внутреннем электрич. поле $E_{вн}$ перехода. Поле $E_{вн}$ обуславливает диффузионную разность потенциалов V_d (аналог контактной разности потенциалов), величина к-рой (для невырожденных носителей) в *p*- и *n*-областях выражается ф-лой

$$V_d = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_n p_p}{n_i^2} \right). \quad (4)$$

Здесь e — заряд электрона, T — темп-ра полупроводника, n_i — концентрация электронов в собств. полупроводнике, n_n и p_p — концентрации электронов и дырок в *n*- и *p*-областях. Внутр. электрич. поле сосредоточено в обеднённом (запорном) слое *p* — *n*-П., где концентрации носителей обоих типов меньше концентраций основных носителей в *p*- и *n*-областях вдали от перехода ($n < n_n$, $p < p_p$), а мин. уровень суммарной концентрации электронов и дырок достигает значения $(n + p)_{мин} = 2n_i$. Т. к. в обеднённом слое, как правило, разность концентраций свободных носителей мала по сравнению с разностью концентраций ионизиров. доноров (N_d) и акцепторов (N_a), границы этого слоя с квазиравновесными *p*- и *n*-областями w_p и w_n могут быть найдены (после приближённого интегрирования Пуассона уравнения в однородном случае) из ф-л

$$\int_{w_p}^{w_n} [N_d(x) - N_a(x)] dx = 0, \quad (2)$$

$$(e/\epsilon) \left| \int_{w_p}^{w_n} [N_d(x) - N_a(x)] x dx \right| = V_d,$$

где ϵ — диэлектрич. проницаемость полупроводника. Т. к. Ферми уровень \mathcal{E}_F во всём полупроводнике при термодинамич. равновесии должен быть единым, то в области перехода энергетич. зоны полупроводника изгибаются (рис. 2), так что образуется потенциальный барьер, высота к-рого равна V_d .

Внеш. напряжение U , приложенное к *p* — *n*-П., в зависимости от знака уменьшается (при прямом смещении) или увеличивается (обратное смещение) напряжённость электрич. поля в обеднённом слое, сужая или расширяя его при этом. Зависимость положения границ слоя w_n , w_p от смещения U может быть найдена из ф-л (2),

где следует заменить V_d на $V_d - U$ ($U > 0$ при прямом смещении и $U < 0$ — при обратном). В случае резкого сильно асимметричного *p* — *n*-П. ($N_a \gg N_d$) с т. н. ме-

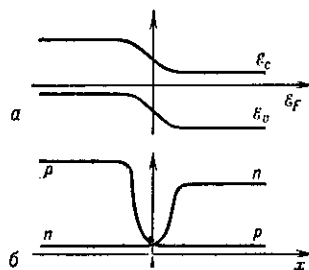


Рис. 2. Зонная диаграмма (а) и концентрации электронов и дырок (б) в области *p* — *n*-перехода; \mathcal{E}_c — дно зоны проводимости, \mathcal{E}_v — вершина валентной зоны; \mathcal{E}_F — уровень Ферми.

таллургич. границей (на к-рой $N_d - N_a = 0$) $x_0 = 0$ и однородно легированной *n*-областью ($N_d = const$):

$$w_p \approx 0, \quad w_n = [2e(V_d - U)/eN_d]^{1/2}. \quad (3)$$

В случае плавного *p* — *n*-П. с пост. градиентом разности концентраций доноров и акцепторов ($N_d - N_a = ax$, $a = const$):

$$w_n(U) = -w_p(U) = [3e(V_d - U)/2ea]^{1/2}. \quad (4)$$

Определяемая толщиной обеднённого слоя $w(U) = |w_n(U) - w_p(U)|$ зарядная ёмкость C_3 *p* — *n*-П. уменьшается с ростом обратного смещения по закону $C_3 \sim (|U| + V_d)^{-1/2}$ в случае ф-лы (3) (для резкого перехода) и $C_3 \sim (|U| + V_d)^{1/2}$ — в случае ф-лы (4) (для плавного перехода). При увеличении прямого смещения зарядная ёмкость растёт. Измерение зависимости $C_3(U)$ позволяет исследовать изменение разности $N_d(x) - N_a(x)$ в *p* — *n*-П.

Ток через *p* — *n*-П. С включением внеш. напряжения U дрейфовые потоки перестают компенсировать диффузионные потоки и через *p* — *n*-П. течёт электрич. ток. Т. к. в глубине *p*-области ток переносится дырками, а в *n*-области — электронами, то прохождения тока через *p* — *n*-П. — в прямом направлении ($U > 0$) сопряжено с рекомбинацией электронов и дырок, прибывающих к *p* — *n*-П. из областей, где они являются основными носителями заряда. При $U < 0$ ток обусловлен генерацией электронно-дырочных пар в окрестности *p* — *n*-П., к-рый разделяет их движение от *p* — *n*-П. в области, где они являются основными носителями.

При термодинамич. равновесии термич. генерация носителей в каждой точке образца в точности компенсируется их рекомбинацией. Но при прохождении тока этот баланс нарушается. Существует неск. механизмов (каналов) избыточной генерации и рекомбинации, определяющих проводимость *p* — *n*-П. при прямом и обратном смещениях. а) Генерация и рекомбинация носителей в *p*- и *n*-областях и диффузия носителей к *p* — *n*-П. или от него. В единице объёма *n*-полупроводника в единицу времени рождается вследствие равновесной термич. генерации p_n/τ_p дырок, где p_n — равновесная концентрация дырок в *n*-области ($p_n = n_i^2/n_n$), а τ_p — их время жизни относительно процесса рекомбинации. Все дырки, рождённые в слое с толщиной L_p , прилегающем к *p* — *n*-П., уходят в *p*-область, т. к. внутр. поле *p* — *n*-П. «втягивает» туда все дырки, подошедшие к переходу в результате диффузии из *n*-области; L_p — длина диффузии дырок в *n*-области за время их жизни: $L_p^2 = D_p \tau_p$, D_p — коэф. диффузии дырок. Дырки, рождённые вне слоя L_p , рекомбинируют прежде, чем процесс диффузии доставит их к *p* — *n*-П., и не дают вклада в ток. Поэтому плотность тока дырок, уходящих из *n*-области в *p*-область:

$$j_{p3} = e p_n L_p \tau_p / \tau_p = e \left(\frac{n_i^2}{n_n} \right) D_p / L_p. \quad (5)$$

Аналогично плотность тока электронов, термически рождённых в *p*-области и доставленных диффузионно к