

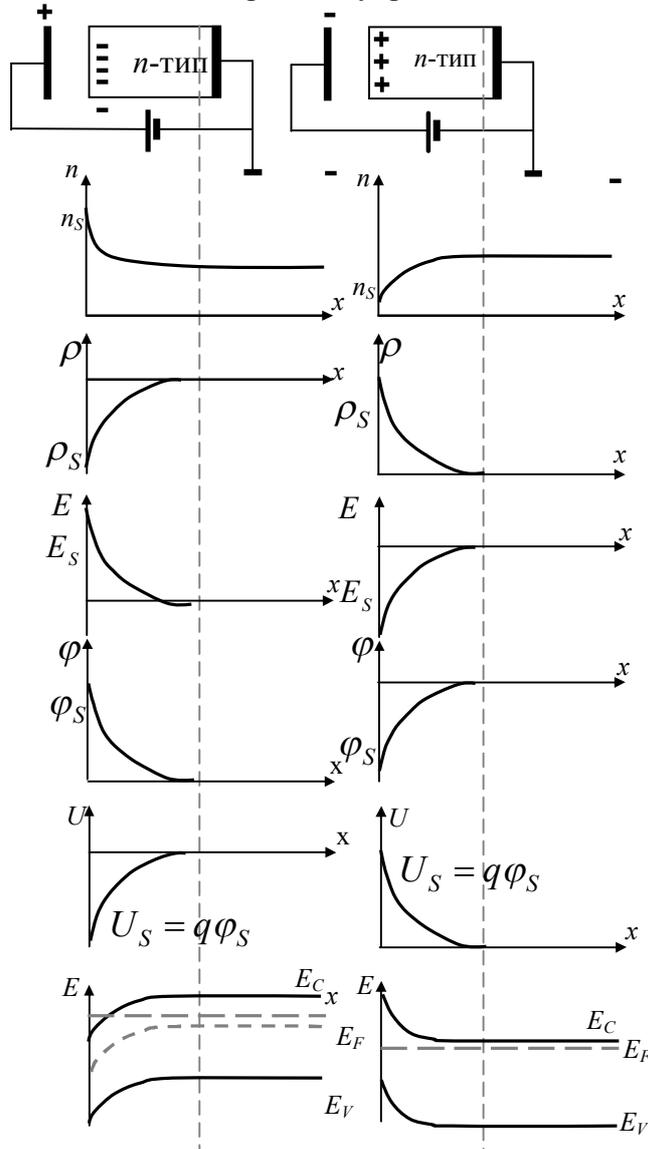
Работа большинства приборов основана на явлениях, возникающих на контакте металл – полупроводник или полупроводник - полупроводник, поэтому они достаточно подробно анализируются в курсах по полупроводниковым приборам. Вообще же область ФП (физика полупроводников), занимающаяся изучением контактных явлений в полупроводниках и основанных на них полупроводниковых приборов, получила название полупроводниковой электроники.

Мы остановимся лишь на основных наиболее общих физических процессах на контакте двух веществ.

Контактные явления (во всяком случае, подавляющее большинство из них) объясняются возникновением на контакте двух веществ контактного поля. Однако воздействие этого поля на носители заряда в приконтактных областях принципиально не отличается от действия некоторого внешнего электрического поля на приповерхностные области кристалла. Поэтому для лучшего понимания контактных явлений целесообразно рассмотреть изменение свойств полупроводника, помещенного во внешнее электрическое поле.

### Полупроводник во внешнем электрическом поле.

Рассмотрим полупроводник *n*-типа внесенный в однородное поле конденсатора.



Для положительной полярности напряжения на (см. рис.) приповерхностная область обогащается электронами и возникает отрицательный объемный заряд, а следовательно и электрическое поле  $E(r)$ , которые уменьшаются с увеличением расстояния от поверхности в глубь полупроводника. Это поле изменит энергию электрона на величину  $U(r) = -q\phi(r)$ , где  $\phi(r)$  – электростатический потенциал контактного поля. Значит, будет иметь место искривление зон полупроводника, причем смещение испытают все уровни энергии. (Примесные, рекомбинационные и т.д.) кроме уровня Ферми.

Он, как известно, в состоянии термодинамического равновесия постоянен и поэтому расстояния

$$E_C - E_F \text{ и } E_F - E_V$$

в присутствии поля станут равны

$$(E_C - U(r)) - E_F \text{ и } E_F - (E_V - U(r))$$

то есть в приповерхностном поле расстояние между  $E_C$  и  $E_F$  уменьшилось на величину  $U(r)$ , а между  $E_F$  и  $E_V$  увеличилось на  $U(r)$  по сравнению с

объемом (см. рис.). Это приведет к перераспределению электронов

по уровням. (На рис. полупроводник из электронного невырожденного в приповерхностной области превращается в 2-й вырожденный).

При изменении полярности напряжения (направления приложенного поля) концентрация электронов у поверхности станет меньше, а дырок – больше, чем в объеме, следовательно,  $\rho$  и  $U(r)$  будут положительными (рис.2). При этом зоны «искривятся вверх» и возможно даже изменения типа проводимости (из  $n$  в  $p$  - тип). Слой, в котором изменился тип проводимости, называют инверсионным или обращенным. Тогда по мере продвижения вглубь образца можно найти слой где  $p \approx n \approx n_i$ , то есть слой с собственной проводимостью или  $i$ -слой ( $E_F$  в нем лежит посередине запрещенной зоны). Область полупроводника возле  $i$  – слоя, где меняется тип проводимости называют физическим  $p$ - $n$  переходом. Он обусловлен внешним полем и исчезает при его снятии.

Итак, при внесении полупроводника в электрическое поле в его приповерхностной области происходит искривление зон и изменение концентрации носителей заряда. При  $U_S > 0$  зоны смещаются вверх и происходит увеличение концентрации дырок, для  $n$  - полупроводника поверхность обогащается неосновными носителями заряда, для  $p$  - полупроводников – основными. При  $U_S < 0$  зоны смещаются вниз и все наоборот.

Рассмотрим количественно влияние поля для невырожденного  $n$  –полупроводника (рис. 2).

Уравнение Пуассона

$$-\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \rho(x)$$

Пусть концентрация электронов в объеме ( $x \rightarrow \infty$ ) равна  $n_0$ , тогда в приповерхностной области:

$$n = N_c e^{\frac{E_c + U - E_F}{kT}} = n_0 e^{\frac{U}{kT}}$$

В общем случае  $U$  может быть как положительно так и отрицательно.

В приповерхностной области объемный заряд определяется  $N_d^+$  и свободными электронами. Считая, что вся примесь ионизована, то есть  $N_d^+ = n_0$ , получим:

$$\rho = q(N_d^+ - n) = qn_0(1 - e^{\frac{-U}{kT}}) \quad (1)$$

Если выполняется условие  $|U| \ll kT$ , то есть искривление зон в поле мало, то  $e^{\frac{-U}{kT}}$  можно разложить в ряд:

$$e^{\frac{-U}{kT}} = 1 - \frac{U}{kT} + \frac{1}{2} \left(\frac{U}{kT}\right)^2 + \dots \approx [f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2] \approx 1 - \frac{U}{kT}$$

(отбросили члены высших порядков малости).

Тогда:

$$\rho = \frac{qn_0U}{kT} = -\frac{q^2n_0}{kT}\varphi \quad (2)$$

Подставив это выражение, в уравнение Пуассона получим:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} - \frac{\varphi}{l_s^2} = 0$$

где  $l_s^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0kT}{q^2n_0}$  - см. §3 темы 7;

Общее решение его:  $\varphi = A_1e^{-\frac{x}{l_s}} + A_2e^{\frac{x}{l_s}}$ ,

А из физических соображений ( $x \rightarrow \infty$ ,  $q \rightarrow 0$  и  $A_2 = 0$ ; при  $x = 0$ ,  $\varphi = -\varphi_3$  и  $A_1 = -\varphi_3$ )

$$\varphi(x) = -\varphi_3 e^{-\frac{x}{l_s}}$$

В предыдущих формулах  $l_s$  есть ни что иное как дебаевская длина экранирования (см. (4) из §3 темы 7). То есть  $l_s$  – это расстояние, на котором напряженность электрического поля в веществе уменьшается (в случае малого изгиба зон). (В §3 темы 7 мы уже упоминали о том, что  $l_s$  характеризует изменение потенциала в приповерхностных слоях).

Для металла с  $n_0 = 10^{22} \text{ см}^{-3}$  и  $E = 1$  при  $T = 300 \text{ К}$   $l_s = 10^{-8} \text{ см}$  – меньше  $a$ . Для полупроводников – существенно больше:  $Ge$  с  $n_0 = 10^{14}$  и  $E = 10$   $l_s = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ . Итак, поле существует только в приповерхностном слое, в котором существует и объемный заряд. Он экранирует внешнее поле, вследствие чего оно не проникает в объем.