

## Лекция №2

### КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области контакта твердых тел. При этом преимущественно используются контакты: полупроводник-полупроводник; металл-полупроводник; металл-диэлектрик-полупроводник.

**Электронно-дырочным переходом или p-n переходом**, называют переходный слой, возникший при контакте двух полупроводников с различным типом электропроводности и обладающий особыми свойствами.

Электронно-дырочный переход создается в одном кристалле полупроводника с использованием сложных и разнообразных технологических операций.

Границу  $x_0$ , разделяющую p- и n- области кристалла, называют металлургической границей.

#### Электронно-дырочный переход в состоянии равновесия

Рассмотрим p-n переход, в котором концентрации доноров  $N_d$  и акцепторов  $N_a$  изменяются скачком на границе раздела. Такой p-n переход называют **резким**, что имеет место при эпитаксиальном наращивании (в противном случае это плавный переход при диффузионном легировании.) Если p- и n- области разделены, то их энергетические диаграммы имеют вид, представленный на рисунке 2.1.

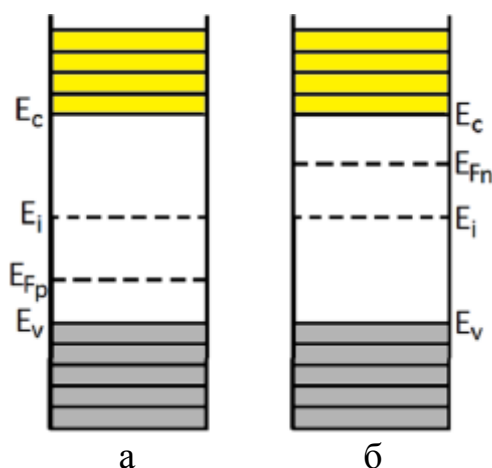


Рис.2.1 – Энергетические диаграммы полупроводников p- и n- типов: а- дырочного, б - электронного

При осуществлении металлургического контакта между этими областями равновесная концентрация дырок в p-области ( $p_{p_0}$ ) значительно превышает их концентрацию в n-области ( $p_{n_0}$ ). Аналогично для электронов выполняется условие  $n_{n_0} > n_{p_0}$ . Неравномерное распределение концентраций одноименных носителей зарядов в кристалле (рис. 2.2, а) приводит к возникновению диффузии электронов из n-области в p-область и дырок из p-области в n-область.

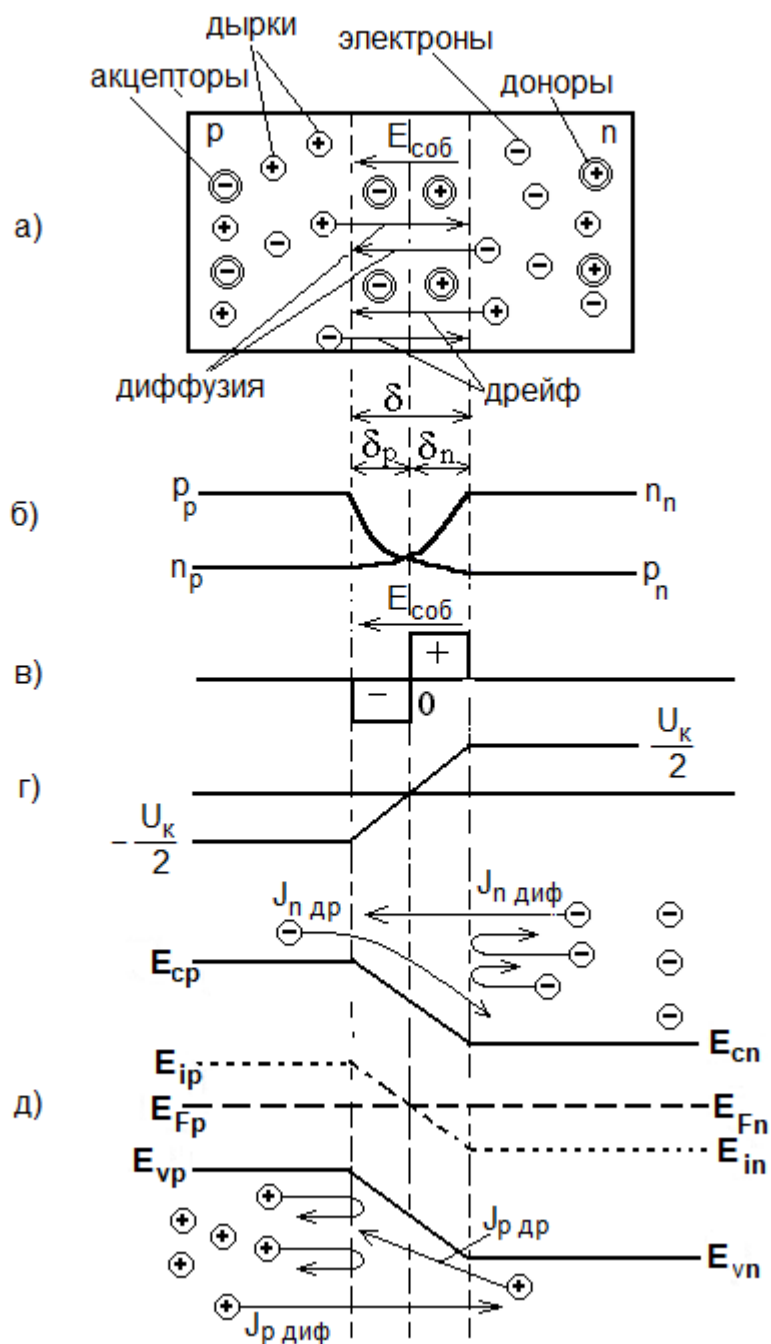


Рисунок 2.2 – Равновесное состояние p-n перехода

Такое движение зарядов создает диффузионный ток электронов и дырок. Плотность полного диффузионного тока, проходящего через границу раздела, определится суммой:

$$j_{\text{диф}} = j_{n\text{диф}} + j_{p\text{диф}} = q \left( D_n \frac{dn(x)}{dx} - D_p \frac{dp(x)}{dx} \right). \quad (2.1)$$

Электроны и дырки, переходя через контакт навстречу друг другу (благодаря диффузии), рекомбинируют, образуя в приконтактной области обедненный подвижными носителями зарядов слой, и в приконтактной области дырочного полупроводника образуется нескомпенсированный заряд отрицательных ионов

акцепторных примесей, а в электронном полупроводнике нескомпенсированный заряд положительных донорных ионов (рис. 2.2, в). Таким образом, электронный полупроводник заряжается положительно, а дырочный - отрицательно. Поскольку потенциальная энергия электрона и потенциал связаны соотношением  $E = -qU$ , образование нескомпенсированных объемных зарядов вызывает понижение энергетических уровней n-области и повышение энергетических уровней p-области. Смещение энергетических диаграмм прекратится, когда уровни Ферми  $E_{fn}$  и  $E_{fp}$  совпадут (рис. 2.2, д). Совпадение уровней Ферми n- и p-областей соответствует установлению динамического равновесия между областями.

Между этими областями возникает собственное электрическое поле (рис. 2, а), созданное двумя слоями объемных зарядов. Направлено это поле из области положительного объемного заряда, т.е. из p-области в область отрицательного объемного заряда, т.е., в n-напряженностью  $E_{соб}$ .

Этому полю соответствует разность потенциалов  $\varphi_k$  между n- и p-областями, называемая контактной (рис. 2.2, г) или высотой потенциального барьера. За пределами области объемного заряда полупроводниковые области n- и p-типа остаются электрически нейтральными.

Высота потенциального барьера определяется:

$$\varphi_k = -\frac{kT}{q} \ln \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{p_{p0}}{p_{n0}} \quad (2.2)$$

Величина  $kT/q = \varphi_T$  называется тепловым потенциалом. Таким образом, контактная разность потенциалов зависит от отношения концентраций носителей зарядов одного знака в p- и n-областях полупроводника.

Кроме контактной разности потенциалов поле в p-n переходе характеризуют напряженностью  $E(x)$  и распределением потенциала  $\varphi(x)$ .

Распределение поля в p-n переходе выражается кусочно-линейной функцией и равно нулю при  $x > x_n$  и  $x < x_p$  и максимально при  $x = x_0$ :

$$E_{\max} = \frac{qN_a}{\varepsilon_0} (x_0 - x_p) = \frac{qN_d}{\varepsilon_0} (x_n - x_0) \quad (2.3)$$

Распределение потенциала описывается выражениями:

В p-области:

$$\varphi(x) = \varphi(x_p) - \frac{qN_a}{2\varepsilon_0} (x - x_p)^2 \quad (2.4)$$

И в n-области

$$\varphi(x) = \varphi(x_n) + \frac{qN_d}{2\varepsilon_0} (x_n - x)^2 \quad (2.5)$$

Другим важным параметром p-n перехода является его ширина, обозначаемая  $\delta = \delta_p + \delta_n$ .

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varphi_{k0}\varepsilon_0}{q} \left( \frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)} \quad (2.6)$$

При  $N_d = N_a$  выполняется условие  $x_0 - x_n = x_p - x_0$ . Такой переход называют симметричным. При  $N_d \neq N_a$  переход называют несимметричным. В этом случае

переход оказывается сдвинутым в область с меньшей концентрацией примеси. Если учесть, что  $\delta_n = x_0 - x_n$ , а  $\delta_p = x_p - x_0$ , то имеем

$$\delta_n / \delta_p = N_A / N_D. \quad (2.7)$$

Из равенства (2.7) видно, что ширина слоев объемных зарядов в n- и p-областях обратно пропорциональна концентрациям примесей и в несимметричном переходе запирающий слой расширяется в область с меньшей концентрацией примесей.

Из соотношения (2.6) видно, что на ширину запирающего слоя существенное влияние оказывает концентрация примесных атомов. Увеличение концентрации примесных атомов сужает запирающий слой, а уменьшение расширяет его. Это часто используется для придания полупроводниковым приборам определенных свойств.

### Включение p-n перехода

При использовании p-n перехода в полупроводниковых приборах к нему подключается внешнее напряжение, при этом его равновесное состояние нарушается. Величина и полярность этого внешнего напряжения определяют электрический ток, проходящий через p-n переход.

Если положительный полюс источника питания подключается к p-области, а отрицательный полюс - к n-области, то включение p-n перехода называют **прямым**. При изменении указанной полярности источника питания включение p-n перехода называют обратным.

#### *Прямое включение p-n перехода*

Прямое включение p-n перехода показано на рис. 2.3. Поскольку сопротивление p-n перехода значительно превышает сопротивление нейтральных p- и n-областей, внешнее напряжение  $U_{пр}$  почти полностью падает на этом переходе.

Прямое напряжение создает в переходе внешнее электрическое поле, направленное навстречу собственному.

Напряженность результирующего поля падает, и уровни Ферми смещаются таким образом, что потенциальный барьер уменьшается до  $(\phi_K - U_{пр})$ . Это сопровождается сужением запирающего слоя, ширина которого может быть найдена из соотношения (2.6) подстановкой вместо  $\phi_K$  величины  $\phi_K - U_{пр}$ :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon_0(N_A + N_D)}{qN_A N_D}} (\phi_K - U_{пр}). \quad (2.8)$$

В результате снижения потенциального барьера большее количество основных носителей зарядов получает возможность диффузионно переходить в соседнюю область, что сопровождается ростом тока диффузии. Ток дрейфа при этом не изменится, поскольку он зависит от количества неосновных носителей, появляющихся на границах p-n перехода. Это количество зависит только от концентрации примесей в полупроводнике и температуры.

Увеличение диффузионной составляющей тока через р-п переход при неизменной дрейфовой составляющей приводит к нарушению термодинамического равновесия. Через переход будет проходить результирующий ток, определяемый диффузионной составляющей.

Дополнительная диффузия носителей зарядов приводит к тому, что на границе р-п перехода повышаются концентрации дырок в области п-типа до некоторого значения  $p_{n1}$  и электронов в р-области до значения  $n_{p1}$ . На границах р-п перехода под действием прямого напряжения  $U_{пр}$  происходит увеличение концентраций неосновных носителей.

Введение носителей заряда через р-п переход из области, где они являются основными, в область, где они становятся неосновными, за счет снижения потенциального барьера, получило название **инжекции**. Область, из которой происходит инжекция, называют эмиттером, а область, в которую осуществляется инжекция - базой.

Дополнительная диффузия носителей зарядов приводит к тому, что на границе р-п перехода повышаются концентрации дырок в п-области до некоторого значения  $(p_{n0} + \Delta p_n)$  и электронов в р-области до значения  $(n_{p0} + \Delta n_p)$ .

Концентрацию инжектированных носителей заряда вблизи металлургической границы можно определить по формулам:

$$\Delta n_p = n_{p0} \left[ \exp \left( \frac{eU_{np}}{kT} \right) - 1 \right]$$

$$\Delta p_n = p_{n0} \left[ \exp \left( \frac{eU_{np}}{kT} \right) - 1 \right]$$

Неравновесные неосновные носители зарядов диффундируют в глубь полупроводника и нарушают его электронейтральность. Восстановление нейтрального состояния полупроводников происходит за счет поступления носителей зарядов от внешнего источника. Это является причиной возникновения тока во внешней цепи, называемого прямым и обозначаемого  $I_{пр}$ .

При увеличении прямого напряжения до величины контактной разности потенциалов потенциальный барьер исчезает, ширина обедненного слоя стремится к нулю. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к свободной диффузии ОНЗ в область с противоположным типом электропроводности. В результате прямой ток становится сравнительно большим и увеличивается при увеличении прямого напряжения.

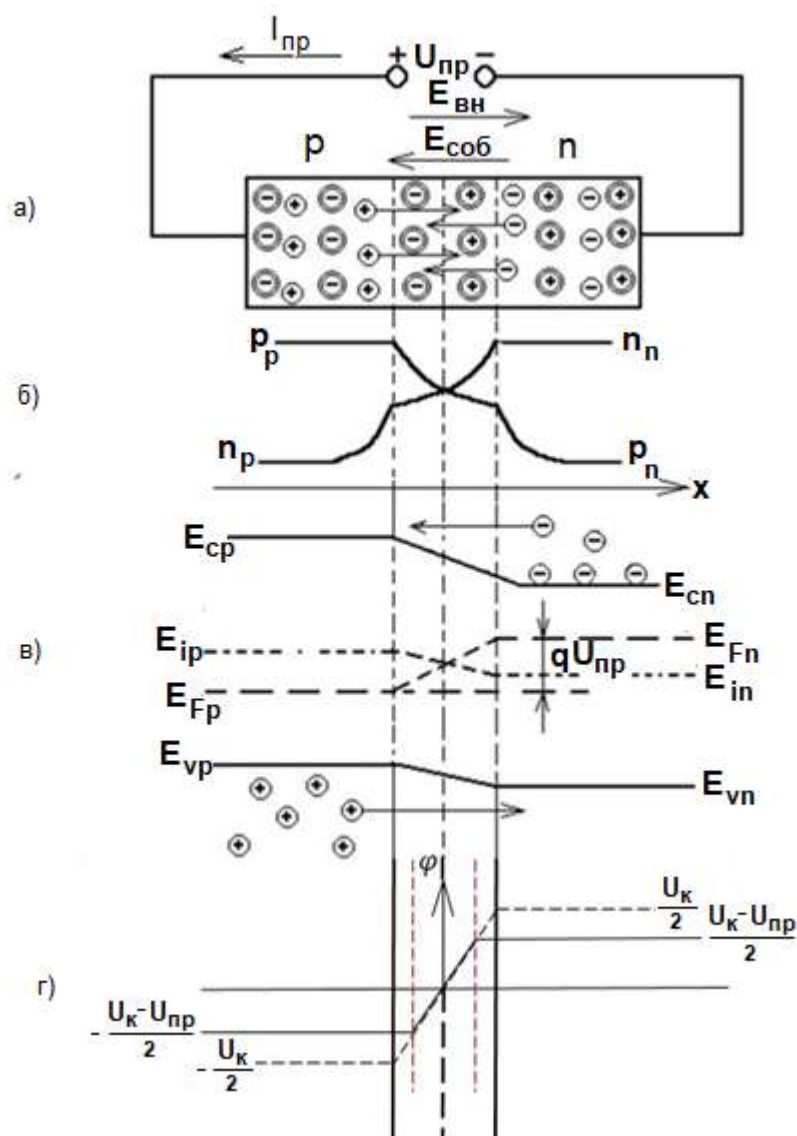


Рисунок 2.3 - Прямое включение p-n перехода

### ***Обратное включение p-n-перехода***

При включении p-n перехода в обратном направлении (рис. 2.4) внешнее обратное напряжение  $U_{обр}$  создает электрическое поле, совпадающее по направлению с собственным, что приводит к росту потенциального барьера на величину  $U_{обр}$  и увеличению относительного смещения энергетических диаграмм на  $(\phi_k + U_{обр})$ .

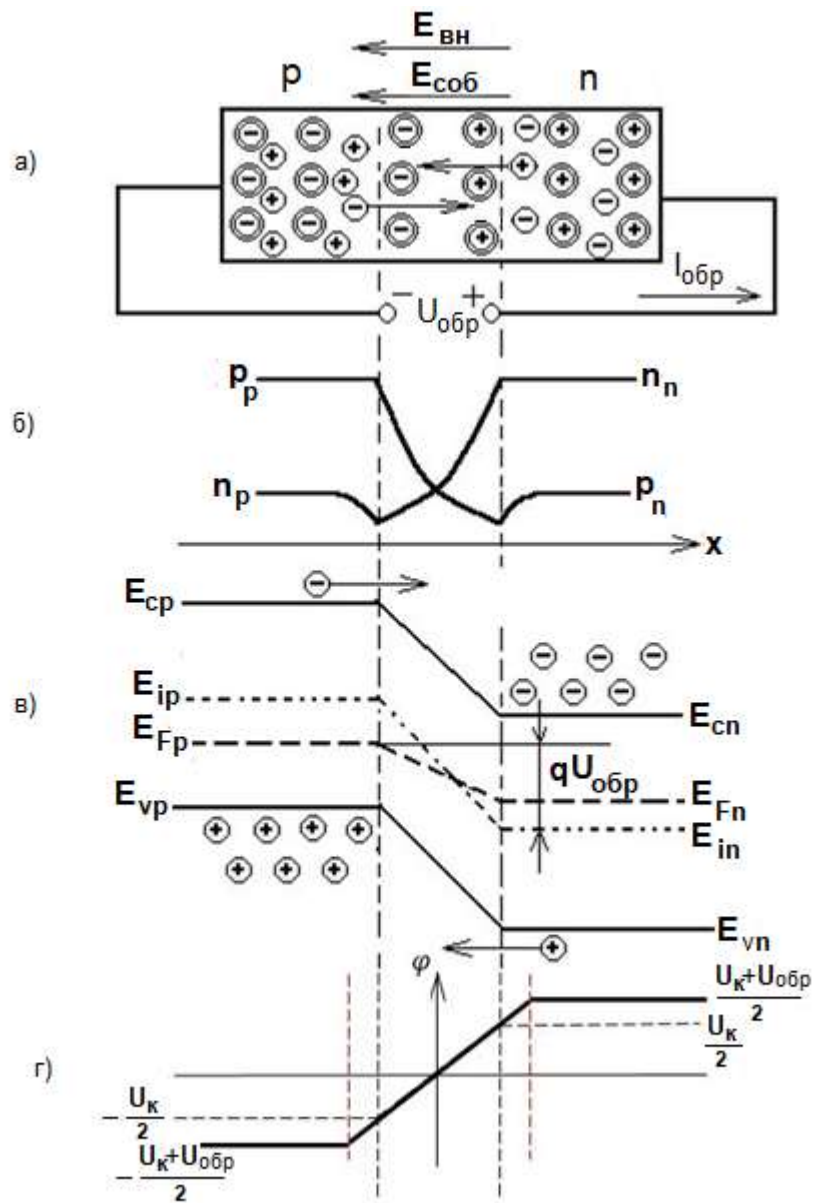


Рисунок 2.4 – Обратное включение р-п перехода

Это сопровождается увеличением ширины запирающего слоя, которая может быть найдена из соотношения (2.6) подстановкой вместо  $\phi_k$  величины  $\phi_k + U_{обр}$ .

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon_0(N_A + N_D)}{qN_A N_D}}(\phi_k + U_{обр}). \quad (2.9)$$

Возрастание потенциального барьера уменьшает диффузионные токи основных носителей (т. е. меньшее их количество преодолет возросший потенциальный барьер), и при некотором значении обратного напряжения диффузия ОНЗ прекратится совсем.

Возросшее электрическое поле в р-п переходе способствует движению ННЗ. При приближении их к р-п переходу электрическое поле захватывает их и переносит через р-п переход в область с противоположным типом электропроводности. Это явление называется *экстракцией*.

Уменьшение диффузионного тока приведет к нарушению условия равновесия. Через переход будет проходить результирующий ток, определяемый в основном током дрейфа неосновных носителей.

Уход ННЗ в результате экстракции приводит к снижению их концентрации в данной области вблизи металлургической границы практически до нуля. Это вызывает диффузию ННЗ из глубины области в направлении к переходу, что компенсирует убыль ННЗ. В результате во внешней цепи появляется ток, называемый *обратным током*. Т.к. число ННЗ  $\ll$  ОНЗ, обратный ток намного меньше прямого. От приложенного напряжения он практически не зависит.

Значение концентрации неосновных носителей заряда на любом удалении  $x$  от границ р-п перехода можно рассчитать по следующим формулам, полученным при решении уравнения непрерывности для обратного включения р-п перехода:

$$p_n(x) = p_{n_0} + p_{n_0} (\exp(-qU_{ОБП} / kT) - 1) \exp(-x / L_p);$$

$$n_p(x) = n_{p_0} + n_{p_0} (\exp(-qU_{ОБП} / kT) - 1) \exp(-x / L_n).$$