

## Лекция 11. Электронно-дырочный переход

Контакт двух примесных полупроводников с различными типами проводимости называется электронно-дырочным переходом или сокращенно *p-n*-переходом. Обычно он создается путем введения в одну часть полупроводникового кристалла донорной примеси, а в другую - акцепторной. При равенстве концентраций донорных центров  $N_d$  и акцепторных центров  $N_a$  переход называется симметричным. При  $N_d \neq N_a$  переход становится несимметричным. Симметричность возникает при условии

$$n p_0 = p n_0 = n_i, \quad (4.8)$$

где  $n_0, p_0$  - концентрации собственных носителей,  $n, p$  - концентрации примесных носителей.

В симметричном переходе (физическом переходе) концентрация свободных носителей выравнивается в плоскости раздела донорных и акцепторных центров. В несимметричном переходе плоскость выравнивания концентраций свободных носителей, называемая металлургическим переходом, сдвинута в менее легированную область (рис. 4.8). В этом случае слой между физическим и металлургическим переходами имеет измененный тип электропроводности по отношению к исходному состоянию.

После образования контакта вследствие разности концентраций примесных носителей возникают диффузионные потоки электронов из *n*-области и дырок из *p*-области. Количество переходящих за счет диффузии в соседнюю область носителей определяется степенью легирования полупроводников. В результате ухода подвижных носителей из приграничных областей в них возникают нескомпенсированные объемные заряды примесных ионов  $N_d$  и  $N_a$ . Эти заряды создают внутреннее электрическое поле, направленное из области *n* в область *p*. Это поле препятствует процессу диффузии носителей. В результате наступает термодинамическое равновесие, при котором количество переходящих за счет диффузии носителей будет компенсироваться равным количеством того же типа носителей, перемещаемых под действием внутреннего электрического поля.

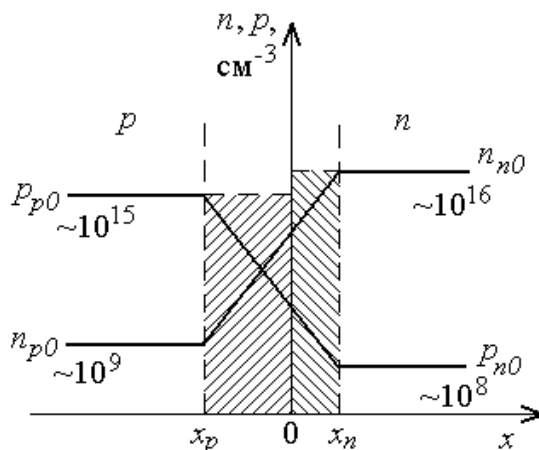


Рис. 4.8. Распределение носителей в  $p$ - $n$ -переходе в состоянии термодинамического равновесия

Таким образом электрический ток, протекающий через  $p$ - $n$ -переход в условиях равновесия будет состоять из четырех компонент:

- 1)  $J_p dif$  - диффузионный ток дырок из  $p$ -области в  $n$ -область;
- 2)  $J_n dif$  - диффузионный ток электронов из  $n$ -области в  $p$ -область;
- 3)  $J_p dr$  - дрейфовый ток дырок из  $n$ -области в  $p$ -область;
- 4)  $J_n dr$  - дрейфовый ток электронов из  $p$ -области в  $n$ -область.

При этом диффузионные токи создаются за счет основных носителей, а дрейфовые токи - за счет неосновных носителей. В состоянии термодинамического равновесия суммарный ток будет равен нулю, поскольку:

$$j_n = j_n dif + j_n dr = 0, \quad j_p = j_p dif + j_p dr = 0. \quad (4.9)$$

Диаграмма энергетических уровней  $p$ - $n$ -перехода представлена на рис. 4.9. Возникновение положительного заряда в  $n$ -области вызывает снижение всех уровней, включая уровень Ферми, в этой области. Наоборот, отрицательное зарядение  $p$ -области вызывает повышение всех уровней. Перетекание электронов и дырок происходит до тех пор, пока уровни Ферми в этих областях не выровняются. Высоту потенциального барьера между областями  $n$  и  $p$  определяют разностью термодинамических работ выхода или разностью уровней Ферми

$$\Delta\varepsilon = e U_b = \Phi_p - \Phi_n = \varepsilon_{Fn} - \varepsilon_{Fp}. \quad (4.10)$$

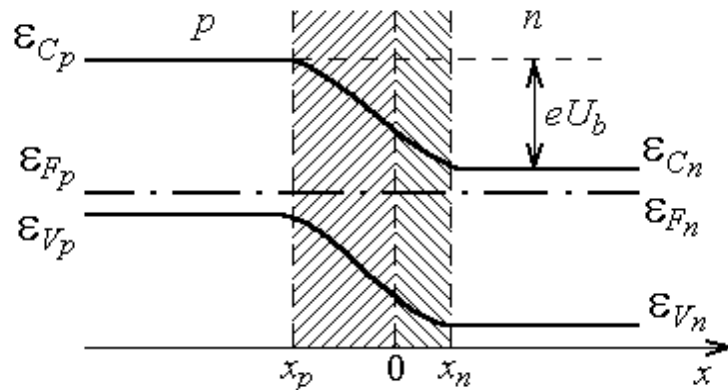


Рис. 4.9. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода в состоянии термодинамического равновесия

С учетом того, что

$$n = N_c \exp [-(\varepsilon_c - \varepsilon_F) / kT] \text{ и } p = N_v \exp [-(\varepsilon_F - \varepsilon_v) / kT], \quad (4.11)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{Fn} - \varepsilon_{Fp} = kT \ln(np / n_i^2) = kT \ln(N_d N_a / n_i^2). \quad (4.12)$$

Следовательно, величина потенциального барьера возрастает с увеличением степени легирования  $n$ - и  $p$ -областей. Вследствие диффузионного перемещения электронов и дырок является уменьшение концентрации носителей заряда вблизи раздела, в результате чего образуется

обедненный подвижными носителями заряда слой, в котором расположены положительные заряды доноров и отрицательные заряды акцепторов. Эти заряды создают внутреннее электрическое поле, препятствующее диффузии электронов и дырок.

В отличие от контакта металл-полупроводник, в  $p$ - $n$ -переходе, вследствие меньшей разницы в концентрациях подвижных носителей, объемный заряд располагается в обеих частях, обедненных носителями заряда. Ширина симметричного  $p$ - $n$ -перехода состоит из двух составляющих

$$L = L_n + L_p = \sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0\Delta\mathcal{E} / e^2 \left( \frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)}, \quad (4.13)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Внешнее напряжение  $U$ , приложенное к концам  $p$ - и  $n$ -областей, в основном будет падать на областях, обедненных носителями заряда, поскольку они обладают более высоким сопротивлением, чем глубинные области. Следовательно внешнее напряжение будет влиять на величину потенциального барьера и изменять равновесные соотношения между диффузионными и дрейфовыми токами. При этом через  $p$ - $n$ -переход начинает протекать электрический ток. Если внешнее поле приложено в прямом направлении (прямое смещение  $p$ - $n$ -перехода), т.е. плюсом к  $p$ -слою и минусом к  $n$ -слою, то высота потенциального барьера будет снижаться на величину  $eU$  (рис. 4.10а), и через переход потекут диффузионные токи; в то же время дрейфовые токи останутся неизменными. Возникающий ток называется прямым током.

При приложении обратного напряжения поле потенциального барьера будет складываться с внешним полем (рис. 4.10б). При достаточно больших значениях  $U$  диффузионные токи практически прекращаются, а дрейфовый ток будет незначительно увеличиваться. Такой ток, созданный дрейфом неосновных носителей, называется обратным током.

Изменение высоты потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода при приложении внешнего напряжения сопровождается эффектами инжекции и экстракции неосновных носителей (рис. 4.11).

Инжекция, т. е. увеличение концентрации подвижных носителей заряда, возникает при включении перехода в прямом направлении. При этом, как уже отмечалось выше, происходит уменьшение высоты потенциального барьера. В результате в область  $p$  диффундирует добавочное количество электронов, а в область  $n$  - дополнительное количество дырок. Такое введение носителей в область, где они не являются основными, получило название инжекции неосновных носителей. Инжектированные носители создают дополнительное электрическое поле, которое в случае положительного заряда притягивает к нему электроны, а в случае отрицательного заряда - дырки. В результате происходит перемещение носителей из более глубоких областей в приконтактные области.

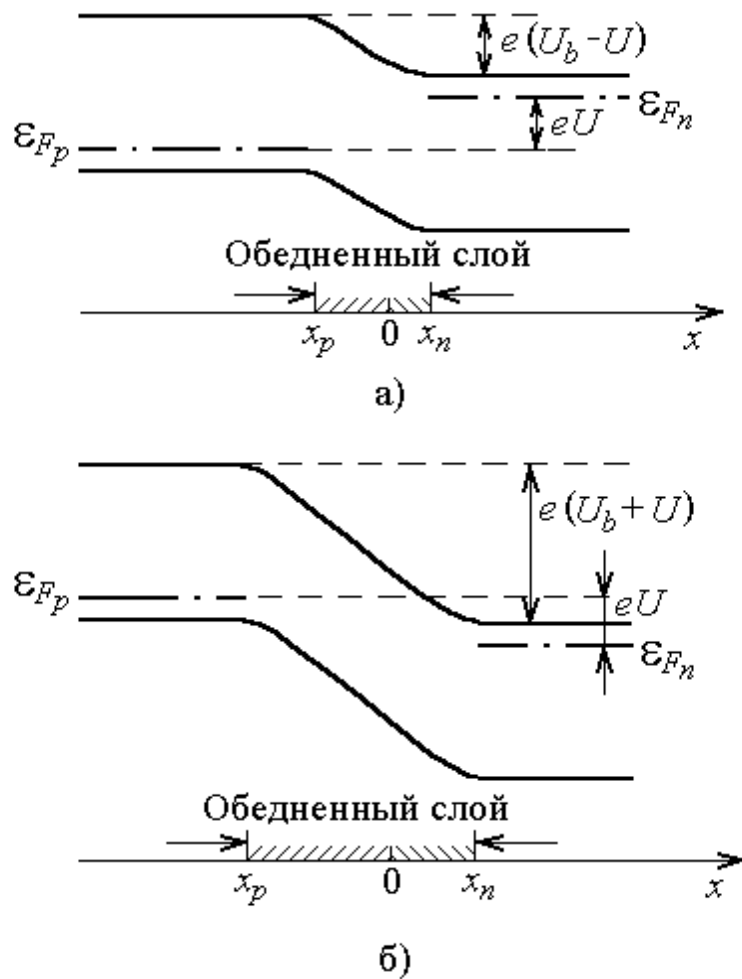


Рис. 4.10. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода при прямом (а) и обратном (б) смещении

Следовательно, суммарная концентрация как основных, так и неосновных носителей зарядов при приложении прямого напряжения отличается от равновесной в сторону увеличения на расстоянии порядка нескольких длин свободного пробега от границ  $p$ - $n$ -перехода (рис. 4.11б). Концентрации электронов и дырок, инжектированных через  $p$ - $n$ -переход, можно представить как

$$\Delta n = n_0(0)[\exp(eU / KT) - 1], \quad \Delta p = p_0(0)[\exp(eU / KT) - 1], \quad (4.14)$$

где  $n_0(0)$ ,  $p_0(0)$  - концентрации неосновных носителей в равновесном состоянии,  $U$  - приложенное прямое напряжение.

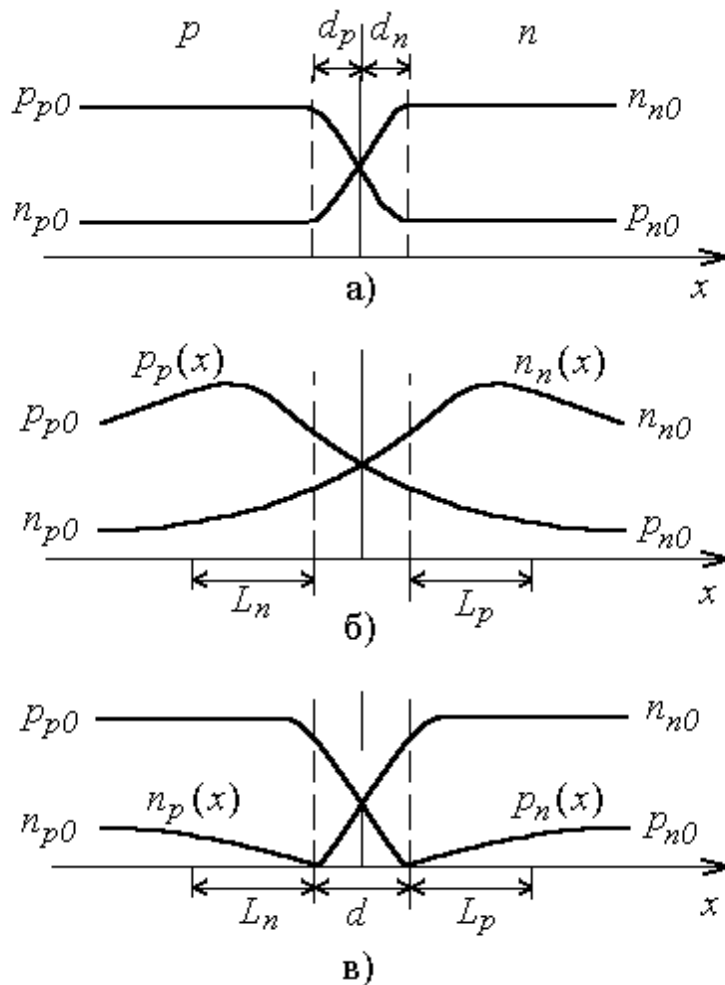


Рис. 4.11. Распределение основных и неосновных носителей в области  $p$ - $n$ -перехода: а - в равновесном состоянии; б - при приложении внешнего напряжения в прямом направлении; в - при приложении внешнего напряжения в обратном направлении

Концентрации инжектированных неосновных носителей по мере диффузии вглубь соответствующих областей падает вследствие их рекомбинации.

Уровнем инжекции называется отношение концентрации избыточных неосновных носителей заряда к равновесной концентрации основных носителей  $n_0(0)$  и  $p_0(0)$ :

$$\delta = \Delta n / n_0(0), \delta = \Delta p / p_0(0). \quad (4.15)$$

При приложении внешнего напряжения в обратном направлении к  $p$ - $n$ -переходу происходит уменьшение концентрации неосновных носителей по отношению к их равновесной концентрации (рис. 4.11в). Этот эффект носит название экстракции неосновных носителей. В этом случае

$$\Delta n = n_0(0)[\exp(-eU / KT) - 1], \quad \Delta p = p_0(0)[\exp(-eU / KT) - 1], \quad (4.16)$$

В несимметричных переходах инжекция имеет односторонний характер. Главную роль играют носители, инжектированные из более легированного слоя в менее легированный слой. При этом сильнолегированный слой называется эмиттером, а слаболегированный слой - базой.

Вольт-амперную характеристику  $p$ - $n$ -перехода (рис. 4.12) можно построить с помощью выражения для суммарного тока, протекающего через переход при прямом и обратном приложенных напряжениях

$$j = j_0(e^{eU/KT} - 1), \quad (4.17)$$

где  $j_0$  - тепловой ток, который зависит от температуры:

$$j_0 \sim \exp(-\Delta\varepsilon_g / KT). \quad (4.18)$$

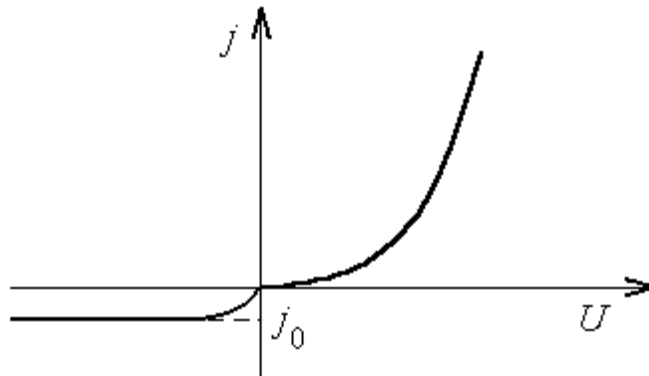


Рис. 4.12. Вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода

Поскольку электронно-дырочный переход обладает нелинейной вольт-амперной характеристикой, то он нашел широкое применение в выпрямительных диодах. Инжекция носителей в  $p$ - $n$ -переходе нашла применение в биполярных транзисторах, фототранзисторах, тиристорах и других полупроводниковых приборах.