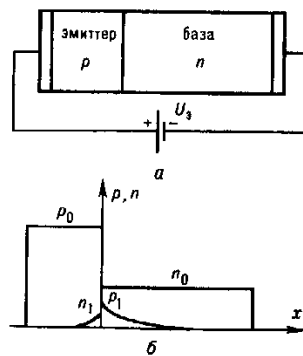


Рис. 4. Протекание тока через  $p-n$ -переход при прямом напряжении:  $a$  — эмиттерный  $p-n$ -переход;  $b$  — распределение носителей заряда при протекании прямого тока ( $p_0 \approx N_a$  — равновесная концентрация дырок в  $p$ -эмиттере;  $n_0 \approx N_d$  — равновесная концентрация электронов в базе;  $p_1$  — концентрация вблизи границы дырок, инжектированных из эмиттера в базу;  $n_1$  — концентрация электронов, инжектированных в эмиттер).



роком диапазоне токов выполняется соотношение  $p_1/p_0 = n_1/n_0$ , где  $p_1$  — концентрация дырок в базе на границе с эмиттером,  $n_1$  — концентрация электронов в эмиттере на границе с базой,  $p_0$  — концентрация дырок в эмиттере,  $n_0$  — концентрация электронов в базе (рис. 4, б). Концентрация дырок  $p_0$  в эмиттере и концентрация электронов  $n_0$  в базе определяются соответственно концентрациями легирующих примесей  $N_a$  и  $N_d$  (см. *Легирование полупроводников*). Эмиттер транзистора всегда легируется значительно сильнее, чем база ( $N_a \ll N_d$ ). Поэтому в широком диапазоне токов  $n_1 \ll p_1$ .

Если ширина слаболегированной области (базы) значительно превышает диффузионную длину дырок  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  ( $D_p$  — коэф. диффузии дырок,  $\tau_p$  — время жизни дырок), то концентрация неравновесных (избыточных) дырок экспоненциально убывает в глубь базы:  $p(x) = p_1 \exp(-x/L_p)$ . Аналогично для электронов в эмиттере  $n(x) = n_1 \exp(x/L_n)$ , где  $x$  принимает отрицат. значения. На границе  $p$ - и  $n$ -областей полный ток, протекающий через  $p-n$ -переход, складывается из диффузионного тока дырок  $j_p = eD_p(dp/dx)_{x=0}$  и диффузионного тока электронов  $j_n = eD_n(dn/dx)_{x=0}$  (см. *Диффузия носителей заряда в полупроводниках*). При этом доля дырочного тока

$$\gamma_p = \frac{j_p}{j_n + j_p} = \left[ 1 + \frac{n_1}{p_1} \sqrt{\frac{D_n \tau_p}{D_p \tau_n}} \right]^{-1} \quad (1)$$

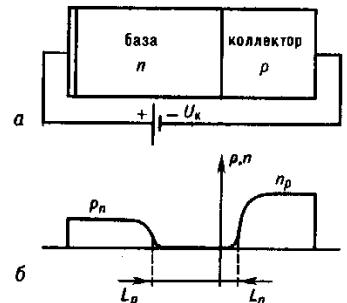
Коэф.  $\gamma_p$  называют коэффициентом инжекции эмиттера. Электрониз. параметры эмиттера и базы всегда выбираются такими, чтобы величина  $\gamma_p$  была по возможности близка к единице, даже с учётом того, что на практике часто выполняются неравенства  $D_n > D_p$ ,  $\tau_p > \tau_n$ . Т. о., на границе эмиттера и базы ( $x=0$ ) ток в осн. является диффузионным током дырок.

**Особенности протекания тока.** При прямом напряжении на эмиттере через базовый электрод в базу каждую секунду входят  $N = I/e$  электронов со стороны отрицат. полюса источника питания. Если коэф. инжекции эмиттера  $\gamma_p = 1$  (идеальный эмиттер), то ни один электрон выйти из базы в эмиттер не может. На практике величина  $\gamma_p$  близка к единице, так что лишь малая доля электронов, вошедших в базу, покидает её в виде диффузионного потока электронов в эмиттер. Подавляющая часть вошедших в базу электронов исчезает в базе, рекомбинируя с дырками, инжектированными эмиттером. Это осн. свойство эмиттерного перехода, используемое при получении транзисторного эффекта — усиления по току.

Когда к  $p-n$ -переходу приложено обратное напряжение (рис. 5, а), высота потенц. барьера на границе  $p-n$ -перехода повышается. При этом ни дырки из коллектора в базу, ни электроны из базы в коллектор переходить не могут. Через коллекторный переход течёт относительно небольшой ток, складывающийся из двух компонентов. Первый компонент — ток электронов и дырок, возникающих вследствие теплового возбуждения в области объёмного заряда коллекторного перехода. Природа второго компонента представляет с точки зрения принципа работы Т. б. наибольший интерес. Электрич. поле, существующее внутри  $p-n$ -перехода, направлено так, что электрон, попавший

в область перехода, выталкивается в  $n$ -область, а дырка — в  $p$ -область. Однако для неосновных носителей (дырок в  $n$ -области и электронов в  $p$ -области) поле в переходе, очевидно, направлено так, что оно способствует переходу дырок из базы в коллектор, а электронов из коллектора в базу. Любая дырка, оказавшаяся в базе на расстоянии от  $p-n$ -перехода, меньшем диффузионной длины  $L_p$ , с большой вероятностью попадает в поле  $p-n$ -перехода и выбрасывается из базы в коллектор. Такая же ситуация реализуется и для электронов в коллекторе. Поток неосновных носителей — дырок из базы и электронов из коллектора — и создаёт второй компонент тока  $p-n$ -перехода при обратном напряжении — т.н. диффузионный компонент. По обе стороны от коллекторного  $p-n$ -перехода при обратном напряжении возникают области, обеднённые неосновными носителями. В базе длина этой области равна диффузионной длине дырок  $L_p$ , в эмиттере — равна диффузионной длине электронов  $L_n$  (рис. 5, б).

Рис. 5. Протекание тока через  $p-n$ -переход при обратном напряжении:  $a$  — коллекторный  $p-n$ -переход;  $b$  — распределение неосновных носителей заряда в базовой и коллекторной области перехода ( $p_n$  — равновесная концентрация дырок в базе;  $n_p$  — равновесная концентрация электронов в коллекторе).



Осн. свойство коллекторного  $p-n$ -перехода, используемое при получении транзисторного эффекта, состоит в том, что любая дырка, возникающая в  $n$ -базе на расстоянии, меньшем, чем диффузионная длина  $L_p$ , с высокой вероятностью попадает в поле перехода и увлекается в коллектор.

Для реализации эффекта усиления по току транзисторная структура (рис. 3) изготавливается так, чтобы расстояние между эмиттерным и коллекторным  $p-n$ -переходами, т.е. ширина базы  $W$ , было бы значительно меньше диффузионной длины дырок  $L_p$  в базе.

Если в базе транзистора протекает ток  $I_b$ , то в базовую область каждую секунду входят  $N_b = I_b/e$  электронов. Ни в эмиттер, ни в коллектор электроны из базы практически уйти не могут. Следовательно, в стационарном состоянии все  $N_b$  электронов должны рекомбинировать в базе. В диоде с длинной базой и с коэф. инжекции дырок  $p-n$ -перехода  $\gamma_p = 1$  для того, чтобы обеспечить рекомбинацию  $N_b$  электронов, из эмиттера должно инжектироваться  $N_b \approx N_d$  дырок. Если же  $p-n$ -переход обладает коэф. инжекции  $\gamma_p < 1$ , то для обеспечения рекомбинации электронов в базе должно ежесекундно инжектироваться  $N_b = \gamma_p N_d$  дырок. Однако в транзисторе с шириной базы  $W < L_p$  каждая дырка, инжектированная из эмиттера в базу, оказывается от коллектора на расстоянии, меньшем  $L_p$ . Поэтому она, не успев прорекомбинировать с электроном, с высокой вероятностью попадает в поле коллекторного перехода и выбрасывается в коллектор. Долю дырок  $\alpha$ , проходящих без рекомбинации из эмиттера в коллектор, называют коэффициентом переноса. Естественно, эта доля тем больше, чем меньше отношение  $W/L_p$ . Во многих практически важных случаях можно считать, что  $\alpha \approx 1 - W^2/2L_p^2$ . В зависимости от типа и назначения Т. б. отношение  $W/L_p$  лежит обычно в пределах от 0,5 до 0,05, а величина  $\alpha$  составляет от 0,9 до 0,999. Т. о., в транзисторной структуре подавляющая часть инжектированных эмиттером дырок проходит в коллектор, не прорекомбинировав с электронами в базе.

Доля дырок, инжектированных эмиттером, идущих на рекомбинацию с поступающими в базу электронами, равна, очевидно,  $(1 - \alpha)$ . Чтобы обеспечить рекомбинацию