

всех электронов, входящих в базу, должно выполняться равенство

$$I_3 \approx \frac{I_0}{1-\alpha} \quad (2)$$

Т. о., протекание тока  $I_0$  в цепи базы определяет протекание в эмиттерной и коллекторной цепи Т. б. токов  $I_e$  и  $I_k \approx \alpha I_0 / (1-\alpha)$ , во много раз больших, чем  $I_0$ .

**Основные параметры.** Осн. характеристики Т. б.—коэф. усиления по току и предельная рабочая частота. Коэф. усиления Т. б. по току  $\beta = 1/(1-\alpha)$  определяется гл. обр. отношением  $W/L_p$ . Для уменьшения толщины базы  $W$  техн. ограничений почти не существует. Совр. методы *эпитаксии* позволяют изготавливать полупроводниковые монокристаллические слои. Однако уменьшению толщины  $W$  и, следовательно, увеличению  $\beta$  препятствуют физ. ограничения.

На границах областей эмиттер—база и база—коллектор существуют области объёмного заряда (ООЗ). Для нормальной работы транзистора необходимо, чтобы протяжённость этих областей была существенно меньше  $W$ . Грубую оценку мин. значения  $W$  можно получить, приняв, что величина  $W$  должна быть много больше ширины ООЗ на границе эмиттер—база при нулевом смещении на эмиттерном переходе. Уровень легирования эмиттера значительно превышает уровень легирования базы. Поэтому практически вся ООЗ на эмиттерном переходе лежит в базовой области. Её ширина

$$W_n = (2\epsilon\epsilon_0 V_d / e N_d)^{1/2} \quad (3)$$

Диффузионная разность потенциалов  $V_d$  может быть оценена как  $V_d \approx \epsilon_g / e$ , где  $\epsilon_g$ —ширина запрещённой зоны полупроводника. Для Si  $\epsilon_g \approx 1,1$  эВ, для GaAs  $\epsilon_g \approx 1,4$  эВ, т. о.,  $V_d \approx 1$  В.

Величина  $N_d$  практически не может быть больше  $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Уровень легирования эмиттера  $N_{e0} \gg N_d$ . Однако при  $N_{e0} \geq 10^{19}$  см<sup>-3</sup> время жизни носителей становится очень малым. При малом  $\tau_n$  коэф. инжекции  $\gamma_p$  уменьшается [см. (1)]. Снижение  $\gamma_p$ , в свою очередь, вызывает уменьшение  $\beta$ .

При  $N_d \approx 10^{17}$  см<sup>-3</sup> и  $V_d \approx 1$  В величина  $W_n \approx 0,1$  мкм, что требует ширины базы  $W \geq 0,5$  мкм. Такой величине  $W$  соответствует значение  $\beta \approx 100-200$ .

Коэф. усиления по току Т. б. составляет обычно неск. десятков, в нек-рых Т. б.—неск. сотен. В Т. б., для изготовления к-рых используются различные гетероструктуры, коэф. усиления достигает неск. тысяч.

Быстродействие Т. б. принято характеризовать граничной частотой  $f_T$ , при к-рой коэф. усиления по току уменьшается до  $\beta = 1$ .

Физ. ограничение величины  $f_T$  связано со временем переноса носителей через базу:  $f_T \approx 1/2\tau_b$ . При чисто диффузионном механизме переноса носителей в базе  $\tau_b \approx W^2/D_p$ . Величина  $\tau_b$  может быть несколько уменьшена, если создать в базе электрич. поле, ускоряющее прохождение носителей от эмиттера к коллектору (т. н. тянущее поле). Такое поле создаётся в диффузионно-дрейфовых Т. б. неоднородным легированием базы. Величина  $\tau_b$  при этом может быть уменьшена приблизительно в 2 раза. Т. о., осн. путём повышения быстродействия Т. б. является уменьшение толщины базы  $W$ .

Отметим, что уменьшение  $W$  приводит к росту входного сопротивления базы  $r_b$ . При этом увеличиваются постоянные времени заряда эмиттерной и коллекторной ёмкостей  $C_e$  и  $C_k$  через сопротивление  $r_b$ . Время заряда этих ёмкостей также ограничивает быстродействие Т. б. Практически граничная частота обычных Т. б. не превышает 10 ГГц.

Предельная рабочая частота гомоструктурных Т. б. составляет неск. ГГц. Предельная частота гетероструктурных Т. б. превышает 60 ГГц.

Характеристики Т. б. могут быть существенно улучшены, если в качестве эмиттера (а иногда и коллектора) использовать материал с шириной запрещённой зоны  $\epsilon_g$  большей, чем у материала базы. В таких гетерострук-

турных Т. б. чаще всего база изготавливается из GaAs, а эмиттер—из GaAlAs (гетеропереход GaAs/GaAlAs). Идея гетероструктурных Т. б. сформулирована У. Шокли в 1948, а созданы они были в кон. 70-х гг. В этих Т. б. коэф. инжекции эмиттера  $\gamma$  близок к единице, даже если база легирована значительно сильнее, чем эмиттер (явление суперинжекции). Это снимает рассмотренные выше ограничения на толщину базы  $W$  и уровень легирования базы  $N_d$ . Кроме того, снижением уровня легирования эмиттера может быть существенно уменьшена ёмкость эмиттера  $C_e$ . Созданы гетеротранзисторы с  $W \leq 0,1$  мкм,  $\beta \geq 5000$ , макс. частотой генерации  $f \geq 60$  ГГц и шумом коэффициентом (в малошумящих Т. б.)  $\approx 2-5$  дБ.

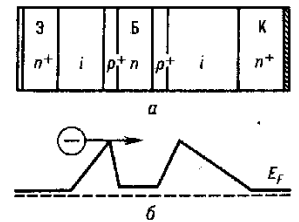
**Применение.** Круг применений Т. б. условно можно разбить на 4 осн. части: Т. б. для цифровых устройств (ЦУ) и интегральных схем (ИС), Т. б. общего применения, СВЧ Т. б. и мощные Т. б.

Т. б., предназначенные для работы в ЦУ и ИС, должны обладать малыми габаритами, высокой скоростью и мин. энергией переключения. Элементную базу наиб. быстродействующих (время переключения  $\approx 20$  пс) узлов серийных ЭВМ составляют кремниевые Т. б. В качестве наиболее быстродействующих элементов серийных ИС используются *полевые транзисторы* на основе GaAs и гетероструктурные Т. б. на основе гетеропары GaAs/GaAlAs.

Осн. требование к СВЧ Т. б. состоит в достижении макс. мощности и коэф. усиления на предельно высокой частоте. СВЧ Т. б. изготавливаются в осн. из GaAs, в к-ром баллистич. эффекты, позволяющие увеличить скорость прелёта носителей через базу, выражены значительно сильнее, чем в Si. Ведутся интенсивные разработки гетероструктурных СВЧ Т. б. Предельная частота генерации СВЧ Т. б.  $\sim 60$  ГГц.

Мощные Т. б. изготавливаются почти исключительно на основе Si, работают при напряжении коллектор—база до 1500 В и позволяют коммутировать ток  $\sim 10$  А. Физ. особенности высоковольтных Т. б. обусловлены тем, что коллектор в высоковольтных Т. б. легирован значительно слабее базы. Благодаря этому широкая область объёмного заряда, возникающая при большом обратном напряжении, почти целиком расположена в коллекторе. На долю базы приходится лишь ничтожная часть общей ширины области объёмного заряда, что позволяет сделать базу достаточно тонкой и сочетать большие коллекторные напряжения с относительно малым временем переключения ( $\sim 1$  мкс).

Рис. 6. Транзистор с горбообразными барьерами: а—структура слоев; б—зональная диаграмма.



Наиб. перспективными с точки зрения улучшения частотных свойств являются структуры, в к-рых сочетаются свойства Т. б. и полевых транзисторов (ПТ). Как и в ПТ, работа таких транзисторов основывается на использовании носителей заряда только одного знака, однако принцип управления в таких приборах тот же, что и в Т. б.: инжекция носителей в базу осуществляется понижением барьера на границе эмиттер—база.

Одна из наиб. перспективных разновидностей Т. б. схематически показана на рис. 6,а. Соответствующая зональная диаграмма приведена на рис. 6,б. Чередуя легированных по заданному закону  $n$ - и  $p$ -областей приводит к образованию на границе эмиттер—база и база—коллектор двух горбообразных барьеров. К переходу эмиттер—база прикладывается напряжение, понижающее барьер на границе  $i-p^+$ . При этом из эмиттера в базу инжектируются электроны с большой энергией, достаточной для того,