

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

В.Ф. Агафонников

Измерение h - параметров биполярных транзисторов

Руководство к лабораторной работе
по курсу "Физика полупроводниковых структур"
для студентов радиоконструкторского факультета

Томск 2012

I. ВВЕДЕНИЕ

Транзистор является основным компонентом практически всех радиотехнических схем, а также интегральных схем. В реальных схемах транзистор удобно представить как линейный активный четырехполюсник, параметры которого связаны с собственными параметрами транзистора.

Изучению зависимости собственных параметров транзистора от тока эмиттера и напряжения на коллекторе посвящена эта работа.

2. ИЗМЕРЕНИЕ h -ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

С точки зрения теории электрических цепей транзистор с его тремя выводами представляет собой трехполюсник. Обычной схемой включения трехполюсника является схема, где один из выводов относится к входной цепи, один - к выходной, а третий вывод является общим как для входной, так и для выходной цепи. Так трехполюсник превращается в четырехполюсник (рис. 2.1). В этом случае при работе на малых переменных сигналах взаимосвязь между входными и выходными величинами токов и напряжений в транзисторе определяется теорией линейных четырехполюсников. Обозначение: I_1, U_1 - входной ток и напряжение; I_2, U_2 - выходной ток и напряжение. В соответствии со статическими характеристиками транзистора все четыре величины являются взаимосвязанными, причем, достаточно задать две из них (независимые переменные), чтобы затем однозначно определить две другие величины (зависимые переменные).

Схема транзистора в виде четырехполюсника

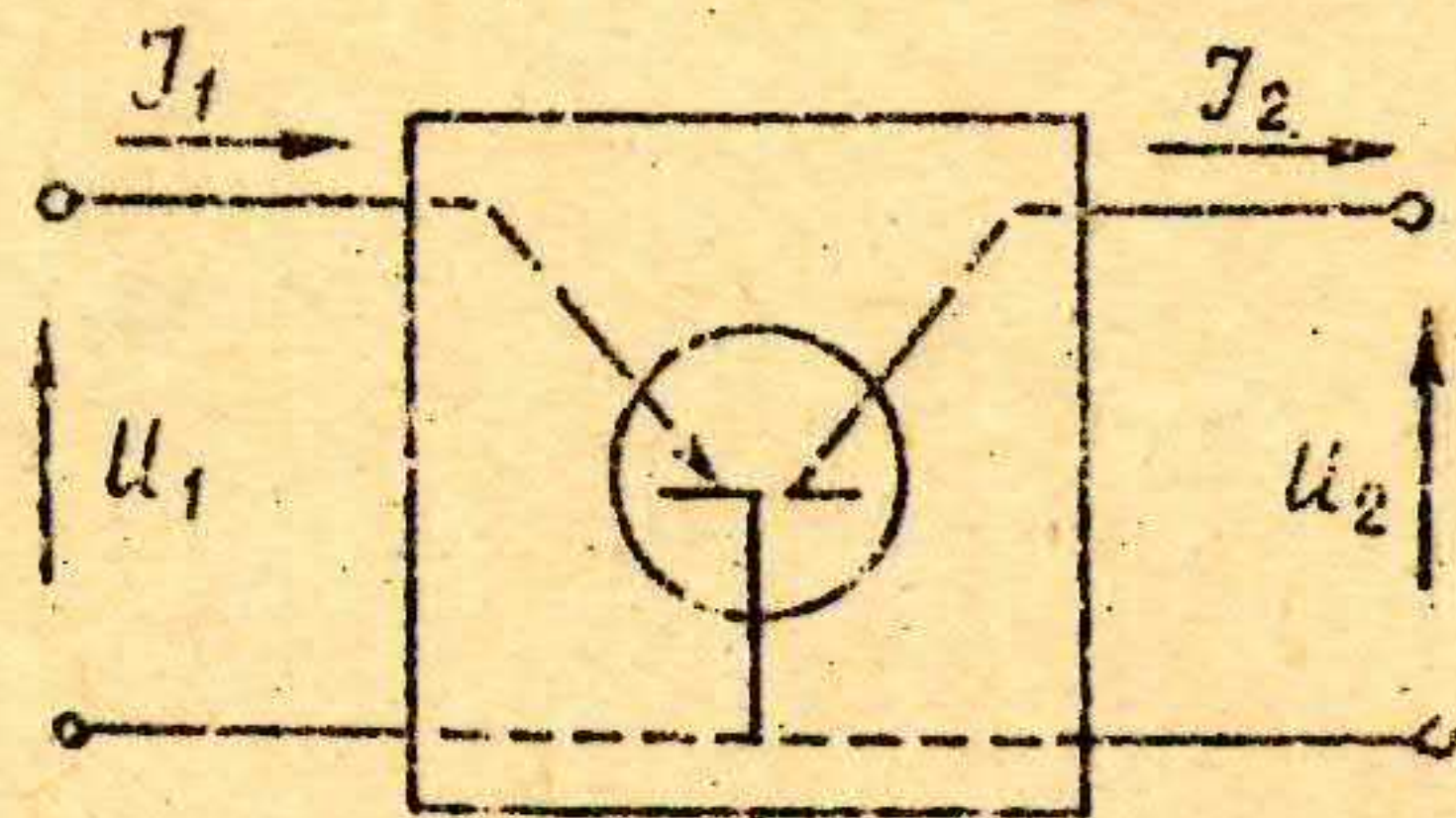


Рис. 2.1

Обозначим независимые переменные токов через x_1 и x_2 , а зависимые переменные - через y_1 и y_2 , тогда:

$$y_1 = F_1(x_1, x_2) \quad (2.1)$$

$$y_2 = F_2(x_1, x_2) \quad (2.2)$$

Если величины x_1 и x_2 получают некоторые малые приращения

$\Delta x_1, \Delta x_2$, то приращения, которые при этом получают зависимые переменные Δy_1 и Δy_2 , можно определить с помощью разложения в ряд Тейлора. Пренебрегая членами второго и высшего порядков малости, получим

$$\Delta y_1 = \frac{\partial y_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \Delta x_2 \quad (2.3)$$

$$\Delta y_2 = \frac{\partial y_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y_2}{\partial x_2} \Delta x_2 \quad (2.4)$$

Так как за независимые переменные (x_1 и x_2) могут быть приняты любые величины из четырех (двух токов и двух напряжений), то в зависимости от выбора независимых переменных получим ряд систем уравнений, связывающих приращения токов и напряжений.

Если в качестве независимых переменных выбрать входной ток I_1 и выходное напряжение U_2 , то получим так называемую систему h -параметров

$$U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2 \quad (2.5)$$

$$I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2 \quad (2.6)$$

где $h_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0}$ - входное сопротивление при коротком замыкании на выходе;

$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0}$ - коэффициент обратной связи при разомкнутой входной цепи;

$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0}$ - коэффициент усиления тока при коротком замыкании на выходе;

$h_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0}$ - выходная проводимость при холостом ходе на выходе.

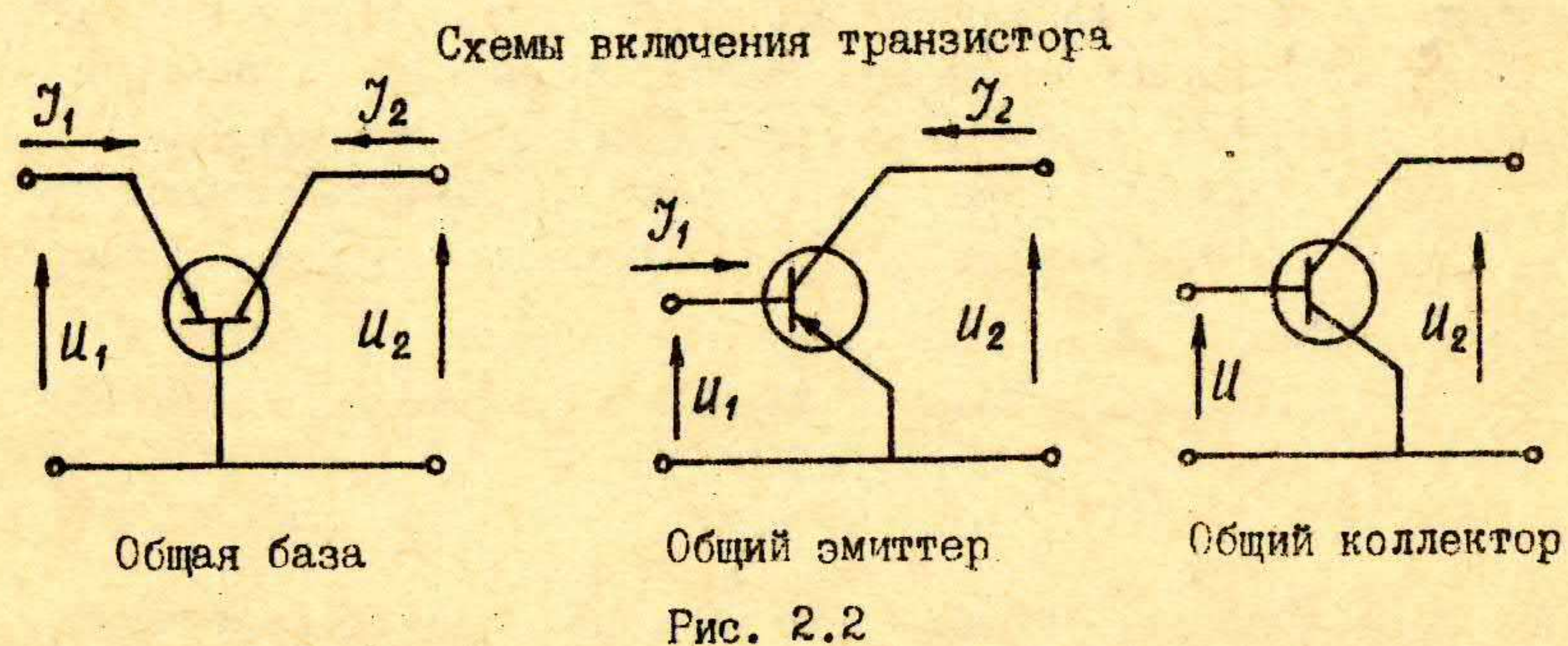
В связи с тем, что h имеет смысл сопротивления, h_{22} - проводимости, а h_{12} и h_{21} - безразмерные величины, систему h -параметров называют смешанной.

Очевидно, что в различных схемах включения транзисторов (ОБ), (ОЭ), (ОК) (рис.2.2) значения h -параметров будут различны. Ниже приводятся формулы, связывающие параметры схемы с ОБ h_{kj}^{δ} с параметрами с ОЭ h_{kj}^{σ} :

$$h_{11}^{\sigma} = \frac{h_{11}^{\delta}}{1 + h_{21}^{\delta}}; \quad h_{21}^{\sigma} = \frac{-h_{21}^{\delta}}{1 + h_{21}^{\delta}} = \beta; \quad (2.7)$$

$$h_{12}^{\sigma} = \frac{h_{11}^{\delta} \cdot h_{22}^{\delta} - h_{12}^{\delta} \cdot h_{21}^{\delta} - h_{12}^{\delta}}{1 + h_{21}^{\delta}};$$

$$h_{22}^{\sigma} = \frac{h_{22}^{\delta}}{1 + h_{21}^{\delta}}; \quad h_{21}^{\delta} = -\alpha.$$



Используя перечисленные выше параметры, можно определить собственные параметры триодов. Представим триод в виде упрощенной Т-образной схемы (рис.2.3). Элементы этой схемы имеют следующий смысл:

z_{σ} - сопротивление эмиттерного р-п перехода переменному току;

z_{κ} - сопротивление коллекторного р-п перехода переменному току;

z_{δ} - сопротивление базового слоя и базового контакта переменному току;

α - коэффициент усиления по току в схеме с общей базой

$$\alpha = \left. \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\sigma}} \right|_{U_{\kappa} = const} \quad (2.8)$$

Т-образная эквивалентная схема транзистора

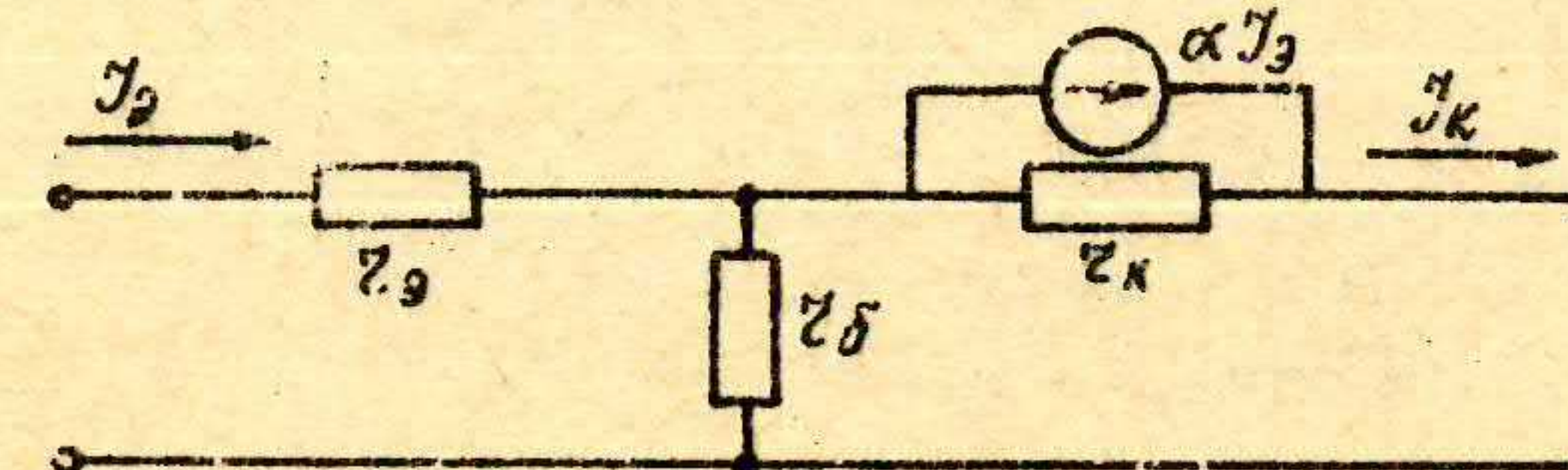


Рис. 2.3

Генератор тока αI_{σ} с бесконечно большим внутренним сопротивлением условно отображает способность триода усиливать переменный сигнал, подаваемый на входные клеммы.

Так как все системы параметров списывают один и тот же четырехплюсник (триод), поэтому между ними существует определенная связь. Зная h -параметры, можно найти параметры Т-образной эквивалентной схемы по следующим формулам:

$$z_{\sigma} = h_{11}^{\delta} - z_{\delta}(1 - \alpha); \quad z_{\delta} = \frac{h_{12}^{\delta}}{h_{22}^{\delta}}; \quad (2.9)$$

$$\alpha = -h_{21}^{\delta}; \quad z_{\kappa} = \frac{1}{h_{22}^{\delta}}$$

3. ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ ОТ РЕЖИМА СМЕЩЕНИЯ

3.1. Коэффициент передачи тока эмиттера

Коэффициент передачи тока эмиттера транзистора зависит от режима работы по постоянному току, который определяется постоянным напряжением на коллекторе U_{κ} и постоянным током эмиттера I_{σ} .

По определению коэффициент передачи равен отношению приращения тока коллектора к току эмиттера при постоянном напряжении на коллекторе транзистора. В транзисторе, работающем в режиме усиления, приращениями считают переменные составляющие токов и напряжений ($\Delta I_{\kappa} = i_{\kappa}$, $\Delta I_{\sigma} = i_{\sigma}$, $\Delta U_{\kappa} = v_{\kappa}$, $\Delta U_{\sigma} = v_{\sigma}$).

Значение коэффициента передачи тока определяется выражением

$$\alpha = \gamma \cdot \beta \cdot \alpha^* \quad (3.1)$$

где $\gamma = \frac{i_{p2}}{i_2}$ - коэффициент инжекции определяет долю дырочного тока эмиттера i_{p2} в общем токе эмиттера i_2 ;

$\beta = \frac{i_{pk}}{i_{p2}}$ - коэффициент переноса неосновных носителей через базу определяется отношением дырочного тока коллектора i_{pk} к дырочному току эмиттера i_{p2} ;

α^* - коэффициент лавинного умножения носителей в коллекторном переходе. При отсутствии лавинного размножения носителей в коллекторном переходе $\alpha^* = 1$.

Величины γ, β для области низких частот можно записать еще в виде:

$$\gamma \approx 1 - \frac{\sigma_{\delta}}{\sigma_{\beta}} \cdot \frac{W}{L_{n2}} \quad (3.2)$$

$$\beta = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_p} \right)^2 \quad (3.3)$$

где W - толщина базы транзистора;

$\sigma_{\delta}, \sigma_{\beta}$ - проводимость базы эмиттера, соответственно;

L_p - диффузионная длина дырок в базе;

L_{n2} - диффузионная длина электронов в эмиттере.

С увеличением напряжения U_k коллекторный переход расширяется. При этом расширение запирающего слоя происходит, в основном, в область базы, поскольку удельное сопротивление ее в транзисторах велико по сравнению с областью коллектора. Таким образом, с ростом напряжения на коллекторе ширина базы уменьшается. Это, как видно из уравнений (3.2-3.3), приводит к увеличению коэффициентов γ и β , а следовательно, и к росту коэффициента передачи. Явной зависимости коэффициента переноса от тока эмиттера в выражении (3.3) не содержится. Это выражение получено в предположении, что электрическое поле в базе отсутствует. На самом деле в базе транзистора имеется слабое электрическое поле, которое увеличивается с ростом тока эмиттера. Это поле ускоряет перенос дырок к коллектору, в результате чего количество рекомбинированных дырок в базе уменьшается. Учет поля приведет к уве-

личению диффузионной длины (которую при учете поля следует называть длиной затягивания) и к увеличению β , а следовательно, и α .

Дальнейшее увеличение тока эмиттера приведет к заполнению базы носителями заряда, росту проводимости базы, и коэффициент инжекции эмиттерного перехода γ падает.

3.2. Сопротивление эмиттера

Величина сопротивления эмиттера Z_2 для переменного тока определяется из вольтамперной характеристики эмиттерного перехода

$$J_2 \approx \left(\frac{e D_{n2} n_{p2}}{L_{n2}} + \frac{e D_p p_{n2}}{W} \right) \left(e^{\frac{e U_2}{kT}} \right) \quad (3.4)$$

Отсюда:

$$Z_2 = \frac{dU_2}{dJ_2} = \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{(J_2 + J_{20})} \quad (3.5)$$

где

$$J_{20} = \frac{e D_{n2} n_{p2}}{L_{n2}} + \frac{e D_p p_{n2}}{W} \quad (3.6)$$

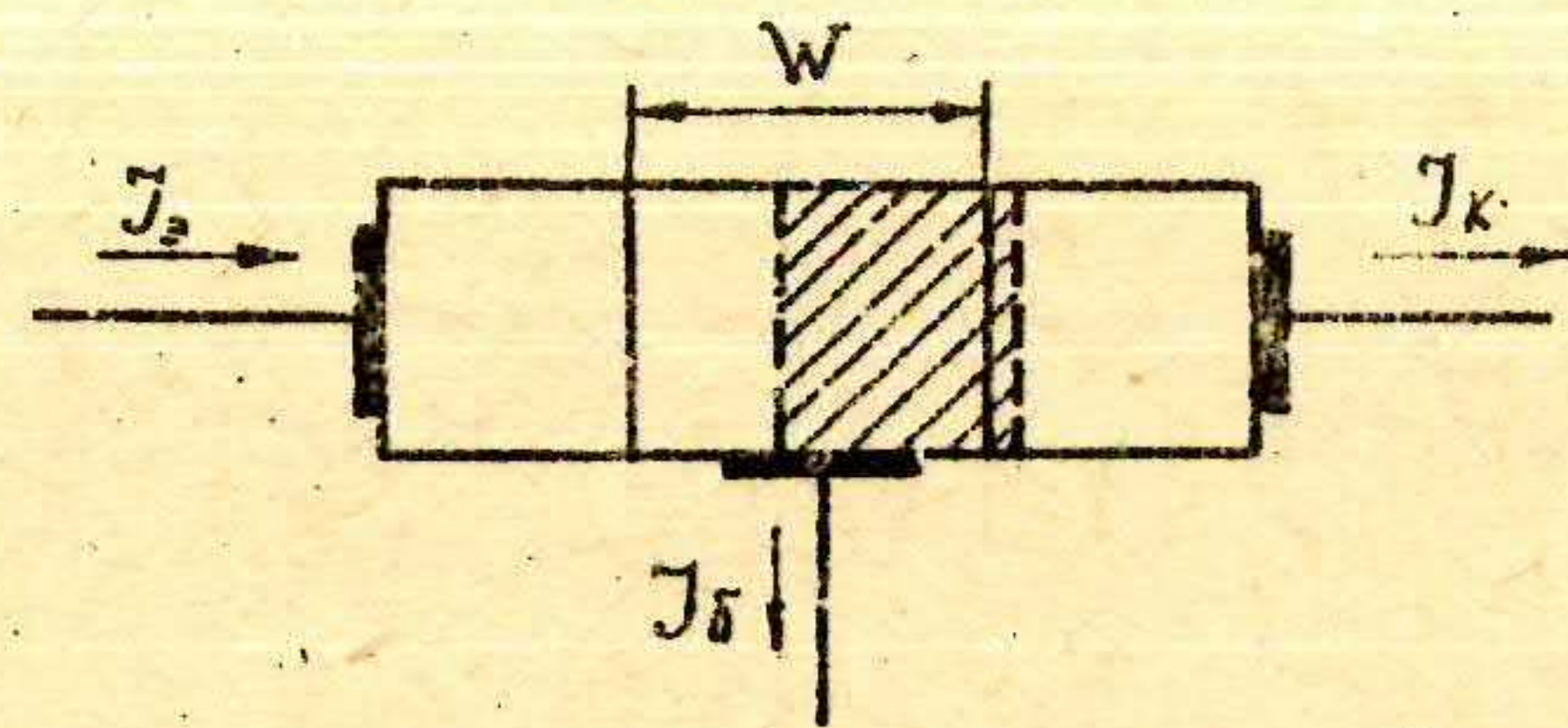
представляет собой обратный ток эмиттерного перехода при коротком замыкании цепи база-коллектор.

Из соотношения (3.6) видно, что Z_2 с ростом постоянной составляющей тока эмиттера J_2 уменьшается по гиперболическому закону.

Зависимость Z_2 от напряжения на коллекторе слабая. С увеличением U_k Z_2 уменьшается.

3.3. Сопротивление базы

Величина сопротивления базы Z_{δ} характеризуется омическим сопротивлением протекающему току базы, определяется конструкцией транзистора и удельным сопротивлением материала базы. С увеличением напряжения на коллекторе область объемного заряда расширяется в базу (это характерно для сплавных транзисторов), толщина базы падает, следовательно, уменьшается поперечное сечение полупроводникового материала базы для базового тока. Это приводит к росту Z_{δ} .



С ростом тока эмиттера J_e повышается концентрация носителей в базе. Это приводит к уменьшению удельного, а значит, и полного сопротивления базы транзистора.

3.4. Сопротивление коллектора

По определению дифференциальное сопротивление коллектора

$$z_k = \left. \frac{dU_k}{\alpha J_k} \right|_{J_e = \text{const}} \quad (3.7)$$

Ток коллектора, являющийся обратным током коллекторного перехода, слабо зависит от напряжения:

$$g_k = \frac{dJ_k}{dU_k} = 0 \quad \text{или} \quad z_k = \frac{dU_k}{dJ_k} = \infty$$

Однако в реальных транзисторах сопротивление z_k , оставаясь большим, все же имеет конечную величину. Отклонение от идеальной модели определяется изменением коэффициента переноса, связанным с модуляцией ширины базы W при изменении напряжения коллектора, а также наличием токов утечки по поверхности р-п перехода и тока термической генерации в запиорном слое коллектора.

Токи утечки трудно поддаются расчету, а влияние модуляции ширины базы на z_k с изменением напряжения на коллекторе можно подсчитать.

С увеличением напряжения на коллекторе слой объемного заряда расширяется, толщина базы W уменьшается, вызывая изменение коэффициента усиления по току α .

Следовательно, полагая $J_{ko} \ll \alpha J_e$, получим:

$$g_k = \frac{1}{z_k} = h_{22} = -J_e \frac{d\alpha}{dU_k} = -J_e \frac{d\alpha}{dW} \cdot \frac{dW}{dU_k} \quad (3.8)$$

Взяв производные, получим для эмиттерного транзистора следующее выражение для z_k :

$$z_k = \frac{2U_k \cdot W}{J_e \cdot d_k [2(1-\beta) + (1-\gamma)]} \quad (3.9)$$

где d_k - область объемного заряда коллекторного перехода;
 β - коэффициент переноса, характеризующий отношение дырочной составляющей тока коллектора к дырочной составляющей тока эмиттера (для р-п-р транзистора);

γ - эффективность эмиттера, характеризующая отношение дырочной составляющей тока эмиттера к полному току эмиттера.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Почему транзистор можно представить в виде линейного активного четырехполюсника?

4.2. Как выразить взаимосвязь токов и напряжений в системе h -параметров?

4.3. Вид T-образной эквивалентной схемы транзистора.

4.4. Выразить связь параметров T-образной схемы транзистора с параметрами h -системы.

4.5. Объяснить зависимость z_e , z_δ , z_k , α от тока эмиттера и напряжения на коллекторе.

5. ЗАДАНИЕ

5.1. Ознакомиться по описанию с прибором Л2-22 и методикой измерения параметров.

5.2. Измерить h_{kj} -параметры триодов в схемах с общей базой и общим эмиттером в заданной рабочей точке ($U_k = 5$ В, $J_e = 1$ мА).

5.3. Взяв за основу h_{kj}^δ -параметры, измеренные в схеме с ОБ, по известным формулам перехода рассчитать h_{kj}^e параметры для схемы с ОЭ. Сравнить с ранее измеренными. Результаты свести в таблицу.

5.4. По измеренным параметрам h_{kj} в схеме с ОБ найти параметры T-образной эквивалентной схемы z_e , z_δ , z_k , α .

5.5. Снять зависимость h_{kj} - параметров в схеме с ОБ от тока эмиттера $I_э = (0, 2-2, 0)$ мА при напряжении коллектора $U_k = 2, 4, 6, 8, 10$ В.

Построить зависимости:

$$z_k = f(I_э); \quad z_\delta = f(I_э); \quad z_э = f(I_э); \quad \alpha = f(I_э);$$

$$z_k = f(U_k); \quad z_\delta = f(U_k); \quad z_э = f(U_k); \quad \alpha = f(U_k).$$

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 6.1. Федотов А.Я. Основы физики полупроводниковых приборов. -М.: Сов.радио, 1969. -274с.
- 6.2. Красилов А.В., Трутко А.Ф. Методы расчета транзисторов. -М.: Энергия, 1964. -63с.
- 6.3. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. -М.: Сов.радио, 1980. -100с.
- 6.4. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов. -Томск: Изд-во Томск.гос.ун-та, 1989. -334с.