

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.М. Славникова
С.А. Артищев

ИЗМЕРЕНИЕ h - ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине
«Физические основы микро- и наноэлектроники»

Томск
2022

УДК 538.915
ББК 22.35
С 470

Рецензент

Еханин С.Г., доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

Славникова Марина Михайловна, Артищев Сергей Александрович

Измерение h -параметров биполярного транзистора: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Физические основы микро- и нанoeлектроники» / М.М. Славникова, С.А. Артищев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 10с.

В методических указаниях кратко изложена работа биполярного транзистора (БПТ) как четырехполюсника, показаны возможные три схемы включения БПТ, составляющие коэффициента усиления, связь между собственными параметрами и параметрами четырехполюсника. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначено для студентов, изучающих курс «Физические основы микро- и нанoeлектроники».

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.915
ББК 22.35

© Славникова М.М., 2022
© Артищев С.А., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	4
1	Измерение h-параметров биполярного транзистора.....	4
2	Зависимость параметров транзистора от режима смещения.....	7
3	Задание.....	9
4	Контрольные вопросы	10
	Список рекомендуемой литературы.....	10

ВВЕДЕНИЕ

В 1948 году американские ученые Дж. Бардин и В. Браттейн создали полупроводниковый триод или транзистор. Это событие имело большое значение для развития полупроводниковой электроники. Транзисторы могут работать при значительно меньших напряжениях, чем ламповые триоды, и не являются простыми заменителями последних: их можно использовать не только для усиления и генерации переменного тока, но и в качестве ключевых элементов. Определение «биполярный» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают участие носители заряда двух сортов (электроны и дырки). Слово «транзистор» произошло от английского словосочетания «transfer resistor» – преобразователь сопротивления.

Транзистор является основным компонентом практически всех радиотехнических схем. Он используется в радиоэлектронике в качестве дискретного активного элемента, а в планарном исполнении является основой для создания интегральных твердотельных микросхем. Твердотельные микросхемы являются главными элементами современного поколения ЭВМ и других сложных радиоэлектронных устройств.

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.

1 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 ко входной цепи, один к выходной, а третий вывод является общим как для входной, так и для выходной цепи. Так трехполюсник превращается в четырехполюсник (рис.1.1). 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).

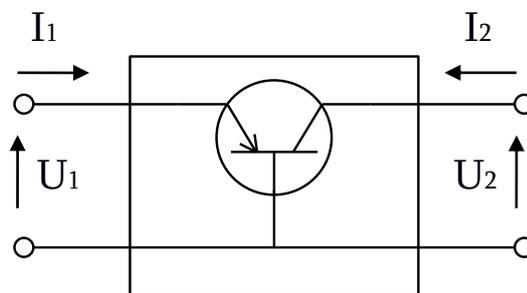


Рисунок 1.1 – Схема транзистора в виде четырехполюсника

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

$$y_1 = F_1(x_1, x_2), \quad (1.1)$$

$$y_2 = F_2(x_1, x_2), \quad (1.2)$$

где F_1 и F_2 – в данном случае символы функциональной зависимости.

Если величины x_1 и x_2 получают некоторые малые приращения Δx_1 , Δx_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

$$\Delta y_1 = (\partial y_1 / \partial x_1) \cdot \Delta x_1 + (\partial y_1 / \partial x_2) \cdot \Delta x_2 \quad (1.3)$$

$$\Delta y_2 = (\partial y_2 / \partial x_1) \cdot \Delta x_1 + (\partial y_2 / \partial x_2) \cdot \Delta x_2 \quad (1.4)$$

В этих уравнениях величины $(\partial y / \partial x)$ представляют собой, так называемые дифференциальные параметры, характеризующие четырехполюсник в данной рабочей точке, заданной постоянными токами и напряжениями. Эти параметры представляют собой наклон той или иной характеристики при неизменности одной из независимых переменных (т.е. при $x_1 = \text{const}$ и $\Delta x_1 = 0$ или $x_2 = \text{const}$ и $\Delta x_2 = 0$).

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.

Коэффициенты уравнений любой системы полностью характеризуют все основные свойства активного линейного четырехполюсника. Поэтому система четырех коэффициентов образует систему основных или первичных параметров четырехполюсника.

Произвольно осуществляемый выбор независимых переменных не может влиять на основные свойства четырехполюсника, поэтому различные пары уравнений являются взаимосвязанными и коэффициенты одного из них могут быть однозначно пересчитаны в коэффициенты другого.

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

$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2, \quad (1.5)$$

$$i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2, \quad (1.6)$$

где h_{11} – входное сопротивление при коротком замыкании на выходе;

h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению при разомкнутой входной цепи;

h_{21} – коэффициент усиления по току при коротком замыкании на выходе;

h_{22} – выходная проводимость при холостом ходе на входе.

В связи с тем, что h_{11} имеет смысл сопротивления, h_{22} – проводимости, а h_{12} и h_{21} – безразмерные величины, систему h -параметров называют смешанной.

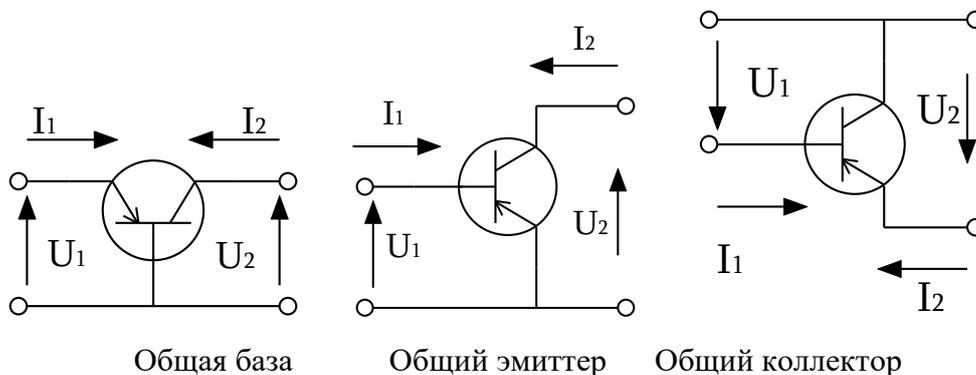


Рисунок 1.2 – Схемы включения биполярного транзистора

Очевидно, что в различных схемах включения транзисторов (ОБ), (ОЭ), (ОК) значения h -параметров будут различны. Ниже приводятся формулы, связывающие параметры схемы с ОБ h_{kj}^6 с параметрами схемы с ОЭ h_{kj}^3 :

$$\begin{aligned} h_{11}^3 &= h_{11}^6 / (1 + h_{21}^6); \\ h_{21}^3 &= -h_{21}^6 / (1 + h_{21}^6); \\ h_{12}^3 &= (h_{11}^6 \cdot h_{22}^6 - h_{12}^6 \cdot h_{21}^6 - h_{12}^6) / (1 + h_{11}^6); \\ h_{22}^3 &= h_{22}^6 / (1 + h_{21}^6); \\ h_{21}^6 &= -\alpha, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где α – коэффициент усиления по току в схеме с общей базой;

Используя перечисленные выше параметры четырехполюсника, можно определить собственные параметры транзистора. Собственные, или физические параметры транзистора, связаны с физическими процессами в нем и не зависят от схемы включения транзистора. Представим триод в виде упрощенной Т-образной схемы (рис.1.3).

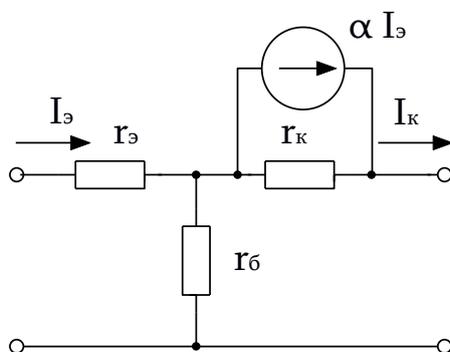


Рисунок 1.3 – Т-образная эквивалентная схема биполярного транзистора

Элементы этой схемы имеют следующий смысл:

$r_э$ – сопротивление эмиттерного перехода переменному току;

$r_к$ – сопротивление коллекторного перехода переменному току;

$r_б$ – сопротивление базы переменному току;

α – коэффициент усиления по току в схеме с общей базой (коэффициент передачи тока эмиттера).

$$\alpha = \Delta I_k / \Delta I_э \quad \text{при } U_{кб} = const. \quad (1.8)$$

Генератор тока $\alpha_0 \cdot I_э$ с бесконечно большим внутренним сопротивлением условно отображает способность триода усиливать переменный сигнал, подаваемый на входные клеммы.

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

$$\begin{aligned} r_э &= h_{11}^6 - r_б \cdot (1 - \alpha); \\ r_б &= h_{12}^6 / h_{22}^6; \\ r_к &= 1 / h_{22}^6; \\ \alpha &= -h_{21}^6 \end{aligned} \quad (1.9)$$

2 ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА ОТ РЕЖИМА СМЕЩЕНИЯ

2.1. Коэффициент передачи тока эмиттера

Коэффициент передачи тока эмиттера транзистора зависит от режима работы по постоянному току, который определяется постоянным напряжением на коллекторе U_K и постоянным током эмиттера $I_Э$.

По определению коэффициент передачи тока равен отношению приращения тока коллектора к вызвавшему его изменению тока эмиттера при постоянном напряжении на коллекторе транзистора. В транзисторе, работающем в режиме усиления, приращениями считают переменные составляющие токов и напряжений ($\Delta I_K = i_K$, $\Delta I_Э = i_Э$, $\Delta U_K = u_K$, $\Delta U_Э = u_Э$). Значение коэффициента передачи тока эмиттера определяется выражением:

$$\alpha = \gamma \cdot \beta \cdot \alpha^*, \quad (2.1)$$

где $\gamma = I_{pЭ}/I_Э$ – коэффициент инжекции или эффективность эмиттера. γ определяет долю дырочного тока эмиттера $I_{pЭ}$ в общем токе эмиттера $I_Э$;

β – коэффициент переноса неосновных носителей через базу. β определяется отношением дырочного тока коллектора I_{pK} к дырочному току эмиттера $I_{pЭ}$. Следовательно, β учитывает потерю неравновесных дырок, инжектированных эмиттером, на рекомбинацию с электронами в базе.

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 в виде:

$$\gamma \approx 1 - (\sigma_б/\sigma_э) \cdot (w/l_{пэ}), \quad (2.2)$$

$$\beta \approx 1 - 1/2 \cdot (w/l_{pб})^2, \quad (2.3)$$

где w – ширина базы транзистора;

$\sigma_б, \sigma_э$ – удельная электропроводность базы и эмиттера, соответственно;

$l_{pб}$ – диффузионная длина дырок в базовой области;

$l_{пэ}$ – диффузионная длина электронов в эмиттере.

С увеличением напряжения $U_{кб}$ коллекторный p-n переход расширяется.

При этом, расширение области пространственного заряда происходит в основном в сторону базы, так как ее удельное сопротивление в транзисторах значительно превышает удельное сопротивление области коллектора. За счет этого с ростом запирающего напряжения на коллекторном p-n переходе ширина базы уменьшается. Это, как видно из уравнений (1.2 и 1.3) приводит к увеличению коэффициентов γ и β и к росту коэффициента передачи тока эмиттера α .

Явной зависимости коэффициента переноса β от тока эмиттера $I_Э$ в выражении (2.3) не содержится. Это выражение получено в предположении, что электрическое поле в базе отсутствует. В действительности в базе транзистора существует слабое электрическое поле, которое увеличивается с ростом тока эмиттера. Это поле ускоряет перенос дырок от эмиттера к коллектору, в результате чего уменьшается количество прорекомбинировавших в базе дырок.

Учет электрического поля приведет к увеличению 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.

2.2. Сопротивление эмиттера

Величина сопротивления эмиттера $r_э$ для переменного тока определяется из вольтамперной характеристики эмиттерного p-n перехода.

$$I_э \approx (e \cdot D_{nэ} \cdot n_{pэ} / l_{nэ} + e \cdot D_{pб} \cdot p_{nб} / w) \cdot (e^{U_э/kT} - 1) \quad (2.4)$$

Отсюда:

$$r_э = dV_э / dI_э = kT / e \cdot 1 / (I_э + I_{э0}), \quad (2.5)$$

где

$$I_{э0} = (e \cdot D_{nэ} \cdot n_{pэ} / l_{nэ} + e \cdot D_{pб} \cdot p_{nб} / w) \quad (2.6)$$

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

Из соотношения (2.5) видно, что $r_э$ с ростом постоянной составляющей тока эмиттера $I_э$ уменьшается по гиперболическому закону.

Зависимость $r_э$ от напряжения на коллекторе слабая. С увеличением $U_{кб}$ $r_э$ уменьшается.

2.3. Сопротивление базы

Величина сопротивления базы $r_б$ характеризуется омическим сопротивлением протекающему току базы, определяется конструкцией транзистора и удельным сопротивлением и материала базы. С увеличением напряжения на коллекторе область объемного заряда коллекторного p-n перехода расширяется в сторону базы (это характерно для сплавных транзисторов), толщина базы уменьшается, следовательно, уменьшается поперечное сечение полупроводникового материала базы для базового тока. Это приводит к росту $r_б$ (рис. 2.1).

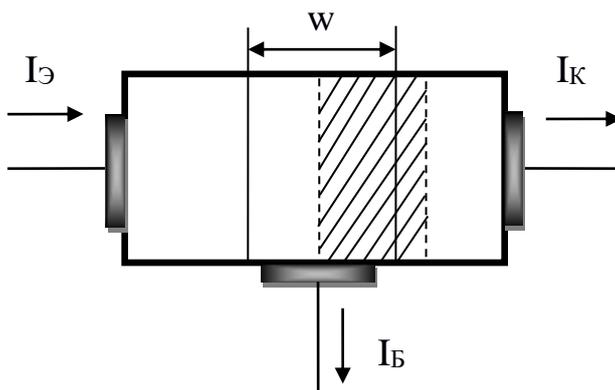


Рисунок 2.1 – Плоскостная модель биполярного транзистора

С ростом тока эмиттера $I_э$ концентрация неравновесных носителей в базе увеличивается. Это приводит к уменьшению удельного, а значит, и полного сопротивления базы транзистора.

2.4. Сопротивление коллектора

По определению дифференциальное сопротивление коллектора

$$r_к = dU_к / dI_к \quad \text{при } I_э = \text{const}. \quad (2.7)$$

Ток коллектора, являющийся обратным током коллекторного перехода, слабо зависит от напряжения поэтому $r_к = dU_к / dI_к \approx \infty$

Однако в реальных транзисторах сопротивление $r_к$, 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 p-n перехода и тока

термической генерации в области пространственного заряда коллектора.

Токи утечки трудно поддаются расчету, а влияние модуляции ширины базы на сопротивление коллектора можно подсчитать.

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

Следовательно, полагая $I_{к0} \ll \alpha \cdot I_3$, получим

$$g_k = 1/r_k = h_{22} = -I_3 \cdot (d\alpha/dw) = I_3 \cdot d\alpha/dw \cdot dw/dU_k. \quad (2.8)$$

Беря производные, получим для сплавного транзистора следующее выражение для g_k :

$$2U_k \cdot W / (I_3 \cdot d_k \cdot (2 \cdot (1 - \beta) + (1 - \gamma))), \quad (2.9)$$

где d_k – область объемного заряда коллекторного перехода;

β – коэффициент переноса, характеризующий отношение дырочной составляющей тока коллектора к дырочной составляющей тока эмиттера (для p-n-p транзистора);

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

3 ЗАДАНИЕ

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

3.2. Измерить h-параметры предложенного преподавателем триода в схемах с общей базой и общим эмиттером в заданной рабочей точке ($U_{кб} = 5$ В, $I_3 = 1$ мА).

3.3. Взяв за основу h-параметры, измеренные в схеме с ОБ, по известным формулам перехода рассчитать h-параметры для схемы с ОЭ. Сравнить с ранее измеренными. Результаты свести в таблицу.

3.4. По измеренным h-параметрам в схеме с ОБ найти параметры T-образной эквивалентной схемы r_3 , r_k , r_6 , α .

3.5. Снять зависимость h_{ij}- параметров в схеме с ОБ от тока эмиттера I_3 (0,2-2) мА при напряжении коллектора $U_k = 2,4,6,8,9$ В.

3.6. Рассчитать, построить и объяснить зависимости собственных параметров транзистора от тока эмиттера и напряжения на коллекторе.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Почему транзистор называется биполярным?

4.2. Каково назначение эмиттера, базы и коллектора?

4.3. Из каких соображений выбирается ширина базы w ?

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

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

4.6. Изобразите T-образную эквивалентную схему биполярного транзистора.

4.7. Выразите связь параметров T-образной схемы транзистора с h-параметрами.

4.8. Объясните зависимости собственных параметров биполярного транзистора (r_3 , r_k , r_6 , α) от тока эмиттера и напряжения на коллекторе.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов А.Я, Основы физики полупроводниковых приборов. М.: Сов.радио, 1969. -274с.
2. Красилов А.В., Трутко А.Ф. Методы расчета транзисторов. М.: Энергия, 1964. - 63с.
3. В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. 5-еизд.,исправленное. СПб.:Издательство «Лань»,2003.-480 с.
4. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.