

Кафедра электроники и квантовой радиофизики

Отчет по лабораторной работе №1

**Измерение статических характеристик биполярного
транзистора**

Выполнили студенты 440 группы
Понур К.А.

Нижний Новгород, 2019

1. Теоретическая часть

1.1. Введение

Принцип действия биполярного транзистора состоит в управлении током неосновных носителей заряда, инжектируемых эмиттерным $p - n$ переходом в базу и достигающих коллекторного $p - n$ перехода, включенного в запорном направлении.

Управление током, протекающим через транзистор, достигается при помощи изменении высоты энергетических барьеров $p - n$ переходов: прямосмещенного эмиттерного и обратсмещенного коллекторного. Биполярный транзистор является прибором, управляемым током – малый ток базы управляет большим током, протекающим из эмитера в коллектор.

1.2. Устройство биполярного транзистора

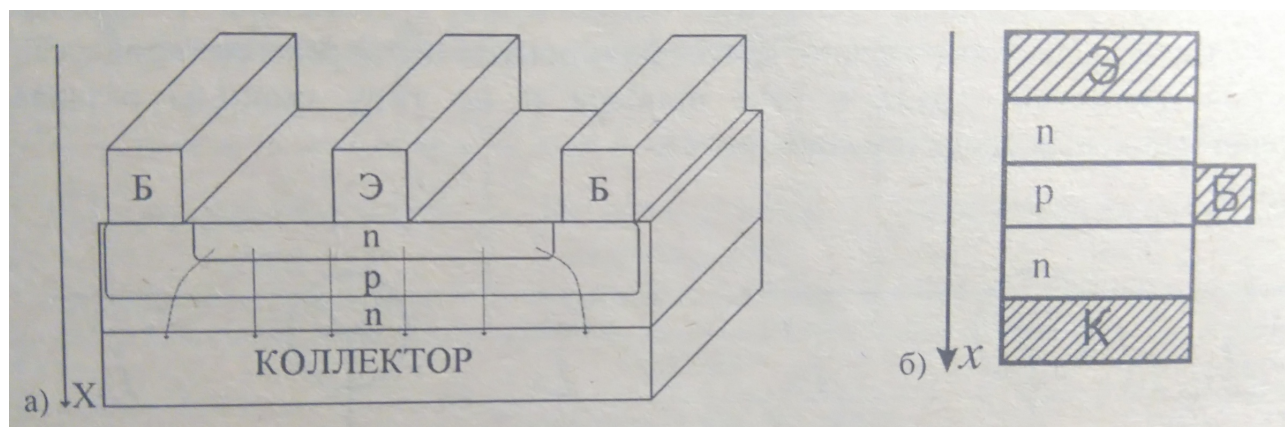


Рис. 1

Прибор представляет собой монокристалл, содержащий три полупроводниковых области с различным типом проводимости, которые образуют между собой два $p - n$ перехода, а с наружными металлическими электродами – омические контакты.

Как видно из рис. 1а ток, за исключением периферийных областей, течет перпендикулярно границам $p - n$ переходов. Обычно краевыми эффектами на периферии структуры пренебрегают, так как толщина слоя базы много меньше её латеральных размеров. Идеализированная одномерная структура транзистора представлена на рис. 1.

Отметим две принципиальные конструктивно-технологические особенности транзисторов:

- Малая толщина базы по сравнению с диффузионной длиной дырок L_p , являющихся в базе неосновными носителями.

- Относительно малая степень легирования материала базы примесными атомами по сравнению с эмиттером и коллектором.

1.2.1 Схема включения транзистора

Несмотря на то, что схема включения транзистора непосредственно не влияет на физику его работы, она определяет граничные условия на контактах. На рис. 6 приведены две схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ).

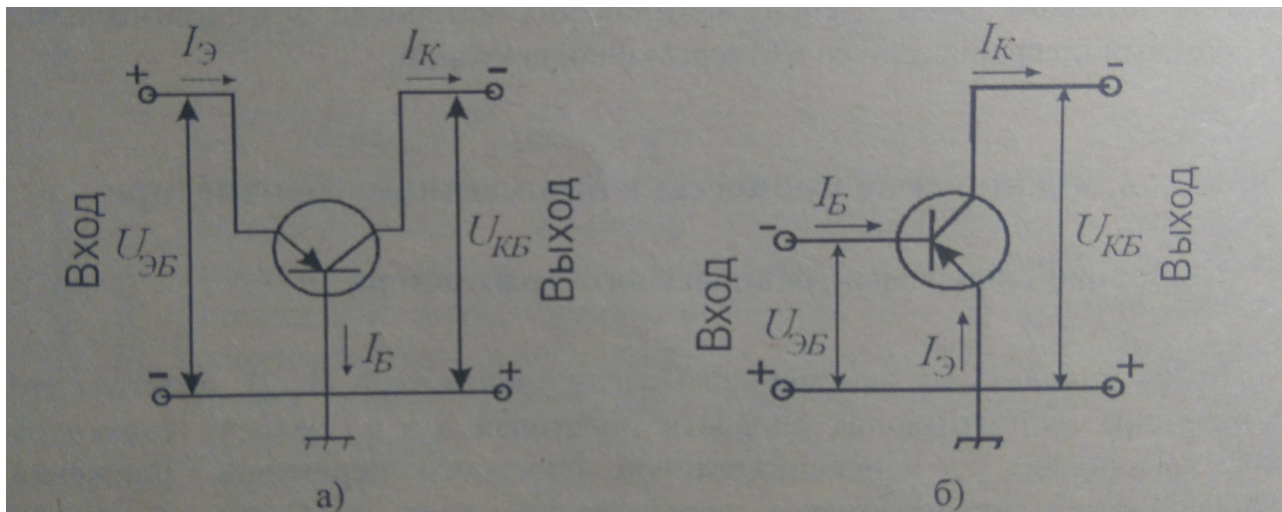


Рис. 2

1.2.2 Зонная диаграмма транзистора в активном режиме

Присоединим источники напряжения к клеммам транзистора. При нормальном включении, обеспечивающим активный режим, на эмиттерный переход должно быть подано прямое смещение, а на коллекторный переход обратное. На рис. 2 показано включение источников по схеме с общей базой при котором вывод базы является общим для обоих источников питания. При малом уровне инжекции (т.е. вброса электронов и дырок соответственно области p и n -типа) электрическое поле вне перехода равно нулю. Тогда на достаточном удалении от границ переходов носители находятся в состоянии термодинамического равновесия, а уровни Ферми располагаются относительно краев зон в соответствующих областях так же, как в равновесном транзисторе (рис. 46). На рис. 76 изображена зонная диаграмма транзистора в активном режиме работы. Перепад уровней Ферми в областях n -переходов соответствует приложенным к этим переходам напряжениям. Кроме того, приложенные напряжения приводят к трансформации зонной диаграммы.

- Эмиттерный переход, находящийся под прямым смещением, сужается, а высота потенциального барьера в переходе уменьшается на $e_0 U_{ЭБ}$;

- Обрато-смещенный коллекторный переход расширяется, а высота потенциального барьера увеличивается на величину $e_0 U_{кб}$.

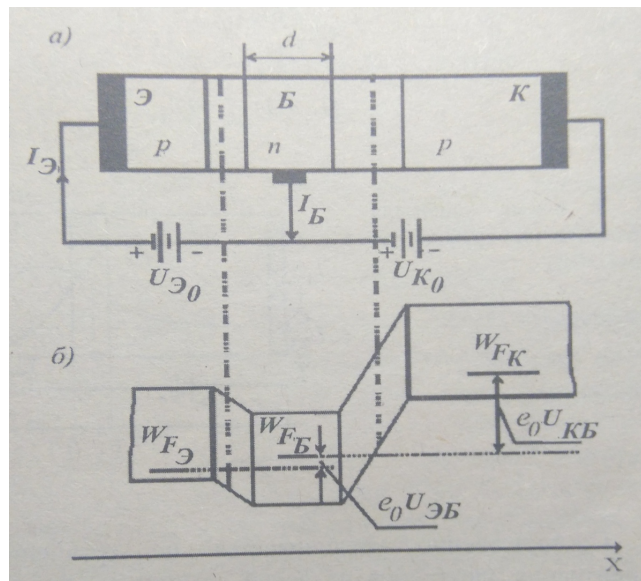


Рис. 3

2. Практическая часть

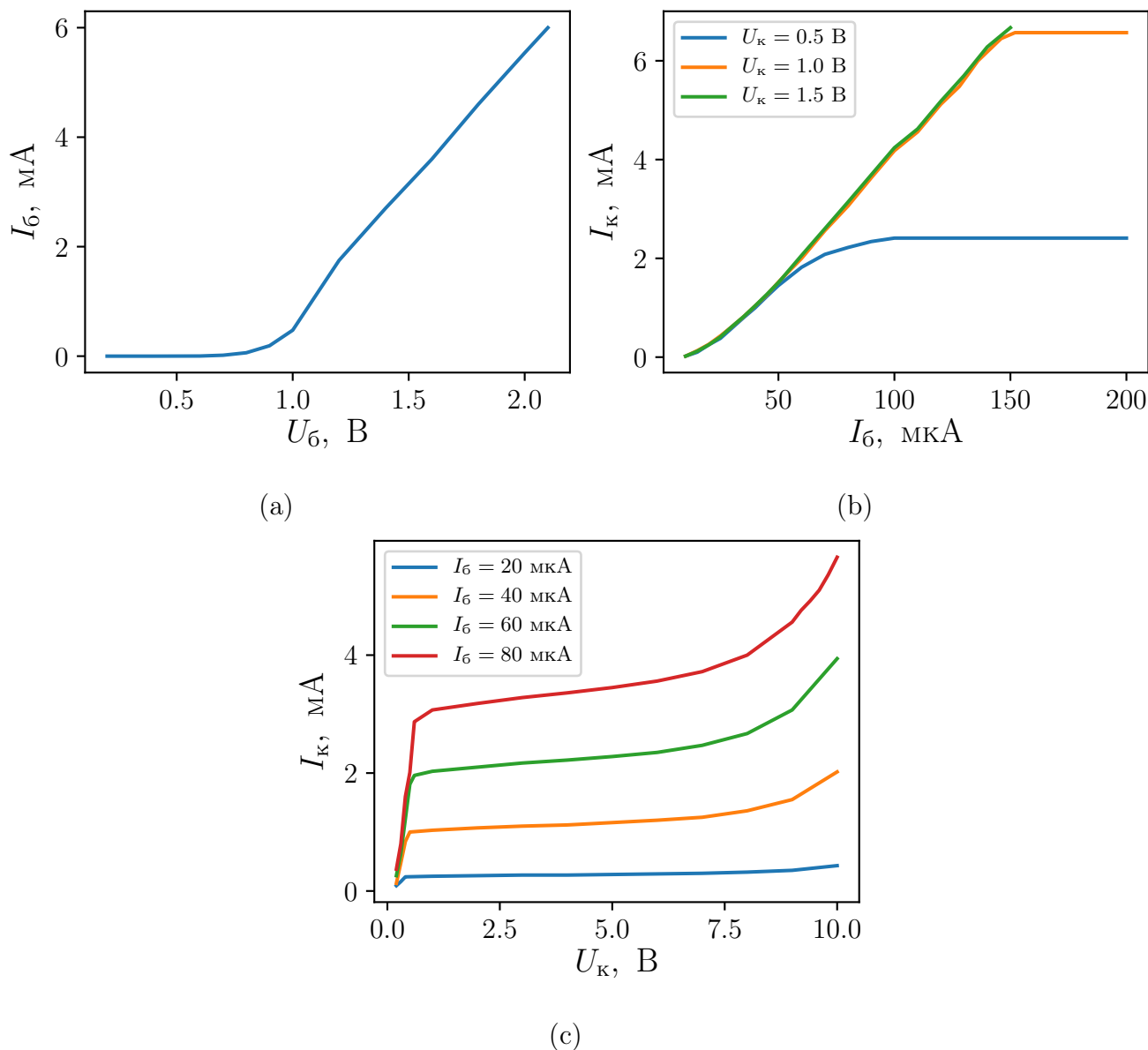


Рис. 4: Статические характеристики биполярного транзистора: (а) входная характеристика, (б) переходная характеристика, (с) выходная характеристика

Расчёт параметров транзистора Рассмотренные в теоретической части эквивалентные схемы не являются единственно возможными. В литературе можно встретить множество других схем, в частности, П-образные схемы. С точки зрения схемотехники выбор конкретной схемы не имеет существенного значения. Достаточно представить транзистор в виде некоторого бесструктурного четырехполюсника, и задать связи между входными и выходными величинами.

В приближении малого сигнала 4-х полюсник является линейным и упомянутым связям соответствует система двух линейных уравнений. Естественно, что коэффициенты

уравнений (параметры 4-х полюсника) зависят не только от физических свойств транзистора и режима, но также от его схемы включения и выбора каких-то двух величин из 4-х в качестве управляющих переменных.

Преимуществом такого подхода является устранение произвола, связанного с выбором той или иной эквивалентной схемы, т.к. величины параметров определяются непосредственно из уравнений транзистора.

Рассмотрим для иллюстрации определение h -параметров транзистора для включения с общим эмиттером. Для h -системы в качестве независимых (управляющих) переменных выбираются входной ток и выходное напряжение. В результате уравнения линейного 4-х полюсника имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{\text{BX}} &= h_{11}i_{\text{BX}} + h_{12}U_{\text{ВЫХ}}, \\ i_{\text{ВЫХ}} &= h_{21}i_{\text{BX}} + h_{22}U_{\text{ВЫХ}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Из (1) следует, что

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left(\frac{U_{\text{BX}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right) \bigg|_{i_{\text{BX}}=0} & h_{12} &= \left(\frac{U_{\text{BX}}}{i_{\text{BX}}} \right) \bigg|_{U_{\text{ВЫХ}}=0} \\ h_{21} &= \left(\frac{i_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{BX}}} \right) \bigg|_{U_{\text{ВЫХ}}=0} & h_{22} &= \left(\frac{i_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right) \bigg|_{i_{\text{BX}}=0} \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно (2), h_{11} имеет смысл входного сопротивления 4-х полюсника при закороченном выходе; h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению, при разомкнутом входе; h_{21} – коэффициент усиления по току при закороченном выходе; h_{22} – выходная проводимость при разомкнутом входе. Для системы с ОЭ:

$$\begin{aligned} i_{\text{BX}} &= i_{\text{б}} & i_{\text{ВЫХ}} &= i_{\text{к}} \\ U_{\text{ВЫХ}} &= U_{\text{к}} + U_{\text{э}} = U_{\text{к}}^* \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда можно получить h -параметры через основные параметры транзистора:

$$\begin{aligned} h_{11} &= r_{\text{б}} + \frac{r_{\text{э}}}{1 - \alpha}, & h_{12} &= \frac{r_{\text{э}}}{2(1 - \alpha)r_{\text{к}}}, \\ h_{21} &= \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, & h_{22} &= \frac{1}{(1 - \alpha)r_{\text{к}}} \end{aligned}$$

Формулы (3) служат в качестве исходных при измерениях h -параметров. Согласно (3) они определяются из опытов при условии короткого замыкания на выходе или холостого на входе. Поскольку выходная цепь в схеме с ОЭ является высокоомной, а входная, наоборот – низкоомной, указанные эксперименты не вызывают затруднений. Именно поэтому h -система наиболее удобна для схем с ОЭ и ОБ. Отметим, что величины h - одного и того же транзистора при различных схемах включения транзистора также различны. По результатам проведённых измерений были рассчитаны и построены зависимости коэффициента передачи тока от напряжения коллектора при токах коллектора 2 мА и 5 мА. Для

транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, уравнение (2) примет вид

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left(\frac{U_6}{U_3} \right) \bigg|_{i_k=0} & h_{12} &= \left(\frac{U_k}{i_k} \right) \bigg|_{U_3=0} \\ h_{21} &= \left(\frac{i_3}{i_k} \right) \bigg|_{U_3=0} & h_{22} &= \left(\frac{i_3}{U_3} \right) \bigg|_{i_k=0} \end{aligned}$$

Коэффициент передачи по току

$$K_i(U_k) = \frac{i_k}{i_6} =$$

Измерение коэффициента усиления однокаскадного усилителя В данном опыте была собрана схема однокаскадного усилителя (см. рис. 5) и произведено измерение его коэффициента усиления в зависимости от частоты входного сигнала.

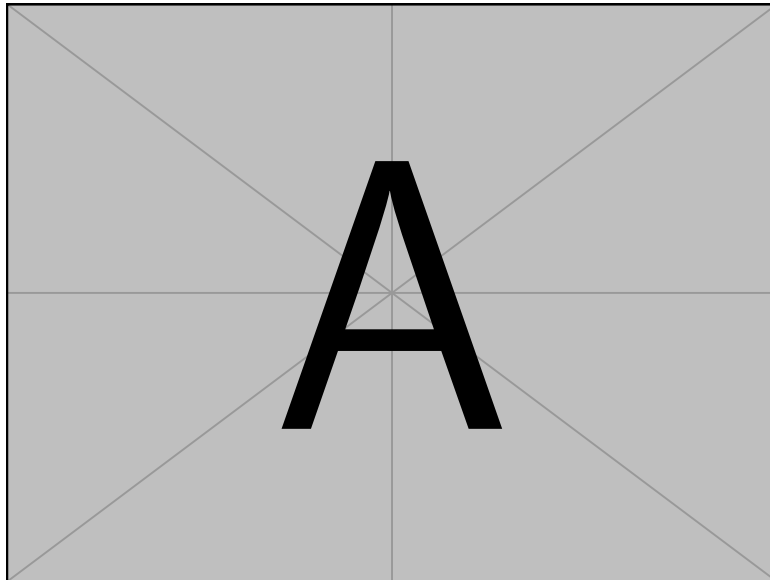


Рис. 5: Однокаскадный усилитель

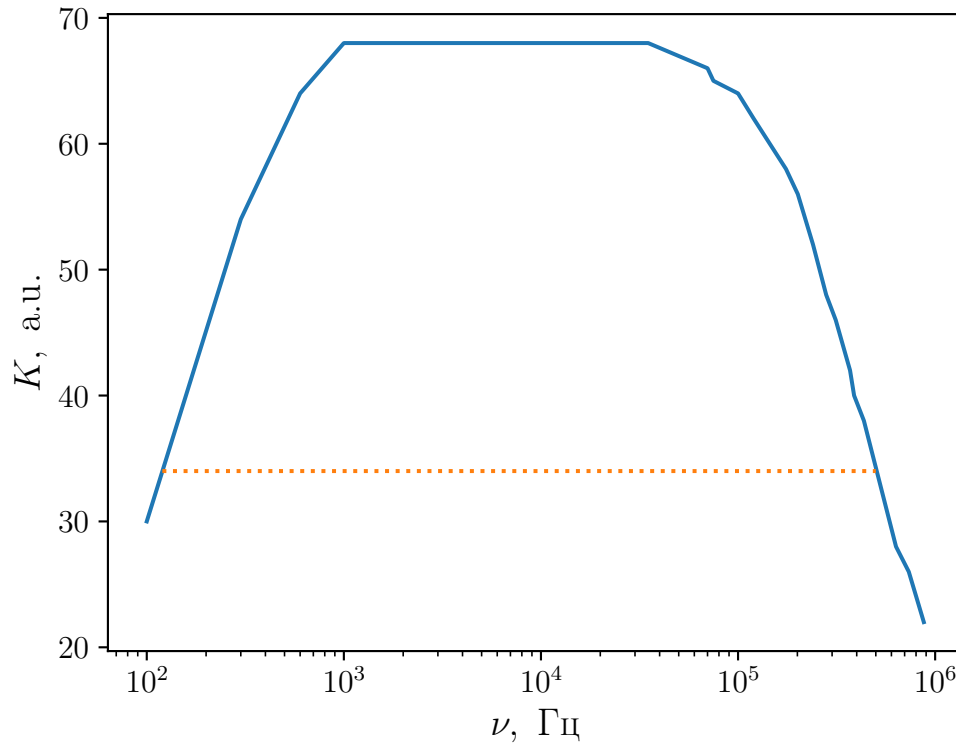


Рис. 6: Коэффициент усиления однокаскадного усилителя. Пунктиром отмечена высота, соответствующая уровню $\frac{1}{2}$ относительно максимума

Полосой пропускания будем считать ординаты $K(\nu)$, соответствующие уровню 0.5 от максимума функции $K(\nu)$. Получаем полосу:

$$\nu_{\min} = 120 \text{ Гц}, \quad \nu_{\max} = 500 \text{ кГц}$$

$$\nu_{\min} < \nu < \nu_{\max}$$

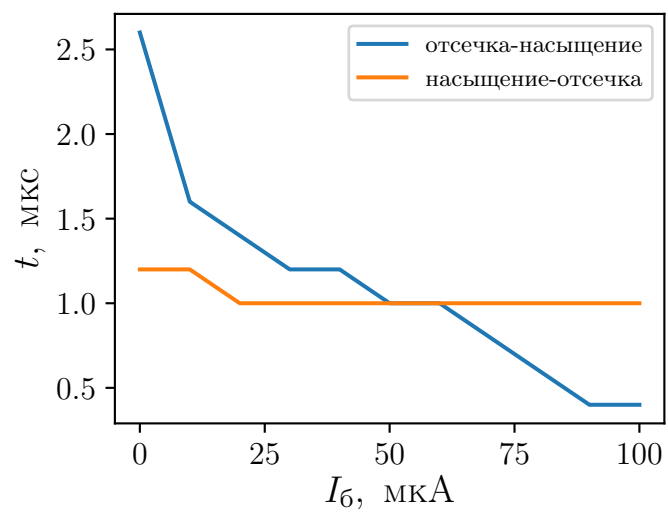


Рис. 7: Зависимость времени переключения транзистора от тока базы транзистора