

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

**ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
УСИЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА**

**Методические указания к лабораторной работе № 79  
по дисциплине «Физика»**

**Уфа 2015**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
УСИЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА

Методические указания к лабораторной работе № 79  
по дисциплине «Физика»

Уфа 2015

Составитель С. Н. Сазонов

УДК 621.382.3 (07)

ББК 32.852.3 (Я7)

Изучение статических характеристик и определение коэффициента усиления транзистора: Методические указания к лабораторной работе № 79 по дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. С. Н. Сазонов – Уфа, 2015. – 14 с.

Цель методических указаний – закрепление и совершенствование знаний студентов по дисциплине «Физика» и формирование умений их применять для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах, возникающих в последующей профессиональной деятельности выпускников технического университета.

Приведены краткие сведения по теории диффузии, об инжекции носителей тока, принципе работы транзистора, даны описания экспериментальной установки, порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Физика» по разделу «Оптика и атомная физика» на всех направлениях подготовки бакалавров и специалистов.

Табл. 1. Ил. 5. Библ.: 2 назв.

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, доц. Михайлов Г. П.,  
канд. тех. наук, доц. Иванов М. П.

© Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2015

## Содержание

1. Цели работы .....	4
2. Задача .....	4
3. Теоретическая часть .....	4
3.1. Введение .....	4
3.2. Инжекция носителей тока.....	5
3.3. Принцип работы транзистора.....	7
4. Приборы и оборудование .....	11
5. Требования к технике безопасности .....	12
6. Задания .....	12
7. Методика выполнения заданий .....	13
Контрольные вопросы .....	13
Требования к содержанию и оформлению отчёта .....	14
Критерии результативности выполнения лабораторной работы .....	14
Список литературы .....	14

## Лабораторная работа № 79

# ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА

### 1. ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Изучение принципа работы биполярного транзистора.
2. Снятие статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
3. Определение коэффициента усиления по току.

### 2. ЗАДАЧА

Приобретение навыков проведения измерений и умения обработки экспериментальных данных, характеризующих работу биполярного транзистора в электрических схемах.

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1. Введение

Транзистором, или полупроводниковым триодом, называется электронный прибор на основе полупроводникового монокристалла, содержащий три вывода и служащий для преобразования (чаще всего усиления) электрических сигналов. По физическим принципам работы транзисторы делятся на биполярные и полевые.

В биполярных транзисторах ток создаётся как электронами, так и дырками. В основе их работы лежит явление диффузии электронов и дырок в *p-n*- переходе.

В полевых (униполярных) транзисторах ток создаётся носителями заряда только одного типа, либо электронами, либо дырками. Диффузионные процессы в них отсутствуют.

Диффузией называется процесс спонтанного перемещения вещества из областей, где его концентрация относительно велика, туда, где она мала. Это явление – следствие хаотического теплового движения частиц. Математически диффузия описывается уравнением

$$J = -D \cdot \text{grad } n, \quad (3.1)$$

где  $J$  – вектор плотности потока вещества с модулем, равным числу частиц, пересекающих за единичное время площадку единичной

площади, ориентированную перпендикулярно потоку,  $n$  – концентрация частиц в данном месте пространства. Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом диффузии. Для кремния при комнатной температуре коэффициент диффузии электронов  $D_n = 35 \text{ см}^2/\text{с}$ , дырок –  $D_p = 15 \text{ см}^2/\text{с}$ . Зная величину  $D$ , можно найти путь  $L$ , проходимый частицей в процессе диффузии за данное время  $t$ ,

$$L = \sqrt{D \cdot t}. \quad (3.2)$$

Эта формула называется законом случайных блужданий. Формулы (3.1)-(3.2) применимы для описания диффузии любых частиц. Для описания диффузии неосновных носителей в полупроводниках помимо коэффициентов  $D_n$  и  $D_p$  нужен ещё один параметр – время жизни неосновных носителей  $\tau$ , определяемое как среднее время, прошедшее от появления заряда в полупроводнике до его рекомбинации (исчезновения пары) с носителем заряда противоположного знака. Время жизни зависит от концентрации примесей в полупроводнике и для разных образцов лежит в широких пределах  $\tau = 10^{-8} - 10^{-4} \text{ с}$ .

### 3.2. Инжекция носителей тока

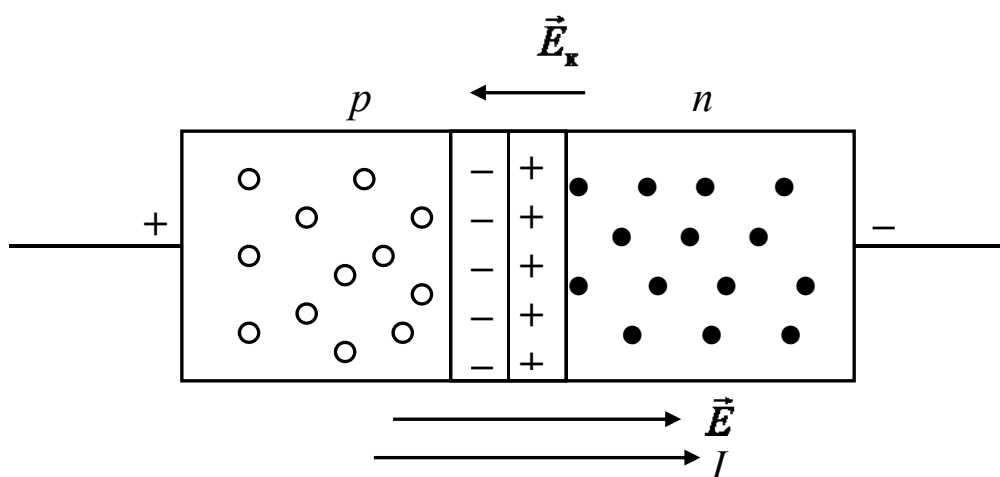


Рис. 3.1

Пусть на  $p$ - $n$ - переход (рис. 3.1) подано напряжение такой полярности, что внешнее поле  $E$  противоположно полю  $p$ - $n$ - перехода  $E_k$  (прямое смещение). Тогда потенциальный барьер для основных носителей на границе  $p$ - $n$ - перехода снижается по сравнению со случаем, когда внешнее напряжение отсутствует. Под влиянием внешнего поля дырки переходят из  $p$ - в  $n$ - полупроводник, а

электроны в обратном направлении (из  $n$  в  $p$ -полупроводник), и в цепи возникает прямой ток, определяемый величиной ЭДС источника питания.

Дырки, перешедшие в  $n$ -полупроводник, являются для него неосновными носителями. Встречаясь с электронами, они рекомбинируют с ними с характерным временем жизни  $\tau_p$ . То же самое происходит с электронами, перешедшими в  $p$ -полупроводник, но уже со своим временем жизни  $\tau_n$ .

Пусть на  $p$ - $n$ -переход, показанный на рис. 3.1, в момент времени  $t = 0$  подан импульс прямого напряжения, длящийся время  $t_0$ , намного меньшее, чем  $\tau_p$  и  $\tau_n$ . А при  $t = t_0$ , напряжение вновь скачком падает до нуля. Процесс рекомбинации происходит не мгновенно, поэтому у границы  $p$ - $n$ -перехода за время импульса происходит как бы «впрыскивание» дырок в приграничный слой  $n$ -полупроводника, а электронов – в приграничный слой  $p$ -полупроводника. Это явление получило название инжекции носителей.

За время  $dt$  число неосновных носителей уменьшается на  $dN$ , причем уменьшение числа носителей пропорционально времени  $dt$  и концентрации неосновных носителей  $N$ , так как, чем их больше, тем больше вероятность встречи их с основными носителями, приводящей к рекомбинации

$$-dN = \frac{1}{\tau} N dt, \quad (3.3)$$

где  $\tau = \tau_p$ , если рассматривается диффузия дырок (слева направо на рис. 3.1) и  $\tau = \tau_n$  для диффузии электронов (справа налево там же).

Разделяя переменные и интегрируя полученное выражение, получим закон, по которому изменяется с течением времени число неосновных носителей на границе  $p$ - $n$ -перехода в результате рекомбинации

$$N = N_0 e^{-t/\tau}, \quad (3.4)$$

где  $N_0$  – концентрация неосновных носителей при  $t = 0$ . Если  $p$ -полупроводник легирован примесями намного сильнее, чем  $n$ -полупроводник, то величина  $N(t)$  для электронов в любой момент  $t$  намного меньше, чем  $N(t)$  для дырок и процессом диффузии электронов можно пренебречь.

Из соотношения (3.4) видно, что при  $t = \tau \frac{N}{N_0} = \frac{1}{e}$ , следовательно,

$\tau$  можно определить и как время, спустя которое число неосновных

носителей при подаче короткого импульса напряжения уменьшается в  $e$  раз. За это время носители успевают проникнуть вглубь полупроводника на расстояние  $L$ , называемое диффузионной длиной носителей. Её можно рассчитать по формуле (3.2). Величина  $L$  различна для различных полупроводников и зависит от количества примесей и других дефектов кристаллической решетки. Например, для чистого германия  $L \cong 1$  мм, для германия с примесями 0,3-0,5 мм.

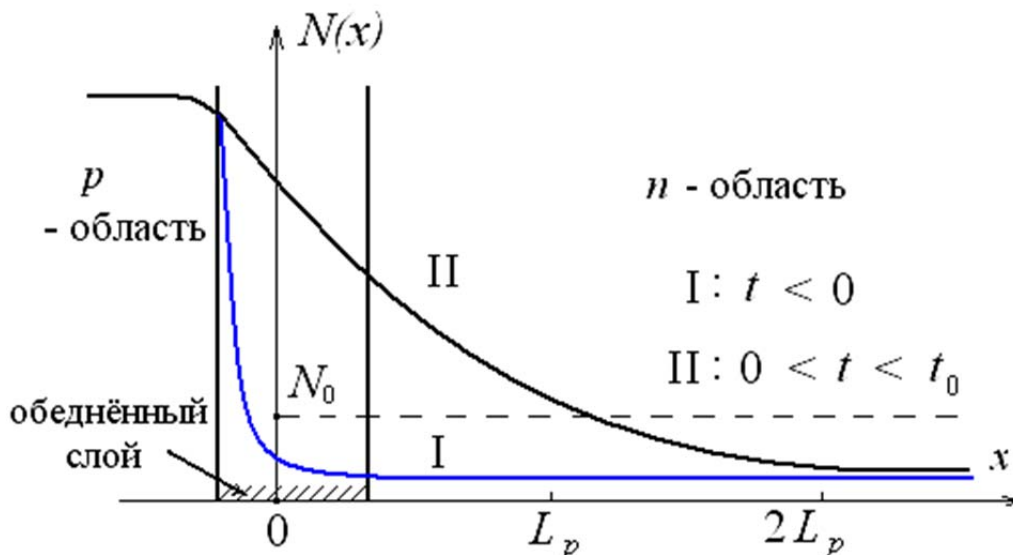


Рис. 3.2

Если же время импульса напряжения  $t_0$  много больше  $\tau_p$  и  $\tau_n$ , то вблизи  $p$ - $n$ - перехода при  $0 < t < t_0$  успевает установиться равновесная концентрация дырок, график зависимости которой от координаты показан на рис. 3.2 верхней кривой II. (Кривая I – распределение концентрации дырок без внешнего напряжения.) По мере удаления от границы  $p$ - $n$ - перехода направо, концентрация  $N(x)$  дырок плавно уменьшается, а расстояние, на которое они проникают в  $n$ - область, по порядку величины, равно

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}. \quad (2.5)$$

Существует и инжекция электронов из  $n$ - области в  $p$ - область (справа налево на рис. 3.2), но при малой концентрации  $N_0$  электронов в  $n$ - полупроводнике, этим процессом можно пренебречь.

### 3.3. Принцип работы транзистора

Существуют два типа биполярных транзисторов:  $p$ - $n$ - $p$  и  $n$ - $p$ - $n$ , которые различаются последовательностью чередования в монокристалле полупроводника областей с различным типом проводимости ( $p$ - и  $n$ -).



На рис. 3.3 показана принципиальная схема  $n-p-n$ - транзистора, включенного в схему с общим эмиттером.

Транзистор состоит из трех областей: левой, сильно легированной  $n$ - области, называемой эмиттером (Э), средней, слабо легированной  $p$ - области, называемой базой (Б) и правой сильно легированной  $n$ - области, называемой коллектором (К). Эти области отделены одна от другой двумя  $p-n$ - переходами: эмиттерным (1) и коллекторным (2). Эмиттерный  $p-n$ - переход включен в прямом направлении с помощью источника постоянного напряжения величиной  $E_1$ , коллекторный смещён в обратном направлении постоянным напряжением от источника  $E_2$ .

При включении транзистора в схему с общим эмиттером, усиливаемый сигнал от источника слабо переменного напряжения  $u$  подается в цепь между эмиттером и базой, а снимается с нагрузочного резистора  $R_H$ , включенного в цепь между эмиттером и коллектором. Поток электронов из эмиттера в базу будет регулироваться напряжением  $U_{эб}$  на базе, равным  $U_{эб} = E_1 + u$ , которое будет изменять высоту потенциального барьера на эмиттерном  $p-n$ - переходе по сравнению со случаем  $U_{эб} = 0$ .

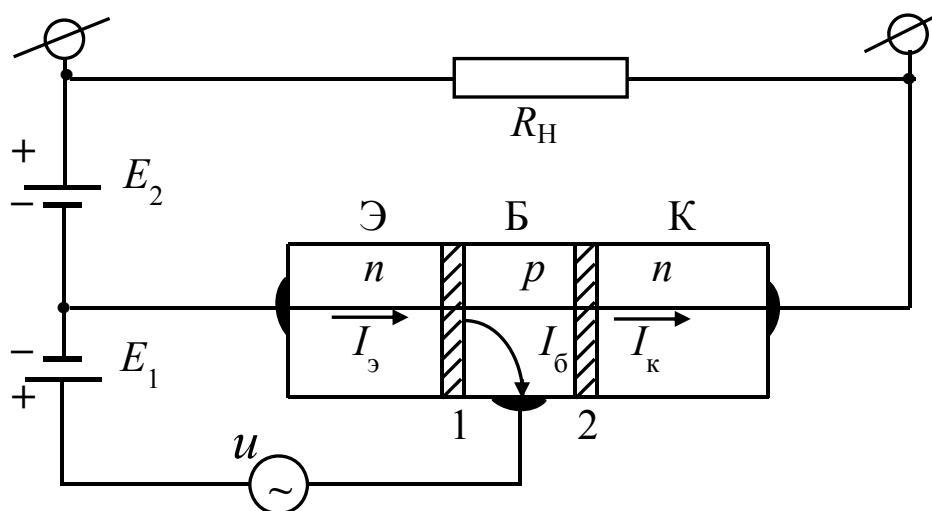


Рис. 3.3

Основными носителями в эмиттере  $n-p-n$ - транзистора являются электроны. Так как эмиттерный  $p-n$ - переход включен в прямом направлении, то потенциальный барьер для электронов, совершающих переход эмиттер – база, снижается, что приводит к инжекции электронов из эмиттера в базу ( $p$ - область).

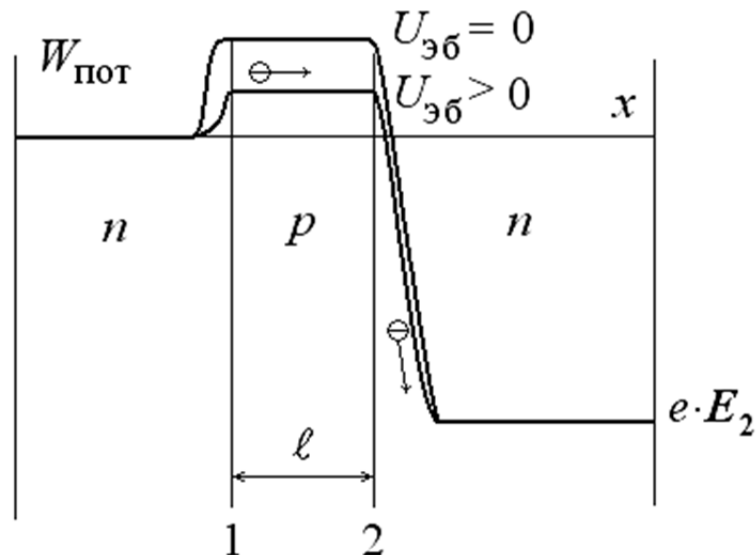


Рис. 3.4

Это схематично показано на рис. 3.4 ( $e$  – заряд электрона), где изображены графики зависимости потенциальной энергии электрона  $W_{\text{пот}}$  от координаты вдоль транзистора  $x$  при двух значениях потенциала базы  $U_{\text{эб}}$ , но фиксированных потенциалах эмиттера и коллектора. (Для простоты, на рис. 3.4 взят случай  $R_{\text{H}} = 0$ , так что потенциал коллектора совпадает с потенциалом «плюса» верхней батареи на рис. 3.3.) При  $U_{\text{эб}} = 0$ , тока коллектора нет – транзистор «закрыт». Для «отпираения»  $n-p-n$ - транзистора, на базу нужно подать положительный относительно эмиттера потенциал  $U_{\text{эб}}$ , больший, чем 0,5-0,6 В. В результате инжекции электронов в базу, их концентрация на границе эмиттерного перехода становится больше, чем в остальном объеме базы. Вследствие этого начинается диффузия электронов к границе второго  $p-n$ - перехода, где они попадают под действие электрического поля, приложенного к переходу база – коллектор. Так как коллекторный переход (2) включен в направлении запираения, то не будет перехода ни дырок из базы в коллектор, ни электронов из коллектора в базу. Но для электронов, попавших в базу из эмиттера и диффундирующих к коллектору, приложенное ко второму  $p-n$ - переходу поле является ускоряющим (рис. 3.4) и потенциального барьера для него не существует. Эти электроны

втягиваются в коллектор, создавая коллекторный ток  $I_k$ . Таким образом, в активном режиме коллектор собирает инжектированные в базу электроны, что и отражается в его названии (*to collect* – собирать).

Инжекция электронов из эмиттера сопровождается их рекомбинацией с дырками базы, в результате чего образуется базовый ток  $I_b$ . Чтобы сократить потери носителей, базу делают слаболегированной, а её толщина  $l$  (см. рис. 3.4) берется много меньшей диффузионной длины электронов  $L_n$  ( $l < L_n$ ), которая составляет в германии 0,3-0,5 мм. Поэтому в германиевых транзисторах толщина базы не более 0,25 мм.

Итак, большая часть электронов, инжектируемых с эмиттера, будет диффундировать к коллектору и только незначительная часть уходит в цепь базы, создавая небольшой по сравнению с током коллектора  $I_k$  ток базы  $I_b$  ( $I_b \ll I_k$ ), причем, по первому правилу Кирхгофа,

$$I_b = I_e - I_k. \quad (3.6)$$

Базовый ток имеет и дырочную компоненту, которая образуется за счёт инжекции дырок базы в эмиттер. В силу слабой легированности базы, этим процессом можно пренебречь. Величину

$$\alpha = I_k / I_e \quad (3.7)$$

называют передаточным коэффициентом транзистора. Обычно  $\alpha = 0,90-0,99$ . Комбинируя (3.6) и (3.7), найдём, что

$$\frac{I_k}{I_b} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \gg 1. \quad (3.8)$$

Отношение изменения коллекторного тока к изменению тока базы при постоянном напряжении на коллекторе  $U_{эк}$  называется коэффициентом усиления по току в схеме с общим эмиттером

$$\beta = \left( \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \right) \Big|_{U_{эк} = \text{const}}. \quad (3.9)$$

Функция  $I_k(I_b)$  близка к линейной, поэтому

$$\beta \approx \frac{I_k}{I_b}. \quad (3.10)$$

Это означает, что в схеме включения транзистора с общим эмиттером достигается усиление по току. Значение коэффициента  $\beta$  практически не зависит от величины сопротивления нагрузки  $R_H$ ,

поэтому схема рис. 3.3 будет работать как усилитель тока, даже когда  $R_H = 0$ . Однако сигнал на выходе при этом отсутствует и практического значения схема с рис. 3.3 при  $R_H = 0$  не имеет.

Введём коэффициент усиления сигнала по напряжению как отношение

$$\gamma = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{эб}}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta u}, \quad (3.11)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  – напряжение на нагрузке  $R_H$  (рис. 3.3). Определим входное сопротивление транзистора как

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{эб}}}{\Delta I_{\text{б}}}, \quad (3.12)$$

(для типовых транзисторов значение  $R_{\text{ВХ}} \sim 1$  кОм). Подставив (3.9) и (3.12) в (3.11), получим

$$\gamma = \beta \frac{R_H}{R_{\text{ВХ}}}. \quad (3.13)$$

В радиотехнических схемах обычно  $R_H > R_{\text{ВХ}}$ , поэтому  $\gamma \gg 1$ , то есть схема с общим эмиттером усиливает не только входной ток, но и напряжение входного сигнала.

Коэффициент усиления по мощности равен

$$K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}} \cdot U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}} \cdot u} \approx \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \cdot \gamma \approx \beta^2 \cdot \frac{R_H}{R_{\text{ВХ}}} \gg 1. \quad (3.14)$$

Для некоторых типов транзисторов  $K_p$  может достигать десятков тысяч.

Характеристики транзистора в статическом режиме, то есть при отсутствии нагрузки в цепи коллектора и, следовательно, при постоянстве напряжений, приложенных к коллекторному и эмиттерному переходам при изменении тока в цепях транзистора, называются статическими характеристиками.

#### 4. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В данной работе исследуются статические выходные характеристики германиевых транзисторов типа П214, включенных по схеме с общим эмиттером. Электрическая схема установки приведена на рис. 4.1.

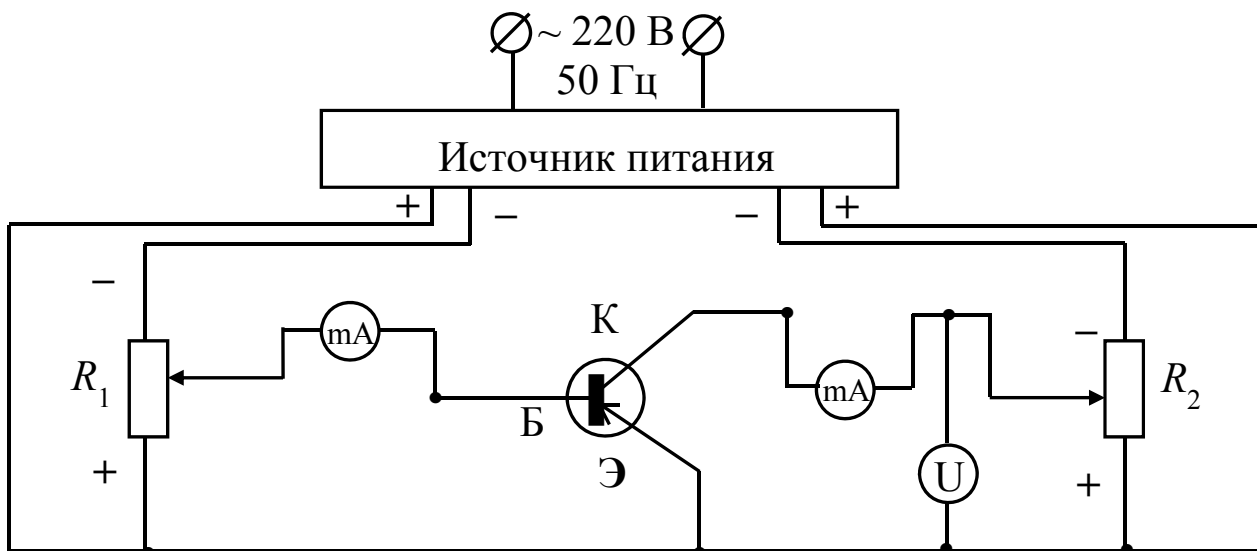


Рис. 4.1

Блок питания, транзистор и электроизмерительные приборы смонтированы в установку, подключаемую к сети шнуром и тумблером «Сеть». На переднюю панель установки вынесены электроизмерительные приборы: 1) амперметр для измерения тока базы  $I_b$ , 2) вольтметр, измеряющий напряжение между эмиттером и коллектором  $U_{эк}$ , 3) амперметр для измерения коллекторного тока  $I_k$  с двумя пределами измерений: 50 и 500 мА. Поскольку транзисторы П214 относятся к типу *p-n-n*, а не *n-p-n*, полярность подключения источников напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах на рис. 4.1 обратна по отношению к показанной ранее на рис. 3.3.

## 5. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Прежде чем приступить к работе, необходимо внимательно ознакомиться с оборудованием и заданием.

2. Перед включением установки в сеть проверить, чтобы тумблер «Сеть» в источнике питания находился в нижнем положении («Выкл»).

3. По окончании работы отключить питание установки и привести рабочее место в порядок.

4. Не оставлять без присмотра включенную установку.

## 6. ЗАДАНИЯ

1. Построение семейства статических характеристик транзистора.

2. Вычисление коэффициента усиления транзистора по току.

## 7. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

1. Включить установку в сеть, переводя тумблер в положение «Вкл».

2. Установить ток базы  $I_{\text{б}} = 0,2 \text{ мА}$ , и, меняя ручкой потенциометра напряжение на коллекторе  $U_{\text{эк}}$  от 1 до 8 В с шагом 0,5 В, снять соответствующие значения коллекторного тока ( $I_{\text{к}}$ ), записывая их в таблицу. После измерений необходимо сбросить напряжение до нуля.

3. Повторить измерения для тока базы  $I_{\text{б}} = 0,3 \text{ мА}$ ;  $0,4 \text{ мА}$ ;  $0,5 \text{ мА}$ ;  $0,6 \text{ мА}$ . Так как при  $I_{\text{б}} = 0,6 \text{ мА}$ , амперметр для измерения коллекторного тока зашкаливает уже при  $U_{\text{эк}} = 3,5 \text{ В}$ , в таблице в клетках, соответствующих таким напряжениям, ставят пропуск.

4. Построить графики зависимости  $I_{\text{к}}$  от  $U_{\text{эк}}$  при различных значениях тока базы  $I_{\text{б}}$  (на одном листе миллиметровой бумаги).

5. Используя построенные графики, по формуле (3.9) рассчитать коэффициент усиления по току ( $\beta$ ) при одном из значений коллекторного напряжения, например при  $U_{\text{эк}} = 6 \text{ В}$ .

6. Рассчитать абсолютную погрешность величины  $\beta$  по формуле  $\Delta\beta = \beta \cdot \varepsilon_{\beta}$ , где  $\varepsilon_{\beta}$  – относительная погрешность  $\beta$ . Для расчёта  $\varepsilon_{\beta}$  можно использовать формулу

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{\delta I_{\text{к}}}{I_{\text{к},2} - I_{\text{к},1}} + \frac{\delta I_{\text{б}}}{I_{\text{б},2} - I_{\text{б},1}}. \quad (7.1)$$

Здесь  $I_{\text{к},2}$ ,  $I_{\text{к},1}$  – коллекторные токи транзистора при одном и том же значении  $U_{\text{эк}}$  и двух разных базовых токах  $I_{\text{б},2}$ ,  $I_{\text{б},1}$ , а  $\delta I_{\text{б}}$  и  $\delta I_{\text{к}}$  – цена деления амперметров, подключенных к базе и коллектору транзистора соответственно.

Таблица

$U_{\text{эк}}$ (В)	$I_{\text{к}}$ (мА)				
	$I_{\text{б}} = 0,2 \text{ мА}$	$I_{\text{б}} = 0,3 \text{ мА}$	$I_{\text{б}} = 0,4 \text{ мА}$	$I_{\text{б}} = 0,5 \text{ мА}$	$I_{\text{б}} = 0,6 \text{ мА}$

### Контрольные вопросы

1. Что такое *p-n*- переход? Какими свойствами он обладает?

В чем заключается процесс инжекции неосновных носителей тока в полупроводниках?

2. Почему уменьшается концентрация неосновных носителей при удалении от границы *p-n*- перехода?

3. Что называется временем жизни и диффузионной длиной пробега носителей тока в полупроводниках?

4. Каков принцип работы транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером?

5. Почему носители тока, перешедшие из эмиттера в базу, свободно переходят в цепь коллектора?

6. Почему транзистор может служить усилителем по напряжению?

7. Как определяется коэффициент усиления по току?

### **Требования к содержанию и оформлению отчёта**

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и номер работы.

2. Основные теоретические и рабочие формулы.

3. Таблицу с результатами измерений.

4. Графики статических характеристик транзистора (зависимость  $I_k$  от  $U_{эк}$ ) при значениях тока базы  $I_b = 0,2 \text{ mA}; 0,3 \text{ mA}; 0,4 \text{ mA}; 0,5 \text{ mA}; 0,6 \text{ mA}$ , выполненные на миллиметровой бумаге.

5. Расчет коэффициента усиления по току  $\beta$  при одном из значений  $U_{эк}$  в интервале  $U_{эк} = 3-6 \text{ В}$ .

6. Расчет погрешности в определении  $\beta$ .

7. Выводы.

### **Критерии результативности выполнения лабораторной работы**

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- умеет объяснять физические принципы работы биполярного транзистора;

- правильно выполнил измерения и расчеты;

- грамотно построил графики;

- представил отчет, соответствующий предъявляемым требованиям;

- знает ответы на все контрольные вопросы.

### **Список литературы**

1. Трофимова Т. И. Курс физики. – М.: Академия, 2012.

2. Левинштейн М. Е., Симин Г. С. Барьеры. – М.: Наука, 1987.

Составитель САЗОНОВ Сергей Николаевич

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
УСИЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА

Методические указания к лабораторной работе № 79  
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2015. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman.  
Усл. печ. л. 1,1. Уч-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный  
технический университет»  
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ  
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12