МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное

автономное образовательное учреждение

высшего образования

«Казанский (Приволжский) федеральный университет»

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

КАФЕДРА РАДИОФИЗИКИ

Биполярный транзистор. Статический режим

Лабораторная работа

КАЗАНЬ 2018

УДК 621.318.57:621.382.2

С41

Печатается по решению редакционно-издательского совета Института физики Казанского федерального университета

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент кафедры радиофизики КПФУ, Таюрская Г.В.

Ситников С.Ю., Ситников Ю.К., Шерстюков О.Н.

Биполярный транзистор. Статический режим : учебно-методическое пособие к лабораторной работе / С.Ю. Ситников, Ю.К. Ситников, О.Н. Шерстюков. - К.: КФУ, 2018. – 14 с.

Рассматриваются структура транзисторов и особенности их вольтамперной характеристики. Приводятся описания структуры полупроводниковых материалов и устройства транзисторов. Дано описание лабораторной установки. Сформулированы задания для выполнения эксперимента.

© Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета, 2018г.

© Ситников С.Ю., Ситников Ю.К., Шерстюков О.Н., 2018г.

Введение

Работа посвящена изучению полупроводникового электронного прибора, имеющего три области полупроводникового кристалла, отличающиеся типом проводимости, и два перехода между этими областями. Такой электронный прибор принято называть транзистором (или полупроводниковым триодом). Транзистор называют биполярным, поскольку области, разделённые переходом, имеют разные типы проводимости, которые определяются преобладанием положительных или отрицательных носителей заряда[1].

Наряду с биполярными транзисторами существует другой тип транзисторов, называемых полевыми.

Терминология

Предварительно уточним терминологию, которая будет использоваться в тексте.

Характеристика. Термин характеристика применяется очень широко. Далее будем применять его только для описания свойств электронных приборов. Для электронных приборов (диодов, триодов, тиристоров и др.) применяется термин вольтамперная характеристика.

Вольтамперная характеристика *(ВАХ)* – это зависимость тока, протекающего через электронный прибор, от приложенного к этому прибору напряжения. Вольтамперной характеристикой называют также и график этой зависимости.

Изучая характеристики транзистора, мы встретимся с термином параметр. ***Параметр*** – это величина, числовые значения которой позволяют выделить определенный элемент (например, кривую) из множества элементов (кривых) того же рода. ПАРАМЕТР (в технике) - величина, характеризующая какое-либо свойство процесса, прибора (напр., электрическое сопротивление).

Проводники, изоляторы и полупроводники

Как сказано выше, биполярный транзистор является электронным прибором, в котором использованы полупроводниковые материалы. Поэтому сначала ознакомимся с проводящими, изоляционными и полупроводниковыми материалами. Это позволит понять принцип действия и свойства транзистора.

Электрические свойства вещества определяются количеством электронов на внешней (валентной) атомной орбитали (пространства вокруг

[1] Эту лабораторную работу можно выполнять как отдельную или объединяя с работами «Резисторный усилительный каскад с общим эмиттером» и «Резисторный усилительный каскад с общим коллектором».

ядра атома, в котором наиболее вероятно нахождение электрона). Чем меньше электронов находится на этой орбитали, тем слабее они связаны с ядром. Слабо взаимодействующие с ядром электроны могут оторваться от атома и оказаться в межатомном пространстве. Такие электроны называют свободными. Перемещение свободных электронов в проводнике – это и есть электрический ток.

Исследованиями установлено, что расстояния между электронами и ядром атомов намного превышают их собственные размеры.

Из числа твёрдых тел хорошими проводниками электрического тока являются металлы. Атомы золота и серебра имеют на внешней орбите всего по одному электрону, поэтому именно они являются наилучшими проводниками. У меди тоже один электрон на внешней орбите, а у алюминия три.

В твёрдых телах, у которых связь электрона с ядром атома очень сильная, свободных электронов очень мало (почти нет). Эти вещества принято называть изоляторами. Электрический ток они практически не проводят.

В электронной технике широко применяются вещества, по своей электропроводности относящиеся к промежуточному классу между проводниками и изоляторами, называемые полупроводниками. Полупроводники отличаются от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. Основным свойством полупроводников является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.

К числу используемых в электронной технике полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и другие), а также сплавы и химические соединения, например арсенид галлия.

P-n переход

Полупроводники могут быть с собственной проводимостью или примесные. Полупроводники, в которых свободные электроны и «дырки» появляются в процессе ионизации атомов, из которых построен весь кристалл, называют полупроводниками с собственной проводимостью.

Если в кристалл внесены атомы другого химического элемента, то такие полупроводниковые материалы называются примесными.

Полупроводники в том виде, в каком их применяют в полупроводниковых приборах, относятся к двум типам, а именно к типу n и типу p.

Полупроводники n-типа — это полупроводники с преобладающей электронной проводимостью [1]. Преобладающая электронная проводимость возникает при добавлении донорных примесей, например пятивалентных

сурьмы, мышьяка и др. к четырёхвалентному кремнию. Атом примеси легко ионизируется, добавляя электрон к электронам собственной проводимости.

Полупроводники p-типа возникают при добавлении к химически чистому полупроводнику акцепторных примесей, например, трёхвалентных бора, алюминия и др. к четырёхвалентному кремнию. Атом примеси ионизируется, принимая электрон от соседнего атома основного полупроводникового материала, образуя так называемую «дырку». Дырка – это тот атом, который отдал электрон и стал положительным ионом.

Процесс внесения в кристалл примесей называется легированием. Поэтому полупроводники, к которым добавлены примеси, часто называются легированными.

При нормальной температуре практически все атомы примесей ионизируются и проводимость примесного полупроводника (полупроводника, содержащего атомы примеси) существенно возрастает.

Следует отметить, что примесные полупроводники электрически нейтральны, так как заряды ионов скомпенсированы зарядами основных носителей, то есть электронов в n-области и дырок в p-области полупроводника.

Структура биполярного транзистора. Назначение электродов

Биполярный транзистор – прибор, имеющий три обрасти полупроводящего материала, с двумя взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами между этими областями и тремя (иногда более) выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции[2] и экстракции[3] неосновных носителей заряда [2]. Крайние области имеют один и тот же тип проводимости, средняя область – другой тип.

Область транзистора, расположенную между p-n переходами, называют базой. Примыкающие к базе области чаще всего делают неодинаковыми. Одну из областей изготавливают так, чтобы из нее наиболее эффективно происходила инжекция носителей в базу, а другую – так, чтобы соответствующий p-n переход наилучшим образом осуществлял экстракцию носителей из базы.

На рис.1 упрощенно представлена структура биполярного транзистора с порядком чередования областей n-p-n (слева) и условное графическое изображение такого транзистора на электрических схемах (справа). Изображение заключается в окружность, если транзистор является

---

[2] Процесс введения носителей зарядов, создающих избыточную (неравновесную) концентрацию в полупроводниковом слое, называется **инжекцией**.

[3] **Экстракция** носителей заряда в полупроводниках – обеднение приконтактной области ПП неосновными носителями заряда при протекании тока через контакт ПП с металлом или другим полупроводником.

самостоятельным компонентом. Если транзистор является элементом интегральной микросхемы, то кружочек не изображается.

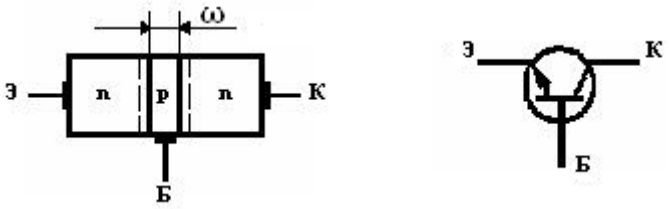

Рис. 1. Структура биполярного транзистора и его условное графическое изображение

В зависимости от проводимости крайних слоёв различают транзисторы p-n-p и n-p-n типов [3]. Далее в работе будем рассматривать только транзисторы типа n-p-n.

Переход, работающий в прямом направлении, называется эмиттерным, а соответствующий крайний слой – эмиттером. Название отражает факт инжекции неосновных носителей через переход. Стрелка около эмиттерного перехода на рис. 1 показывает направление тока через переход. Второй переход, нормально смещённый в обратном направлении, называется коллекторным, а соответствующий крайний слой – коллектором. Коллектор «собирает» инжектированные носители, прошедшие через базовый слой.

Область базы должна иметь небольшую толщину (тонкая база). В противном случае инжектированные носители успеют рекомбинировать в процессе преодоления области базы.

В транзисторах типа n-p-n рабочими носителями заряда являются электроны. Следует отметить, что в микроэлектронных приборах (микросхемах) преимущественно применяются n-p-n транзисторы.

Характер движения неосновных носителей в базе в общем случае заключается в сочетании диффузии и дрейфа.

Для соединения транзистора с другими компонентами электрической цепи от каждой области p и n выходит проволочный вывод. Каждый такой вывод имеет название той области, к которой соединен, то есть: эмиттер, база, коллектор.

Подключение к транзистору одного источника электропитания не обеспечит его работу, так как потенциал на третьем электроде не будет задан. Соответственно, прибору не будет обеспечен рабочий режим. Поэтому всегда подключаются два источника. Подключение источников показано на рисунке 2. Полярность источников не может быть произвольной. В рассматриваемом случае полярность указана для транзисторов n-p-n типа. Электроды помечены первыми буквами их наименования.

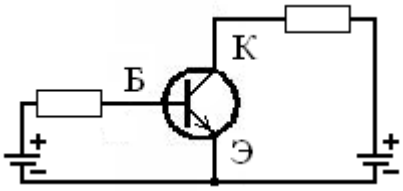

Рис. 2. Подключение источников питания

Токи в n-p-n транзисторах

Токи, протекающие через переходы, будем рассматривать, учитывая, что концентрация носителей в n- области существенно выше, чем в p-области, то есть для n-p-n транзисторов справедливо неравенство $n_n >> p_p$.

Если электрическое поле отсутствует и носители заряда имеют в кристалле равномерную концентрацию, то электроны и дырки совершают непрерывное хаотическое тепловое движение. В результате столкновения носителей заряда друг с другом и с атомами кристаллической решетки скорость и направление их движения все время изменяются, так что тока в кристалле не будет.

Электрический ток представляет собой направленное движение носителей заряда. Под действием приложенного к кристаллу напряжения в нем возникает электрическое поле. Под воздействием этого электрического поля движение носителей заряда упорядочивается, электроны перемещаются в направлении положительного электрода, а дырки – к отрицательному электроду. При этом не прекращается и тепловое движение носителей заряда, вследствие которого происходят столкновения их с атомами полупроводника и примеси.

Направленное движение носителей заряда под действием сил электрического поля называют ***дрейфом***, а вызванный этим движением ток – ***дрейфовым током***. При этом характер тока может быть электронным, если он вызван движением электронов, или дырочным, если он создается направленным перемещением дырок.

Свободные электроны движутся в пространстве между узлами кристаллической решетки, а дырки – по ковалентным связям, поэтому средняя скорость, а, следовательно, и подвижность электронов больше, чем дырок.

У кремния подвижность носителей заряда меньше, чем у германия.

В собственных полупроводниках концентрации электронов и дырок одинаковы, но вследствие их разной подвижности электронная составляющая тока больше дырочной. В примесных полупроводниках концентрации электронов и дырок существенно отличаются, характер тока определяется основными носителями заряда: в полупроводниках p-типа – дырками, а в полупроводниках n-типа – электронами.

При неравномерной концентрации носителей заряда вероятность их столкновения друг с другом больше в тех слоях полупроводника, где их концентрация выше. Совершая хаотическое тепловое движение, носители заряда отклоняются в сторону, где меньше число столкновений, т.е. движутся в направлении уменьшения их концентрации.

Направленное движение носителей заряда из слоя с более высокой их концентрацией в слой, где концентрация ниже, называют ***диффузией***, а ток,

вызванный этим явлением, – ***диффузионным током***. Этот ток, как и дрейфовый, может быть электронным или дырочным.

Пусть к эмиттерному переходу приложено прямое напряжение, а к коллекторному обратное (рис. 3). Вследствие этого через эмиттерный переход из эмиттера в область базы будут инжектироваться электроны, образуя ток эмиттера Iэ. Малым током, возникающим за счёт инжекции дырок из области базы в область эмиттера, пренебрегаем.

Часть поступивших в область базы электронов рекомбинируют с дырками, являющимися основными носителями заряда в области базы. Они образуют ток базы Iб.

Другая часть инжектированных электронов достигает коллекторный переход и под действием напряжения Uкб поступает (экстрагируется) в коллекторную n- область. Таким образом, образуется коллекторный ток Ik.

Представление транзисторного каскада в виде четырёхполюсника и схемы включения транзисторов

Электронные устройства создают, соединяя электронные компоненты. Во многих случаях эти компоненты имеют два входных контакта и два контакта выходных. Такие компоненты называются четырехполюсниками.

Соединение четырёхполюсников выполняется подсоединением выходных контактов одного четырёхполюсника к входным контактам другого четырёхполюсника. Отдельно взятый транзистор, имеющий только три контакта, четырёхполюсником не является.

Для включения транзистора в цепь один из контактов приходится использовать дважды, как входной и как выходной. Этот контакт является общим и для входа и для выхода. Таким способом полупроводниковые триоды присоединяют к другим компонентам устройства.

Соответственно числу контактов существуют три схемы включения транзисторов. Они называются по типу общего контакта: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК), рис. 3.

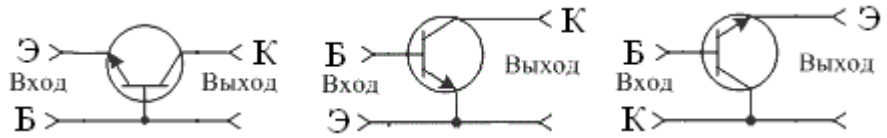

Рис. 3. Включение транзистора с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором

Из рисунка видно, что входным током, в случае схемы включения с общей базой (ОБ), является ток эмиттера. В остальных двух случаях, ОЭ и ОК, входным током является ток базы.

Следует отметить, что рис. 3 является упрощённой иллюстрацией способов построения четырёхполюсников на основе транзисторов. В реальном устройстве, например усилителе, присутствует источник входного

сигнала, источники питания, элементы, обеспечивающие режим работы. Рассмотрим схему с ОЭ, приведённую на рис. 4 [2]. В отличие от схемы на рис. 3 здесь, кроме ЭДС источников, указаны напряжения, токи в ветвях цепи и источник входного сигнала.

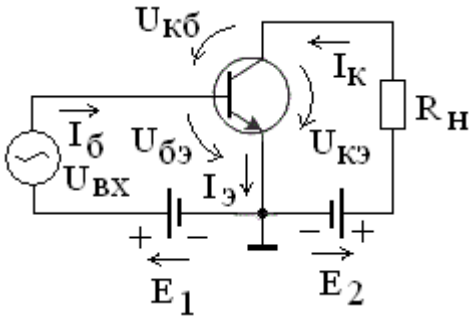

Рис. 4. Схема усилителя на транзисторе типа n-p-n

Параметры и характеристики

Рассмотрим параметры и статические характеристики транзистора. Основными параметрами, характеризующими транзистор как активный нелинейный четырёхполюсник, при любой схеме включения, являются коэффициенты усиления:

– по току $k_I = \Delta I_{ВЫХ}/\Delta I_{ВХ}$;
– по напряжению $k_U = \Delta U_{ВЫХ}/\Delta U_{ВХ}$;
– по мощности $k_P = k_I \cdot k_U = \Delta P_{ВЫХ}/\Delta P_{ВХ}$;
а также:
– входное сопротивление $R_{ВХ} = U_{ВХ}/I_{ВХ}$;
– выходное сопротивление $R_{ВЫХ} = U_{ВЫХ}/I_{ВЫХ}$.

Обратите внимание, что коэффициенты усиления определяются через приращения входных и выходных величин.

Схема включения транзистора с ОЭ может считаться универсальной, в том смысле, что она обеспечивает усиление как по току, так и по напряжению. Благодаря этому схема включения с ОЭ находит широкое применение.

Каждой схеме включения транзистора соответствуют свои статические характеристики.

Транзистор как четырёхполюсник характеризуется входной и выходной статическими ВАХ.

Входная характеристика показывает зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном значении выходного напряжения:

$I_{ВХ} = f(U_{ВХ})$ при $U_{ВЫХ} = const$.

Выходная зависимость показывает зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе транзистора:

$I_{ВЫХ} = f(U_{ВЫХ})$ при $I_{ВХ} = const$.

В приложении к конкретной схеме включения транзистора эти характеристики видоизменяются. Например, для схемы с **ОЭ** они имеют следующую форму записи:

- входные характеристики: $\mathbf{I_Б = f(U_{БЭ})}$ при $\mathbf{U_{КЭ} = const;}$

- выходные характеристики: $\mathbf{I_К = f(U_{КЭ})}$ при $\mathbf{I_Б = const.}$

Входные и выходные характеристики транзистора являются нелинейными. Их графики представлены на рис. 5.

Входные ВАХ биполярного транзистора малой мощности изображены на рисунке 5а. Эти кривые подобны ВАХ полупроводникового диода. Входным параметром является напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ}$, выходным – ток базы $I_Б$.

Семейство выходных ВАХ транзистора в схеме с **ОЭ** представлено на рисунке 5б. Штриховой линией (справа) обозначена область лавинного пробоя, переходящего в тепловой пробой. Граница перехода кривых тока коллектора на пологий участок определяет активный режим работы транзистора, а левей расположен участок, где открываются оба p – n - перехода и наступает режим насыщения. Левая пунктирная кривая показывает начало выхода транзистора на активный режим ($U_{БК} = 0$). Режим отсечки соответствует области токов базы $I_Б$ в области нулевых значений (нижняя пунктирная кривая). Рабочей считается область, расположенная между штриховыми линиями.

Особенностью входных характеристик в схеме **ОЭ** является различный характер зависимости тока базы от величины приложенного коллекторного напряжения $\mathbf{I_Б = f(U_{КЭ})}$. Входным током в схеме **ОЭ** является ток рекомбинации в базе $\mathbf{I_Б}$. При $\mathbf{U_{КЭ} = 0}$ на коллекторном переходе действует небольшое внутреннее запирающее поле. При этом запорный (обедненный носителями заряда) слой коллекторного перехода распространен на некоторую глубину в сторону базы. Рекомбинация происходит в активной области, не занятой запорным слоем. При увеличении $\mathbf{U_{КЭ}}$ запорный слой расширяется за счет слаболегированной базы (так называемый эффект Эрли), активная область которой сужается и число рекомбинировавших пар уменьшается, следовательно, уменьшается ток базы, что можно увидеть на входной характеристике (см. рисунок 5 а). Этот процесс называется модуляцией (изменением) ширины базы. Эффект модуляции имеет место для выходных напряжений в пределах $\mathbf{U_{КЭ}} \leq 5 \div 3$ В.

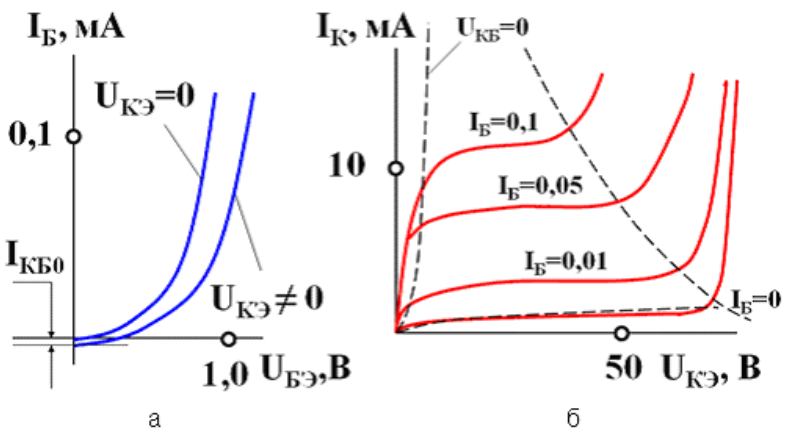

Рис. 5. ВАХ биполярного транзистора для схемы включения с **ОЭ**; а – входные характеристики; б – выходные характеристики

От определения коэффициента усиления для четырёхполюсника перейдём к выражению для транзистора.

Коэффициентом усиления транзистора по току, напряжению или мощности называют физическую величину, равную отношению изменения соответствующего параметра (тока, напряжения или мощности) в цепи коллектора и в цепи базы.

Коэффициент усиления транзистора по току для схем с общей базой обозначается буквой **α.** Это есть отношение силы тока в коллекторе ($I_К$) к силе тока эмиттера ($I_Э$) при неизменном напряжении коллектор-база:

$$\alpha = I_К/I_Э \text{ при } U_{КБ} = \text{const}.$$

Коэффициент усиления по току для схем с общим эмиттером обозначается буквой **β.** Это отношение величины силы тока в коллекторе ($I_К$) к силе тока в базе ($I_Б$) при неизменном напряжении коллектор-эмиттер:

$$\beta = I_К/I_Б \text{ при } I_{КЭ} = \text{const}.$$

Из анализа токов по рисунку 4 следует выражение для токов в транзисторе:

$$I_Э = I_К + I_Б.$$

Называть параметр **α** коэффициентом усиления не вполне корректно [2]. Значение этого параметра может быть 0,95…0,99. Это значение вычисляется через приращения коллекторного и эмиттерного тока. Поэтому более строгим будет термин **динамический (дифференциальный) коэффициент передачи тока эмиттера.** Однако, часто, при работе на линейном участке зависимости, строгий термин опускают.

Используя приведённые выше соотношения, можно связать значение **β** и **α**:

$$\beta = \alpha/(1- \alpha).$$

Из последнего выражения следует, что **β** >> 1

Лабораторная установка

В стендовом варианте учебной лабораторной установки при снятии семейства характеристик (ВАХ) биполярного транзистора используются 3 модуля, а именно: *лабораторный модуль, модуль питания и модуль измерений*.

Модуль питания содержит два регулируемых источника напряжения 0-10 В и 0-15 В и два источника фиксированных напряжений 5 В и ±15 В.

Модуль измерений содержит 2 вольтметра и 2 миллиамперметра постоянного тока. Вольтметры имеют переключаемые пределы измерения 2, 20 и 200 В, а миллиамперметры – 2, 20 и 200 миллиампер.

Лабораторный модуль

Лабораторный модуль содержит наборы резисторов, потенциометров, операционных усилителей, полевых и биполярных транзисторов, диодов, кремниевых стабилитронов и конденсаторов. **Выводы всех этих элементов соединены с гнёздами на наборном поле, размещённом на лицевой панели.** Около гнёзд нанесены условные графические обозначения перечисленных элементов с указанием, в необходимых случаях, полярности. С помощью гибких изолированных проводников, снабжённых штекерами, осуществляются необходимые соединения элементов.

В лабораторном модуле установлено 4 типа биполярных транзисторов: VT3-КТ503Е; VT4- КТ817А; VT5 – КТ502Е; VT6 – КТ816А. Кремниевые транзисторы КТ502Е (p-n-p типа) и КТ503Е (n-p-n типа) предназначены для применения в усилителях сигналов низкой частоты, дифференциальных усилителях, преобразователях сигналов, импульсных устройствах. Кремниевые транзисторы типов КТ816А (p-n-p типа) и КТ817А (n-p-n типа) предназначены для применения в усилителях низкой частоты, дифференциальных усилителях, преобразователях сигналов, импульсных устройствах.

Справочные данные транзисторов

Тип транзистора	Структура	Предельное напряжение коллектор-база, В	Постоянное напряжение коллектор-эмиттер, В	Предельный ток коллектора, А	Предельная мощность, рассеиваемая на коллекторе, Вт
КТ503Е	n-p-n	100	80	0,15	0,35
КТ817А	n-p-n	40	40	3	1,25
К502Е	p-n-p	90	80	0,13	0,35
КТ816А	p-n-p	40	40	3	1

Эксперимент

Собрать схему измерения, приведённую на рис. 6.

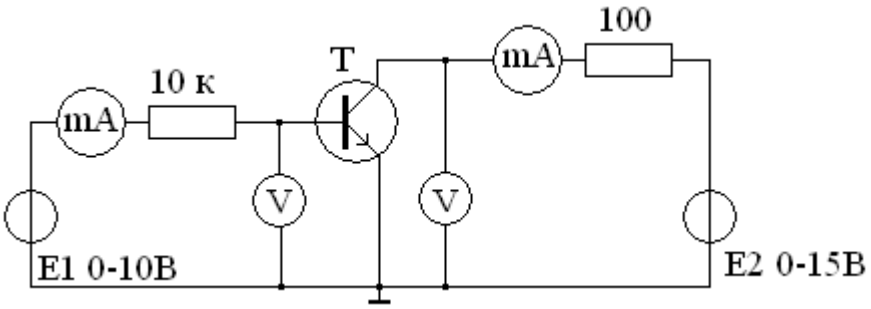

Рис. 6.

I

Выполнить измерения входной характеристики, для чего установить напряжение источника коллекторного питания E2 равным нулю. Увеличивая напряжение источника питания E1 в цепи базы с нуля до 10 В с шагом 1 В, для каждого значения E1 измерить напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ и базовый ток $I_Б$. Повторить измерения, установив E2 = 10 В. Данные записать в таблицу 1.

Таблица 1.

	E1, В	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$U_{БЭ}$,В										
$U_{КЭ}$ = 0 В											
$U_{КЭ}$=10 В											

Кривые для U = 0 В U = 10 В построить на одном графике. Полученный результат объяснить.

II

Выполнить измерения семейства выходных характеристик.

Для нескольких значений базового тока из таблицы 1 построить выходные характеристики. Для этого, установив базовый ток, последовательно увеличивать напряжение источника коллекторного литания Е2. При этом измерять напряжение $U_{КЭ}$ и коллекторный ток $I_К$. Таким образом получить не менее десяти точек. Результаты измерений записать в таблицу 2.

Таблица 2.

		E2,B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E1, B	$I_Б$, мА											
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

III

По результатам измерений постройте семейство выходных характеристик. Объясните результаты измерений.

Библиография

1. Кучумов А.И. Электроника и схемотехника: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Гелиос АРВ, 2004. – 336 с.

2. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учебник для вузов. Под ред. О.П. Глудкина. — М.: Горячая линия–Телеком, 2005. – 768 с.

3. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изл. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1977, 672 с.