

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

Кафедра физики твёрдого тела

В.В. ПАРФЕНОВ, И.В. ЯНИЛКИН

**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО
ТРАНЗИСТОРА**

Методическое пособие к лабораторным работам

Казань 2016

УДК 537.9
ББК В379.2

*Принято на заседании кафедры физики твердого тела
Протокол № 2 от 19 сентября 2016 года*

Рецензент: Тюрин В.А.
к. ф.-м. н., доцент кафедры радиофизики ИФ КФУ

Парфенов В.В., Янилкин И.В.
Изучение работы биполярного транзистора /В.В. Парфенов, И.В. Янилкин –
Казань: Казан. ун-т, 2016. – 19 с.

Методическая разработка предназначена для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 03.03.02 «Физика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Физика конденсированного состояния», «Физические основы микро- и наносистемной техники».

Пособие не освобождает и не ограничивает студента от обращения к другим источникам информации, в том числе рекомендованным в данном пособии, необходимым для выполнения лабораторных заданий, для подготовки к зачету и экзамену, поскольку не охватывает материал, вынесенный на самостоятельное изучение студентом.

© Парфенов В.В., 2016
© Янилкин И.В., 2016
© Казанский университет, 2016

Полупроводниковый триод был изобретен в 1948г. американскими физиками Дж. Бардином, У. Браттейном и У. Шокли. За это изобретение в 1956 г. они были удостоены Нобелевской премии. Сначала изобретенное ими устройство именовалось просто транзистором, но в 1952г. один из соавторов – Уильям Шокли разработал еще один тип полупроводникового триода, по принципу работы сильно отличающийся от первого и названный полевым транзистором. За изобретением же Бардина, Браттейна и Шокли утвердилось название биполярный транзистор.

Биполярный транзистор, являясь управляемым элементом, нашел широкое применение в схемах усиления, а также в импульсных схемах. Отсутствие накала, малые габариты и стоимость, высокая надежность - таковы преимущества, благодаря которым транзистор вытеснил из большинства областей техники электронные лампы.

Биполярный транзистор - трехэлектродный полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих *p-n* перехода (рис. 1). В зависимости от порядка чередования областей с различным типом проводимости различают транзисторы *p-n-p* и *n-p-n* типа. Принцип действия обоих транзисторов одинаков. В дальнейшем для определенности будем рассматривать транзистор *p-n-p* типа.

Одна из крайних областей биполярного транзистора, используемая обычно в режиме инжекции, называется **эмиттером**, промежуточная область – **базой**, а другая крайняя область - **коллектором**. *P-n* переход между эмиттером и базой называют эмиттерным переходом, а между коллектором и базой – коллекторным.

На эмиттер для обеспечения режима инжекции подают прямое напряжение $V_{\text{э}}$. На коллектор, работающий в режиме экстракции, - обратное напряжение $V_{\text{к}}$. На рис. 1 изображен транзистор, включенный по

схеме «с **общей базой**», когда базовый электрод является общим для входной - эмиттерной и выходной – коллекторной, цепей.

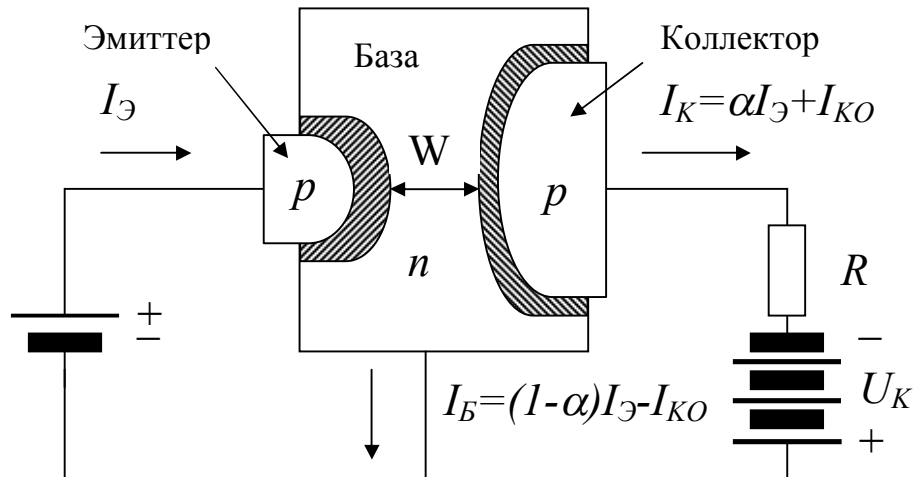


Рис. 1 Схема соединения транзистора «с общей базой». Тепловой ток I_{K0} на несколько порядков ниже, чем I_K , для кремниевого транзистора, используемого в данной работе (при комнатной температуре).

Толщина базы в транзисторе W значительно меньше диффузионной длины дырок L_p . Благодаря этому **основная часть дырок**, инжектируемых эмиттером, **пройдет сквозь базу** до коллекторного перехода. Здесь дырки затягиваются сильным электрическим полем коллекторного перехода, включенного в обратном направлении, и будут участвовать в образовании тока в цепи коллектора. Обе цепи оказываются связанными друг с другом с помощью инжектированных дырок, так что всякое изменение тока в цепи эмиттера вызывает определенное изменение тока в цепи коллектора. Поскольку напряжение в цепи коллектора, включенного в обратном направлении, может быть значительно больше, чем в цепи эмиттера, включенного в прямом направлении, то **мощность**, создаваемая переменной составляющей коллекторного тока на нагрузочном

сопротивлении R , может быть **значительно больше**, чем мощность, затрачиваемая в цепи эмиттера, т.е. транзистор обладает усилительным эффектом.

Важной характеристикой полупроводникового транзистора является коэффициент передачи тока эмиттера, который, по определению, есть

$$\alpha = \left(\frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\varepsilon}} \right)_{U_{\kappa} = const}, \quad (1)$$

где ΔI_{κ} - абсолютная величина малого изменения тока коллектора, вызванного малым изменением тока эмиттера ΔI_{ε} при постоянном напряжении коллектор–база V_{κ} . Величина α определяется свойствами эмиттерной, базовой и коллекторной областей транзистора (в первую очередь – концентрациями равновесных носителей заряда в них), а также процессами рекомбинации в области базы и в эмиттерном p - n переходе. Действительно, полный ток эмиттера I_{ε} состоит из дырочной $I_{\varepsilon p}$ и электронной $I_{\varepsilon n}$ компонент, а также из тока рекомбинации I_r внутри эмиттерного p - n перехода:

$$I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon p} + I_{\varepsilon n} + I_r. \quad (2)$$

Так как к коллектору движутся только дырки, то $I_{\varepsilon n}$ и I_r не изменяют тока коллектора и являются бесполезными. Отношение

$$\gamma = \frac{I_{\varepsilon p}}{I_{\varepsilon}} = \frac{I_{\varepsilon p}}{I_{\varepsilon p} + I_{\varepsilon n} + I_r} \quad (3)$$

называют коэффициентом инжекции или эффективностью эмиттера. Качество эмиттера, очевидно, тем лучше, чем ближе γ к единице. Обычно

можно считать $I_r \approx 0$. Учитывая (поскольку переход база-эмиттер является диодом) что:

$$\begin{aligned} I_{\text{Эн}} &= eS_{\text{Э}} \frac{D_n n_p}{L_n} \left(e^{\frac{eV_{\text{Э}}}{kT}} - 1 \right), \\ I_{\text{Эр}} &= eS_{\text{Э}} \frac{D_p p_n}{W} \left(e^{\frac{eV_{\text{Э}}}{kT}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

, где D_n , D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок, n_p – концентрация электронов в полупроводнике р-типа, p_n – концентрация дырок в полупроводнике п-типа, L_n – диффузионная длина электронов в эмиттере, получим из (3):

$$\gamma \approx \frac{1}{1 + \frac{I_{\text{Эн}}}{I_{\text{Эр}}}} = \frac{1}{1 + \frac{D_n \cdot n_p \cdot W}{D_p \cdot p_n \cdot L_n}}. \quad (5)$$

Поскольку

$$\begin{aligned} p_n &= p_p \exp\left(-\frac{e(\varphi_K - V_{\text{Э}})}{kT}\right), & n_p &= n_n \exp\left(-\frac{e(\varphi_K - V_{\text{Э}})}{kT}\right), \\ D_p &= \frac{kT}{e} \mu_p, & D_n &= \frac{kT}{e} \mu_n, \end{aligned} \quad (6)$$

, где φ_K – контактная разность потенциалов р-п перехода; то получим следующее выражение для γ :

$$\gamma \approx \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{\text{б}} W}{\sigma_{\text{Э}} L_n}} \approx 1 - \frac{\sigma_{\text{б}}}{\sigma_{\text{Э}}} \cdot \frac{W}{L_n}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{б}} = en_n \mu_n$ и $\sigma_{\text{Э}} = ep_p \mu_p$ – удельные проводимости базы и эмиттера соответственно. Таким образом, величина γ будет тем ближе к единице,

чем сильнее выполняются неравенства $\sigma_{\delta} < \sigma_{\varepsilon}$ и $W < L_n$. Практически это достигается более сильным легированием эмиттера по сравнению с базой и уменьшением толщины базы W .

Учет рекомбинации дырок в базе характеризуется коэффициентом переноса дырок (выводится из решения уравнения диффузии дырок с учетом их рекомбинации):

$$\chi = \frac{I_{kp}}{I_{\varepsilon p}} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_p} \right)^2. \quad (8)$$

Очевидно, что величина χ будет тем ближе к единице, чем меньше отношение $\frac{W}{L_p}$.

И наконец, следует учесть, что полный ток коллектора тоже имеет дырочную и электронную составляющие. Величину

$$\xi = \frac{I_k}{I_{kp}} \quad (9)$$

называют эффективностью коллектора. Как видно из (9), эффективность коллектора – величина, заведомо большая единицы – в числителе дроби – полный ток коллектора

$$I_k = I_{kp} + I_{ko} + I_L, \quad (10)$$

куда кроме полезной составляющей I_{kp} входит электронный ток коллектора I_{ko} – ток неосновных носителей (электронов), экстрагируемых из базы в коллектор, и ток лавинного умножения коллекторного перехода I_L , возникающий при напряжении на коллекторном переходе, превышающем напряжение пробоя. Но в биполярных транзисторах рабочий ток обычно превышает ток неосновных

носителей заряда, т.е. $\frac{I_{кр}}{I_{ко}} \gg 1$, а в режиме «лавинного умножения» транзисторы эксплуатируются редко (за исключением некоторых специальных схем). Поэтому можно положить $\xi = 1$.

С учетом вышесказанного коэффициент передачи тока α можно представить в виде:

$$\alpha = \gamma\chi\xi \approx \gamma\chi \approx 1 - \frac{\sigma_{\bar{o}}}{\sigma_{\bar{o}}} \cdot \frac{W}{L_n} - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_p} \right)^2. \quad (11)$$

Так как $\gamma < 1$ и $\chi < 1$, то и $\alpha < 1$, т. е. в схеме с общей базой получить усиление тока нельзя. При достаточно тонкой базе и высокой степени легирования эмиттера коэффициент передачи может доходить до 0,990 – 0,999. Однако изменение напряжения на нагрузочном сопротивлении $\Delta U_K = R_H \Delta I_K$ при большой величине R_H может быть значительно больше изменения напряжения эмиттера $\Delta V_{\bar{o}}$, т.е. усиление по напряжению (и по мощности) может быть значительно больше единицы.

Рассмотрим зависимость коэффициента передачи транзистора α от тока эмиттера $I_{\bar{o}}$ (рис. 2).

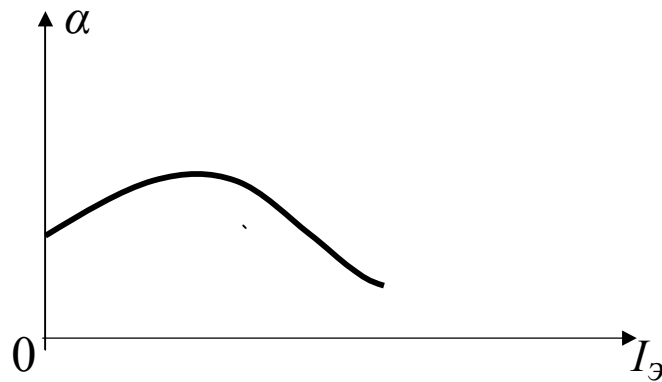


Рис. 2

При малых токах наблюдается увеличение α с ростом тока эмиттера, что обусловлено ростом градиента концентрации инжектированных в базу дырок. В базовой области возникает слабое электрическое поле, обусловленное неравномерным распределением инжектированных в базу носителей заряда. В этом поле увеличится скорость движения дырок по базовой области, вследствие чего увеличится коэффициент переноса χ и коэффициент передачи α .

При дальнейшем увеличении I_E начинает снижаться коэффициент инжекции γ , так как инжекция дырок в базу увеличивает ее проводимость, в то время как проводимость эмиттера меняется незначительно (см. ф.7). Поэтому величина коэффициента передачи α начинает падать.

Зависимость коэффициента передачи транзистора от напряжения на коллекторе V_K определяется изменением (или модуляцией) ширины базы W . С увеличением V_K коллекторный p - n переход становится шире, причем расширение происходит главным образом в сторону базы, поскольку она существенно менее легирована, чем коллекторная область. Таким образом, ширина базы с ростом V_K уменьшается, что приводит к увеличению коэффициента γ и χ , а следовательно, и α .

Коэффициент передачи α является одним из важнейших параметров биполярного транзистора. Другими важнейшими, с точки зрения эксплуатации транзистора в электронных схемах, параметрами являются **входное и выходное сопротивления** этого полупроводникового прибора. В схеме включения «с общей базой» входным сопротивлением является сопротивление эмиттера.

Дифференциальное сопротивление эмиттера r_E определяется следующим образом:

$$r_{\vartheta} = \left(\frac{dV_{\vartheta}}{dI_{\vartheta}} \right)_{V_{\kappa} = \text{const}}. \quad (12)$$

Ток через эмиттерный переход – не что иное, как ток диода, на который подано прямое смещение:

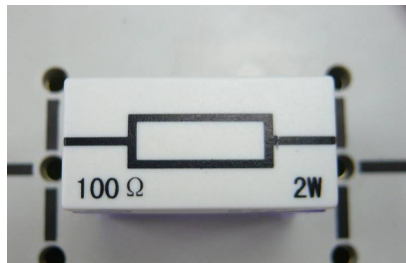
$$I_{\vartheta} = I_{\vartheta 0} \left(e^{\frac{eV_{\vartheta}}{kT}} - 1 \right) = eS_{\vartheta} \left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{W} \right) \left(e^{\frac{eV_{\vartheta}}{kT}} - 1 \right). \quad (13)$$

Вместо диффузионной длины дырок L_p в этом выражении стоит ширина базы W , так как обратный ток эмиттерного перехода будет определяться термогенерацией носителей в базе, ширина которой W много меньше диффузионной длины дырок. Дифференцируя (13), находим

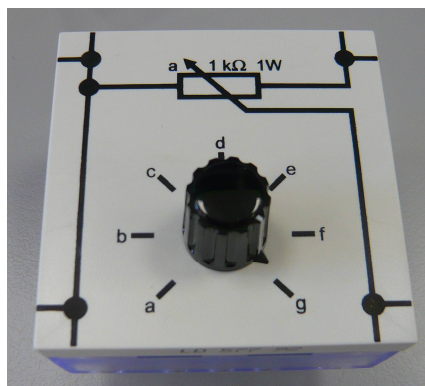
$$r_{\vartheta} = \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{I_{\vartheta} + I_{\vartheta 0}}. \quad (14)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе используются электронные компоненты: резисторы различного номинала, потенциометры и биполярный транзистор n-p-n типа. Основным измерительным прибором является мультиметр. Также можно использовать биполярный транзистор p-n-p типа. Для этого необходимо изменить полярность питания во всех схемах.

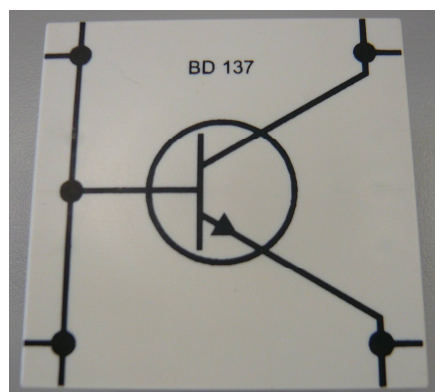


Резистор.



Потенциометр. Вращение по часовой стрелке увеличивает сопротивление.

Диапазон 10 Ом – 100 кОм.



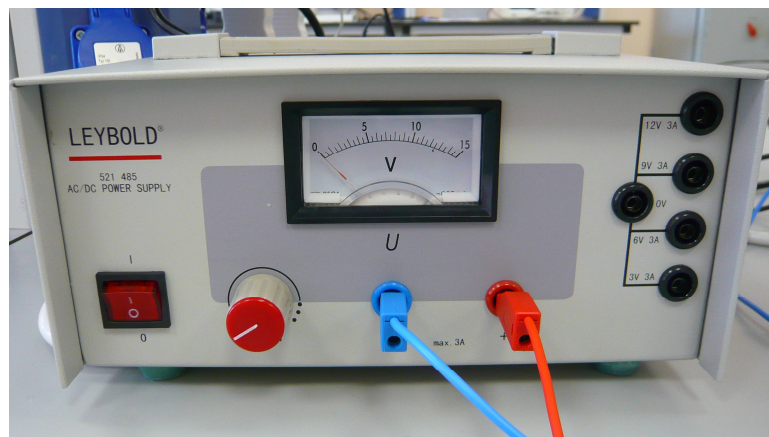
Биполярный транзистор n-p-n-типа BD 137.



Соединительный контакт.



Мультиметр. Переключением верхнего тумблера можно переключаться между красной и черной шкалой



Источник питания.

Задание 1.

1. Соберите схему как показано на рис. 1-2. Покажите преподавателю. Включите источник питания. Напряжение источника питания плавно поднимите до значения 5 В.
2. Вращением ручки потенциометра выведите напряжение $U_{\text{бэ}}$ на 0. Затем плавно изменяя сопротивление потенциометра снимите зависимость $I_3(U_{\text{бэ}})$.

3. Занесите полученные значения в таблицу, постройте график $I_6(U_{6э})$.
4. Выключите источник питания.

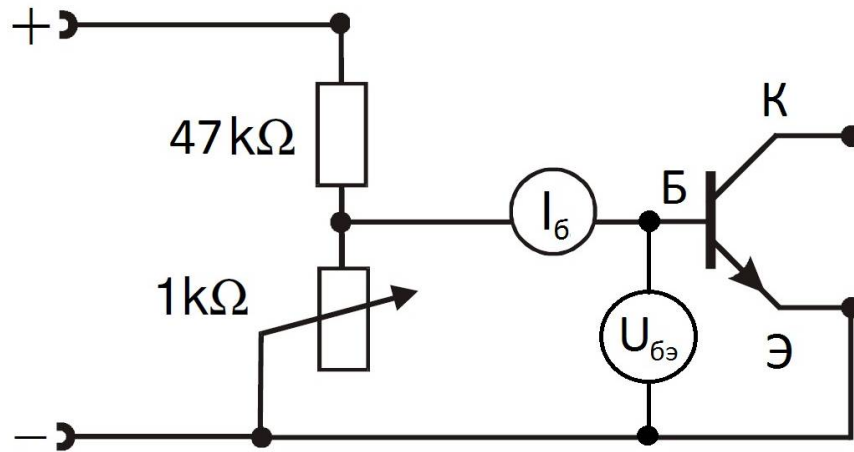


Рис. 1. Схема для измерения вольтамперной характеристики перехода база-эмиттер.

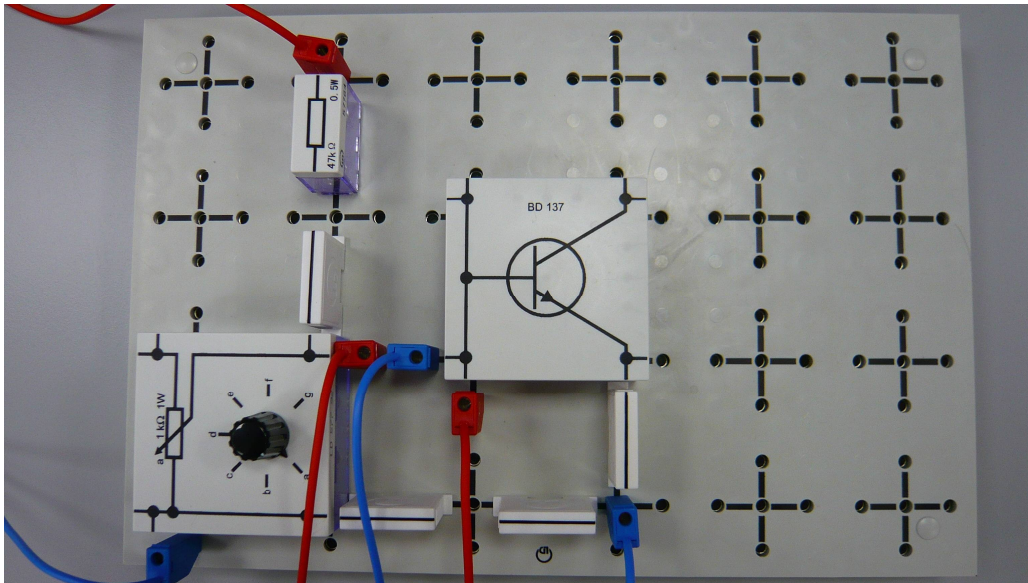


Рис. 2. Схема для измерения вольтамперной характеристики перехода база-эмиттер.

Задание 2.

1. Соберите схему как показано на рис. 3-4. Покажите преподавателю. Включите источник питания (5 В).

2. Вращением ручки потенциометра выведите ток базы I_B на минимальное значение. Затем плавно изменяя сопротивление потенциометра снимите зависимости $I_K(I_B)$, $r_3(I_3)$, $\alpha(I_3)$.
3. Занесите полученные значения в таблицу, постройте графики $I_K(I_B)$, $r_3(I_3)$, $\alpha(I_3)$.
4. Выключите источник питания.

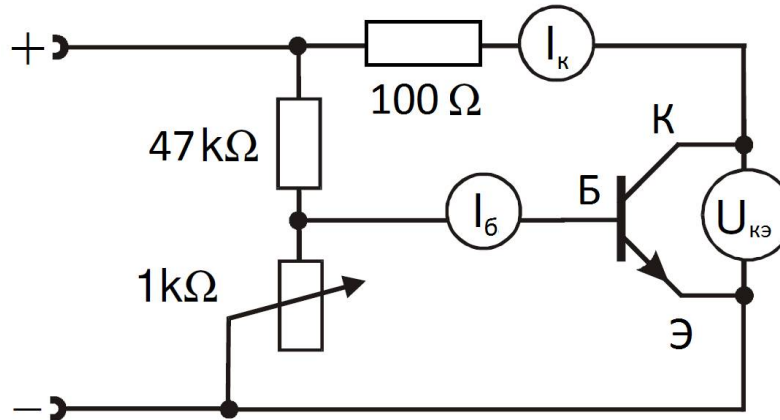


Рис. 3. Схема для измерения зависимости тока коллектора от тока базы.

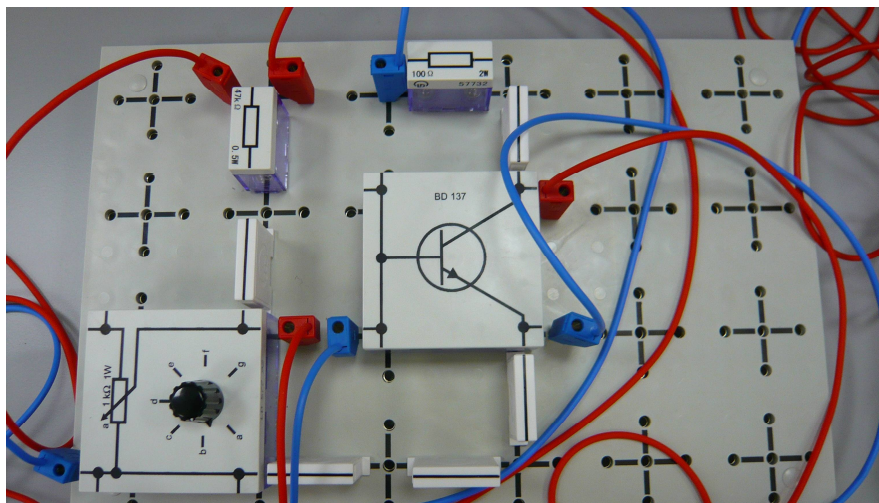


Рис. 4. Схема для измерения зависимости тока коллектора от тока базы

Задание 3.

1. Соберите схему как показано на рис. 5-6. Покажите преподавателю. Включите источник питания (5 В).
2. Вращением ручки потенциометра (1 кОм) выведите ток базы I_B на определенное значение. Затем плавно изменяя сопротивление потенциометра (220 Ом) снимите зависимость $I_K(U_{КЭ})$.
3. Вращением ручки потенциометра (1 кОм) задайте другое значение тока базы I_B . Плавно изменяя сопротивление потенциометра (220 Ом) снимите зависимость $I_K(U_{КЭ})$ для нового значения тока базы.
4. Занесите полученные значения в таблицу, постройте графики $I_K(U_{КЭ})$ для нескольких значений тока базы.
5. Выключите источник питания.

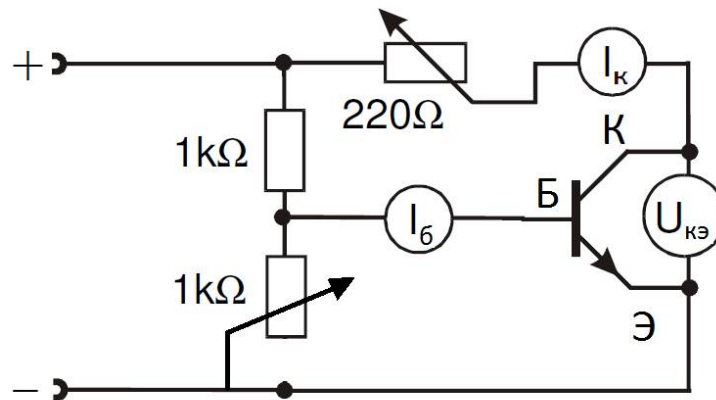


Рис. 5. Схема для измерения зависимости тока коллектора от $U_{КЭ}$.

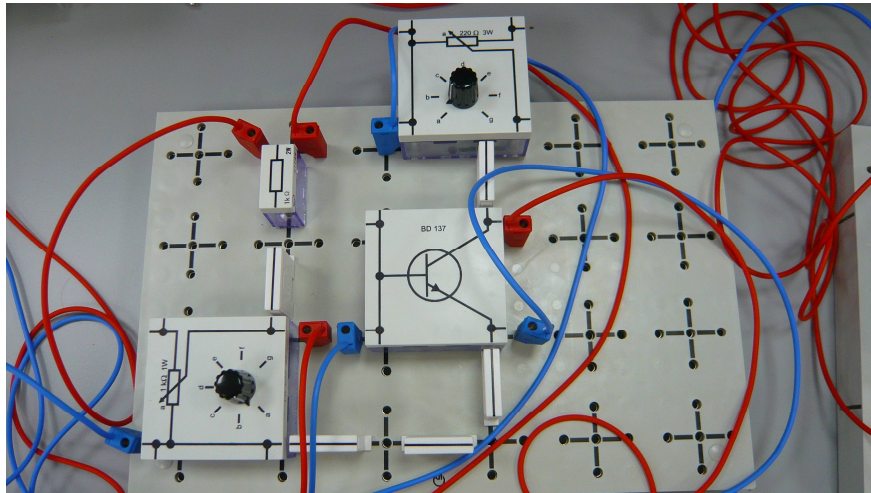


Рис. 6. Схема для измерения зависимости тока коллектора от $U_{КЭ}$.

Контрольные вопросы.

1. Что представляют собой полупроводники p и n-типа?
2. Что представляет собой p-n переход?
3. Объясните принцип работы биполярного транзистора.
4. Почему базу транзистора делают тонкой?
5. Какие носители заряда являются основными и неосновными в эмиттерной, базовой и коллекторной областях для биполярного транзистора p-n-p типа?
6. Какие схемы соединения транзистора вам известны?
7. Как определяются коэффициенты усиления по току и напряжению при работе транзистора?

Список рекомендуемой литературы

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы. М.: Высшая школа, 1973.
2. Епифанов Г.Н., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высшая школа, 1986.
3. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1990.

4. Игнатов, Фадеева, Савиных: Классическая электроника и наноэлектроника. М.: ФЛИНТА: Наука, 2009.

РЕЦЕНЗИЯ

на учебно-методическое пособие Парфенова В.В., Янилкина И.В.

«Изучение работы биполярного транзистора»

В учебно-методическом пособии «Изучение работы биполярного транзистора» рассмотрены физические основы работы биполярного транзистора на примере р-п-р транзистора, включенного по схеме «с общей базой». Подробно рассмотрены входная характеристика транзистора (дифференциальное сопротивление эмиттера) и характеристика передачи (коэффициент передачи эмиттерного тока). Выведены формулы, описывающие эти характеристики. Сформулированы основные требования, необходимые для получения максимального коэффициента передачи и максимального коэффициента усиления по току. После изложения теоретических основ подробно рассмотрена методика измерения входной и выходной характеристик прибора в статическом режиме на лабораторном макете. В конце пособия приведены контрольные вопросы и список литературы. Пособие написано хорошим научным языком, в достаточной мере иллюстрировано. Считаю, что методическое пособие «Изучение работы биполярного транзистора» может быть опубликовано в электронном виде на университетском сайте и использовано для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 03.03.02 «Физика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Физика магнитных материалов и полупроводников», «Физика конденсированного состояния», «Физические основы микро- и наносистемной техники».

Рецензент:

кандидат физ.-мат. наук, доц. кафедры радиофизики К(П)ФУ



Тюрин В.А.

**ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА № 2 ЗАСЕДАНИЯ КАФЕДРЫ ФИЗИКИ
ТВЕРДОГО ТЕЛА ОТ 19.09.2016 Г.**

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

зав. каф. д.ф.-м.н., проф. Тагиров Л.Р., к.ф.-м.н., доцент Болтакова Н.В., д.ф.-м.н., проф. Парфенов В.В., д.ф.-м.н., проф. Садыков Э.К., ассистент Пятаев А.В., ассистент Янилкин., научн. сотрудник Усеинов Н.Х., инж. Закиров Р.Х., инж. Хуснутдинова Г.М.

СЛУШАЛИ:

проф. Парфенова В.В. о подготовленных коллективом авторов (Парфенов В.В., Янилкина И.В.) методических пособиях к лабораторным работам к практикуму «Физика конденсированного состояния».

ПОСТАНОВИЛИ:

Рекомендовать к опубликованию в электронном варианте методические пособия к лабораторным работам к практикуму «Физика конденсированного состояния»:

1. Изучение работы биполярного транзистора.
2. Изучение работы полевого транзистора.

ГОЛОСОВАЛИ: единогласно.

Секретарь

Завед. кафедрой

Хуснутдинова Г.М.

Тагиров Л.Р.