

Лабораторная работа №6

Изучение вольтамперных характеристик полупроводникового триода

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение двух семейств характеристик:

1. $I_K = f_{IB1}(U_K)$ и $I_K = f_{IB2}(U_K)$;
2. $I_B = f_{UK1}(U_{\text{Э}})$ и $I_B = f_{UK2}(U_{\text{Э}})$;

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

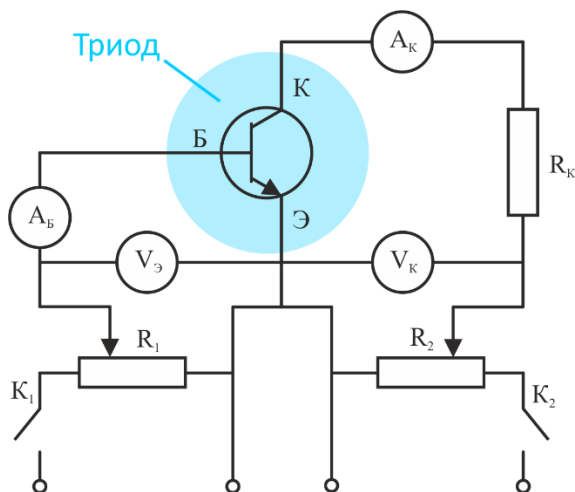


Рис. 5. Схема цепи для снятия вольтамперных характеристик триода

В схеме использованы следующие приборы:

- Транзистор Т.108 А;
- Миллиамперметр A_K – для измерения тока через коллектор I_K . Максимальное значение не должно превышать 50 мА;
- Миллиамперметр A_B – для измерения тока через базу I_B . Максимальное значение не должно превышать 0,4 мА;
- Вольтметр V_K – для измерения напряжения U_K между коллектором и базой.

U_K не должно превышать 15 в;

- Вольтметр $V_{\mathcal{E}}$ – для измерения напряжения эмиттер-база $U_{\mathcal{E}}$.

$U_{\mathcal{E}}$ не должно превышать 0,4 В;

- R_1 и R_2 – потенциометры, которые приключаются соответственно к селеновому выпрямителю (15 В) и к кенотронному выпрямителю (0,4 В);
- Сопротивление R_M на 1200 Ом;
- K_1 и K_2 – рубильники.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Полупроводниковые триоды, или как их называют – **транзисторы**, способны выполнять ряд функций обычной электронной лампы, а в некоторых случаях решать специфические задачи, которые не могут быть осуществлены с помощью ламп.

Слово «*транзистор*» происходит от сочетания английских слов *transfer* и *resistor*, что означает «преобразователь сопротивления». Впервые они были созданы в 1948 году. Благодаря ряду преимуществ перед электронными лампами (малые габариты и вес, продолжительный срок службы, высокая механическая прочность, отсутствие цепей накала) транзисторы нашли широкое и все возрастающее применение в радиотехнических устройствах в качестве усилителей, генераторов колебаний, смесителей и т.п. В отличие, от электронных ламп, разработка которых стала основой для развития новых направлений, транзистор оказался предшественником новых приборов, дал начало новой полупроводниковой технологии.

Свойства *p-n*-перехода

Известно, что в зависимости от природы примесей, «свободными» зарядами в полупроводнике являются *электроны* или «дырки». В первом случае полупроводник и его проводимость называют электронными (*n*-типа), во втором дырочными (*p*-типа). Например, присутствие в германии

атомов мышьяка создает электронную проводимость, а примесь атомов индия - дырочную.

Представим, что полупроводники разного типа проводимости (p и n) контактируют между собой. На границе их соприкосновения, которую называют p - n -переходом, имеет место диффузионный переход «дырок» в n -область и электронов в p -область. Такое перемещение свободных зарядов создает в узком приконтактном слое толщиной $10^{-4} - 10^{-6}$ см электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии зарядов. Кроме того, так как при встрече электрона с «дыркой» имеет место их рекомбинация, эта область оказывается обедненной носителями тока по сравнению с основной толщей полупроводника, т.е. будет иметь место повышенное электрическое сопротивление.

Образовавшийся в p - n -переходе слой называется **запирающим**. Он обладает односторонней проводимостью, т.е. по отношению к приложенному внешнему напряжению он ведет себя подобно электронной лампе – **диоду**.

Действительно, при включении p - n -перехода в цепь внешнего источника напряжения в нем будет создано электрическое поле E , которое будет действовать на положительные («дырки») и отрицательные (электроны) заряды в противоположные стороны. В одном случае (**рис.1а**) это поле будет сближать электроны и дырки.

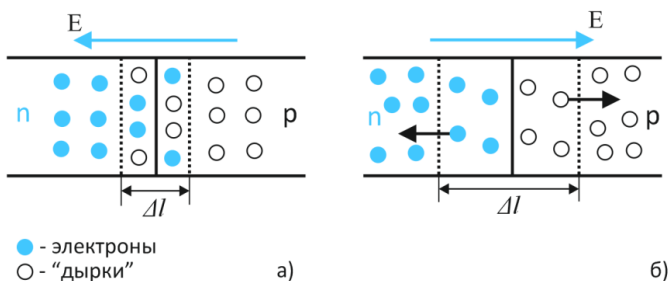


Рис.1. Изменение концентрации электронов и «дырок» в p - n -переходе под действием электрического поля

При этом толщина запирающего слоя Δl резко уменьшается, концентрация свободных зарядов увеличится, сопротивление практически будет таким, как и в толще полупроводника.

p - n -переход не будет оказывать препятствия прохождению тока. Это так называемое **пропускное направление поля** (тока).

В другом случае (рис. 16) и электроны, и «дырки» будут удаляться от границы раздела, что приведет к уменьшению концентрации зарядов в p - n -переходе, увеличению его толщины, т.е. к резкому увеличению сопротивления. Такое направление поля называется запирающим, поскольку при этом через p - n -переход будет протекать ничтожный (в 10^4 – 10^5 раз меньший, чем в пропускном направлении) ток.

Принцип действия полупроводникового триода

Полупроводниковый триод можно рассматривать как систему из двух p - n -переходов (2-х диодов), соединенных последовательно навстречу друг другу. Эту систему называют **p - n - p -** (или **n - p - n -) переходом (рис.2).**

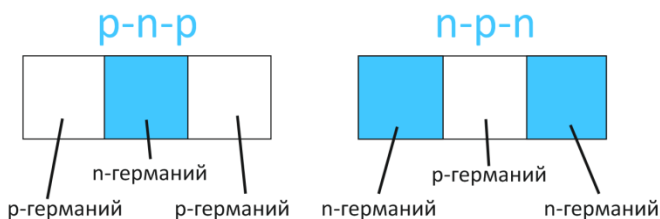


Рис.2. Схема полупроводниковых триодов

Триод состоит из двух слоев примесного полупроводника одного типа разделенных тонкой прослойкой того же полупроводника другого типа проводимости.

Эта прослойка имеет форму тонкой пленки значительной площади сечения и поэтому рассматриваемые триоды называют плоскостными, в отличие от точечных триодов, в которых площадь сечения p - n - p -перехода является весьма незначительной. Принцип действия плоскостных и точечных триодов одинаков.

Рассмотрим механизм усиления триодом на примере $p-n-p$ транзистора, который представляет собой кристалл, в котором существует три области проводимости: две крайние – с дырочной проводимостью p и одну среднюю – с электронной n . На **рис.3.** представлена идеализированная схема транзистора.

При отсутствии внешних напряжений на границах средней области образуются контактные разности потенциалов $U_{Э}$ и $U_{К}$, условно показанные на **рис.3** в виде батарей. Контакты, соединяющие указанные три области с внешней цепью, называются эмиттером $Э$, коллектором $К$, базой $Б$.

Транзистор включен по схеме с общей базой. Источник усиливаемого напряжения $U_{ВХ}$ включается в цепь эмиттера, а сопротивление нагрузки $R_{М}$ в цепь коллектора.

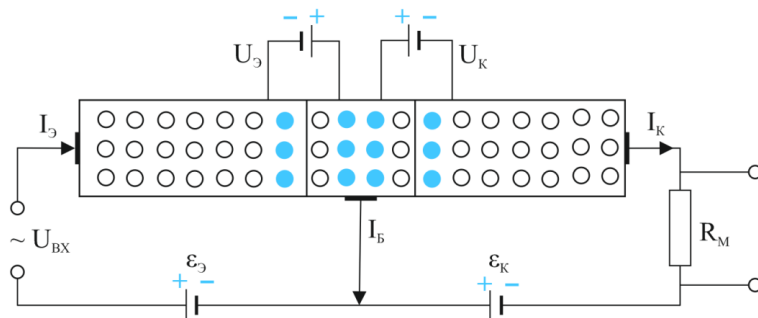


Рис.3. Схема триода

Не вдаваясь в подробности, рассмотрим **принцип действия транзистора**. Подключение батареи $\varepsilon_{Э}$ компенсирует контактную разность потенциалов $U_{Э}$. В этом случае дырки из области эмиттера двигаются в область базы. При этом эмиттер как бы *инжектирует* (нагнетает) дырки в базу. В этом отношении он подобен катоду электронной лампы.

Если включено также напряжение ε_K между коллектором и базой, то тем самым будет создано электрическое поле между эмиттером и коллектором. Под действием этого поля дырки, инжектированные в базу, будут продолжать свое движение по направлению к коллекторному переходу и, дойдя до него, будут втянуты в коллектор.

Следует иметь в виду, что коллекторный переход не препятствует, а помогает указанному (слева направо) движению дырок. Он является запирающим только для перемещения дырок в обратном направлении из коллектора в базу и сдерживает переход электронов из базы в коллектор.

Если входное напряжение меняется во времени по определенному закону $U_{BX} = f(t)$, то количество перешедших в базу дырок, а следовательно, и коллекторный ток будут меняться по тому же закону (линейному режиму).

Плоскостной транзистор можно представить в виде **четырёхполюсника (рис.4)**.



Рис. 4. Четырёхполюсник

Напряжение на входе U_1 и ток на выходе I_2 связаны с напряжением на выходе U_2 и током на входе I_1 уравнениями:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \quad (1)$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \quad (2)$$

где h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} – параметры четырёхполюсника, которые необходимо определить для полной его характеристики.

Параметры транзистора, являющегося четырехполюсником, наиболее просто найти из уравнений в двух режимах работы транзистора.

1. В режиме короткого замыкания на выходе ($U_2 = 0$). Из уравнений (1) и (3) получаем:

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} = R_{BX} - \text{входное сопротивление транзистора,} \quad (3)$$

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} = \alpha - \text{коэффициент усиления по току.} \quad (4)$$

2. В режиме холостого тока на выходе ($I_1 = 0$). Аналогично, из уравнений (1) и (2) получаем:

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{\gamma} - \text{обратный коэффициент усиления по напряжению} \quad (5)$$

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} = \frac{1}{R_{ВЫХ}} - \text{проводимость транзистора.} \quad (6)$$

Наряду с рассматриваемой схемой включения транзистора с общей базой, существуют схемы с общим коллектором и общим эмиттером. Очевидно, для каждого из трех способов включения транзистора параметры h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} будут отличаться друг от друга.

Таким образом, существуют следующие параметры:

$h_{11Б}, h_{12Б}, h_{21Б}, h_{22Б}$ – общая база,

$h_{11К}, h_{12К}, h_{21К}, h_{22К}$ – общий коллектор,

$h_{11Э}, h_{12Э}, h_{21Э}, h_{22Э}$ – общий эмиттер.

Если известны параметры для схемы с общим эмиттером Э, то параметры для остальных схем включения можно определить из следующих уравнений.

Для схемы с общей базой B :

$$\begin{aligned}
 h_{11B} &= \frac{h_{11Э}}{1+h_{21Э}} & h_{12B} &= \frac{h_{11Э} \cdot h_{22Э} - h_{12Э}(1+h_{21Э})}{1+h_{21Э}} \\
 h_{21B} &= \frac{h_{21Э}}{1+h_{21Э}} & h_{22B} &= \frac{h_{22Э}}{1+h_{21Э}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Для схемы с общим коллектором K :

$$\begin{aligned}
 h_{11K} &= h_{11Э} & h_{12K} &= 1-h_{12Э} \\
 h_{21K} &= -(1+h_{21Э}) & h_{22K} &= h_{22Э}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Параметры транзистора для низких частот можно определить по его стратегическим характеристикам. При этом нет необходимости в трудно-осуществимых режимах короткого замыкания и холостого хода. На схеме (рис.5) цепь эмиттера представляет собой вход, а коллектора – выход, т.е.

$$I_B = I_1 \quad U_Э = U_1$$

$$I_K = I_2 \quad U_K = U_2$$

Тогда исходные уравнения для четырехполюсника можно представить в виде:

$$U_Э = h_{11Э}I_B + h_{12Э}U_K \tag{9}$$

$$I_K = h_{21Э}I_B + h_{22Э}U_K \tag{10}$$

Рассмотрим теперь два условия проведения опыта:

- Ток в цепи базы не меняется** ($I_B = const$). Дифференцируя уравнение (5) по U_K , получаем:

$$\frac{\partial U_Э}{\partial U_K} = h_{12Э}$$

Из уравнения (6) имеем:

$$\frac{\partial I_K}{\partial U_K} = h_{22\varepsilon}$$

2. Напряжение между коллектором и базой не меняется

($U_K = const$). Из уравнения (3) и (4) получаем:

$$\left(\frac{\partial U_{\varepsilon}}{\partial I_B} \right)_{U_K} = h_{11\varepsilon} \quad \left(\frac{\partial I_K}{\partial I_B} \right)_{U_K} = h_{21\varepsilon}$$

В конечных приращениях параметры транзистора можно переписать в виде:

$$R_{BX} = h_{11\varepsilon} = \left(\frac{\Delta U_{\varepsilon}}{\Delta I_B} \right)_{U_K=const} \quad - \text{входное сопротивление транзистора} \quad (11)$$

$$\alpha = h_{21\varepsilon} = \left(\frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right)_{U_K=const} \quad - \text{коэффициент усиления по току} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{1}{h_{12\varepsilon}} = \left(\frac{\Delta U_K}{\Delta U_{\varepsilon}} \right)_{I_K=const} \quad - \text{коэффициент усиления по напряжению} \quad (13)$$

$$R_{BbIX} = h_{22\varepsilon} = \left(\frac{\Delta U_K}{\Delta I_K} \right)_{I_B=const} \quad - \text{выходное сопротивление транзистора} \quad (14)$$

Таким образом, для определения всех параметров достаточно снять два семейства характеристик.

1. **Выходные характеристики** – зависимость тока коллектора I_K от напряжения U_K на коллекторе при различных значениях тока I_{B1} и I_{B2} в цепи базы:

$$I_K = f_{I_{B1}}(U_K) \quad \text{и} \quad I_K = f_{I_{B2}}(U_K)$$

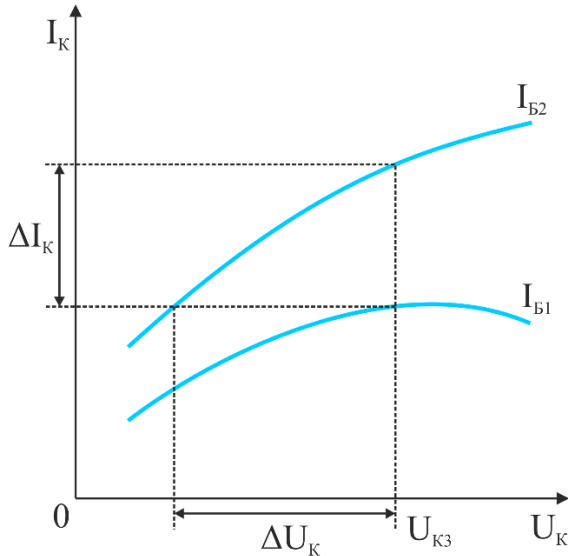


Рис. 6

На графиках выбираются участки наиболее близкие к прямолинейным. Отсюда находят ΔI_{K1} , ΔI_{K2} , ΔU_K , затем в соответствии с формулами (12) и (14) определяются:

$$\alpha = \left(\frac{\Delta I_K}{I_{B2} - I_{B1}} \right)_{U_K = \text{const} = U_{K3}} \quad \text{– коэффициент усиления по току} \quad (15)$$

$$R_{\text{ВЫХ}} = \left(\frac{\Delta U_K}{\Delta I_{K1}} \right)_{I_B = \text{const} = I_{B2}} \quad \text{– выходное сопротивление транзистора} \quad (16)$$

2. Входные характеристики – зависимость тока базы I_B от напряжения $U_{\text{Э}}$ между эмиттером и базой при различных напряжениях U_K на коллекторе:

$$I_B = f_{U_{K1}}(U_{\text{Э}}) \quad \text{и} \quad I_B = f_{U_{K2}}(U_{\text{Э}})$$

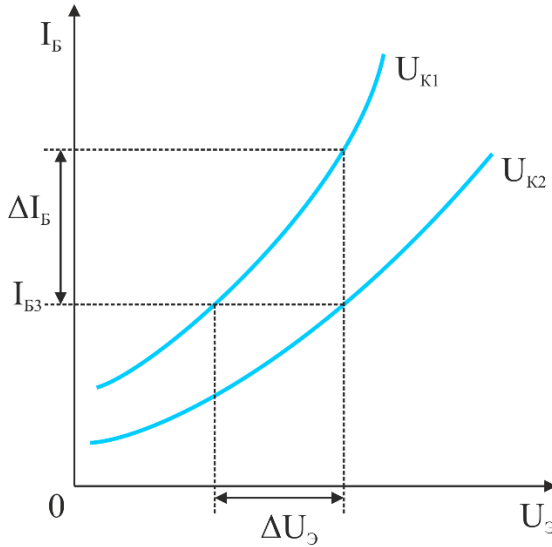


Рис.7

На графиках выбираются участки наиболее близкие к прямолинейным. Из этого семейства кривых находят ΔU_{B1} , ΔU_{B2} , ΔI_B и затем в соответствии с формулами (11) и (13) определяются:

$$R_{BX} = \left(\frac{\Delta U_{\text{Э}}}{\Delta I_B} \right)_{U_K = \text{const} = U_{K1}} \quad \text{– входное сопротивление транзистора} \quad (17)$$

$$\gamma = \left(\frac{U_{K1} - U_{K2}}{\Delta U_{\text{Э}}} \right)_{I_K = \text{const}} \quad \text{– коэффициент усиления по напряжению} \quad (18)$$

На графиках выбираются участки наиболее близкие к прямолинейным. Это соответствует режиму работы триода в радиотехнических схемах.

ХОД РАБОТЫ

Для выполнения работы используется схема с общим эмиттером (рис.5). Схема дается в готовом (собранном) виде.

1. Поставить подвижный контакт потенциометров R_1 и R_2 в нулевое положение.
2. Замкнуть рубильник K_1 и потенциометром R_1 установить показания миллиамперметра A_B на 20 мА .
3. Замкнуть рубильник K_2 и потенциометром R_2 установить показания вольтметра V_K на 1 В , измерить ток I_{K1} .
4. Устанавливая последовательно показания вольтметра V_K на $1, 2, 3, 4, 5\text{ В}$, снять соответствующие показания I_{K1} миллиамперметра A_K . При этом следует каждый раз следить за тем, чтобы ток I_{B1} оставался равным 20 мА .
5. Данные поместите в **Таблицу 1**.

Таблица 1

$U_K, \text{В}$		1	2	3	4	5
$I_{B1} = 20\text{ мА} = 2 \cdot 10^{-2}\text{ А}$	$I_{K1}, \text{ мА}$					
$I_{B2} = 40\text{ мА} = 4 \cdot 10^{-2}\text{ А}$	$I_{K2}, \text{ мА}$					

6. Повторить вышеуказанные измерения для I_{K2} при постоянном напряжении на коллекторе $I_{B2} = 40\text{ мА}$.
7. На основании полученных данных построить характеристики $I_K = f(U_K)$ при $I_B = \text{const}$.

8. Пользуясь полученными графиками, определить коэффициент усиления по току и выходное сопротивление транзистора по формулам (15) и (16) и **рис.6**.
9. Замкнуть рубильник K_2 и установить с помощью потенциометра R_2 напряжение на коллекторе U_K на 0 В .
(В последующем, перед каждым измерением проверять значения U_K и в случае изменения устанавливать на 0 В и 4 В).
10. Замкнуть рубильник K_1 и с помощью потенциометра R_1 установить показания вольтметра V_3 на $0,025\text{ В}$.
11. Снять показания тока через базу I_{B1} , меняя показания вольтметра V_3 .
12. Данные измерения записать в **Таблицу 2**:

Таблица 2

$U_3, \text{В}$		0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
$U_{K1} = 0\text{В}$	$I_{B1}, \text{мА}$						
$U_{K2} = 4\text{В}$	$I_{B2}, \text{мА}$						

13. Повторить вышеуказанные измерения для I_{B2} при постоянном напряжении на коллекторе $U_{K2} = 4\text{ В}$.
14. По полученным данным построить характеристики $I_B = f(U_3)$ при $U_K = \text{const}$.
15. Пользуясь полученными графиками, определить входное сопротивление и коэффициент усиления по напряжению по формулам (17), (18) и **рис.7**.
16. Студенты ЭТФ вычисляют параметры для схем с общей базой и коллектором по формулам (7) и (8).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое полупроводники?
2. Каков принцип действия транзистора?
3. Что называется параметрами транзистора и как они определяются?
4. Зависят ли параметры транзистора от способа его включения? Почему?
5. Почему кривая I_{K2} проходит выше кривой I_{K1} ?
6. Почему кривая I_{B2} проходит ниже кривой I_{B1} ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Яворский В.М., Дятлаф А.А., Милковская Л.Б. Курс физики, т.2. – 1966. – с.394-397.
2. Савельев И.В., Курс общей физики, т.2. – 1968. – с.221-227.
3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики, т.2. – 1972. – с.184-186.