

Лабораторная работа № 2.

Исследование статических характеристик полупроводниковых приборов

Цель работы – изучение принципа действия полупроводниковых диодов, биполярных и полевых транзисторов; освоение методики получения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов и расчёта их основных параметров.

2.1. Краткие теоретические сведения

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области контакта граничащих друг с другом областей полупроводника. При этом в основном используют структуры: полупроводник–полупроводник, металл–полупроводник, металл–диэлектрик–полупроводник. Носителями заряда в полупроводниках являются электроны и дырки. В чистом полупроводнике их концентрация одинакова. Такой полупроводник обладает *собственной электропроводностью*.

Введением соответствующих примесей можно увеличить количество свободных электронов или дырок и получить полупроводник с электронной (*n*-типа) или дырочной (*p*-типа) проводимостью. Области указанных типов могут быть созданы в одном кристалле полупроводника. Граница между *p*- и *n*-областями называется электронно-дырочным переходом либо, кратко, *p–n*-переходом. Различные полупроводниковые приборы получают созданием в кристалле определённого числа *p–n*-переходов. При этом свойства и характеристики приборов зависят от количества, порядка чередования и размеров *p*- и *n*-областей, а также концентрации примесей в них.

Полупроводниковый диод

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним *p–n*-переходом, имеющий два вывода. На рисунке 2.1 показаны структура и условное графическое обозначение (УГО) диода. Вывод от *p*-области называется *анодом*, а вывод от *n*-области *катодом*. В процессе работы к диоду может прикладываться напряжение как в прямом, так и в обратном направлении. При *прямом* включении внешнее напряжение прикладывается плюсом к аноду, при *обратном* – плюсом к катоду.

Вольт-амперной характеристикой (ВАХ) называют зависимость тока от напряжения $I = f(U)$ (или зависимость напряжения от тока $U = f(I)$). Типичная ВАХ диода представлена на рисунке 2.2. Прямая и обратная ветви характеристики соответствуют прямому и обратному включению диода. Как видно из приведённой ВАХ обратный ток диода $I_{\text{обр}}$ очень мал, в то время как прямой ток $I_{\text{пр}}$ резко возрастает при незначительном увеличении напряжения, т.е. диод проводит ток преимущественно в одном направлении. Напряжение на диоде при прямом включении $U_{\text{пр}}$ для кремниевых диодов составляет примерно 1 В, для германиевых – 0,5 В. Низкая обратная проводимость сохраняется в широком диапазоне изменения обратного напряжения $U_{\text{обр}}$. При некотором значении $U_{\text{обр}} = U_{\text{проб}}$ происходит электрический пробой *p–n*-перехода, и он те-

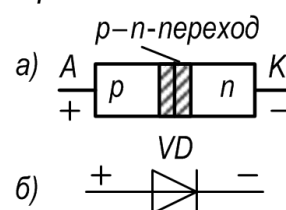


Рисунок 2.1.
Структура (а)
и УГО (б) диода

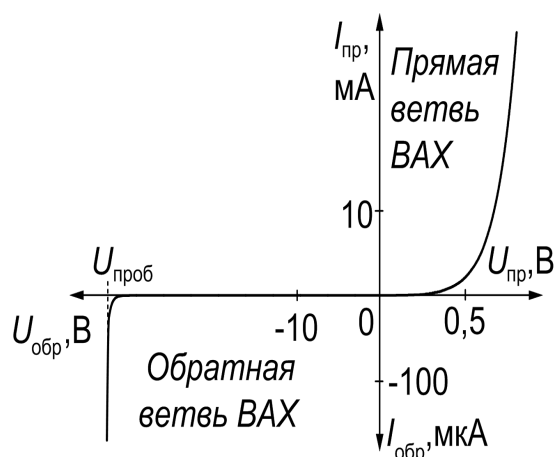


Рисунок 2.2. ВАХ полупроводникового диода

ряет свои запирающие свойства (участок обратной ветви ВАХ, резко уходящий вниз). Рабочий участок обратной ветви ограничивается напряжением $U_{\text{ОБР}} \approx 0,8 U_{\text{ПРОБ}}$, зависящем от типа диода.

Свойства полупроводниковых диодов оценивают рядом параметров. Различают общие параметры, которыми характеризуется любой полупроводниковый диод, и специальные параметры, присущие только отдельным типам диодов.

К общим параметрам диодов относятся:

- допустимая температура перехода $T_{\text{ПЕР. max}}$ (максимальная температура, при которой не возникает тепловой пробой $p-n$ -перехода);
- допустимая мощность, рассеиваемая диодом, $P_{\text{ДОП. max}}$ и
- допустимый прямой ток $I_{\text{ПР. max}}$ (мощность и ток, при которых температура $p-n$ -перехода достигает значения $T_{\text{ПЕР. max}}$);
- допустимое обратное напряжение $U_{\text{ОБР. max}}$ (напряжение, при котором исключается возможность теплового пробоя $p-n$ -перехода);
- прямое сопротивление диода постоянному току (статическое)

$$R_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР}}}; \quad (2.1)$$

- прямое дифференциальное сопротивление (сопротивление переменному току)

$$r_{\text{ПР}} = \left. \frac{dU_{\text{ПР}}}{dI_{\text{ПР}}} \right|_{I_{\text{ПР}}-\text{задан}} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ПР}}}{\Delta I_{\text{ПР}}} \right|_{I_{\text{ПР}}-\text{задан}}; \quad (2.2)$$

- обратные статическое $R_{\text{ОБР}}$ и дифференциальное $r_{\text{ОБР}}$ сопротивления.

Приближённые значения $R_{\text{ПР}}$ и $r_{\text{ПР}}$ можно определить графоаналитическим методом по ВАХ следующим образом. В заданной точке ВАХ (рис. 2.3), например т. A с координатами ($U_{\text{ПР}} = 700 \text{ мВ}$; $I_{\text{ПР}} = 6 \text{ мА}$), проводят касательную BB' , и определяют значения ΔU и ΔI (соответственно BC и $B'C$). Можно считать, что точка пересечения касательной с осью напряжений (т. B) примерно соответствует напряжению открытия диода $U_{\text{ДО}}$. По формулам (2.1) и (2.2) соответственно можно найти:

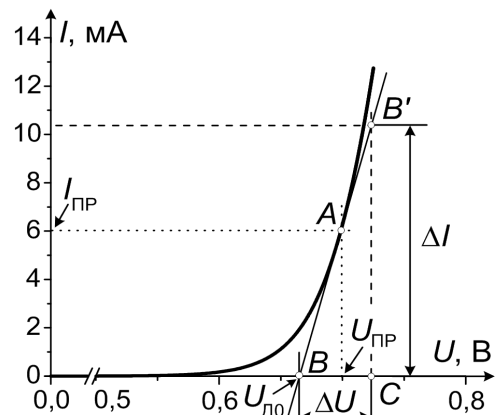


Рисунок 2.3. К определению статического и динамического сопротивлений диода

$$R_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР}}} = \frac{700 \text{ мВ}}{6 \text{ мА}} \approx 170 \text{ Ом}; \quad r_{\text{ПР}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{BC}{B'C} = \frac{(725 - 665) \text{ мВ}}{(10,4 - 0) \text{ мА}} \approx 6 \text{ Ом}. \quad (2.3)$$

Аналогично для обратной ветви ВАХ можно определить значения $R_{\text{ОБР}}$ и $r_{\text{ОБР}}$.

Классификация полупроводниковых диодов осуществляется по ряду признаков, важнейшими из которых являются вид исходного полупроводникового материала и назначение. В зависимости от типа исходного материала различают германиевые, кремниевые, селеновые диоды и другие. По назначению диоды делятся на выпрямительные, высокочастотные и сверхвысокочастотные (ВЧ и СВЧ-диоды), импульсные, стабилитроны, туннельные, варикапы и другие.

Диоды применяются в качестве дискретных компонентов линейных электронных схем для выпрямления переменного тока (в источниках питания и других функциональных узлах), ограничителей напряжения, смесителей, модуляторов (умножителей), параметрических приборов (стабилизаторов, в схемах температурной компенсации и т.п.), преобразователей оптического излучения в электрический ток и наоборот. В цифровой технике диоды применяются для реализации логических функций, схем смещения и фиксации уровней напряжения. Возможны и другие специальные применения.

Диоды являются нелинейными элементами, поэтому при анализе схем с диодами необходимо учитывать нелинейность их вольт-амперных характеристик.

Расчёт схем на диодах

Рассмотрим схему (рис. 2.4, а), в которой диод (нелинейный элемент) соединён с произвольной цепью, содержащей лишь резистивные элементы и источники электрической энергии. Линейную часть этой цепи можно заменить эквивалентным генератором напряжения (рис. 2.4, б). Очевидно, что как только будут найдены напряжение U_{VD} и ток I_{VD} , токи и напряжения в линейной части цепи можно будет определить обычным путём, поскольку токи и напряжения в ней связаны только линейными уравнениями.

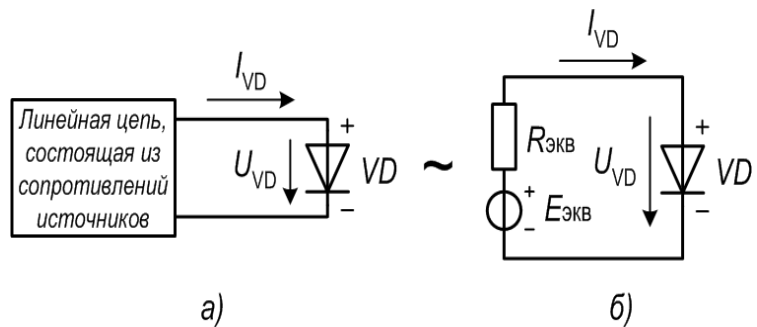


Рисунок 2.4. Общая нелинейная цепь (а) и линейная цепь (б), представленная в виде эквивалентного генератора напряжения

Для нахождения напряжения U_{VD} и тока I_{VD} воспользуемся законом Ома:

$$I_{VD} = \frac{E_{\text{ЭКВ}} - U_{VD}}{R_{\text{ЭКВ}}} . \quad (2.4)$$

Как известно, зависимость прямого тока $I_{\text{ПП}}$ в полупроводниковом диоде от приложенного к нему напряжения $U_{\text{ПП}}$ можно представить в виде:

$$I_{\text{ПП}} = I_S \left(e^{\frac{U_{\text{ПП}} - I_{\text{ПП}} r'_B}{m \varphi_T}} - 1 \right), \quad (2.5)$$

где I_S – ток насыщения диода; φ_T – тепловой потенциал; m – параметр, учитывающий влияние токов утечки, канальных токов и токов рекомбинации-генерации. Из последнего уравнения можно получить зависимость напряжения $U_{\text{ПП}}$ от прямого тока $I_{\text{ПП}}$:

$$U_{\text{ПП}} = m \varphi_T \ln \left(1 + \frac{I_{\text{ПП}}}{I_S} \right) + I_{\text{ПП}} r'_B . \quad (2.6)$$

С учётом выражения (2.6) уравнение (2.4) примет вид:

$$I_{VD} = \frac{E_{\text{ЭКВ}} - m \varphi_T \ln \left(1 + \frac{I_{\text{ПП}}}{I_S} \right) - I_{\text{ПП}} r'_B}{R_{\text{ЭКВ}}} . \quad (2.7)$$

Полученное уравнение является нелинейным и обычными алгебраическими методами не решается. Поэтому на практике чаще всего используют либо графический метод, либо графоаналитический.

Графический метод

Этот метод основан на непосредственном использовании вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода, заданной в графическом виде. Анализируемая схема представлена на рис. 2.4, б, а ВАХ диода на рис. 2.5. При использовании графического метода строится *линия нагрузки*, или *нагрузочная прямая*, характеризующая зависимость тока от напряжения для сопротивления $R_{\text{ЭКВ}}$. Эта прямая строится по двум точкам, соответствующим режимам холостого хода ($U_{VD} = U_{XX} = E_{\text{ЭКВ}}; I_{VD} = 0$) и короткого замыкания (т.е. $U_{VD} = 0$, а $I_{VD} = I_{КЗ} = U_{XX}/R_{\text{ЭКВ}}$). Из рис. 2.5 видно, что существует только одна точка, где ВАХ диода и линия нагрузки пересекаются. Эта точка, называемая *рабочей точкой*, и является решением уравнения в графическом виде.

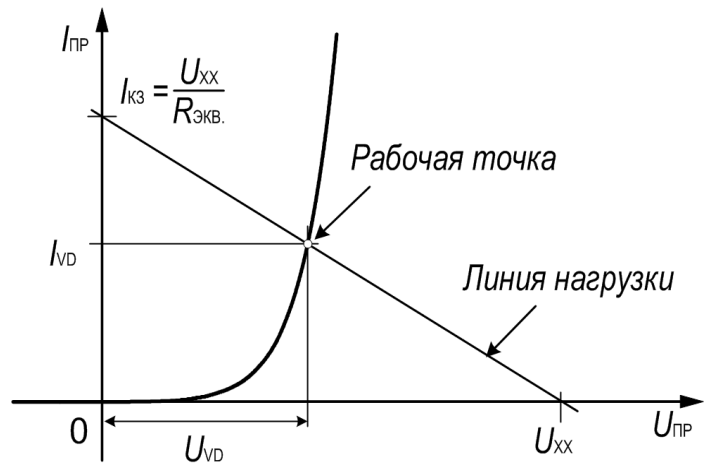


Рисунок 2.5. Графическое решение для нелинейной цепи

Графический метод наиболее пригоден, когда в схеме имеется только один диод.

Графоаналитический метод

При графоаналитическом методе используется кусочно-линейная аппроксимация ВАХ диода (рис. 2.6). В этом случае диод при прямом смещении можно заменить эквивалентной моделью, состоящую из последовательно соединённых идеального источника ЭДС (U_{D0}) и сопротивления $r_{\text{ПР}}$. Данная эквивалентная модель представлена на рис. 2.7 (вверху справа). На рисунке указаны направление протекания прямого тока $I_{\text{ПР}}$,

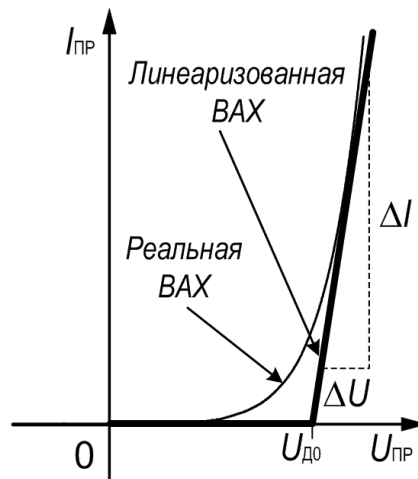


Рисунок 2.6. Линеаризованная ВАХ диода

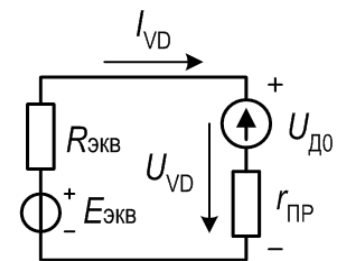
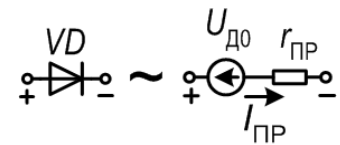


Рисунок 2.7. Эквивалентная модель диода

U_{D0} — напряжение открытия диода, определяемое по ВАХ соответствующего диода (см. рис. 2.6 и 2.3); прямое дифференциальное сопротивление диода $r_{\text{ПР}}$ находят по (2.2). В этом случае зависимость напряжения $U_{\text{ПР}}$ от прямого тока $I_{\text{ПР}}$ представляется в виде

$$U_{\text{ПР}} = U_{D0} + I_{\text{ПР}} r_{\text{ПР}}, \quad (2.8)$$

а схема (рис. 2.4) примет вид, показанный на рисунке 2.7(внизу). Тогда с учётом выражения (2.8) уравнение (2.4) примет вид

$$I_{VD} = \frac{E_{\text{ЭКВ}} - U_{D0}}{R_{\text{ЭКВ}} + r_{\text{ПР}}}. \quad (2.9)$$

Транзисторы

Транзистор – электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, пригодный для усиления мощности и имеющий три или более выводов. Действие транзисторов основано на управлении движением носителей электрических зарядов в полупроводниковом кристалле.

Транзисторы классифицируют по характеру переноса носителей заряда, по числу и порядку чередования областей $p-n$ -переходов, по мощности и т. д.

По характеру переноса носителей заряда различают транзисторы *биполярные* и *полевые*. В биполярных транзисторах физические процессы определяются движением носителей заряда обоих знаков, которые для отдельных областей могут являться неосновными, а в полевых транзисторах – движением основных носителей заряда одного знака.

Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор (БТ) – полупроводниковый прибор содержащий три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости, разделённые двумя взаимодействующим $p-n$ -переходами. В зависимости от порядка чередования областей различают транзисторы типа $p-n-p$ или $n-p-n$. Структура кристалла и УГО

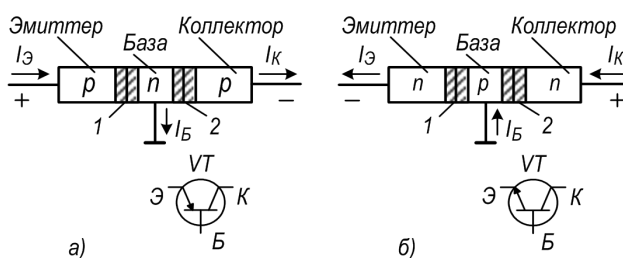


Рисунок 2.8. Структура биполярных транзисторов и их УГО (внизу):
а) $p-n-p$ -типа; б) $n-p-n$ -типа

данных типов транзисторов представлены на рис. 2.8. Среднюю область кристалла называют *базой* (Б), одну крайнюю область – *эмиттером* (Э), а другую *коллектором* (К). Соответственно один переход называется *эмиттерным* (1) другой – *коллекторным* (2). Часть базы, находящаяся между запирающими слоями переходов называется активной.

В большинстве выпускаемых биполярных транзисторов площадь коллекторного перехода больше площади эмиттерного, концентрация основных носителей в эмиттере значительно превышает концентрацию основных носителей в базе. Ширина активной области базы выполняется меньшей диффузионной длины неосновных носителей в базе, чтобы они могли диффундировать через базу из эмиттера в коллектор.

Поскольку БТ включают во входную и выходную цепи с помощью трёх выводов (электродов), то один электрод должен быть общим для обеих цепей. Соответственно различают схемы с *общей базой* (ОБ), с *общим эмиттером* (ОЭ), с *общим коллектором* (ОК), которые приведены на рис. 2.9.

В зависимости от полярности и величины напряжений во входной и выходной цепях возможны следующие режимы работы БТ:

отсечки – напряжения на обоих переходах обратные (транзистор закрыт);

насыщения – напряжения на обоих переходах прямые (транзистор открыт);

активный – напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном – обратное (транзистор открыт);

инверсный – напряжение на коллекторном переходе прямое, а на эмиттерном – обратное (транзистор открыт).

На рисунке 2.9 полярность электродов указана для активного режима.

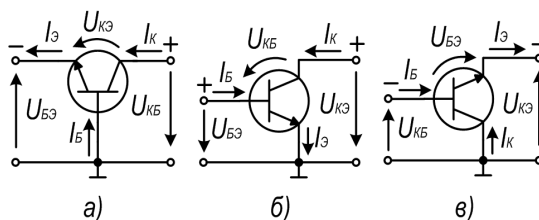


Рисунок 2.9. Схемы включения БТ
а) ОБ; б) ОЭ; в) ОК

Рассмотрим принцип работы транзистора $p-n-p$ -типа в активном режиме. Под действием внешних напряжений эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. При этом в цепи эмиттера возникает ток – дырки инжектируются в базовую область. Поскольку ширина базы мала, а концентрация электронов в ней намного меньше количества инжектируемых дырок, то большая часть дырок путем диффузии попадает в область коллектора. В результате в цепи коллектора возникает ток. Небольшая часть дырок в области базы рекомбинирует с электронами. Восполнение рекомбинировавших электронов происходит за счёт тока в цепи базы. Увеличение напряжения и тока входной цепи приводит к увеличению инжекции дырок в базу и соответственно – выходного тока. Таким образом, с помощью входной цепи можно управлять током выходной цепи, обеспечивая функцию усиления сигнала.

Работа транзистора $n-p-n$ -типа происходит аналогичным образом. Отличие заключается только в том, что подключаемые внешние источники напряжения имеют противоположную полярность (см. рис. 2.8, б).

Статические характеристики биполярного транзистора – это графические зависимости между его напряжениями и токами. Для построения характеристик из четырех переменных две выражают как функции оставшихся. Это можно сделать шестью способами. Соответственно существует шесть систем функциональной связи (характеристик). Наиболее часто используется *система H -параметров*, в которой принято

$$\begin{cases} U_{\text{ВХ}} = f_1(I_{\text{ВХ}}; U_{\text{ВЫХ}}), \\ I_{\text{ВЫХ}} = f_2(I_{\text{ВХ}}; U_{\text{ВЫХ}}). \end{cases} \quad (2.10)$$

Из (2.10) в статическом режиме можно получить четыре семейства характеристик. Из них на практике обычно используются *входная* ($U_{\text{ВХ}} = f(I_{\text{ВХ}})|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}}$) и *выходная* ($I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}})|_{I_{\text{ВХ}} = \text{const}}$) вольт-амперные характеристики, которые однозначно определяют взаимосвязь между напряжениями и токами транзистора. Внешний вид характеристик зависит от схемы включения транзистора.

Транзистор при конкретной схеме включения может рассматриваться как активный нелинейный четырёхполюсник (рис. 2.10, а). На низких частотах его параметры имеют активный характер. При малых сигналах их можно считать линейными. В этом случае H -параметры переходят в h -параметры, и (2.10) преобразуется к системе линейных уравнений, описывающих изменения напряжений и токов транзистора:

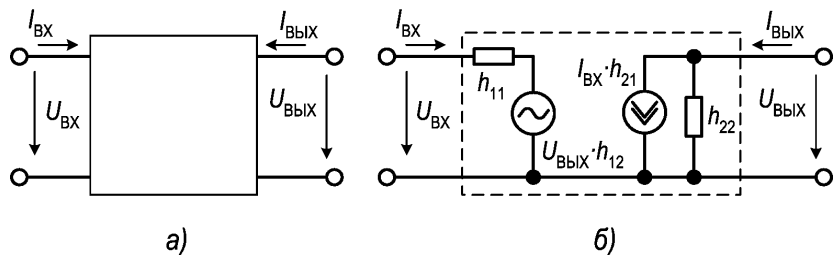


Рисунок 2.10. Четырёхполюсник (а) и малосигнальная эквивалентная схема БТ в h -параметрах (б)

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{ВХ}} = h_{11} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{12} \Delta U_{\text{ВЫХ}}; \\ \Delta I_{\text{ВЫХ}} = h_{21} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{22} \Delta U_{\text{ВЫХ}}, \end{cases} \quad (2.11)$$

где $h_{11} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}}$ – дифференциальное входное сопротивление; (2.11,а)

$h_{12} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}} = \text{const}}$ – коэффициент обратной передачи (связи) по напряжению; (2.11,б)

$$h_{21} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}} \quad - \text{коэффициент прямой передачи тока (усиление по току);} \quad (2.11, \text{в})$$

$$h_{22} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}} = \text{const}} \quad - \text{дифференциальная выходная проводимость.} \quad (2.11, \text{г})$$

Преимущество h -параметров состоит в удобстве их экспериментального определения в режимах, близких к режимам работы транзистора в практических схемах.

В соответствии с уравнениями (2.11) биполярный транзистор можно представить малосигнальной эквивалентной схемой, показанной на рис. 2.10, б. Эквивалентная схема транзистора в h -параметрах справедлива для любой схемы включения транзистора. Конкретные значения h -параметров зависят от схемы включения транзистора, т.е. от того, какие токи и напряжения являются входными и выходными, и обозначаются соответствующими индексами: «б» – для схемы с ОБ, «э» – с ОЭ, «к» – с ОК.

Значения h -параметров приводятся в справочниках, их также можно приближённо определить графоаналитическим методом по статическим характеристикам транзисторов. Для определения всех h -параметров необходимо иметь не менее двух характеристик каждого семейства (входных и выходных). Параметры рассчитываются по конечным приращениям вблизи рабочей точки транзистора.

В качестве примера рассмотрим определение h -параметров для транзистора, включённого по схеме с ОЭ с помощью представленных на рис. 2.11 соответствующих входных (а) и выходных (б) вольт-амперных характеристик.

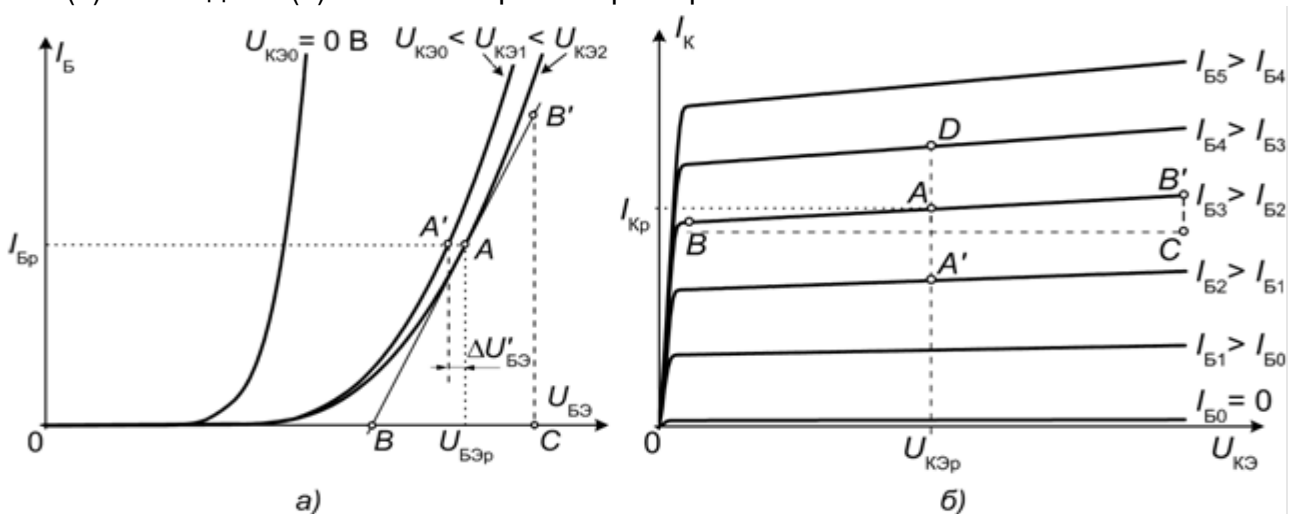


Рисунок 2.11. Статические характеристики биполярного транзистора:
а – входные, б – выходные

Для определения параметров $h_{11э}$ и $h_{12э}$ на семействе входных характеристик (рис.2.11, а) задаются рабочей точкой $A(I_{Bp}; U_{BEp})$, через которую проводят касательную BB' . Затем строят треугольник $CB'B'$, и в соответствии с (2.11,а) и (2.11,б) находят:

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{BC}{B'C}; \quad h_{12э} = \frac{\Delta U'_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \frac{AA'}{U_{CE2} - U_{CE1}}. \quad (2.12)$$

Следует отметить, что ввиду малости $\Delta U'_{BE}$ (< 1 мВ) определить его значение по входным ВАХ очень сложно, поэтому обычно параметр $h_{12э}$ во внимание не принимают.

Семейство выходных ВАХ (рис. 2.11, б) используют для определения параметров $h_{21э}$ и $h_{22э}$. Задавшись значениями тока I_{Kp} и напряжения U_{CEp} (рабочая точка A), прово-

дят касательную BB' (на рис. 2.11, б она совпадает с прямолинейным участком ВАХ, соответствующей входному току $I_{BX} = I_{B3}$), строят треугольник CBB' , и находят, используя соотношения (2.11,в), (2.11,г):

$$h_{113} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{A'D}{I_{B4} - I_{B2}}; \quad h_{123} = \frac{\Delta I'_K}{\Delta U_{KЭ}} = \frac{B'C}{BC}. \quad (2.13)$$

Рабочая точка на всех характеристиках должна соответствовать одним и тем же выбранным значениям тока и напряжения. В соответствии с этим требованием необходимо, чтобы $U_{KЭ2} = U_{KЭp}$; $I_{B3} = I_{Bp}$.

Аналогичным образом определяются h -параметры для схем с ОБ и ОК.

Полевые транзисторы

Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем (отсюда и название – *полевой*). Действие полевого транзистора обусловлено носителями заряда одной полярности, поэтому полевые транзисторы называют также *униполярными*.

По способу создания проводящего канала различают полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом, имеющие *объемный* канал, и со структурой металл – диэлектрик (окисел) – полупроводник (МДП- или МОП-транзисторы), имеющие *приповерхностный* канал (*встроенный* или *индуцированный*). В зависимости от электропроводности полупроводника проводящий канал может быть n -типа или p -типа.

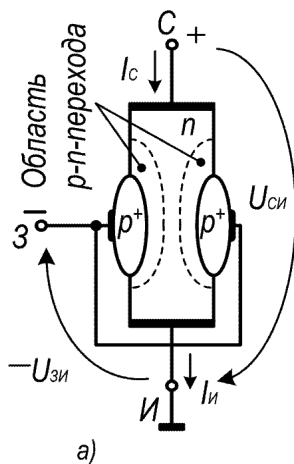


Рисунок 2.12. Структура (а) и УГО ПТУП с каналом n - (б) и p -типа (в)

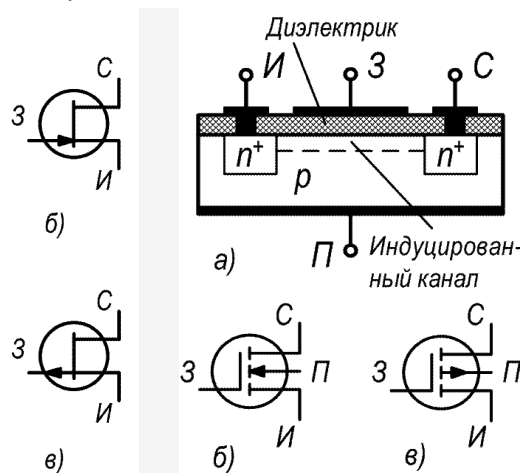


Рисунок 2.13. Структура (а) и УГО ПТИЗ с индуцированным каналом n - (б) и p -типа (в)

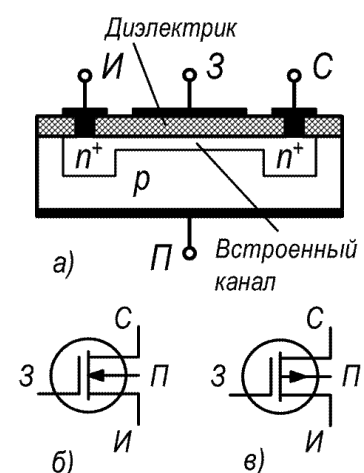


Рисунок 2.14. Структура (а) и УГО ПТИЗ со встроенным каналом n - (б) и p -типа (в)

Полевой транзистор с управляющим переходом (ПТУП) представляет собой пластину полупроводникового материала, в центральной части которого имеется область с проводимостью противоположной проводимости проводящего канала. Электрод, подключенный к этой области, называется *затвором* (З). Между затвором и проводящим каналом образуется $p-n$ -переход, обедненный слой которого расположен в основном в объеме проводящего канала, имеющего гораздо меньшую концентрацию примеси. На торцах проводящего канала расположены два электрода. Электрод, от которого начинают движение основные носители заряда в канале, называют *истоком* (И), а электрод, к которому движутся основные носители заряда, называют *стоком* (С). На рисунке 2.12 показаны структура ПТУП с проводящим каналом n -типа и условные обозначения ПТУП

с проводящими каналами разных типов.

В основе работы ПТУП лежит изменение площади поперечного сечения проводящего канала при подаче на $p-n$ -переход управляющего напряжения ($U_{зи}$), смещающего его в обратном направлении. На рис. 2.12, а показаны полярности прикладываемых напряжений и направления токов соответствующие рабочему режиму работы транзистора. При $U_{зи} = 0$ и $U_{си} \neq 0$ через проводящий канал протекает ток стока, называемый начальным: $I_{с нач.}$. При увеличении обратного напряжения $U_{зи}$ увеличивается ширина $p-n$ -перехода и соответственно уменьшается площадь поперечного сечения проводящего канала. Уменьшение площади поперечного сечения проводящего канала влечёт увеличение его сопротивления, что приводит к уменьшению тока стока I_c при неизменном и отличном нуля напряжении между стоком и истоком $U_{си}$. В цепи затвора при этом протекает малый обратный ток (входное сопротивление до $10^7 \dots 10^9$ Ом). При некотором обратном напряжении, называемом *напряжением отсечки* ($U_{зи отс.}$) канал может быть полностью перекрыт, и в цепях стока и истока начнут протекать малые обратные токи. При напряжении $U_{зи} = 0$, площадь поперечного сечения проводящего канала максимальна, а его сопротивление минимально. Прямое напряжение на $p-n$ -переход не подают, так как в этом случае теряется возможность управления током стока, появляется входной ток, что приводит к значительному уменьшению входного сопротивления.

МОП-транзисторы. В МОП-транзисторах электрод затвора изолирован от канала слоем диэлектрика (обычно это окисел – SiO_2), поэтому эти транзисторы называют также *полевыми транзисторами с изолированным затвором (ПТИЗ)*. Благодаря такой структуре входное сопротивление ПТИЗ достигает $10^{12} \dots 10^{15}$ Ом. Различают две разновидности ПТИЗ – с *индуцированным* (наведённым полем) и со *встроенным* каналом.

ПТИЗ с индуцированным каналом n -типа (рис. 2.13, а) содержит две сильно легированные n^+ -области истока (И) и стока (С), созданные в исходной полупроводниковой пластине кремния p -типа, которая называется подложкой (П). Поверхность подложки покрыта слоем диэлектрика, поверх которого нанесена тонкая металлическая плёнка (обычно из алюминия), служащая затвором (З).

Так как высоколегированные n^+ -области истока и стока с полупроводником подложки p -типа образуют $p-n$ -переходы, то при любой полярности напряжения сток – исток один из этих переходов оказывается включенным в обратном направлении и препятствует протеканию тока канала, следовательно, между истоком и стоком отсутствует токопроводящий канал. При подаче на затвор положительного относительно истока напряжения к поверхности полупроводника притягиваются дополнительные электроны а дырки выталкиваются из этой области – подзатворная область *обогащается* электронами. При некотором положительном *пороговом напряжении* на затворе относительно истока ($U_{зи пор.} > 0$) в приповерхностной области подложки p -типа образуется (*индуцируется*) слой с инверсным типом проводимости (на рис. 2.13, а показан штриховой линией). Это слой соединяет n^+ -области истока и стока и формирует между ними токопроводящий канал n -типа.

ПТИЗ со встроенным каналом конструктивно отличается от транзистора с индуцированным каналом тем, что канал формируется на этапе изготовления транзистора путём легирования транзистора. На рис. 2.14, а показана структура ПТИЗ с каналом n -типа. По

принципу действия этот транзистор аналогичен ПТИЗ с индуцированным каналом. Однако, ввиду наличия проводящего канала через транзистор будет протекать ток $I_{C \text{ нач.}}$ даже при нулевой разности потенциалов между истоком и затвором. При отрицательном напряжении между истоком и затвором ($U_{ЗИ} < 0$) поле затвора выталкивает электроны из канала в подложку p -типа. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается и ток стока уменьшается. Такой режим называют *режимом обеднения*. Если на затвор подано напряжение $U_{ЗИ} > 0$, то подзатворная область *обогащается* электронами и ток стока увеличивается.

Подобно биполярным транзисторам полевой транзистор можно включить по одной из трёх схем: с общим истоком (ОИ – аналогична схеме с ОЭ), с общим стоком (ОС – аналогична схеме с ОК) и общим затвором (ОЗ – аналогична схеме с ОБ). Последняя схема (ОЗ) в усилительных устройствах практически не используется ввиду малости входного сопротивления и отсутствия усиления тока. Наибольшее усиление мощности обеспечивает схема с ОИ. Схема с ОС обладает повышенным входным сопротивлением и чаще всего применяется в качестве буферного каскада.

Статические вольт-амперные характеристики полевого транзистора.

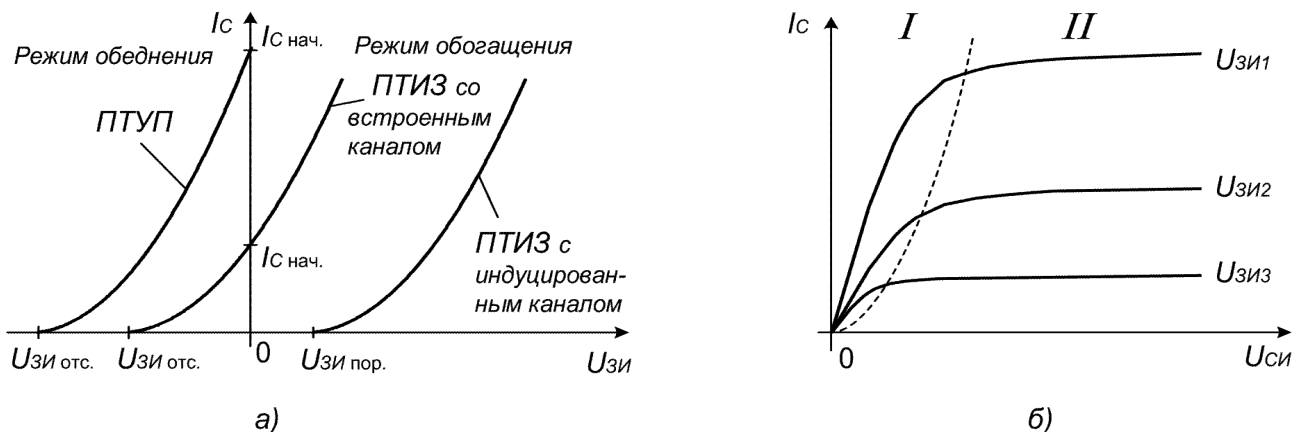


Рисунок 2.15. Стоко-затворная (а) и выходные (б) характеристики ПТ различных типов с каналом n -типа

Для анализа работы полевых транзисторов используют следующие характеристики:

- *стоко-затворные* – зависимость выходного тока (I_C) от входного напряжения ($U_{ЗИ}$) при заданном напряжении между стоком и истоком: $I_C = f(U_{ЗИ})|_{U_{СИ} = \text{const}}$;
- *выходные* – зависимость выходного тока (I_C) от выходного напряжения ($U_{СИ}$) при заданном напряжении между затвором и истоком: $I_C = f(U_{СИ})|_{U_{ЗИ} = \text{const}}$.

На рисунке 2.15 приведены вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с различными структурами с проводящим каналом n -типа. Из рисунка 2.15, а видно, что ПТУП может работать только в режиме обеднения проводящего канала носителями заряда, ПТИЗ с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения, а ПТИЗ со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения. Выходные ВАХ (рис. 2.15, б) полевых транзисторов различных типов по форме подобны. Отличие состоит в следующем:

- для ПТУП $U_{ЗИ1} = 0$, а $U_{ЗИ3} = U_{ЗИ \text{ отс.}} < 0$;
- для ПТИЗ со встроенным каналом $U_{ЗИ1} > 0$, $U_{ЗИ2} = 0$, $U_{ЗИ3} = U_{ЗИ \text{ отс.}} < 0$;
- для ПТИЗ с индуцированным каналом $U_{ЗИ3} = U_{ЗИ \text{ пор.}} > 0$, $U_{ЗИ1} > U_{ЗИ2} > U_{ЗИ3}$.

В выходных ВАХ (рис. 2.15, б) можно выделить две рабочие области слева (*I*) и справа (*II*) от штриховой линии. Область *I* называют крутой областью характеристики; область *II* – пологой, или областью насыщения. В крутой области транзистор может быть использован как омическое управляемое напряжением сопротивление. В усилительных каскадах транзистор работает на пологом участке характеристики.

К основным параметрам полевых транзисторов относят:

- крутизну характеристики, характеризующую управляющее действие затвора:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}} ; \quad (2.14)$$

- дифференциальное сопротивление проводящего канала полевого транзистора:

$$r_{СИ} = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}} ; \quad (2.15)$$

- коэффициент усиления, характеризующий усилительные свойства ПТ:

$$\mu = - \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} \right|_{I_C = \text{const}} , \quad (2.16)$$

который связан с крутизной характеристики и дифференциальным сопротивлением проводящего канала полевого транзистора соотношением

$$\mu = - S r_{СИ} . \quad (2.17)$$

Значения основных параметров полевых транзисторов приводятся в справочниках. В справочниках также приводят для ПТУП и ПТИЗ со встроенным каналом значения начального тока стока $I_{C \text{ нач.}}$ и напряжения отсечки $U_{ЗИ \text{ отс.}}$, для ПТИЗ с индуцированным каналом – значение порогового напряжения $U_{ЗИ \text{ пор.}}$.

Параметры полевого транзистора можно приближённо определить графоаналитическим методом по ВАХ. В этом случае их рассчитывают по конечным приращениям вблизи рабочей точки.

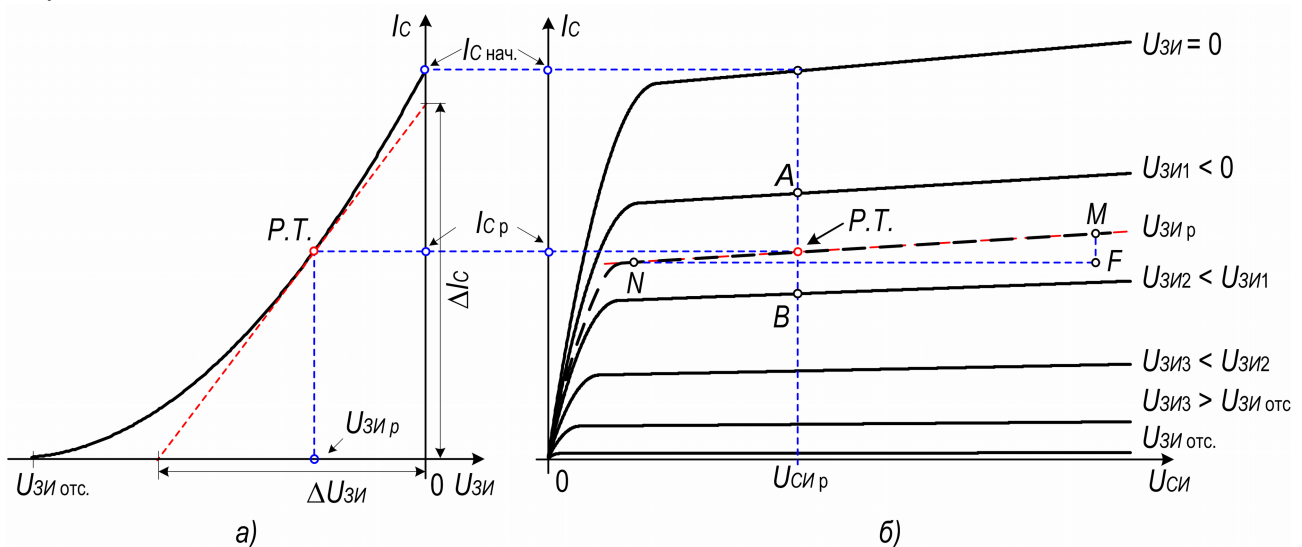


Рисунок 2.16. Стоко-затворная (а) и выходные (б) ВАХ ПТУП

Рассмотрим на примере ПТУП определение дифференциальных параметров с помощью вольт-амперных характеристик, приведённых на рисунке 2.16. Отметим на стоко-затворной ВАХ рабочую точку (P.T.) и проведём через неё касательную (на рис. 2.16, а

выделена красным цветом), которая отсечёт на оси напряжений отрезок $\Delta U_{\text{зи}}$, а на оси токов – отрезок $\Delta I_{\text{с}}$. Тогда, используя выражение (2.14), можно приближённо найти крутизну ПТУП в рабочей точке:

$$S \approx \frac{\Delta I_{\text{с}}}{\Delta U_{\text{зи}}}. \quad (2.18)$$

Крутизну можно определить также с помощью выходной ВАХ (рис. 2.16, б), если знаем значения токов стока в точках A и B , а также значения напряжений $U_{\text{зи1}}$ и $U_{\text{зи2}}$ (см. рис. 2.16, б):

$$S \approx \frac{I_A - I_B}{U_{\text{зи1}} - U_{\text{зи2}}}. \quad (2.19)$$

Крутизну можно определить, учитывая, что зависимость тока стока $I_{\text{с}}$ ПТУП от напряжения $U_{\text{зи}}$ достаточно хорошо описывается выражением

$$I_{\text{с}} = I_{\text{с нач.}} \left(1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зи отс.}}} \right)^2, \quad (2.20)$$

где $I_{\text{с нач.}}$ – начальный ток стока при $U_{\text{зи}} = 0$; $U_{\text{зи отс.}}$ – напряжение запирания транзистора. Дифференцируя (2.20) в соответствии с (2.14), получаем

$$S = \frac{2 I_{\text{с нач.}}}{|U_{\text{зи отс.}}|} \left(1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зи отс.}}} \right) \quad (2.21)$$

Дифференциальное сопротивление проводящего канала полевого транзистора $r_{\text{си}}$ определяют по выходным ВАХ. Для этого к ветви выходной ВАХ, соответствующей заданному напряжению $U_{\text{зи р.}}$, проводят касательную (на рис. 2.16, б – выделенная красным цветом прямая MN), строят прямоугольный треугольник (MNF) (см. рис. 2.16, б) и определяют разность напряжений $\Delta U_{\text{си}}$ (NF) и токов $\Delta I_{\text{с}}$ (MF), откуда с учётом (2.15)

$$r_{\text{си}} \approx \frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta I_{\text{с}}}. \quad (2.22)$$

2.2. Порядок выполнения работы

Задание 1: Получение прямой ветви вольт-амперной характеристики диода

а) собрать схему измерения в соответствии с рис.2.17; задать указанный преподавателем тип диода;

Необходимо соблюдать полярность подключения вольтметра **V** и амперметра **A**, отрицательные клеммы которых обозначены более широкой чёрной полосой и могут находиться на любой грани изображения компонента при его вращении.

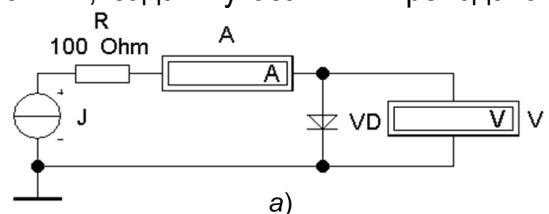


Рисунок 2.17. Схема для получения прямой ветви ВАХ диода

б) снять зависимость $I_{\text{пр}}(U_{\text{пр}})$ для прямой ветви характеристики, последовательно устанавливая значения тока источника $I_{\text{пр}} = (0; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10)$ мА и измеряя соответствующие значения напряжения $U_{\text{пр}}$; результаты свести в таблицу (для записи результатов и построения графиков удобно использовать *Microsoft Excel*);

- в) построить вольт-амперную характеристику диода $I_{\text{ПР}} = f(U_{\text{ПР}})$ (см. рис. 2.2);
 г) рассчитать прямые дифференциальное $r_{\text{ПР}}$ и статическое $R_{\text{ПР}}$ сопротивления диода в произвольных точках характеристики (см. рис. 2.3 и формулы (2.3)).

Задание 2: Расчёт схем на диодах

в предложенной преподавателем схеме определить напряжение U_{VD} на диоде VD и протекающий через него ток I_{VD} :

- а) графическим методом (см. рис. 2.5);
 б) используя эквивалентную схему диода (рис. 2.7) и выражение (2.9);
 в) сделать выводы.

Задание 3: Получение входных и выходных вольт-амперных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

- а) собрать схему для получения ВАХ биполярного транзистора (см. рис. 2.18) и задать указанный преподавателем тип исследуемого транзистора.

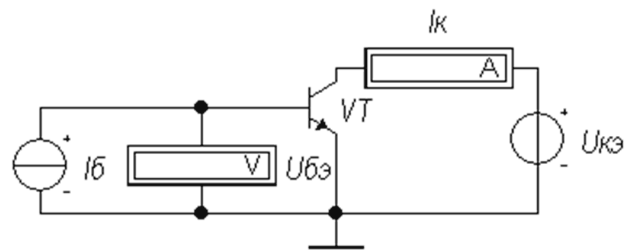


Рисунок 2.18. Схема для получения входных и выходных ВАХ биполярного транзистора

Обращайте внимание на полярность подключения источников тока (I_B) и напряжения ($U_{KЭ}$), вольтметра и амперметра.

- б) установить значение выходного напряжения $U_{KЭ} = 5\text{ В}$; последовательно изменяя значение входного тока $I_B = (0; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; \dots)$ мкА, измерять соответствующие значения входного напряжения U_{BE} ; результаты свести в таблицу;

Указание: I_B увеличивать до достижения значения выходного тока $I_K = (10 \dots 15)$ мА (согласовать с преподавателем).

- в) при трёх значениях входного тока I_B снять зависимости $I_K(U_{KЭ})|_{I_B = \text{const}}$; последовательно устанавливая выходного напряжения $U_{KЭ} = (0; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2; 5; 15)$ В, измерять соответствующие значения I_K ; результаты свести в таблицу;

Указание: зависимости $I_K(U_{KЭ})$ получить (по согласованию с преподавателем) при фиксированных значениях $I_B \approx (0,25; 0,50; 0,75) \times I_{B \text{ max}}$, где $I_{B \text{ max}}$ – максимальное значение установленного в предыдущем пункте тока базы.

- г) построить входные $I_B(U_{BE})|_{U_{KЭ} = \text{const}}$ и выходные $I_K(U_{KЭ})|_{I_B = \text{const}}$ ВАХ БТ; рассчитать h -параметры в произвольно выбранной рабочей точке (см. рис. 2.11 и (2.11 а-г)).

Задание 4: Получение статических вольт-амперных характеристик полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

- а) собрать схему (рис. 2.19) для получения статических ВАХ полевого транзистора, указанного преподавателем;

- б) установить значение выходного напряжения $U_{СИ} = (6 \dots 8)$ В; изменяя напряжение $U_{ЗИ}$, определить напряжение отсечки $U_{ЗИ \text{ отс.}}$, при котором ток стока уменьшится до $I_C < 1$ мкА; снять зависимость $I_C(U_{ЗИ})|_{U_{СИ} = \text{const}}$, измеряя значения тока стока I_C при изменении напряжения $U_{ЗИ}$ от $U_{ЗИ \text{ отс.}}$ до 0 В; результаты (8...10 измерений) свести в таблицу;

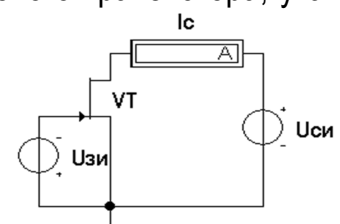


Рисунок 2.19. Схема для получения ВАХ ПТУП

- в) при трёх фиксированных значениях $U_{зи} \approx (0; 0,3; 0,6) \times U_{зи\text{отс}}$ (согласовать с преподавателем), снять зависимость $I_C(U_{СИ})|_{U_{зи} = \text{const}}$, последовательно устанавливая значения напряжения $U_{СИ} = (0; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2; 5; 15)\text{В}$ и измеряя соответствующие значения I_C ; результаты свести в таблицу;
- в) построить стоко-затворную $I_C(U_{зи})|_{U_{СИ} = \text{const}}$ и выходные $I_C(U_{СИ})|_{U_{зи} = \text{const}}$ ВАХ, с помощью которых в произвольно выбранной рабочей точке (см. рис. 2.15) определить крутизну S (2.18), дифференциальное сопротивление $r_{СИ}$ (2.22) и коэффициент усиления μ (2.17) полевого транзистора; рассчитать также крутизну S , используя формулы (2.19), (2.20), и сравнить с полученным ранее значением; сделать выводы.

2.3. Контрольные вопросы

1. Что такое $p-n$ -переход и какими основными свойствами он обладает?
2. Что собой представляет вольт-амперная характеристика диода.
3. Какие общие параметры и основные типы диодов?
4. Как учитывается в математической модели ВАХ неидеальность диода.
5. Какие эквивалентные модели диодов можно использовать при расчётах схем?
6. Что называют биполярным транзистором? Каков принцип его действия?
7. Чем различаются режимы работы биполярного транзистора?
8. Перечислите схемы включения биполярного транзисторов, укажите особенности использования этих схем?
9. Что собой представляют статические характеристики биполярных транзисторов?
10. Какой физический смысл имеют h -параметры биполярных транзисторов?
11. Как по вольт-амперным характеристикам определяются h -параметры БТ?
12. Что такое полевой транзистор?
13. Каков принцип действия полевых транзисторов разных типов?
14. Что собой представляют статические характеристики полевых транзисторов?
15. Как по вольт-амперным характеристикам определяются параметры ПТ?
16. Перечислите схемы включения биполярного и полевого транзисторов, укажите особенности использования этих схем?
17. Какие эквивалентные схемы биполярных и полевых транзисторов используют в режиме малого сигнала?