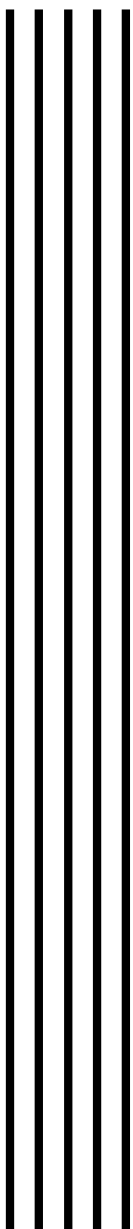


**Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический
университет**



**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по дисциплине
«КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА РЭА»
для студентов направления 6.050901 «Радиотехника»
дневной и заочной форм обучения**

**Севастополь
2009**



Лабораторный практикум по дисциплине «Компонентная база РЭА» для студентов направления 6.050901 «Радиотехника» дневной и заочной форм обучения / А.Д. Плоткин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. — 50 с.

Целью лабораторного практикума является оказание помощи студентам при выполнении и сдаче лабораторных работ по отдельным разделам дисциплины «Компонентная база РЭА», а также ознакомление с характеристиками диодов, транзисторов и методами определения их параметров.

Лабораторный практикум рассмотрен и утвержден на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций (протокол № 5 от 6 января 2009 г.).

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

Рецензент: кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Зиборов С.Р.

Ответственный за выпуск: заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций, доктор технических наук, профессор Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лабораторная работа № 1	
Исследование полупроводникового диода	5
2. Лабораторная работа № 2	
Исследование полупроводникового стабилитрона	12
3. Лабораторная работа № 3	
Исследование вольтамперных характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой.....	19
4. Лабораторная работа № 4	
Исследование вольтамперных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером	28
5. Лабораторная работа № 5	
Исследование статических характеристик полевого транзистора	34
6. Лабораторная работа № 6	
Исследование электронного ключа на биполярном транзисторе	41
Библиографический список	48
Приложение А Образец титульного листа.....	49

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехнические системы играют все возрастающую роль в жизни общества. Качественные показатели радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в значительной степени определяются параметрами элементной базы, т. е. характеристиками интегральных схем, полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, контактных устройств, фильтров и т. п.

Рабочая программа дисциплины «Компонентная база РЭА» (КБРЭА) построена таким образом, что основное внимание в лекционном курсе отводится принципам работы полупроводниковых приборов. Поэтому тематика лабораторных работ посвящена исследованию полупроводниковых приборов, которые являются основой как аналоговых, так и цифровых схем.

В ходе выполнения работ студенты знакомятся с принципами работы полупроводниковых приборов и методиками определения характеристик и параметров диодов, стабилитронов, биполярных и полевых транзисторов в различных режимах работы.

Лабораторные работы № 1, 2, 5, 6 являются двухчасовыми. Лабораторные работы № 3 и № 4, из-за большого объема экспериментов, являются трехчасовыми.

В основу лабораторного практикума положен фронтальный метод проведения работ. Суть фронтального метода заключается в том, что половина академической группы студентов (12...15 человек) разбивается на 6 бригад, каждая из которых выполняет одну и ту же лабораторную работу на разных макетах. Фронтальный метод позволяет синхронизировать теоретический (лекционный) материал с тематикой лабораторных работ, а также обсуждать полученные результаты с половиной академической группы одновременно. К достоинствам фронтального метода следует также отнести возможность предварительной подготовки студентов к лабораторным занятиям, так как тематика лабораторных занятий известна заранее.

Лабораторная установка состоит из базового блока с источником питания в который устанавливается лабораторный макет и блока измерительных приборов постоянного тока, который установлен на каждом рабочем месте. Макет соединяется с измерительными приборами с помощью перемычек.

Отчеты по лабораторным работам оформляются в соответствии с требованиями, изложенными в [1].

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

1.1. Цель работы

Целью работы является исследование характеристик полупроводникового диода.

1.2. Краткие теоретические сведения

В подавляющем большинстве практических использований полупроводников мы имеем дело с примесными полупроводниками, проводимость которых определяется характером примеси. Донорные примеси, способны легко отдавать свои электроны и создавать значительное преобладание числа электронов в зоне проводимости над дырками в заполненной зоне. Проводимость всего полупроводника с такими примесями является электронной (n -типа). Донорными к германию и кремнию являются пятивалентные примеси мышьяк и сурьма.

Акцепторные примеси, способны легко отбирать электрон из заполненной зоны и создавать значительное преобладание дырок в зоне проводимости. Проводимость всего полупроводника с такими примесями является дырочной (p -типа). Акцепторными для германия и кремния являются трехвалентные примеси индий и галлий.

Полупроводник, содержащий примеси, называется легированным, а процесс ввода этих примесей называется легированием.

Полупроводниковый диод представляет собой контактную систему из двух полупроводников с разными типами проводимости. В месте соприкосновения полупроводников с различными типами проводимости образуется выпрямляющий контакт, имеющий малое сопротивление в одном, направлении (прямой режим); имеющий высокое сопротивление другом (обратной режим). Этот выпрямляющий контакт называют электронно-дырочным переходом или p - n переходом.

Возникновение электронно-дырочного перехода объясняется следующим образом. В полупроводнике n -типа имеется большое количество свободных электронов, являющихся основными носителями заряда. В полупроводнике p -типа, наоборот, имеется большое количество свободных дырок, являющихся основными носителями и незначительное количество свободных электронов, являющихся неосновными носителями заряда.

Поэтому электроны будут стремиться проникнуть (диффундировать) в p -область, а дырки в n -область. Уходя в другую область, свободные заряды будут оставлять в своих областях ионизированные атомы примеси, жестко связанные с кристаллической решеткой. В результате, у границы раздела создаются два слоя противоположных по знаку неподвижных зарядов. Именно эта область кристалла и называется p - n переходом или запирающим слоем. Внутри p - n перехода возникает электрическое поле. Создается, так называемый, потенциальный барьер, препятствующий диффузии основных носителей из контактирующих полупроводников (рис.1.1, а).

Распределение потенциала в области p - n перехода показано на рис. 1.1, (а). Величина потенциального барьера (контактная разность потенциалов φ_k) определяется концентрациями и энергиями заряженных частиц в областях n и p

$$\varphi_k = \varphi_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2},$$

где $\varphi_T = \frac{kT}{e}$ — тепловой потенциал, который зависит только от температуры.

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура в градусах по шкале Кельвина;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона;

N_A и N_D — концентрации акцепторных и донорных примесей в дырочной и электронной областях p - n перехода соответственно;

n_i — концентрация ионизированных атомов собственного вещества.

При комнатной температуре $T_0 = 293$ К тепловой потенциал равен $\varphi_T \approx 26$ мВ.

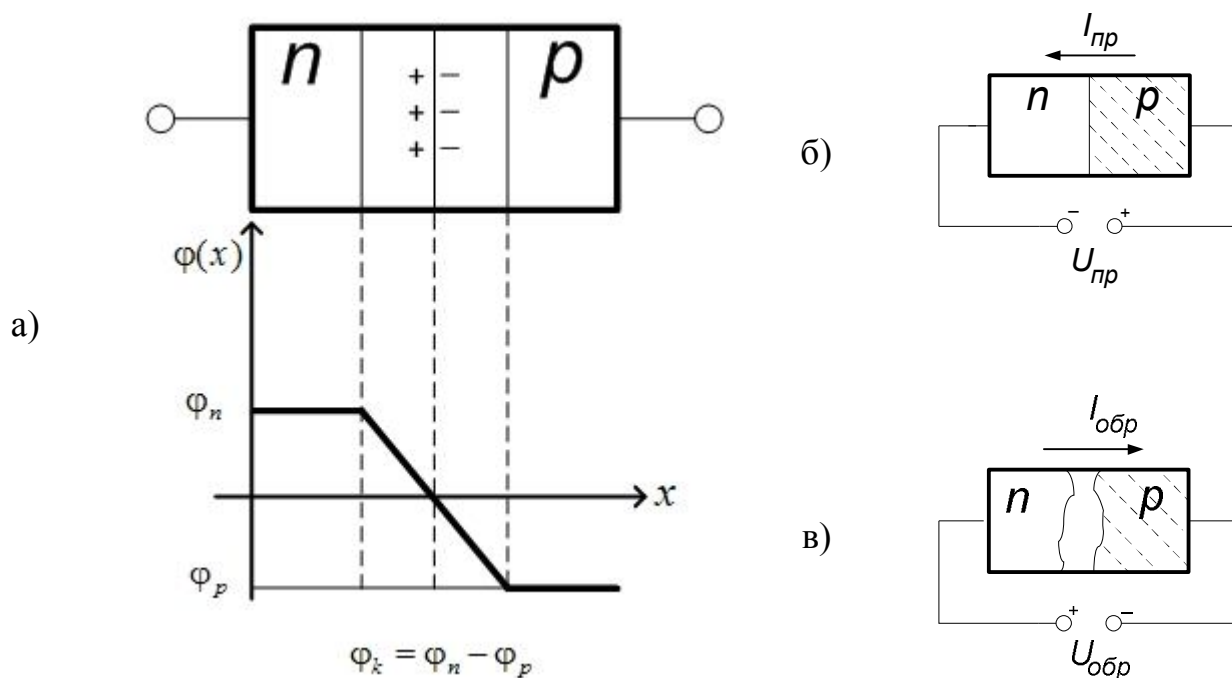


Рис. 1.1 — Распределение потенциала (а) в области p - n перехода при отсутствии внешнего поля; направление тока при прямом (б) и обратном (в) включении p - n перехода

В установившемся режиме электроны и дырки будут стремиться проникнуть в противоположные области. Однако, попав в p - n переход, они будут подвержены воздействию сил поля, которое будет их тормозить и возвращать в исходную область. Только отдельные основные носители, обладающие достаточ-

ной энергией, способны преодолевать действие сил поля и пройти через p - n переход в соседнюю область. Это приведет к появлению еще одного иона, к еще большему увеличению напряженности поля, (возрастанию потенциального барьера) к еще большему затруднению условий перехода для других зарядов.

Для неосновных носителей электрическое поле p - n перехода является не тормозящим, а ускоряющим. Поэтому любая дырка из n -полупроводника, попавшая в p - n переход, будет подхвачена полем и перенесена в правую область. То же самое происходит и с электроном, попавшим в p - n переход из p -области. Из-за этого происходит обеднение пограничного слоя полупроводников n и p основными носителями зарядов, вследствие чего такой слой обладает повышенным сопротивлением.

Контактная система из двух полупроводниковых областей (рис. 1.1, а) называется диодом, причем анодом называют p -область, а катодом — n -область. На электрических схемах диод обозначается двумя латинскими буквами “VD”. Изображение диода показано на рис.1.2.

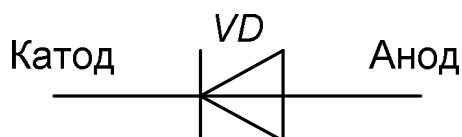


Рис. 1.2 — Изображение диода на принципиальной схеме

Если полупроводниковый диод присоединить к источнику напряжения так, что положительный потенциал источника приложен к p -области, т. е. к аноду диода, (рис. 1.1, б), то под действием электрического поля, появившегося в диоде, основные носители заряда в n -области и p -области будут перемещаться к плоскости контакта. При этом обедненная пограничная зона пополняется основными носителями заряда, а сопротивление и потенциальный барьер p - n перехода уменьшаются. В этом случае говорят, что диод включен в прямом направлении и через него течет прямой ток $I_{пр}$, величина которого определяется прямым напряжением $U_{пр}$ на диоде.

При включении диода по схеме рис. 1.1, в (положительный потенциал источника приложен к области n , т. е. к катоду), говорят, что диод включен в обратном направлении и на него подается обратное напряжение $U_{обр}$. При этом основные носители будут перемещаться от плоскости контакта к электродам диода, что приведет к расширению обедненной пограничной зоны, увеличению сопротивления и потенциального барьера p - n перехода. В результате основные носители не смогут участвовать в процессе образования тока диода, при этом через диод течет небольшой обратный ток $I_{обр}$, значение которого практически не зависит от обратного напряжения $U_{обр}$, приложенного к диоду.

Обратный ток диода обусловлен движением только неосновных носителей заряда, небольшая концентрация которых всегда имеет место в легированном

полупроводнике, если его температура не равна абсолютному нулю (-273°C). В технической литературе обратный ток диода называют также током насыщения.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) идеального p - n перехода описывается выражением

$$i(u) = I_{\text{обр}} \left[\exp\left(\frac{eu}{kT}\right) - 1 \right],$$

где $I_{\text{обр}}$ — обратный ток p - n перехода; u — напряжение, приложенное к p - n переходу.

На рис. 1.3 изображена типовая ВАХ полупроводникового диода $i(u)$ где i — ток через диод; u — напряжение, приложенное к диоду)

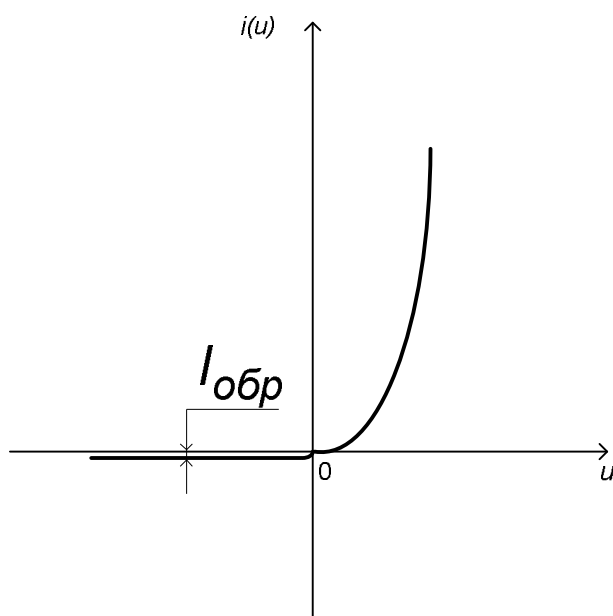


Рис. 1.3 — Вольтамперная характеристика полупроводникового диода

Из рисунка видно, что ВАХ диода состоит из двух ветвей, которые существенно отличаются одна от другой. Правая ветвь ВАХ соответствует прямому, а левая — обратному включению диода. Соответственно значения прямого тока $I_{\text{пр}}$, откладываемые по верхней полуоси тока в миллиамперах, намного превышают значения обратного тока $I_{\text{обр}}$, откладываемые по нижней полуоси тока в микроамперах.

В современной схемотехнике применяются как германиевые, так и кремниевые диоды. В настоящей работе исследуются характеристики германиевого диода Д2Б.

1.3. Задание на лабораторную работу

Изучить принципы построения и работы полупроводниковых диодов, методику измерения их ВАХ. Измерить ВАХ диода и определить по ней сопротивление и рассеиваемую мощность диода в различных точках характеристики.

1.4. Приборы и оборудование

Соединение элементов лабораторного макета между собой выполняются с помощью перемычек (см. рис. 1.4, 1.5).

В лабораторной работе для измерения напряжений и токов используются вольтметры V и миллиамперметр mA . В схеме измерения обратного тока диода дополнительно используется операционный усилитель с нормированным коэффициентом усиления равным 100.

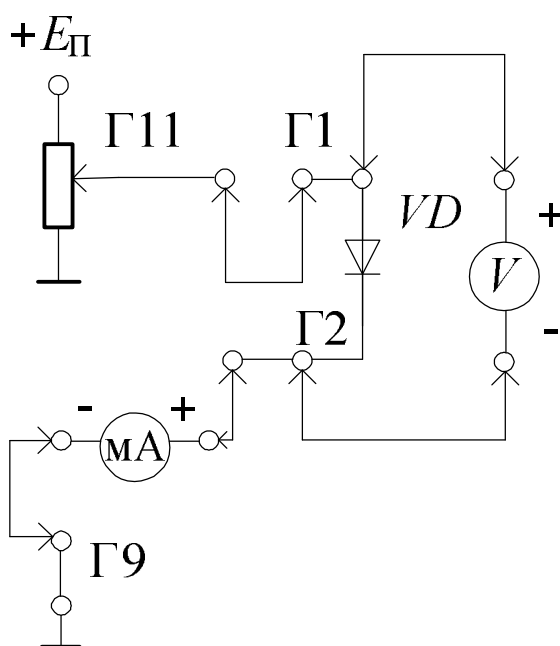


Рис. 1.4 — Схема включения диода в прямом направлении

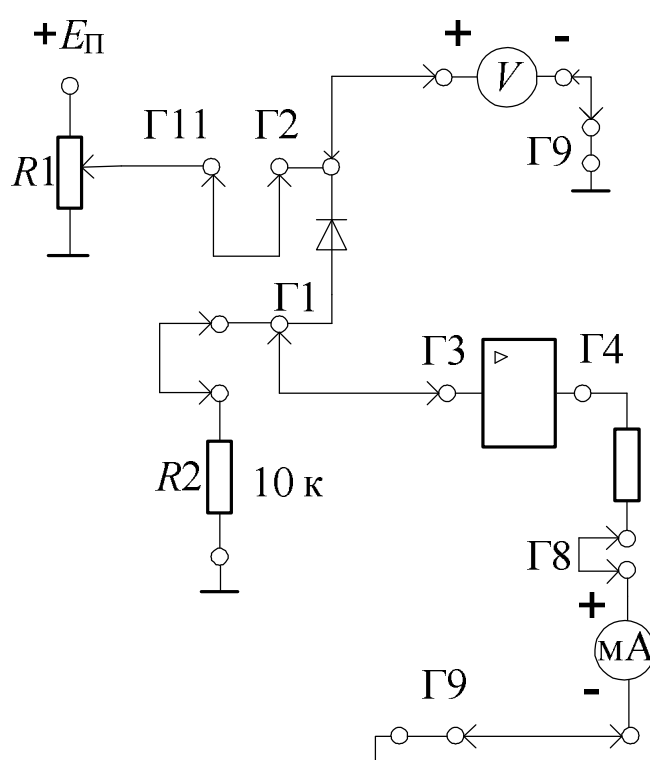


Рис. 1.5 — Схема включения диода в обратном направлении

При измерении ВАХ в макете используется миллиамперметр с пределом измерения 10 мА, вольтметры с пределами измерения 1 В (рис. 1.4) и 10 В (рис. 1.5).

1.5. Программа исследований

1.5.1. С помощью перемычек соберите испытательную схему, показанную на рис. 1.4.

1.5.2. Установите ручки всех потенциометров в крайнее левое положение. Перед включением макета проверьте правильность подключения источников питания и измерительных приборов. Собранный макет покажите преподавателю и получите разрешение на его включение.

1.5.3. Включите макет и установите напряжение на вольтметре базового блока 18...20 В.

1.5.4. Снимите зависимость $i(u)$ при включении диода в прямом направлении. Так как при изменении напряжения u , ток i изменяется по экспоненци-

альному закону, целесообразно задавать значение тока i в пределах от 1 до 10 мА с шагом 1 мА, а снимать и записывать в таблицу значения u . Результаты занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 — ВАХ диода в прямом включении

Эксперимент	u , В										
	i , мА										
Расчет	P , мВт										
	$R_{пр}$, Ом										

1.5.5. По окончании измерений выключите макет.

1.5.6. Используя перемычки, соберите испытательную схему, показанную на рис. 1.5, и выполните действия по п. п. 1.5.2, 1.5.3.

1.5.7. Снимите зависимость $i(u)$ при включении диода в обратном направлении. Так как ток i незначительно изменяется при изменении обратного напряжения, то целесообразно задавать значение напряжения u в пределах от 1 до 10 В с шагом 1 В. Поскольку в схеме использован усилитель тока с нормированным коэффициентом усиления 100, то показания миллиамперметра следует разделить на 100, затем перевести в микроамперы (умножив на 1000) и полученное значение занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 — ВАХ диода в обратном включении

Эксперимент	u , В										
	i , мкА										
Расчет	P , мВт										
	$R_{обр}$, кОм										

1.5.8. По окончании измерений выключите макет.

1.5.9. По данным таблиц 1.1 и 1.2 построить вольтамперную характеристику диода $i(u)$.

1.5.10. Рассчитать мощность, рассеиваемую на диоде $P = iu$, сопротивление диода постоянному току $R = \frac{u}{i}$, при прямом и обратном включении. Результаты расчета занести в таблицы 1.1 и 1.2.

1.5.11. Построить зависимости $P(i)$ для прямого включения, $R(u)$ — для прямого и обратного включений диода.

1.5.12. Рассчитать дифференциальное сопротивление диода в прямом включении R_i (сопротивление переменному току) в трех точках экспериментально измеренной ВАХ (на начальном участке, в середине и в окрестности максимального тока) прямой ВАХ

$$R_i = \frac{D\mu}{Di},$$

где $D\mu$ и Di — малые приращения напряжения и тока в окрестностях точки покоя.

Дифференциальное сопротивление диода можно также рассчитать по приближенной формуле

$$R_i \approx \frac{\varphi_T}{i},$$

где $\varphi_T \approx 26$ мВ, i — значение прямого тока в выбранной точке ВАХ.

1.5.13. Рассчитать коэффициент выпрямления для прямого и обратного напряжений $u = 0,7$ В, который равен отношению обратного сопротивления диода к прямому или прямого тока к обратному при равенстве модулей прямого и обратного напряжений:

$$K = \frac{R_{\text{обр}}}{R_{\text{пр}}} = \frac{i(0,7)}{i(-0,7)}.$$

1.6. Содержание отчета

1.6.1. Цель работы.

1.6.2. Схема лабораторного макета при включении диода в прямом направлении.

1.6.3. Схема лабораторного макета при включении диода в обратном направлении.

1.6.4. Результаты экспериментальных исследований и расчетов в виде таблиц и графиков.

1.6.5. Выводы по результатам экспериментальных исследований и расчетов.

1.7. Контрольные вопросы

1.7.1. Нарисуйте одну из конструкций полупроводникового диода.

1.7.2. Перечислите основные параметры диода.

1.7.3. Что представляет собой дифференциальное сопротивление диода?

1.7.4. Чем определяется ширина p - n перехода?

1.7.5. Чем определяется обратный ток диода?

1.7.6. Поясните физический смысл диффузионной емкости p - n перехода.

1.7.7. Чем определяется высота потенциального барьера p - n перехода?

1.7.8. Поясните физический смысл барьерной емкости p - n перехода.

1.7.9. Запишите выражение для ВАХ идеального p - n перехода.

1.7.10 Поясните физические процессы, происходящие в p - n переходе, при отсутствии приложенного напряжения, а также при наличии прямого и обратного напряжений.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СТАБИЛИТРОНА

2.1. Цель работы

Исследование характеристик полупроводникового стабилитрона.

2.2. Краткие теоретические сведения

Известно явление пробоя в обратном смещенном $p-n$ переходе. Характерной особенностью электрического пробоя являются то, что напряжение на переходе мало изменяется при значительных изменениях тока пробоя. Поэтому напряжение, при котором происходит пробой $p-n$ перехода, можно использовать в качестве напряжения стабилизации, если ток пробоя не превышает допустимого для диода уровня. Различают тепловой и электрический пробой $p-n$ перехода.

Тепловой пробой происходит следующим образом. При подаче на $p-n$ переход обратного напряжения достаточно большой величины из-за протекания обратного тока в области $p-n$ перехода выделяется мощность, что вызывает разогрев $p-n$ перехода. Повышению температуры $p-n$ перехода приводит к дальнейшему возрастанию обратного тока и, следовательно, к увеличению выделяемой мощности и еще большему увеличению температуры и тока $p-n$ перехода. Если обратный ток не ограничить внешним сопротивлением, то описанный процесс саморазогрева $p-n$ перехода может привести к его расплавлению и выходу диода из строя. Поэтому тепловой пробой является необратимым.

Поскольку при повышении температуры падение напряжения на $p-n$ переходе уменьшается, то при тепловом пробое ВАХ диода имеет S -образную форму. Описанный тепловой пробой характерен для германиевых диодов, поскольку ширина запрещенной зоны германия меньше чем у кремния.

Обычно тепловому пробую $p-n$ перехода предшествует электрический (лавинный или туннельный) пробой.

При **туннельном пробое** причиной увеличения обратного тока диода является разрушение сильным электрическим полем связей носителей заряда с атомами кристаллической решеткой. Сильные поля имеют место при высокой степени легирования (большой концентрации примесей) полупроводникового материала. Напряжение стабилизации при туннельном пробое составляет от 3,5 до 6 В.

Причиной **лавинного пробоя** является ударная ионизация, наблюдаемая в широких $p-n$ переходах, в которых носители заряда за время свободного пробега (время жизни носителя заряда) успеют набрать энергию, достаточную для разрыва их связи с атомами кристаллической решеткой. В результате, происходит лавинное размножение носителей заряда, которое характеризуется коэффициентом размножения

$$M = \frac{n_2}{n_1},$$

где n_1 — число носителей заряда поступающих в p - n переход;

n_2 — число носителей заряда вновь возникающих из-за ионизации за p - n переходом.

Зависимость коэффициента размножения носителей заряда от напряжения u на переходе определяется по формуле

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{u}{U_{\text{Л}}} \right)^k},$$

где $U_{\text{Л}} = ar^m$ — напряжение лавинного пробоя (напряжение стабилизации);

ρ — удельное сопротивление полупроводникового материала;

a, m, k — постоянные коэффициенты, значения которых зависят от типа p - n перехода, материала и концентрации примесей.

При стремлении напряжения u к $U_{\text{Л}}$ коэффициент M стремится к бесконечности, что вызывает электрический пробой p - n перехода.

Важной особенностью лавинного пробоя является высокий уровень так называемых шумов ударной ионизации, который становится весьма существенными при работе в предпробойном режиме, т. е. при обратном напряжении, немного меньшем напряжения пробоя.

Диоды, предназначенные для стабилизации напряжения, называются **стабилитронами** и характеризуются следующими параметрами:

- напряжение стабилизации $U_{\text{СТ}}$;
- дифференциальное сопротивление;
- статическое сопротивление;
- коэффициент качества;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН).

Напряжением стабилизации стабилитрона называется постоянное напряжение соответствующее электрическому пробую p - n перехода (см. ВАХ рис. 2.1).

Дифференциальное сопротивление стабилитрона в точке покоя ВАХ определяется по формуле

$$R_{\text{СТ}} = \left. \frac{du}{di} \right|_{u=U_{\text{СТ}}}.$$

Следует иметь в виду, что ток стабилизации стабилитрона представляет собой обратный ток диода в режиме пробоя p - n перехода.

Экспериментально дифференциальное сопротивление стабилитрона определяют на участке электрического пробоя по следующей приближенной формуле

$$R_{\text{ист}} \approx \left. \frac{Du}{Di} \right|_{u=U_{\text{ст}}}, \quad (2.1)$$

где Du и Di — приращения напряжения и тока стабилизации в окрестности рабочей точки соответственно.

Статическое сопротивление стабилитрона определяется соотношением

$$R_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст}}}.$$

Коэффициент качества стабилитрона определяют как отношение дифференциального сопротивления стабилитрона к статическому сопротивлению в заданной рабочей точке:

$$Q = \frac{R_{\text{ист}}}{R_{\text{ст}}}.$$

Температурный коэффициент напряжения (ТКН) стабилитрона Γ является количественной мерой относительного изменения напряжения стабилизации, вызываемого изменением температуры,

$$\Gamma = \frac{1}{U_{\text{ст}}} \frac{du}{dT}.$$

Знак ТКН (положительный или отрицательный) зависит от механизма пробоя. При лавинном пробое в относительно низкоомных материалах ТКН имеет положительное значение, поскольку напряжение пробоя растет с ростом температуры. Это обусловлено, уменьшением подвижности носителей заряда, что приводит к уменьшению их дрейфовой скорости. В результате, для ионизации атомов с повышением температуры возрастают и напряжённость поля, и обратное напряжение. При туннельном пробое ТКН является отрицательным, так как повышение температуры вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны, что приводит к возрастанию эффекта туннелирования носителей заряда и уменьшению напряжения пробоя с ростом температуры.

При обратном напряжении от 6 В до 8 В имеют место как туннельный, так и лавинный пробой. Если в области пробоя одновременно происходят оба пробоя (лавинный и туннельный), то ТКН каждого из них компенсируют друг друга, что дает возможность получить малое значение ТКН.

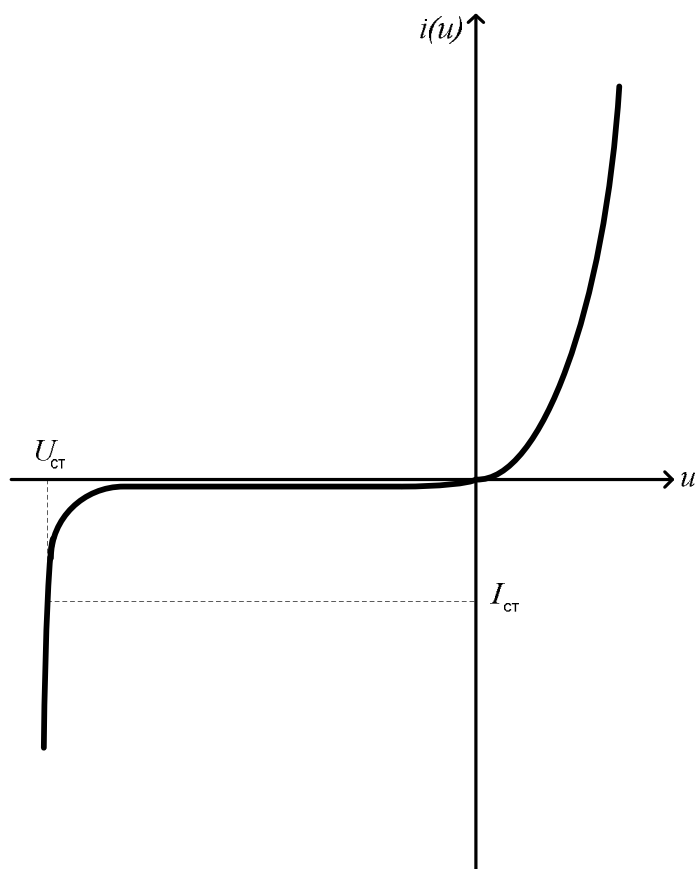


Рис. 2.1 — Вольтамперная характеристика стабилитрона

2.3. Задание на лабораторную работу

Изучить принципы работы полупроводникового стабилитрона, методику измерения его ВАХ. Измерить ВАХ стабилитрона и рассчитать по ней параметры стабилитрона.

2.4. Приборы и оборудование

В лабораторной работе в качестве измерителей тока и напряжения используются приборы магнитоэлектрической системы М4205. Элементы макета соединяются между собой с помощью перемычек. При снятии ВАХ стабилитрона используется миллиамперметр с пределом измерения 10 мА и вольтметры с пределом измерения 1 В и 10 В.

2.5. Программа исследования

2.5.1. С помощью перемычек соберите испытательную схему, показанную на рис. 2.2.

2.5.2. Установите ручки всех потенциометров в крайнее левое положение. Перед включением макета проверьте правильность подключения источников питания и измерительных приборов. Собранный макет покажите преподавателю и получите разрешение на его включение.

2.5.3. Включите макет и установите напряжение на вольтметре базового блока 18...20 В.

2.5.4. Снимите зависимость $i(u)$ при включении стабилитрона в прямом

направлении. Так как при изменении напряжения u , ток i изменяется по экспоненциальному закону, целесообразно задавать значение тока i в пределах от 1 до 10 мА с шагом 1 мА, а снимать и записывать в таблицу значения u . Результаты занести в таблицу 2.1.

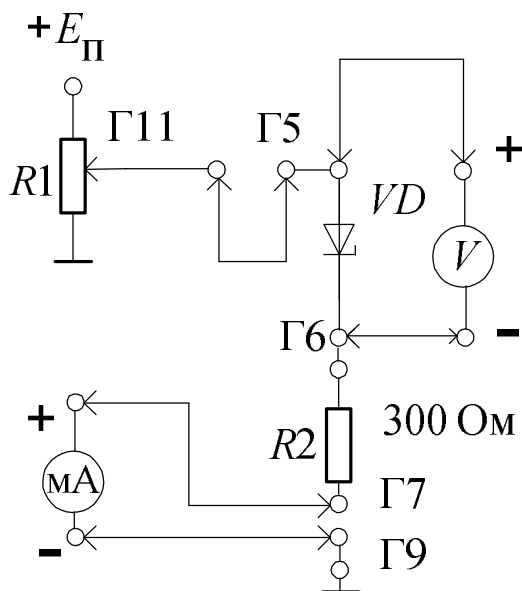


Рис. 2.2 — Схема включения стабилитрона в прямом направлении

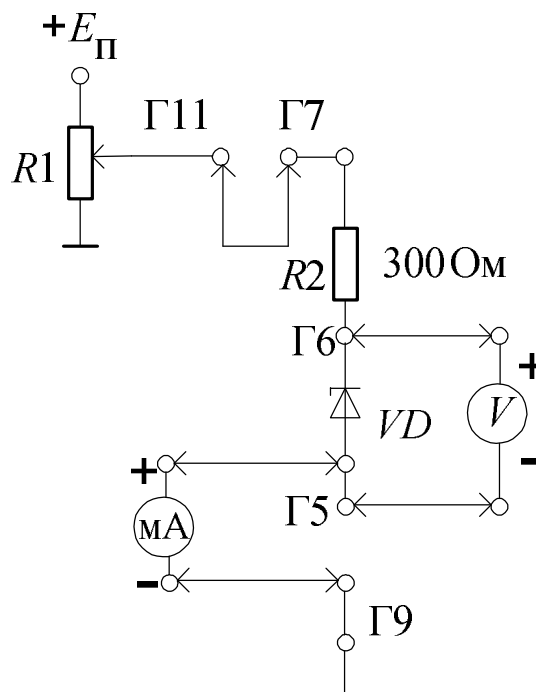


Рис. 2.3 — Схема включения стабилитрона в обратном направлении

Таблица 2.1 — ВАХ стабилитрона в прямом включении

u , В										
i , мА										

2.5.5. По окончании измерений выключите макет.

2.5.6. Используя перемычки, соберите испытательную схему, показанную на рис. 2.3, и выполните действия по п. п. 2.5.2, 2.5.3.

2.5.7. Снимите зависимость $i(u)$ при включении стабилитрона в обратном направлении. Так как ток i резко изменяется при изменении обратного напряжения, то целесообразно задавать значение тока i в пределах от 1 до 10 мА с шагом 1 мА, а снимать и записывать в таблицу значения u . Результаты занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 — ВАХ стабилитрона в обратном включении

u , В										
i , мА										

2.5.8. По окончании измерений выключите макет.

2.5.9. По данным таблиц 2.1 и 2.2 построить ВАХ стабилитрона для пря-

мой и обратной ветвей.

2.5.10. Рассчитать дифференциальное сопротивление стабилитрона в прямом включении $R_{iпр}$ (сопротивление переменному току) в трех точках экспериментально измеренной ВАХ (на начальном участке, в середине и в окрестности максимального тока) прямой ВАХ

$$R_{iпр} = \frac{D\mu}{Di},$$

где $D\mu$ и Di — малые приращения напряжения и тока в окрестностях точки покая.

Дифференциальное сопротивление диода можно также рассчитать по приближенной формуле

$$R_{iпр} \approx \frac{\phi_T}{i},$$

где $\phi_T = \frac{kT}{e} \approx 26$ мВ при $T = 300$ К, i — значение прямого тока в выбранной точке ВАХ.

Сравнить полученные значения прямого сопротивления.

2.5.11. По данным таблицы 2.2 рассчитать дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке стабилизации при значении тока $I_{ст} = 5$ мА по формуле (2.1).

2.5.12. Рассчитать для этой же рабочей точки коэффициент качества стабилитрона

$$Q = \frac{R_{iст}}{R_{ст}},$$

где $R_{ст} = U_{ст}/I_{ст}$ — статическое сопротивление стабилитрона в данной рабочей точке; $U_{ст}$ — напряжение стабилизации при токе стабилизации $I_{ст} = 5$ мА

2.6. Содержание отчета

2.6.1 Схемы исследования стабилитрона.

2.6.2 Таблицы и графики.

2.6.3 Результаты расчетов.

2.6.4 Выводы по результатам экспериментальных исследований и расчетов.

2.7. Контрольные вопросы

2.7.1. Конструкция полупроводниковых стабилитронов.

2.7.2. Физические процессы в полупроводниковом стабилитроне.

2.7.3. Основные параметры стабилитронов.

2.7.4. Основные виды пробоя в $p-n$ переходе.

2.7.5. Виды пробоя в стабилитроне.



2.7.6. Как зависит напряжение пробоя от удельного сопротивления исходных материалов p - n перехода?

2.7.7. Нарисовать и объяснить график ВАХ стабилитрона.

2.7.8. Как зависит ТКН от вида пробоя стабилитрона?

2.7.9. Как зависит величина наибольшего тока стабилизации от температуры?

2.7.10. Нарисуйте схему стабилизатора напряжения на полупроводниковом стабилитроне и объясните принцип работы при изменении входного напряжения.

2.7.11. Нарисуйте схему стабилизатора напряжения на полупроводниковом стабилитроне и объясните принцип работы при изменении сопротивления нагрузки.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

3.1. Цель работы

Изучение статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой.

3.2. Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор с тремя областями чередующейся электропроводности. Термин биполярный означает то, что работа такого транзистора основана на использовании как отрицательных (*negative*) носителей заряда (электронов), так и положительных (*positive*) носителей заряда (дырок).

Различают биполярные транзисторы типа *p-n-p* и *n-p-n*, условные обозначения которых изображены на рис. 3.1.



Рис. 3.1 — Условные обозначения *p-n-p* (а) и *n-p-n* (б) транзисторов

На рис. 3.2 изображена типичная топология маломощного кремниевого *n-p-n* транзистора, выполненного по планарно-эпитаксиальной технологии.

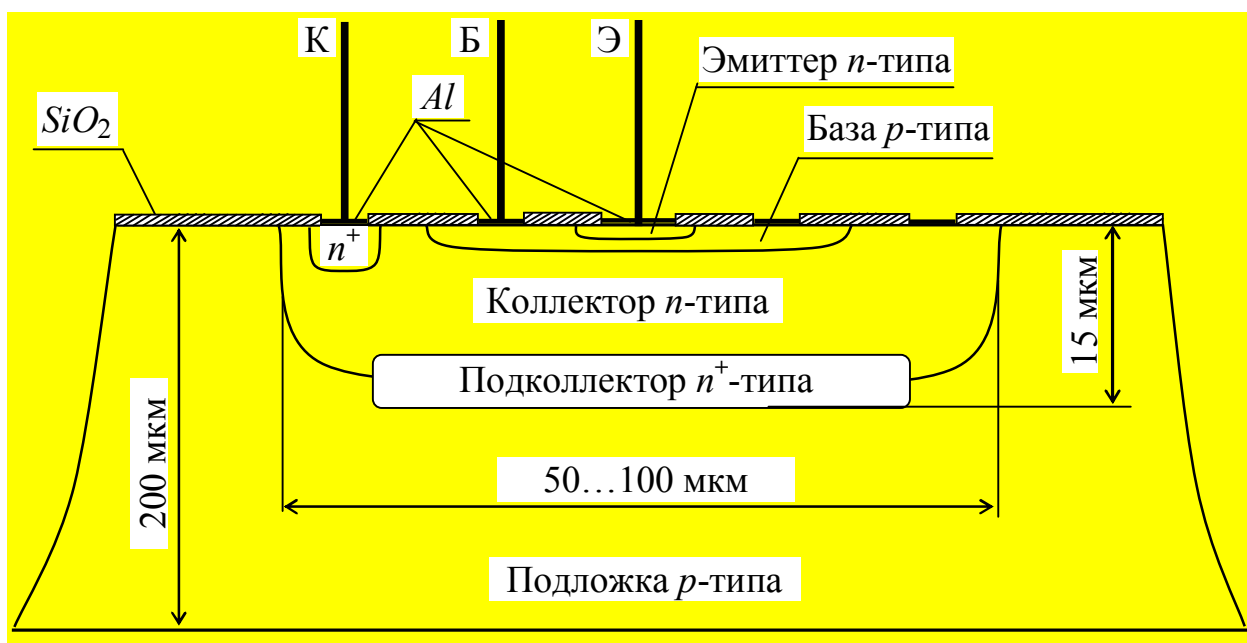


Рис. 3.2 — Топология биполярного *n-p-n* транзистора

Верхняя область транзистора является эмиттером, нижняя — коллектором, а средняя — базой, три электрода на рис. 3.1, 3.2 обозначены прописными буквами Э, К и Б соответственно. Поскольку все области транзистора формируются путем диффузии примесей в кремниевую пластину через одну из ее сторон (верхняя поверхность пластины), то такие транзисторы называются планарными. Все диффузии примесей выполняются в вакуумной камере при достаточно высокой температуре через отверстия (окна), протравливаемые плавиковой кислотой в окиси кремния SiO_2 , слой которой защищает поверхности кремниевой пластины от проникновения примесей. В результате диффузии происходят селективно, т. е. примеси проникают только в нужные области пластины. Толщина защитного покрытия составляет приблизительно 0,5...1 мкм. Для сравнения, диаметр человеческого волоса составляет 40...60 мкм. На рис. 3.2 указаны типичные размеры различных областей планарного транзистора. Толщина областей эмиттера и базы составляет приблизительно 1 мкм каждая. Подколлектор транзистора представляет собой высоколигированный слой полупроводника n -типа, который расположен непосредственно под коллекторной областью транзистора и позволяет существенно снизить объемное сопротивление коллектора. Знак плюс рядом с буквой n означает повышенную концентрацию примесей в данной области.

В местах присоединения выводов на кремниевую пластину осаждается алюминиевая пленка Al (рис. 3.2), к которой привариваются проволочные выводы транзистора.

В зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ); с общим эмиттером (ОЭ); с общим коллектором (ОК). Схемы включения изображены на рис. 3.3.

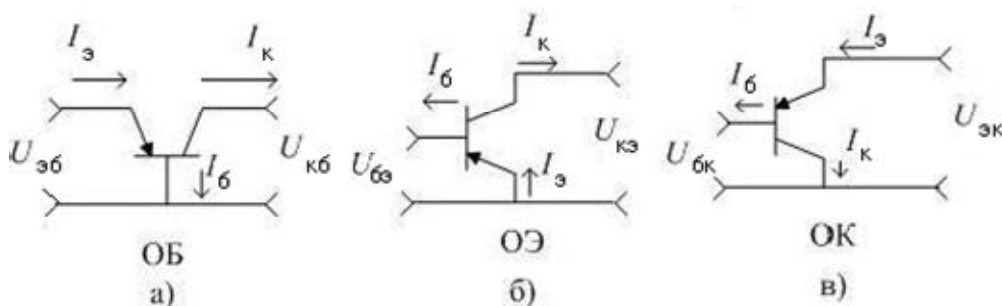


Рис. 3.3 — Схемы включения биполярного транзистора:

а — с общей базой; б — с общим эмиттером; в — с общим коллектором

В зависимости от характера напряжений на p - n переходах различают следующие режимы работы биполярных транзисторов:

- активный режим, при котором напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном обратное;
- режим отсечки, при котором на обоих переходах обратные напряжения (транзистор заперт);
- режим насыщения, при котором на обоих переходах прямые напряже-

ния (транзистор открыт и насыщен).

Режимы отсечки и насыщения характерны для работы транзистора в ключевом режиме, который используется в цифровых схемах (логические элементы, триггеры, импульсные генераторы и т. п.). Активный режим, используют при работе транзистора в аналоговых схемах (усилители, фильтры, и т. п.).

В электрических расчетах цепей используют схемы замещения транзистора. Параметры этих схем связаны с физическими (собственными) параметрами транзистора. На рис. 3.4 показана Т-образная схема замещения транзистора в схеме с ОБ, которая справедлива только для переменных составляющих токов и напряжений при условии, что работа транзистора происходит на линейном участке его входной и выходной ВАХ.

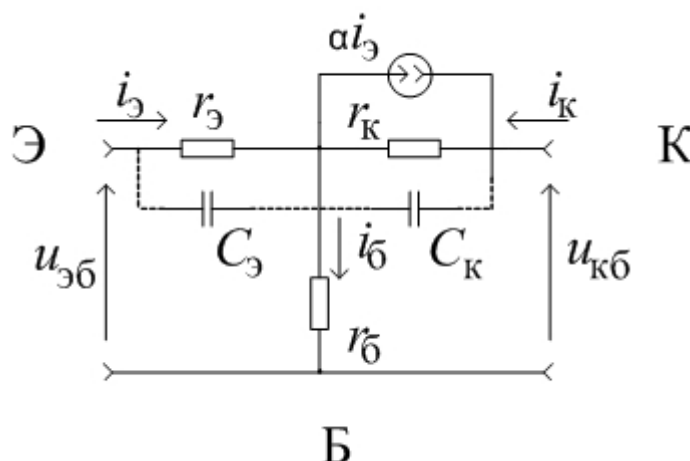


Рис. 3.4 — Т-образная схема замещения биполярного транзистора в схеме с общей базой

На рис. 3.4 использованы следующие условные обозначения:

- $r_э$ — сопротивление открытого эмиттерного перехода транзистора в схеме с общей базой;
- $r_б$ —объемное сопротивление базы;
- $r_к$ — сопротивление коллекторного перехода транзистора в схеме с общей базой;
- $\beta I_э$ — эквивалентный источник коллекторного тока в схеме с общей базой;
- β — коэффициент передачи тока эмиттера в схеме с общей базой;
- $C_э, C_к$ — емкости эмиттерного и коллекторного переходов, каждая из которых равна сумме барьерной и диффузионной емкостей соответствующего перехода.

При постоянном напряжении $u_{кб} = const$ сопротивление открытого эмиттерного перехода в схемы с общей базой определяется по формуле

$$r_э \approx \frac{\varphi_T}{I_э} = \frac{0,026}{I_э},$$

где $\varphi_T \approx 26$ мВ при комнатной температуре $T = 293$ К.

В зависимости от выбранной рабочей точки и типа транзистора значение сопротивления $r_{э}$ может изменяться от единиц до десятков ом.

Обычно объемное сопротивление базы $r_{б} \gg r_{э}$ и составляет 100...500 Ом.

Сопротивление коллекторного перехода при $I_{э} = \text{const}$ определяется по формуле

$$r_k = \frac{du_{кб}}{di_k}.$$

Значения r_k лежат в пределах от 0,1 до 1 МОм.

Дифференциальный коэффициент передачи тока схемы с общей базой при $U_{кб} = \text{const}$ определяется соотношением

$$\beta = \frac{di_k}{di_{э}},$$

и принимает значение от 0,9 до 0,999.

При расчете аналоговых транзисторных схем используют модели транзистора, основанные на его представлении в виде эквивалентного четырехполюсника, который может быть описан одной из шести систем уравнений, связывающих переменные входные и выходные токи и напряжения.

Широкое применение находит система h -параметров транзистора. Эквивалентная схема (схема замещения) транзистора, составленная с учетом его h -параметров, изображена на рис. 3.5.

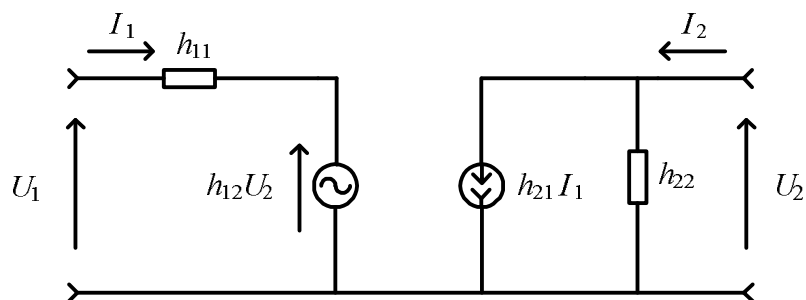


Рис. 3.5 — Эквивалентная схема транзистора

В системе h -параметров соотношения между переменными напряжениями и токами на входе и выходе схемы замещения транзистора (рис. 3.5) могут быть записаны в виде системы уравнений

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 &= h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2, \end{aligned}$$

где $h_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$ — входное сопротивление транзистора в режиме короткого

замыкания на выходе;

$h_{12} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{I}_1=0}$ — коэффициент обратной связи по напряжению в режиме

холостого хода на входе;

$h_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$ — коэффициент передачи тока в режиме короткого замыка-

ния на выходе;

$h_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1=0}$ — выходная проводимость транзистора в режиме холостого

хода на входе.

При включении транзистора по схеме с общей базой его физические параметры связаны с h -параметрами следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} r_9 &= \frac{h_{11\delta}(1 - h_{21\delta})h_{12\delta}}{h_{22\delta}}; \\ r_6 &= \frac{h_{12\delta}}{h_{22\delta}}; \\ r_k &= \frac{1}{h_{22\delta}}; \\ \alpha &= |h_{21\delta}|, \end{aligned}$$

где индексом “б” и отмечена схема включения транзистора (с общей базой), которой соответствует h -параметр.

Различают следующие статические ВАХ транзистора, включенного по схеме с общей базой:

- $i_9(u_{9\delta})$ — входная ВАХ при $u_{k\delta} = const$;
- $i_k(u_{9\delta})$ — проходная ВАХ при $u_{k\delta} = const$;
- $i_k(u_{k\delta})$ — выходная ВАХ при $i_9 = const$.

В выбранной рабочей точке статической ВАХ транзистора могут быть определены следующие параметры транзистора:

- параметр h_{11} — по входным ВАХ;
- параметр h_{22} — по выходным ВАХ;
- параметр h_{21} — по выходным ВАХ;
- входное сопротивление постоянному току $R_{вх}$ — по входным ВАХ;
- выходное сопротивление постоянному току $R_{вых}$ — по выходным

ВАХ;

- крутизна S — по проходной ВАХ.

3.3. Задание на лабораторную работу

Изучить свойства схемы при включении биполярного транзистора в схеме с общей базой. Ознакомиться с методиками измерения статических ВАХ транзистора и методом определения по этим характеристикам параметров транзистора.

3.4. Описание лабораторного макета

Макет содержит три регулируемых источника питания: источник коллекторного напряжения U_K (Г2), источник эмиттерного тока $+I_Э$ (Г3). Указанные напряжения и ток могут изменяться соответствующими потенциометрами. Полярности источников указаны относительно корпуса (Г1). Исследуемый транзистор КТ209 типа $p-n-p$ также расположен в макете и его выводы обозначены Э (Г6), Б (Г8), К (Г7). Измерительные приборы установлены в отдельном блоке.

3.5. Программа исследований

3.5.1. Используя перемычки, соберите схему, показанную на рис. 3.6.

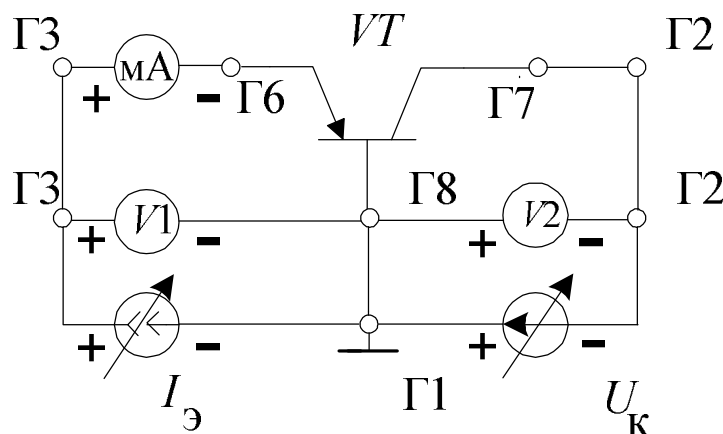


Рис. 3.6 — Схема макета для измерения входной ВАХ транзистора в схеме с общей базой

На рис. 3.6 и 3.7 приняты следующие обозначения:

- $V1$ — вольтметр с пределом измерения 1 В;
- $V2$ — вольтметр с пределом измерения 10 В;
- mA — миллиамперметр с пределом измерения 10 мА;
- $I_Э$ — регулируемый источник тока эмиттера;
- U_K — регулируемый источник коллекторного напряжения.

3.5.2. Установите ручки всех потенциометров в крайнее левое положение. Перед включением макета проверьте правильность подключения источников питания и измерительных приборов. Собранный макет покажите преподавателю и получите разрешение на его включение.

3.5.3. Включите макет и установите напряжение на вольтметре базового блока 18...20 В.

3.5.4. Снимите входную ВАХ транзистора при трех значениях напряжения $u_{кб}$: 0 В; –5 В; –8 В. Плавнo изменяя ток источника $I_э$, снимите три зависимости $i_э(u_{эб})$ и результаты измерений занесите в таблицу 3.1. При снятии характеристик не допускайте перегрузки приборов. Для наглядного представления результатов в графической форме необходимо снять не менее 8...10 точек. Так как при изменении напряжения $u_{эб}$, ток $i_э$ изменяется по экспоненциальному закону, целесообразно задавать значение тока $i_э$ в пределах от 1 до 10 мА с шагом 1 мА, а снимать и записывать в таблицу значения $u_{эб}$.

Таблица 3.1 — Входная ВАХ транзистора, включенного по схеме с общей базой

$i_э$, мА											
$u_{эб}$, В	$U_{кб1} = 0$ В										
	$U_{кб2} = -5$ В										
	$U_{кб3} = -8$ В										

3.5.5. По окончании измерений выключите макет.

3.5.6. Используя перемычки, соберите схему, показанную на рис. 3.7, и выполните действия по п. п. 3.5.2, 3.5.3.

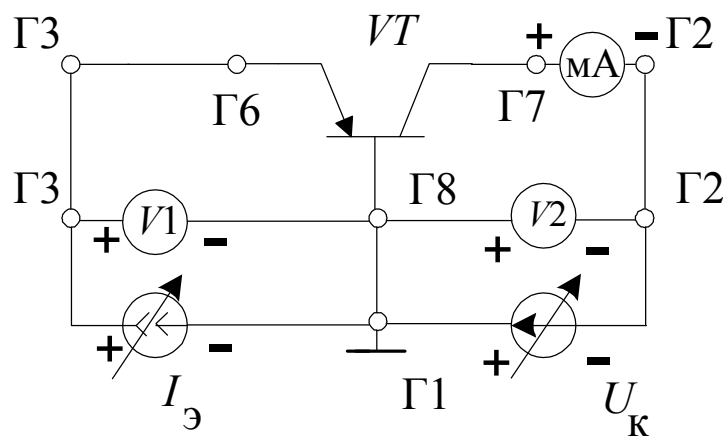


Рис. 3.7 — Схема макета для измерения выходной и проходной ВАХ транзистора в схеме с общей базой

3.5.4. Снимите выходную ВАХ транзистора при трех значениях напряжения $u_{эб}$: 0,55 В; 0,6 В; 0,65 В. Плавнo изменяя напряжение $u_{кб}$, снять три зависимости $i_к(u_{кб})$ и результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 — Выходная ВАХ транзистора, включенного по схеме с общей базой

$u_{кб}, \text{ В}$											
$i_k, \text{ мА}$	$U_{эб1} = 0,55 \text{ В}$										
	$U_{эб2} = 0,6 \text{ В}$										
	$U_{эб3} = 0,65 \text{ В}$										

3.5.3. Не изменяя схему (рис. 3.7) макета снимите проходную ВАХ транзистора при трех значениях напряжения $u_{кб}$: 0 В; –5 В; –8 В. Плавное изменение тока источника $i_э$, снимите три зависимости $i_k(u_{эб})$ и результаты измерений занесите в таблицу 3.3. При снятии характеристик не допускайте перегрузки приборов. Для наглядного представления результатов в графической форме необходимо снять не менее 8...10 точек. Так как при изменении напряжения $u_{эб}$, ток i_k изменяется по экспоненциальному закону, целесообразно задавать значение тока i_k в пределах от 1 до 10 мА с шагом 1 мА, а снимать и записывать в таблицу значения $u_{эб}$.

Таблица 3.3 — Проходная ВАХ транзистора, включенного по схеме с общей базой

$i_k, \text{ мА}$											
$u_{эб}, \text{ В}$	$U_{кб1} = 0 \text{ В}$										
	$U_{кб2} = -5 \text{ В}$										
	$U_{кб3} = -8 \text{ В}$										

3.6. Содержание отчета

3.6.1. Цель работы.

3.6.2. Схемы лабораторного макета.

3.6.3. Таблицы результатов измерений, графики ВАХ.

3.6.4. Результаты расчета следующих параметров транзистора в активной области: $h_{11б}$, $h_{22б}$, $R_{вх}$, $R_{вых}$, S .

3.6.5. Выводы по работе.

3.7. Контрольные вопросы

3.7.1. Нарисуйте структуру $p-n-p$ транзистора и укажите полярности напряжений и направления токов на электродах транзистора при работе в линейном режиме.

3.7.2. Нарисуйте структуру $n-p-n$ транзистора и укажите полярности напряжений и направления токов на электродах транзистора при работе в линейном режиме.

3.7.3. Поясните, какие процессы протекают в различных областях структу-

ры в активной области работы транзистора.

3.7.4. Что такое физическая модель транзистора и каковы ее параметры?

3.7.5. Что такое формализованная модель транзистора?

3.7.6. Нарисуйте эквивалентную схему транзистора с использованием h -параметров.

3.7.7. Поясните физический смысл h -параметров.

3.7.8. Поясните методику измерения статических ВАХ транзистора.

3.7.9. Объясните принцип определения h -параметров транзистора по статистическим характеристикам.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

4.1. Цель работы

Исследование статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

4.2. Краткие теоретические сведения

Краткие теоретические сведения по работе смотри в п. 3.2. (стр. 18...23).

Для электрических расчетов цепей используют схемы замещения транзистора, параметры которого связаны с физическими (собственными) параметрами транзистора. На рис. 4.1 показана Т-образная схема замещения транзистора, в схеме с общим эмиттером, которая справедлива только для переменных составляющих токов и напряжений при условии, что работа транзистора происходит на линейных участках его входной и выходной ВАХ.

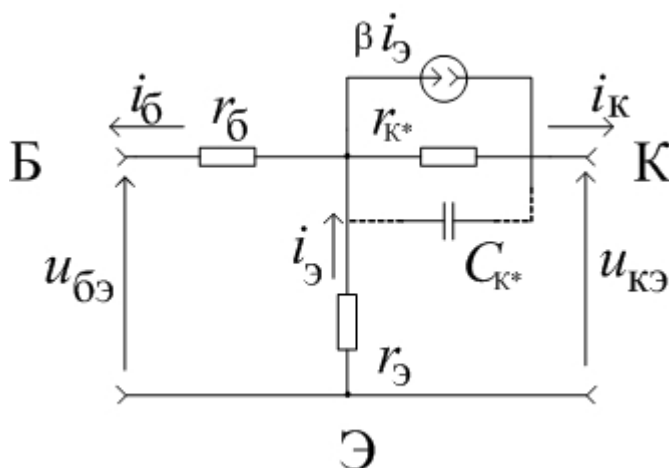


Рис. 4.1 — Т-образная схема замещения биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

На рис. 4.1 использованы следующие условные обозначения:

- $r_э$ — сопротивление открытого эмиттерного перехода транзистора;
- $r_б$ — объемное сопротивление базы;
- $\beta I_б$ — эквивалентный источник коллекторного тока в схеме с общим эмиттером;
- $r_{к*} = r_{к} / (1 + \beta)$ — сопротивление коллекторного перехода транзистора в схеме с общим эмиттером;
- $C_{к}$ — емкость коллекторного перехода, равная барьерной емкости при разомкнутом выводе эмиттера и обратном напряжении $u_{кб}$;
- β — дифференциальный коэффициент передачи тока базы.

Дифференциальный коэффициент передачи тока схемы с общим эмитте-

ром при $U_{кэ} = const$ определяется соотношением

$$\beta = \frac{di_k}{di_б} = \frac{\alpha}{1 - \alpha},$$

где α — коэффициент передачи тока схемы с общей базой.

В системе $\mathbf{h}$ - параметров $\beta = h_{21э}$.

При изменении α от 0,9 до 0,999 коэффициент β изменяется от 9 до 999.

Так как входным в схеме с ОЭ является ток базы, который в $(1 + \beta)$ раз меньше тока эмиттера, то в схеме с общим эмиттером по сравнению со схемой с общей базой не только активное, но и емкостное сопротивление коллекторного перехода уменьшается в $(1 + \beta)$ раз. Поэтому в схеме с общим эмиттером коллекторная емкость $C_k^* = (1 + \beta)C_k \gg C_k$, где C_k — емкость перехода коллектор-база при разомкнутом выводе эмиттера и обратном напряжении $u_{кб}$.

Различают следующие статические ВАХ транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:

- $i_б(u_{эб})$ — входная ВАХ при $u_{кэ} = const$;
- $i_k(u_{эб})$ — проходная ВАХ при $u_{кэ} = const$;
- $i_k(u_{кэ})$ — выходная ВАХ при $i_б = const$.

В выбранной рабочей точке статической ВАХ транзистора могут быть определены следующие параметры транзистора:

- параметр $h_{11э}$ — по входным ВАХ;
- параметр $h_{22э}$ — по выходным ВАХ;
- параметр $h_{21э}$ — по выходным ВАХ;
- входное сопротивление постоянному току $R_{вх}$ — по входным ВАХ;
- выходное сопротивление постоянному току $R_{вых}$ — по выходным ВАХ;
- крутизна S — по проходной ВАХ.

4.3. Задание на лабораторную работу

Изучить свойства схемы при включении биполярного транзистора в схему с общим эмиттером. Ознакомиться с методиками измерения статических ВАХ транзистора, измерить эти ВАХ и определить по ним параметры транзистора.

4.4. Описание лабораторного макета

Макет содержит три регулируемых источника питания: источник коллекторного напряжения U_k (Г2), источник эмиттерного тока $+I_э$ (Г3), источник базового напряжения $U_б$ (Г4). Эти напряжения и ток могут изменяться соответствующими потенциометрами. Полярности источников указаны относительно корпуса (Г1). Исследуемый транзистор КТ209 типа $p-n-p$ также расположен в макете и его выводы обозначены Э (Г6), Б (Г8), К (Г7). Измерительные приборы установлены в отдельном блоке.



4.5. Программа исследований

4.5.1. Используя перемычки, соберите схему, показанную на рис. 4.2.

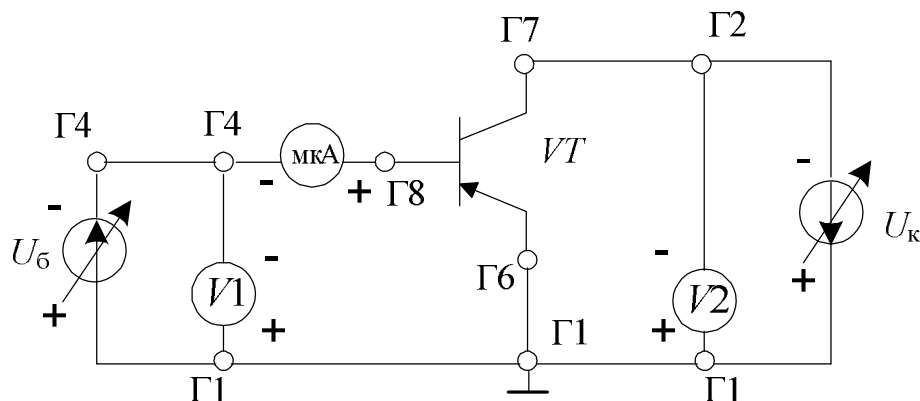


Рис. 4.2 — Схема макета для измерения входной ВАХ транзистора в схеме с общим эмиттером

На рис. 4.2 приняты следующие обозначения:

- $V1$ — вольтметр с пределом измерения 1 В;
- $V2$ — вольтметр с пределом измерения 10 В;
- мкА — микроамперметр с пределом измерения 100 мкА;
- $U_{\text{б}}$ — регулируемый источник базового напряжения;
- $U_{\text{к}}$ — регулируемый источник коллекторного напряжения.

4.5.2. Установите ручки всех потенциометров в крайнее левое положение.

Перед включением макета проверьте правильность подключения источников питания и измерительных приборов. Собранный макет покажите преподавателю и получите разрешение на его включение.

4.5.3. Включите макет и установите напряжение на вольтметре базового блока 18...20 В.

4.5.4. Снимите входную ВАХ транзистора $i_{\text{б}}(u_{\text{бэ}})$ при трех значениях напряжения $u_{\text{кэ}}$: 0 В, –5 В и –8 В и результаты измерений занести в таблицу 4.1. При снятии характеристик не допускать перегрузки приборов. Для наглядного представления результатов в графической форме необходимо снять не менее 8...10 точек. Так как при изменении напряжения $u_{\text{бэ}}$, ток $i_{\text{б}}$ изменяется по экспоненциальному закону, целесообразно задавать значения тока $i_{\text{б}}$ в пределах от 10 до 100 мкА с шагом 10 мкА, а снимать и записывать в таблицу значения $u_{\text{бэ}}$.

Таблица 4.1 — Входная ВАХ транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

$i_{\text{б}}, \text{мкА}$											
$u_{\text{бэ}}, \text{В}$	$U_{\text{кэ1}} = 0 \text{ В}$										
	$U_{\text{кэ2}} = -5 \text{ В}$										
	$U_{\text{кэ3}} = -8 \text{ В}$										

4.5.6. По окончании измерений выключите макет.

4.5.7. Используя перемычки, соберите схему, показанную на рис. 4.3, и выполните действия по п. п. 4.5.2, 4.5.3.

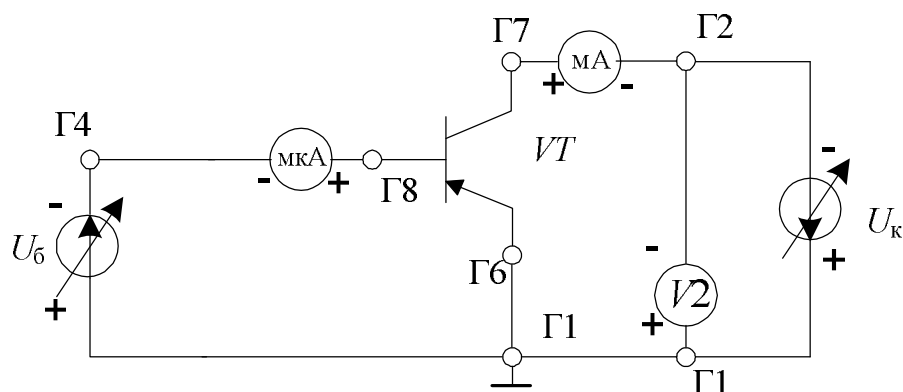


Рис. 4.3 — Схема включения макета для снятия выходных ВАХ транзистора в схеме с общим эмиттером

На рис. 4.3 приняты следующие обозначения:

- $V2$ — вольтметр с пределом измерения 10 В;
- мА — миллиамперметр с пределом измерения 10 мА;
- мкА — микроамперметр с пределом измерения 100 мкА;
- $U_б$ — регулируемый источник базового напряжения;
- $U_к$ — регулируемый источник коллекторного напряжения.

4.5.8. Снимите выходную ВАХ транзистора $i_k(u_{кэ})$ при трех значениях тока базы $i_б$: 100 мкА; 80 мкА; 60 мкА. Плавное изменение напряжения $u_{кэ}$, снимите три зависимости $i_k(u_{кэ})$ и результаты измерений занесите в таблицу 4.2. При снятии характеристик не допускать перегрузки приборов. Для наглядного представления результатов в графической форме необходимо снять не менее 8...10 точек.

Таблица 4.2 — Выходная ВАХ транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

$u_{кэ}, \text{В}$											
$i_k, \text{мА}$	$I_{б1} = 100 \text{ мкА}$										
	$I_{б2} = 80 \text{ мкА}$										
	$I_{б3} = 60 \text{ мкА}$										

4.5.9. По окончании измерений выключите макет.

4.5.10. Используя перемычки, соберите схему, показанную на рис. 4.4 и выполните действия по п. п. 4.5.2, 4.5.3.

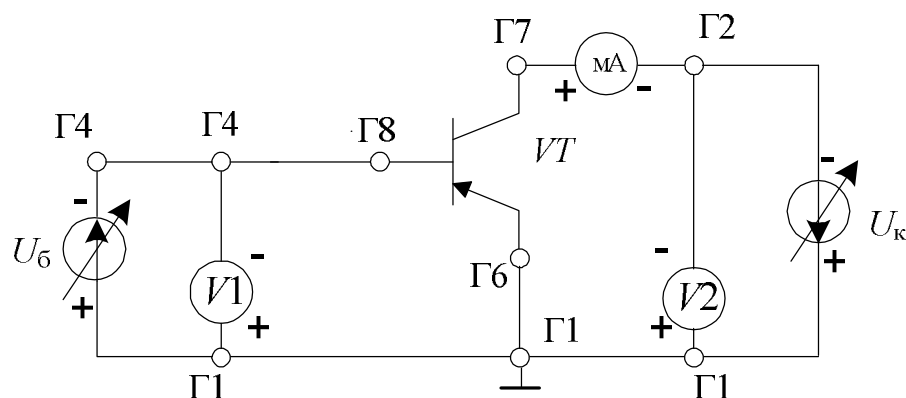


Рис. 4.4 — Схема включения макета для снятия проходных ВАХ транзистора в схеме с общим эмиттером

На рис. 4.4 приняты следующие обозначения:

- $V1$ — вольтметр с пределом измерения 1 В;
- $V2$ — вольтметр с пределом измерения 10 В;
- mA — миллиамперметр с пределом измерения 10 мА;
- $U_{\text{б}}$ — регулируемый источник базового напряжения;
- $U_{\text{к}}$ — регулируемый источник коллекторного напряжения.

4.5.11. Снимите проходную ВАХ транзистора при трех значениях напряжения $u_{\text{кэ}}$: –2 В, –5 В, –8 В. Плавное изменение напряжения $u_{\text{бэ}}$, снять три зависимости $i_{\text{к}}(u_{\text{бэ}})$ и результаты измерений занести в таблицу 4.3. При снятии характеристик не допускать перегрузки приборов. Для наглядного представления результатов в графической форме необходимо снять не менее 8...10 точек. Так как при изменении напряжения $u_{\text{бэ}}$, ток $i_{\text{к}}$ изменяется по экспоненциальному закону, целесообразно задавать значения тока $i_{\text{к}}$ в пределах от 1 до 10 мА с шагом 1 мА, а снимать и записывать в таблицу значения $u_{\text{бэ}}$.

Таблица 4.3. — Проходная ВАХ транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

$i_{\text{к}}, \text{мА}$											
$u_{\text{бэ}}, \text{В}$	$U_{\text{кэ}} = -2 \text{ В}$										
	$U_{\text{кэ}} = -5 \text{ В}$										
	$U_{\text{кэ}} = -8 \text{ В}$										

4.5.12. По окончании измерений выключите макет.

4.6. Содержание отчета

4.6.1. Цель работы.

4.6.2. Схемы лабораторного макета.

4.6.3. Таблицы результатов измерений и графики ВАХ.

4.6.4. Результаты расчета следующих параметров транзистора в активной области: $h_{11э}$; $h_{22э}$; $h_{21э}$; входное сопротивление транзистора постоянному току $R_{вх}$; выходное сопротивление транзистора постоянному току $R_{вых}$; крутизну S ; коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ $h_{21э}$.

4.6.5. Выводы по работе.

4.7. Контрольные вопросы

4.7.1. Нарисуйте структуру $p-n-p$ транзистора и укажите полярности напряжений и направления токов на электродах транзистора при работе в активной области.

4.7.2. То же для транзистора типа $n-p-n$.

4.7.3. Поясните, какие процессы протекают в различных областях структуры в активной области работы транзистора.

4.7.4. Что такое физическая модель транзистора. Физический смысл элементов модели.

4.7.5. Запишите полученные значения β - параметров транзистора в схеме с ОЭ.

4.7.6. Что такое формализованная модель транзистора?

4.7.7. Эквивалентные схемы формализованных моделей транзистора.

4.7.8. Системы y , z и h - параметров. Физический смысл элементов.

4.7.9. Поясните принцип снятия статистических характеристик транзистора.

4.7.10. Объясните принцип определения h - параметров транзистора по статистическим характеристикам.

4.7.11. Сравните полученные значения дифференциальных параметров для двух схем включения транзисторов с ОБ и ОЭ.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

5.1. Цель работы

Изучение статических характеристик полевого транзистора и его основных параметров.

5.2. Краткие теоретические сведения

Полевой транзистор представляет собой полупроводниковый прибор в котором управление током, протекающим в между двумя электродами — стоком и истоком, осуществляется с помощью напряжения, приложенного к третьему электроду — затвору.

Управление током канала осуществляется за счет изменения его удельной проводимости и площади поперечного сечения.

По конструктивным особенностям полевые транзисторы разделяют на транзисторы с управляющим $p-n$ переходом и транзисторы с изолированным затвором.

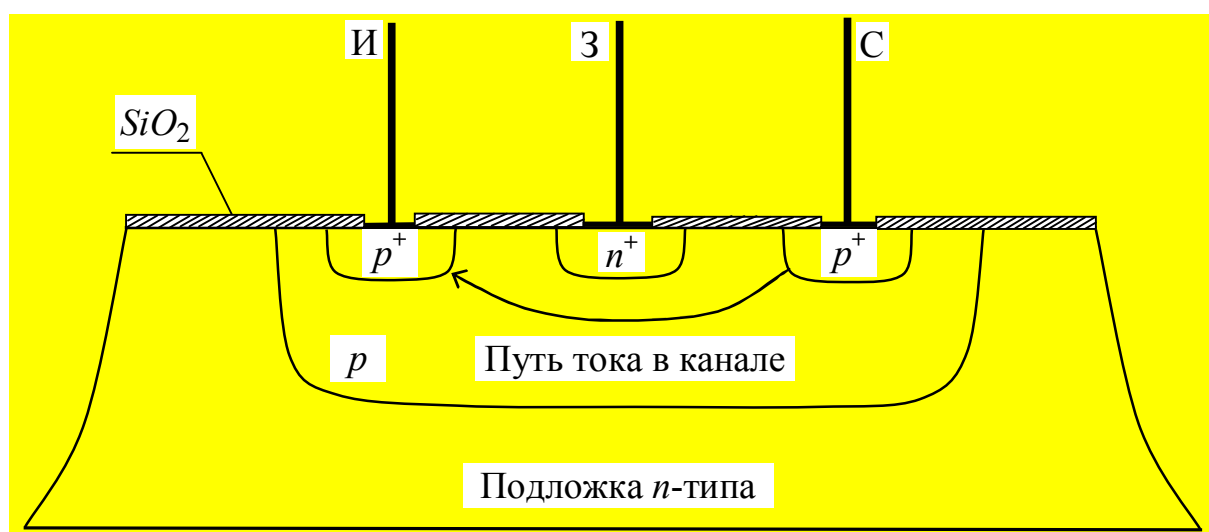


Рис. 5.1 — Структура полевого p -канального транзистора с управляющим $p-n$ переходом

В полевом транзисторе с управляющим $p-n$ переходом (рис. 5.1) управляющая область (затвор) образует $p-n$ переход с областью канала. При подаче на переход затвор-канал обратного напряжения происходит уменьшение удельной проводимости канала, что вызывает уменьшение тока канала.

Полевые транзисторы с изолированным затвором имеют структуру металл — диэлектрик — полупроводник и называются МДП транзисторы. Кремниевые МДП транзисторы часто называют МОП транзисторами, поскольку в них в качестве диэлектрика используется двуокись кремния (SiO_2) и поэтому они имеют структуру металл — окисел — полупроводник. В английском вари-

анте транзисторы имеют название *MOS — transistor (metal — oxide — semiconductor)*. Таким образом, в МДП транзисторах металлический затвор изолирован слоем диэлектрика от канала, образованного в приповерхностном слое полупроводника. Принцип действия МДП транзистора основан на управлении с помощью электрического поля проводимостью канала через слой диэлектрика.

Для нормальной работы полевых транзисторов к стоку подключается источник положительного напряжения для транзисторов с каналом *n*-типа и отрицательного — для транзисторов с каналом *p*-типа (независимо от структуры транзистора).

Одним из основных достоинств полевого транзистора является его высокое входное сопротивление, которое у транзисторов с управляющим *p-n* переходом составляет $10^6 \dots 10^7$ Ом, а у МДП — транзисторов — $10^{10} \dots 10^{15}$ Ом. Последние более устойчивы к воздействию ионизирующих излучений и хорошо работают при сверхнизких температурах.

Поведение полевых транзисторов описывается двумя ВАХ: стоковой $i_c = f(u_{си})$ при $U_{зи} = const$ и стокзатворной $i_c = f(u_{зи})$ при $U_{си} = const$ (рис. 5.2).

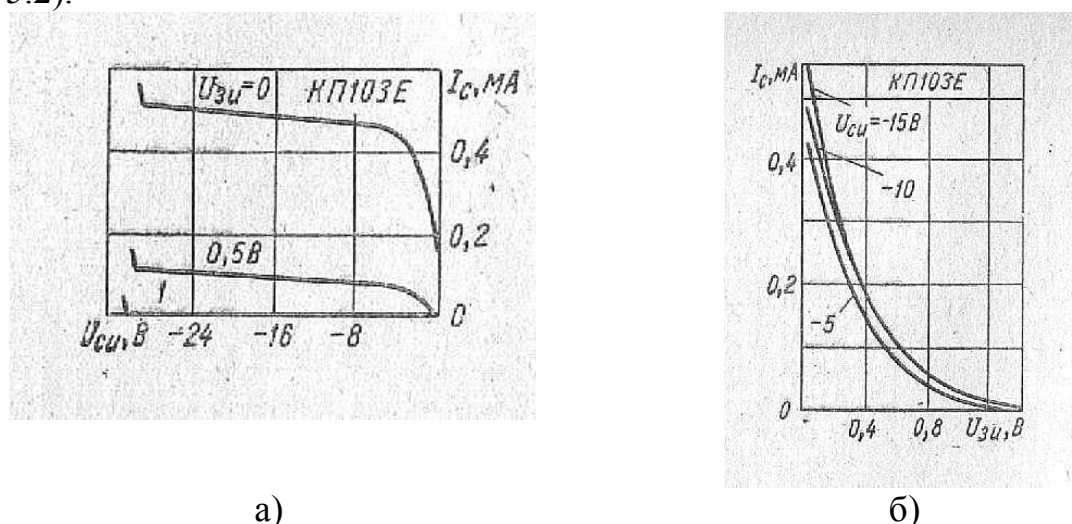


Рис. 5.2 — Вольтамперные характеристики полевого *p*-канального транзистора с управляющим *p-n* переходом: а — стоковые; б — стокзатворные

На стоковой характеристике различают две характерные области:

- омическую область существенного нарастания тока стока при увеличении напряжения $u_{си}$;
- активная область незначительного нарастания тока стока при увеличении напряжения $u_{си}$ (пологий участок стковой ВАХ).

При работе в этой области канал частично перекрыт и напряжение стока $u_{си}$ превышает по абсолютному значению напряжение перекрытия канала. Ток стока практически не зависит от напряжения $u_{си}$.

Отсечка тока стока наблюдается в том случае, когда напряжение на затворе по абсолютному значению превышает напряжение отсечки $u_{зи} \geq |U_{отс}|$.

Для полевого транзистора с управляющим p - n переходом, работающего в омической области, т. е. при напряжении $U_{\text{си}} \leq |U_{\text{нас}}|$, стоковая характеристика описывается уравнением

$$i_c = I_{\text{н0}} \left(2 \frac{u_{\text{си}}}{U_{\text{отс}}} \left(1 - \frac{u_{\text{зи}}}{U_{\text{отс}}} \right) - \left(\frac{u_{\text{си}}}{U_{\text{отс}}} \right)^2 \right), \quad (5.1)$$

где $I_{\text{н0}}$ — ток насыщения стока при $U_{\text{зи}} = 0$.

При напряжении $U_{\text{зи}} = 0$, ток стока I_c достигает максимального значения. При $U_{\text{си}} \geq |U_{\text{нас}}|$, ток стока определяется соотношением

$$I_c = I_{\text{н0}} \left(1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{отс}}} \right)^2, \quad (5.2)$$

которое описывает пологий участок стокзатворной характеристики.

Одним из основных параметров полевого транзистора, характеризующим его усилительные свойства, является крутизна стокзатворной характеристики при $U_{\text{си}} = \text{const}$

$$S = \frac{d i_c}{d u_{\text{зи}}}. \quad (5.3)$$

Крутизна зависит от напряжения $U_{\text{зи}}$. С увеличением $U_{\text{зи}}$ ток стока и крутизна уменьшаются. Для пологой части стоковой характеристики

$$S = S_{\text{max}} \left(1 - \frac{|U_{\text{зи}}|}{|U_{\text{отс}}|} \right), \quad (5.4)$$

где $S_{\text{max}} = 1/R_0$ — максимальная крутизна при $U_{\text{зи}} = 0$; R_0 — минимальное сопротивление канала при $U_{\text{зи}} = 0$.

Внутреннее дифференциальное сопротивление транзистора при $U_{\text{зи}} = \text{const}$ равно

$$R_i = \frac{d u_{\text{си}}}{d i_c}. \quad (5.5)$$

Статический коэффициент усиления транзистора в режиме холостого хода цепи стока при $I_c = 0$ равен

$$m = \left| \frac{d u_{си}}{d u_{зи}} \right|. \quad (5.5)$$

Параметры S , R_i и μ связаны между собой соотношением

$$m = S R_i. \quad (5.6)$$

Цепь затвора характеризуют дифференциальным входным сопротивлением транзистора при $U_{си} = const$, которое определяют по формуле

$$R_{вх} = \frac{d u_{зи}}{d i_3}. \quad (5.7)$$

В качестве параметров указывают также:

- напряжение отсечки $U_{отс}$;
- ток насыщения стока $I_{н0}$ при коротком замыкании между затвором и истоком ($U_{зи} = 0$);
- емкости: затвор-сток $C_{зс}$; затвор-исток $C_{зи}$; сток-исток $C_{си}$; подложка-исток $C_{пи}$;
- граничная частота $f = \frac{1}{2\pi\tau}$, где τ — постоянная времени цепи затвора.

5.3. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет (рис. 5.3) для исследования ВАХ полевого транзистора содержит два регулируемых источника питания: $-U_{си}$ (Г2); $+U_{зи}$ (Г3). Эти напряжения могут изменяться соответствующими потенциометрами. Полярности источников указаны относительно корпуса (Г1).

Исследуемый транзистор КП103Е — полевой транзистор с управляющим p - n переходом и каналом p -типа также расположен в макете и его выводы обозначены: исток — И (Г9), затвор — З (Г10), сток — С (Г11). Измерительные приборы выполнены в виде отдельного блока.

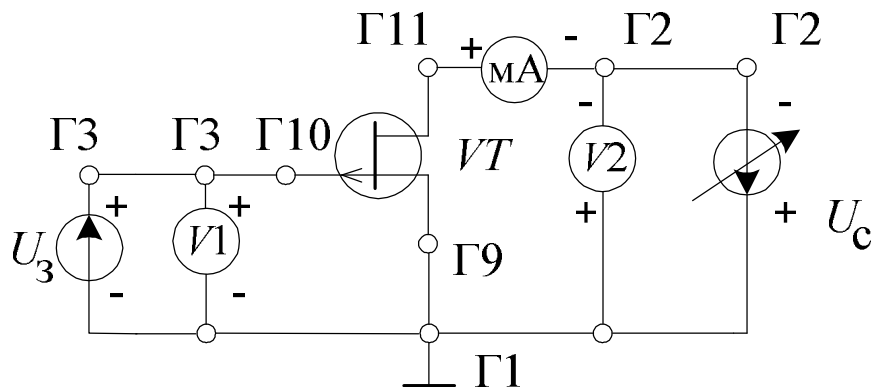


Рис. 5.3 — Схема макета для измерения ВАХ полевого транзистора

На рис. 5.3 приняты следующие обозначения:

- $V1$ — вольтметр с пределом измерения 1 В;
- $V2$ — вольтметр с пределом измерения 10 В;
- mA — миллиамперметр с пределом измерения 1 мА и 10 мА;
- $U_{зи}$ — регулируемый источник напряжения исток-затвор;
- $U_{си}$ — регулируемый источник напряжения сток-исток.

5.4. Задание на лабораторную работу

Изучить принцип работы полевого транзистора, его характеристики и параметры. Ознакомиться с методикой снятия статических вольтамперных характеристик и определения по ним параметров полевого транзистора.

5.5. Программа исследований

5.5.1. Используя переключки, соберите схему, показанную на рис. 5.3.

5.5.2. Установите ручки всех потенциометров в крайнее левое положение. Перед включением макета проверьте правильность подключения источников питания и измерительных приборов. Собранный макет покажите преподавателю и получите разрешение на его включение.

5.5.3. Включите макет и установите напряжение на вольтметре базового блока 18...20 В.

5.5.4. Снимите стоковые ВАХ исследуемого транзистора при трех значениях напряжения $u_{зи}$: 0 В; 0,2 В; 0,4 В. Плавное изменение напряжения $u_{си}$, снять три зависимости $i_c(u_{зи})$ и результаты измерений занести в таблицу 5.1. При снятии характеристик не допускать перегрузки приборов. Для наглядного представления результатов в графической форме необходимо снять не менее 8...10 точек.

Таблица 5.1 — Стоковые ВАХ полевого транзистора

$u_{си}, В$											
$i_c, мА$	$u_{зи1} = 0 В$										
	$u_{зи2} = 0,2 В$										
	$u_{зи3} = 0,4 В$										

5.5.5. По окончании измерений выключите макет.

5.5.6. Используя прежнюю схему, показанную на рис. 5.3., выполните действия по п. п. 5.5.2, 5.5.3.

5.5.7. Снимите стокзатворные ВАХ исследуемого транзистора при трех значениях напряжения $u_{си}$: -2 В; -5 В; -8 В. Плавное изменение напряжения $u_{зи}$, снять три зависимости $i_c(u_{зи})$ и результаты измерений занести в таблицу 5.2. При снятии характеристик не допускать перегрузки приборов. Для наглядного представления результатов в графической форме необходимо снять не менее 8...10 точек.

Таблица 5.2 — Стокозатворные ВАХ полевого транзистора

$u_{зи}, \text{В}$											
$i_c, \text{мА}$	$u_{си1} = -2 \text{ В}$										
	$u_{си2} = -5 \text{ В}$										
	$u_{си3} = -8 \text{ В}$										

5.5.8. По окончании измерений выключите макет.

5.5.9. Экспериментально определить напряжение отсечки транзистора $U_{отс}$ транзистора при трех значениях напряжения $u_{си}$: -2 В ; -5 В ; -8 В . Для этого следует измерить напряжение затвор-исток $U_{зи}^*$, при котором ток стока $I_c^* = 0,25I_{н0}$. Величина $I_{н0}$ — максимальное значение тока стока при $U_{зи} = 0$. Тогда $U_{отс} = 2U_{зи}^*$.

5.6. Содержание отчета

5.6.1. Цель работы.

5.6.2. Схемы лабораторного макета.

5.6.3. Таблицы результатов измерений и графики (ВАХ).

5.6.4. По формулам (5.1) и (5.2) рассчитать стоковую и стокозатворную ВАХ полевого транзистора при значениях напряжений $U_{зи}$, $U_{си}$, устанавливаемых при экспериментальных исследованиях. Указанные ВАХ построить в одной системе координат вместе с одноименными экспериментально измеренными ВАХ.

5.6.5. По стокозатворным характеристикам с использованием выражения (5.3) определить крутизну полевого транзистора на среднем участке стокозатворной характеристики.

5.6.6. По стоковым характеристикам с использованием выражений (5.5) и (5.6) определить значения внутреннего сопротивления R_i и статического коэффициента усиления транзистора m .

5.6.7. Выводы по работе.

5.7. Контрольные вопросы

5.7.1. Перечислите типы полевых транзисторов и поясните их конструктивные особенности.

5.7.2. Укажите полярности подключения источников питания к транзисторам разных типов, способы задания точки покоя.

5.7.3. На стоковых характеристиках укажите две характерные области работы транзистора.

5.7.4. Перечислите основные параметры полевых транзисторов и поясните их физический смысл.

5.7.5. Какие процессы происходят в полевом транзисторе с p - n переходом в активной области?

5.7.6. Какие процессы происходят в МДП транзисторе при работе в актив-

ной области?

5.7.7. При каком напряжении смещения сопротивление канала транзистора будет минимальным?

5.7.8. Как зависит статический коэффициент усиления транзистора от внутреннего сопротивления и крутизны?

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

6.1. Цель работы

Изучение принципов работы электронного ключа на биполярном транзисторе и его основных параметров.

6.2. Краткие теоретические сведения

Электронным ключом называют устройство, имеющее два состояния: **открыто** — сопротивление ключа минимально, выходное напряжение близко к нулю, **закрыто** — сопротивление ключа максимально, выходное напряжение равно напряжению источника питания (логическому уровню).

Электронные ключи предназначены для коммутации пассивных элементов цепи, источников питания и т. п. с помощью малых по мощности управляющих сигналов, а также для сопряжения уровней сигналов логических схем.

При проектировании электронных схем, содержащих ключевые элементы, необходимо решать две задачи:

1. Ключевому элементу в статическом режиме необходимо обеспечить либо замкнутое (включенное), либо разомкнутое (выключенное) состояние.

2. Ключевой элемент должен обеспечивать заданное быстродействие, т. е. время включения и отключения, которые выбирают, исходя из конкретных требований, предъявляемых к электронной схеме.

Упрощенное изображение ключевой схемы показано на рис. 6.1.

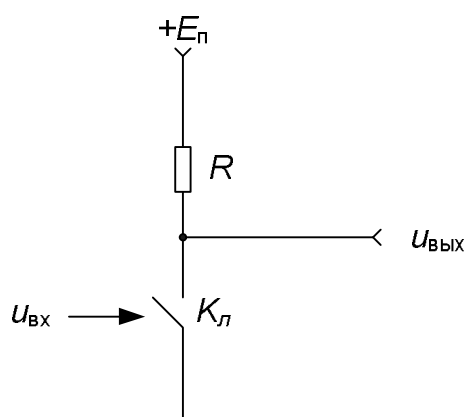


Рис. 6.1 — Упрощенная схема электронного ключа

Замкнутое состояние ключа К_л характеризуется значением сопротивления $R_{от} \ll R$, где R — сопротивление нагрузки ключа. При этом напряжение на выходе ключа близко к нулю $U_{вых} \approx 0$ и через ключ протекает максимальный ток

$$I_{\text{макс}} = \frac{E}{R + R_{от}} \approx \frac{E}{R}.$$

Разомкнутое состояние ключа характеризуется сопротивлением $R_3 \gg R$. При этом напряжение на выходе ключа достигает приблизительно напряжения питания $U_{\text{ВЫХ}} = E$ и через ключ протекает минимальный ток

$$I_{\text{мин}} = \frac{E}{R + R_3} \approx \frac{E}{R_3}.$$

Принципиальная схема простейшего ключа на биполярном транзисторе изображена на рис. 6.2.

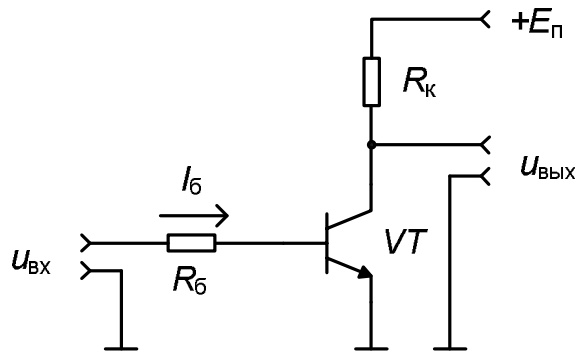


Рис. 6.2 — Схема ключа на биполярном транзисторе

Транзистор VT выполняет роль ключевого элемента, для которого характерны два режима работы:

- режим отсечки;
- режим насыщения.

Режим отсечки соответствует закрытому состоянию транзистора, что имеет место при $U_{\text{ВХ}} \leq U_{\text{отс}}$ и $I_{\text{Б}} = 0$. В этом случае через транзистор протекает неуправляемый малый ток $I_{\text{К}} = I_{\text{КБ0}}(h_{21Э} + 1)$, где $h_{21Э}$ — коэффициент передачи тока транзистора в схеме с общим эмиттером, и напряжение на выходе ключа $U_{\text{ВЫХ}} \approx E_{\text{П}}$.

Режим насыщения соответствует открытому состоянию транзистора, при котором ток коллектора достигает максимального значения

$$I_{\text{макс}} = I_{\text{К нас}} = \frac{E_{\text{П}}}{R_{\text{К}}}. \quad (6.1)$$

Для создания указанного тока коллектора необходимо обеспечить ток базы

$$I_{\text{Б нас}} = \frac{I_{\text{К нас}}}{h_{21Э}}, \quad (6.2)$$

Превышение тока базы $I_{\text{Б}}$ над током базы насыщения $I_{\text{Б нас}}$ не приводит к увеличению тока коллектора. Изменяется только степень насыщения транзистора, которая характеризуется коэффициентом насыщения $S = I_{\text{Б}} / I_{\text{Б нас}}$.

Ток базы определяется сопротивлением $R_{\bar{6}}$ базовой цепи и входным напряжением U ключа

$$I_{\bar{6}} = \frac{U - e_0}{R_{\bar{6}}}, \quad (6.3)$$

где e_0 — падение напряжения на прямо смещенном p - n переходе, которое для кремниевых транзисторов составляет $e_0 = 0,7$ В, а для германиевых — $e_0 = 0,4$ В.

Таким образом, задаваясь величинами U , E_{Π} , $I_{\text{к нас}}$, можно рассчитать параметры элементов схемы насыщенного ключа для конкретного типа транзистора.

Переход транзистора из режима отсечки в режим насыщения и обратно под воздействием управляющего напряжения происходит за конечное время. Длительность переходных процессов обусловлена физическими процессами установления прямого и обратного сопротивлений p - n переходов, накопления и рассасывания накопленного заряда в области базы транзистора, а также постоянными времени входной и выходной цепей ключа.

Различают три временных интервала, характеризующих переходные процессы в транзисторном ключе (рис. 6.3).

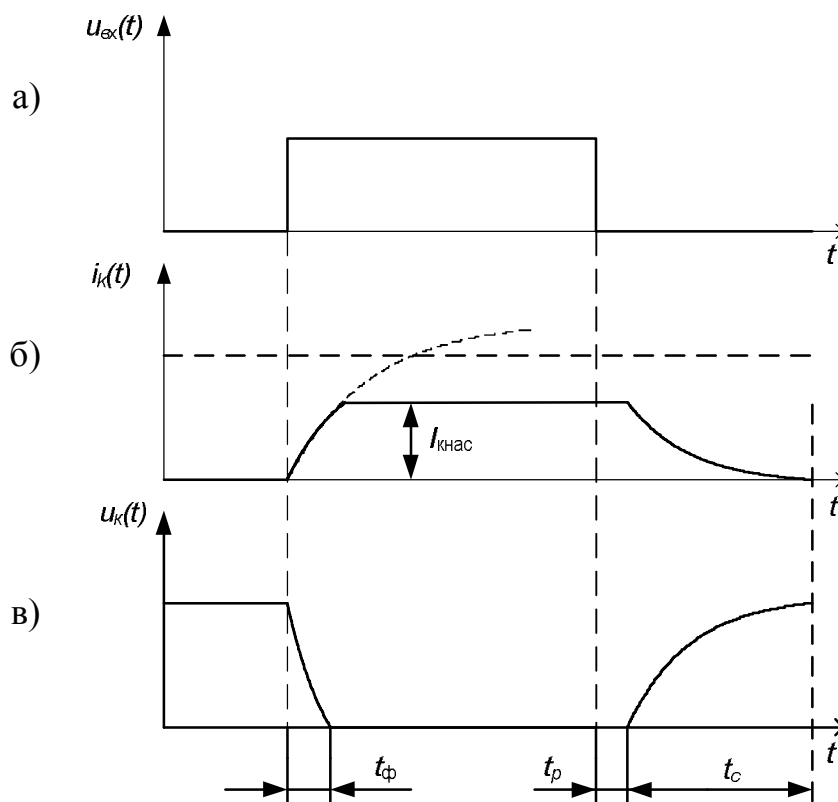


Рис. 6.3 — Временные диаграммы токов и напряжений на выходе ключа

На рис. 6.3 приняты следующие обозначения:

- $u_{\text{вх}}(t)$ — напряжение на входе ключа (а);
- $i_{\text{к}}(t)$ — временная зависимость тока коллектора (б);

- $u_k(t)$ — временная зависимость напряжения на коллекторе (в);
- t_ϕ — длительность фронта или время включения;
- t_p — время рассасывания заряда, накопленного в базе транзистора;
- t_c — время среза или время выключения.

Время включения определяется переходными процессами в самом транзисторе, связанными с установлением сопротивлений p - n переходов транзистора, а также постоянной времени входной цепи.

Переходной процесс установления тока коллектора $i_k(t)$ происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени транзистора τ_T .

$$i_k(t) = I_{k \text{ нас}} (1 - \exp(-t/\tau_T)). \quad (6.4)$$

Ток насыщения $I_{k \text{ нас}}$ определяется соотношением (6.1), задаваясь которым можно рассчитать время включения транзистора t_ϕ .

С увеличением тока базы I_ϕ увеличивается коэффициент насыщения транзистора S , который в транзисторных ключах обычно равен 1,5...2. Таким образом, в режиме насыщения в базе транзистора накапливается избыточный заряд, для рассасывания которого при выключении транзистора требуется некоторое время t_p . При этом, чем больше I_ϕ , тем больше величина заряда, накопленного в базе, и, следовательно, тем больше время t_p .

Повысить быстродействие ключа (уменьшить t_ϕ и t_p) можно следующими двумя способами.

Первый способ реализуется путем включения в цепь базы транзистора ускоряющую емкость C_y (рис. 6.4).

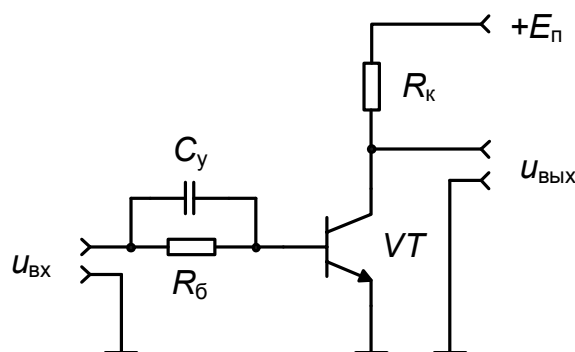


Рис. 6.4 — Схема ключа на биполярном транзисторе с ускоряющей емкостью

При появлении на входе транзистора положительного перепада напряжения в цепи базы формируется большой импульсный ток заряда емкости C_y , вызывающий ускорение процесса включения транзистора. При этом к моменту выключения транзистора ток базы, за счет заряда, накопленного емкостью C_y , уменьшается до величины, определяемой соотношением (6.3). Выбирая вели-

чину $I_{\bar{6}}$ немного больше $I_{\bar{6}\text{нас}}$, можно устранить глубокое насыщение транзистора и уменьшить время t_p .

Второй способ увеличения быстродействия ключа заключается во введении в схему ключа нелинейной обратной связи (рис. 6.5).

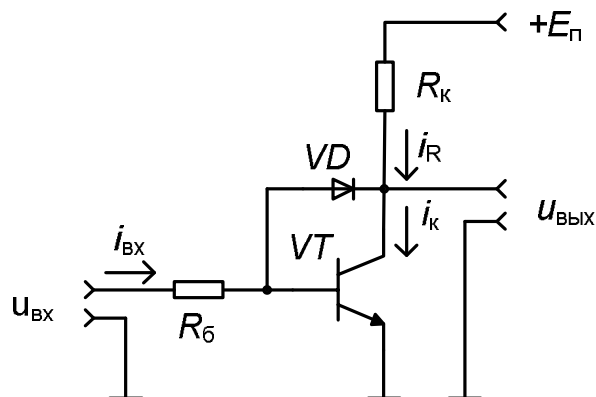


Рис. 6.5 — Схема ключа на биполярном транзисторе с нелинейной обратной связью

Поскольку в режиме насыщения транзистора его коллекторное напряжение близко к нулю, то при положительном напряжении на базе транзистора диод VD открывается и шунтирует транзистор. В результате, ток базы транзистора уменьшается по сравнению со схемой, представленной на рис. 6.2, что следует из первого закона Кирхгофа: $I_{\bar{6}} = I_{\text{вх}} - I_{\text{д}}$, где $I_{\text{д}}$ — ток диода. Уменьшение тока базы обеспечивает уменьшение накопленного к ней заряда. При этом транзистор не доводится до состояния насыщения и время рассасывания неравновесного заряда базы $t_p = 0$. Ток коллектора такого ключа будет превышать ток, протекающий через сопротивление R , что также следует из первого закона Кирхгофа: $I_{\text{к}} = I_R + I_{\text{д}}$.

Время выключения транзистора t_c определяется, в основном, временем зарядом паразитной емкости коллектор — база $C_{\text{кб}}$ через сопротивление $R_{\text{к}}$. Время выключения транзистора t_c примерно равно трем постоянным времени цепи заряда емкости $C_{\text{кб}}$.

6.3. Задание на лабораторную работу

Изучить принцип работы электронного ключа на биполярном транзисторе, его характеристики и параметры. Ознакомиться с методикой определения входного и выходного сопротивлений электронного ключа.

6.4. Приборы и оборудование

Лабораторная установка состоит из лабораторного макета и измерительных приборов:

- генератор низкой частоты ГЗ-33;
- электронный стрелочный вольтметр ВЗ-34;
- электронный осциллограф.

Лабораторный макет (рис.6.6) содержит формирователь прямоугольных импульсов (меандра) из гармонического напряжения на стабилитроне $VD1$, электронный ключ на транзисторе VT , стабилизатор напряжения на стабилитроне $VD2$, сопротивление нагрузки, подключаемое к выходу ключа с помощью тумблера S .

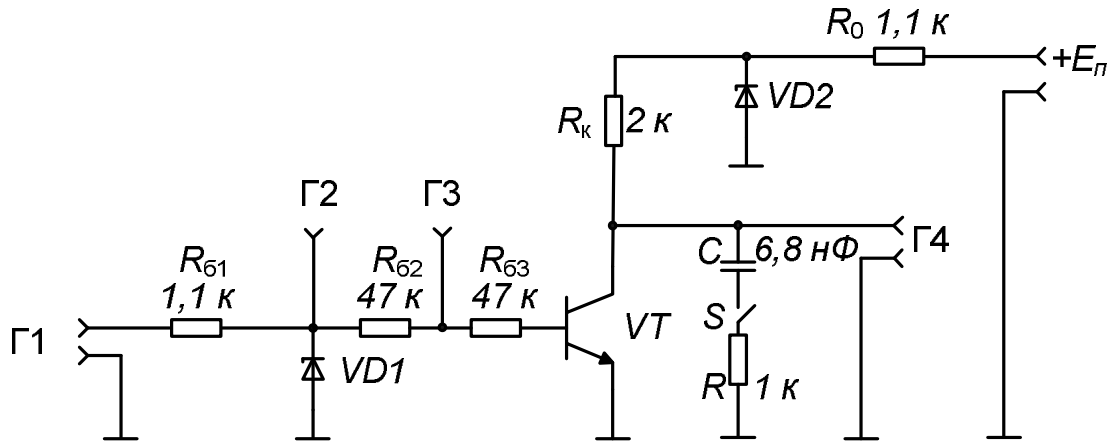


Рис. 6.6 — Схема макета для исследования ключа на биполярном транзисторе

6.5. Программа исследований

6.5.1. Установить напряжение питания базового блока макета 10...20 В.

6.5.2. Подключить выход генератора низкой частоты к входу макета (гнездо Г1) и установить выходное напряжение генератора 10...20 В частотой 1000 Гц.

6.5.3. Подключить осциллограф поочередно к входу (гнезда Г2) и выходу (гнезда Г4) электронного ключа и убедиться, что на входе и выходе ключа однополярное импульсное напряжение со скважностью равной двум (меандр).

6.5.4. Определить с помощью осциллографа минимальное (транзистор насыщен) и максимальное (транзистор закрыт) напряжения на выходе ключа.

6.5.5. Измерить с помощью вольтметра ВЗ-34 действующие значения напряжений $U_{Г2}$ на входе ключа — (гнездо Г2) и $U_{Г3}$ (гнездо Г3).

6.5.6. Измерить с помощью вольтметра ВЗ-34 действующие значения напряжений на выходе ключа (на гнездах Г4) для двух положений тумблера: тумблер разомкнут — $U_{Г4}$ и тумблер замкнут — U_R .

6.5.7. Повторить измерения по пунктам 6.5.2. — 6.5.6. для частот генератора 10 кГц и 100 кГц.

6.5.8. Построить осциллограммы напряжений по пунктам 6.5.3. и 6.5.7.

6.5.9. По данным пунктов 6.5.5. и 6.5.7. определить входной ток и входное сопротивление ключа:

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{Г2} - U_{Г3}}{R_2}; \quad R_{\text{вх}} = \frac{U_{Г2}}{I_{\text{вх}}}.$$

6.5.10. По данным пунктов 6.5.6. и 6.5.7. определить выходное сопротивление ключа по формуле

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_K^2 R (U_{K1} - U_{K2})}{U_{K2} R_K (R_K + R) - U_{K1} R_K R},$$

где R_K — сопротивление в коллекторной цепи;

R — сопротивление нагрузки, подключаемое тумблером S ;

U_{K1} — напряжение на выходе ключа при отключенном сопротивлении нагрузки;

U_{K2} — напряжение на коллекторе транзистора (на выходе ключа) при включенном сопротивлении нагрузки R .

6.5.11. Определить коэффициент усиления ключа по мощности

$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{U_2^2}{R} = \frac{U_{\Gamma 2}^2}{R_{\text{вх}}}.$$

6.6. Содержание отчета

6.6.1. Схема макета для исследования ключа на биполярном транзисторе.

6.6.2. Осциллограммы напряжений построенные по пунктам 6.5.3. и 6.5.7.

6.6.3. Результаты расчета входного тока и входного сопротивления ключа на биполярном транзисторе.

6.6.4. Результаты расчета выходного сопротивления и коэффициент усиления ключа по мощности.

6.6.5. Выводы по работе.

6.7. Контрольные вопросы

6.7.1. Объясните физический смысл степени насыщения транзистора и его влияния на параметры выходного импульсного сигнала транзисторного ключа.

6.7.2. От чего зависит длительность фронта выходного импульса ключа на биполярном транзисторе.

6.7.3. От чего зависит время рассасывания неравновесного заряда базы ключа на биполярном транзисторе.

6.7.4. От чего зависит время среза выходного импульса ключа на биполярном транзисторе.

6.7.5. Как влияют паразитные емкости транзистора на работу ключа.

6.7.6. Поясните принцип действия ускоряющей емкости ключа на биполярном транзисторе.

6.7.7. Поясните принцип действия нелинейной обратной связи в ключе на биполярном транзисторе.

6.7.8. Как можно найти входное и выходное сопротивление ключа на биполярном транзисторе?

6.7.9. Как можно найти коэффициент усиления по мощности ключа?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 0907 — “Радиотехника” / В. Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 15 с.
2. Батушев В.А. Электронные приборы / В.А. Батушев.— М.: Высшая школа, 1990.— 364 с.
3. Дулин В.Н. Электронные приборы / В. Н. Дулин. — М.: Энергия, 1977.- 424 с.
4. Полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы и технологии их производства: учеб. для студ. вузов II — IV уровня аккредитации / Ю. Е. Гордиенко, А. Н. Гуржий, А. В. Бородин, С. С. Бурдукова. — Харьков: Компания СМІТ, 2004. — 620 с.
5. Валенко В. С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств / В. С. Валенко. — М.: Додэка — XXI, 2001. — 366 с.
6. Прохоров Е. Д. Твердотіла електроніка / Е. Д. Прохоров. — Харків: Изд-во Харків. нац. ун-та ім. В. Н. Каразіна, 2007. — 544 с.
7. Москатов Е.А. Электронная техника / Е. А. Москатов. — Таганрог: Изд-во ТРТИ, 2004. — 121с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Образец титульного листа

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

ОТЧЕТ
по лабораторной работе

(название лабораторной работы)
по дисциплине «Компонентная база РЭА»

Выполнил студент гр. _____

(Ф.И.О.)

Отметка о защите _____

Преподаватель _____
(Ф.И.О.)

Севастополь
20__

Заказ № _____ от “ _____ ” _____ 2009 г. Тираж _____ экз.
Изд-во СевНТУ