

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

---

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»  
Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»

**Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова**

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Электронное учебное издание

*Методические указания к лабораторным работам по дисциплинам  
«Электроника», «Электроника и микроэлектроника», «Электроника и  
микропроцессорная техника»*

Москва

(С) 2014 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

УДК 621.38

*Рецензент:* к. т. н., доцент Масленникова С. И.

**Бутенко Д.В., Созинов Б.Л., Черкасова Г.С.**

Исследование полупроводниковых приборов. Методические указания к лабораторным работам по дисциплинам «Электроника», «Электроника и микроэлектроника», «Электроника и микропроцессорная техника»/Электронное учебное издание. - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2014. 64 с.

Приведено описание цикла лабораторных работ по исследованию полупроводниковых приборов. Даны краткие сведения об основных характеристиках и параметрах диодов, биполярных и полевых транзисторов. Приводится описание лабораторного макета. Рассмотрена методика измерения вольт-амперных характеристик и определения параметров диодов и транзисторов. Описана методика изучения работы биполярного транзистора в режиме переключения.

Для студентов МГТУ имени Н.Э. Баумана специальностей «Радиоэлектронные системы и комплексы», «Биотехнические системы и технологии», «Системы управления летательными аппаратами».

*Рекомендовано учебно-методической комиссией факультета «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Электронное учебное издание*

**Бутенко Дмитрий Викторович**

**Созинов Борис Леонидович**

**Черкасова Галина Сергеевна**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

© 2014 МГТУ имени Н.Э. Баумана

[Оглавление](#)

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

Оглавление .....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ .....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ .....	8
Краткие сведения о полупроводниковых диодах и стабилитронах .....	8
Задание и порядок выполнения работы .....	13
Обработка экспериментальных данных .....	16
Выполнение отчета .....	17
Вопросы для самоконтроля и подготовки к защите .....	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА. МОДЕЛЬ ЭБЕРСА-МОЛЛА .....	18
Краткие сведения о биполярных транзисторах .....	18
Задание и порядок выполнения работы .....	26
Обработка экспериментальных данных .....	28
Выполнение отчета .....	28
Вопросы для самоконтроля и подготовки к защите .....	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА....	29
Краткие сведения о полевых транзисторах .....	29
Задание и порядок выполнения работы .....	32
Обработка экспериментальных данных .....	33
Выполнение отчета .....	33
Вопросы для самоконтроля и подготовки к защите .....	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В РЕЖИМЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ .....	35
Краткие сведения о работе биполярного транзистора в ключевом режиме.....	35
Задание и порядок выполнения работы .....	39
Выполнение отчета .....	42
Вопросы для самоконтроля и подготовки к защите .....	42
Приложение 1. Справочные данные полупроводниковых диодов.....	43
Приложение 2. Справочные данные стабилитронов .....	44
Приложение 3. Справочные данные биполярных транзисторов.....	46
Приложение 4. Справочные данные полевых транзисторов .....	48

Приложение 5. Формы отчетов по лабораторным работам .....	49
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	63

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплин «Электроника», «Электроника и микроэлектроника» и др. традиционно начинается с изучения полупроводниковых приборов – диодов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров и т. д. При этом рассматриваются их принцип работы, основные характеристики и параметры, а также основы применения в электронных устройствах. Поэтому лабораторный практикум по данным дисциплинам также начинается с работ по исследованию характеристик и параметров полупроводниковых приборов. При сравнительной технической простоте такие работы особенно важны потому, что многие студенты не обладают практическим опытом в данной области и при выполнении этих работ получают первые практические навыки использования измерительных приборов и сборки электронных схем.

В настоящем пособии приведены методические указания к лабораторным работам, которые посвящены исследованию полупроводниковых приборов и выполняются студентами при изучении дисциплин «Электроника», «Электроника и микроэлектроника», «Электроника и микропроцессорная техника». Программа лабораторного практикума определяется по программам указанных дисциплин для студентов соответствующих специальностей.

В экспериментальную часть работ 1-3 входит снятие вольт-амперных характеристик (ВАХ) германиевого и кремниевого диодов и стабилитрона, биполярного и полевого транзисторов. По снятым ВАХ далее определяются основные параметры исследуемых приборов по постоянному и переменному току, а также параметры их математических моделей. При выполнении работы 4 исследуется работа биполярного транзистора в ключевом режиме: изучается характер переходных процессов в схемах простейшего транзисторного ключа, а также их зависимость от режима работы транзистора и элементов схемы.

Общей целью лабораторных работ данного цикла является экспериментальное подтверждение теоретических сведений о принципе работы, характеристиках и параметрах полупроводниковых диодов и транзисторов; изучение методики обработки экспериментальных данных; приобретение навыков работы с радиоизмерительными приборами. Умения и навыки, приобретаемые студентами при выполнении данных работ, являются базовыми для прохождения лабораторного практикума как по другим разделам указанных дисциплин, так и по иным общепрофессиональным и специальным дисциплинам.

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторный практикум по дисциплинам «Электроника», «Электроника и микроэлектроника», «Электроника и микропроцессорная техника» и другим дисциплинам проводится на универсальных лабораторных стендах, основой которых является комплект измерительных приборов и источников питания. В зависимости от проводимой работы на стенд устанавливается нужный лабораторный макет. Кроме того, стенд снабжается необходимым набором соединительных кабелей и проводов. Вид измерительного стенда приведен на рис. 1.

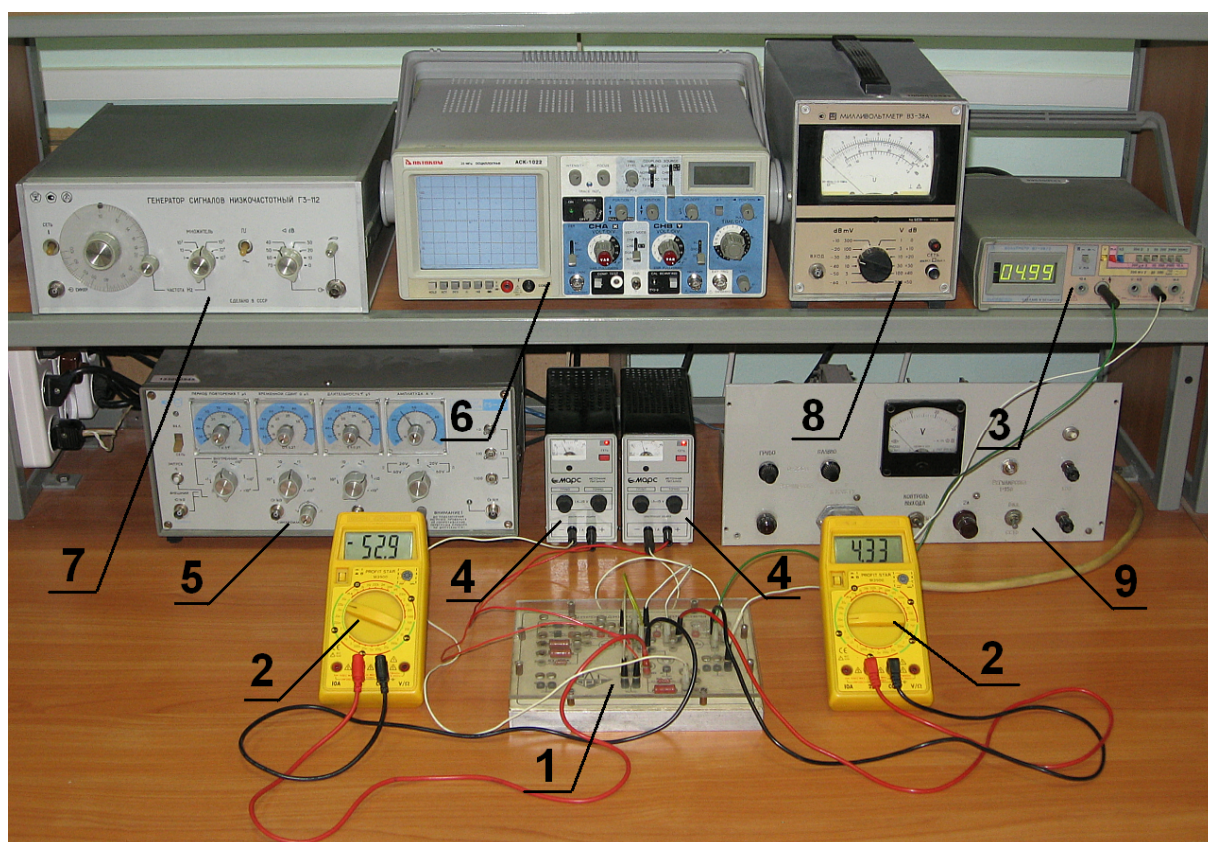


Рис. 1. Общий вид лабораторного измерительного стенда

На переднем плане находится макет «Полупроводниковые приборы» (1), на котором выполняются все рассмотренные в данном пособии лабораторные работы. Для измерения постоянного напряжения и тока при снятии ВАХ используются цифровые мультиметры М3900 (2) и цифровой вольтметр В7-58/2 (3). В качестве регулируемых источников постоянного напряжения используются стабилизированные источники питания ИПС-1 или «Марс» (4). При исследовании работы транзистора в режиме пере-

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



ключения в качестве источника входного сигнала используется генератор импульсов Г5-63 (5), а для визуального контроля входного и выходного сигналов и измерения параметров выходного сигнала используется двухканальный осциллограф АСК-1022 (6). Генератор синусоидального сигнала Г3-112 (7), вольтметр переменного напряжения В3-38А (8) и высоковольтный источник питания (9) при выполнении рассмотренных работ не используются.

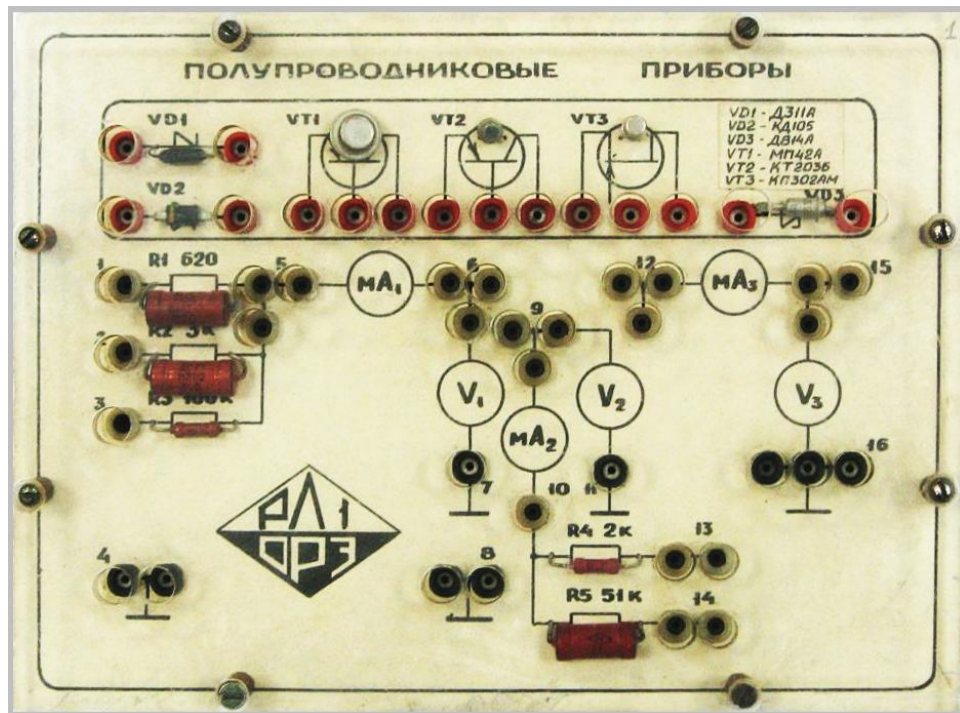


Рис. 2. Передняя панель макета «Полупроводниковые приборы»

Вид передней панели макета «Полупроводниковые приборы» показан на рис.2. В состав макета входят исследуемые полупроводниковые приборы: диоды VD1 и VD2 (один из диодов германиевый, другой кремниевый), стабилитрон VD3, биполярные транзисторы (германиевый VT1 и кремниевый VT2), полевой транзистор с управляющим переходом VT3, а также токоограничивающие резисторы разных номиналов. Необходимые схемы измерений могут быть собраны на макете с помощью перемычек, измерительные приборы и источники питания подключаются к макету с помощью соединительных кабелей и проводов. Типы исследуемых полупроводниковых указываются на макете, их основные справочные данные приводятся в Приложениях 1-4.

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

**Цель работы** - исследование характеристик германиевого и кремниевого диодов, изучение методики измерения характеристик и расчет параметров математической модели диода по характеристикам.

### Краткие сведения о полупроводниковых диодах и стабилитронах

*Полупроводниковым диодом* называется полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя внешними выводами. В качестве выпрямляющего перехода используется р-п-переход или переход Шоттки. Выпрямляющее действие проявляется как существенная (в несколько порядков) разница токов диода при изменении полярности напряжения на диоде. Большинство диодов выполняются на основе несимметричных р-п-переходов, когда в р- и п-областях создаются разные концентрации примеси (степени легирования). Область с более высокой степенью легирования называется *эмиттером*, область с меньшей степенью легирования называется *базой* диода.

При образовании р-п-перехода происходит диффузия основных носителей заряда через переход, в приграничных зонах р- и п- областей уменьшается концентрация основных носителей заряда и образуются нескомпенсированные заряды ионов примесей. Эти заряды создают в переходе электрическое поле, которое препятствует диффузии основных носителей заряда, т. е. создает для них потенциальный барьер. С другой стороны, это электрическое поле ускоряет дрейф неосновных носителей заряда через переход. Таким образом, при отсутствии внешнего напряжения дрейф неосновных носителей уравнивается диффузией основных носителей заряда, дрейфовый ток равен диффузионному и общий ток через переход равен нулю. При этом внутреннее электрическое поле перехода характеризуется *контактной разностью потенциалов*  $\varphi_K$ . При прямом включении р-п-перехода внешнее напряжение прикладывается плюсом к р-области, а минусом к п-области, и напряженность электрического поля в переходе будет уменьшаться (уменьшается высота потенциального барьера перехода). Это приводит к увеличению диффузионного тока по сравнению с дрейфовым, т. е.  $I_{\text{дифф}} > I_{\text{др}}$  и прямой ток будет в основном создаваться диффузией основных носителей заряда. Пря-

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



мое включение сопровождается *инжекцией* – введением носителей заряда в область полупроводника, где они являются неосновными из-за снижения потенциального барьера. Вследствие инжекции растет концентрация неосновных носителей заряда вне р-п-перехода, т. е. в р- и п-областях. В несимметричных р-п-переходах преобладает инжекция носителей заряда из эмиттера в базу.

При обратном включении р-п-перехода внешнее напряжение прикладывается плюсом к п-области, а минусом к р-области, напряженность электрического поля в переходе будет возрастать и потенциальный барьер перехода будет повышаться. В этом случае диффузионный ток уменьшается по сравнению с дрейфовым и при  $U_{обр} \approx 0,1$  В становится практически равным 0. Отметим, что дрейфовый ток не зависит от внешнего напряжения и определяется концентрацией неосновных носителей заряда на границах р-п-перехода. Поэтому обратный ток, обусловленный дрейфом неосновных носителей заряда через переход, оказывается на несколько порядков меньше прямого и при  $U_{обр} > 0,1$  В практически не зависит от внешнего напряжения. При обратном включении происходит *экстракция* – выведение неосновных носителей заряда в область, где они являются основными, из-за повышения потенциального барьера. Таким образом, р-п-переход обладает свойством выпрямления тока.

Рассмотренные свойства идеализированного р-п-перехода подтверждаются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ) – зависимостью тока через переход от напряжения на переходе которая может быть представлена уравнением

$$I = I_T (\exp(U/\varphi_T) - 1),$$

где  $I_T$  – тепловой ток (ток насыщения),  $\varphi_T = kT/e$  – тепловой потенциал.

ВАХ идеального р-п-перехода и реального диода показаны на рис. 3. При прямом включении ток через переход нелинейно возрастает и при  $U_{пр} \approx \varphi_K$  ВАХ идеального р-п-перехода практически вертикальна. При обратном включении ВАХ идеального перехода горизонтальна:  $I_{обр} = I_{др} = I_T = \text{const}$  (кроме начального участка протяженностью менее 0,1 В).

Как показано на рис. 3, ВАХ реального диода отличается от ВАХ идеального р-п-перехода. При прямом включении эти отличия обусловлены рекомбинацией носителей заряда в р-п-переходе и падением напряжения на сопротивлении базы диода  $r_b$ . При малых прямых токах рекомбинация носителей заряда в р-п-переходе оказывает более существенное влияние на ВАХ, т. к. падение напряжения на  $r_b$  незначительно. Реком-

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

бинация в переходе приводит к дополнительному возрастанию прямого тока, поэтому начальный участок прямой ветви ВАХ реального диода проходит несколько выше идеальной ВАХ. Для его описания в уравнении ВАХ проводится замена  $\varphi_T$  на  $m\varphi_T$ , где  $m$  – коэффициент неидеальности. В зависимости от структуры диода  $m$  может принимать значения от 1 до 2, причем часто  $m$  оказывается близок к 1. Тогда ВАХ реального диода на начальном участке практически совпадает с идеальной ВАХ. При увеличении прямого тока рекомбинация в переходе проявляется слабо, зато падение напряжения на  $r_b$  увеличивается и становится соизмеримым с напряжением на переходе. ВАХ реального диода отклоняется от идеальной ВАХ, на ней появляется линейный участок, наклон которого определяется величиной  $r_b$ . С учетом вышеизложенного уравнение для прямой ветви ВАХ реального диода может быть представлено как

$$I = I_T (\exp((U - I r_b) / \varphi_T) - 1) \text{ или } U = \varphi_T \ln((I/I_T) + 1) + I r_b.$$

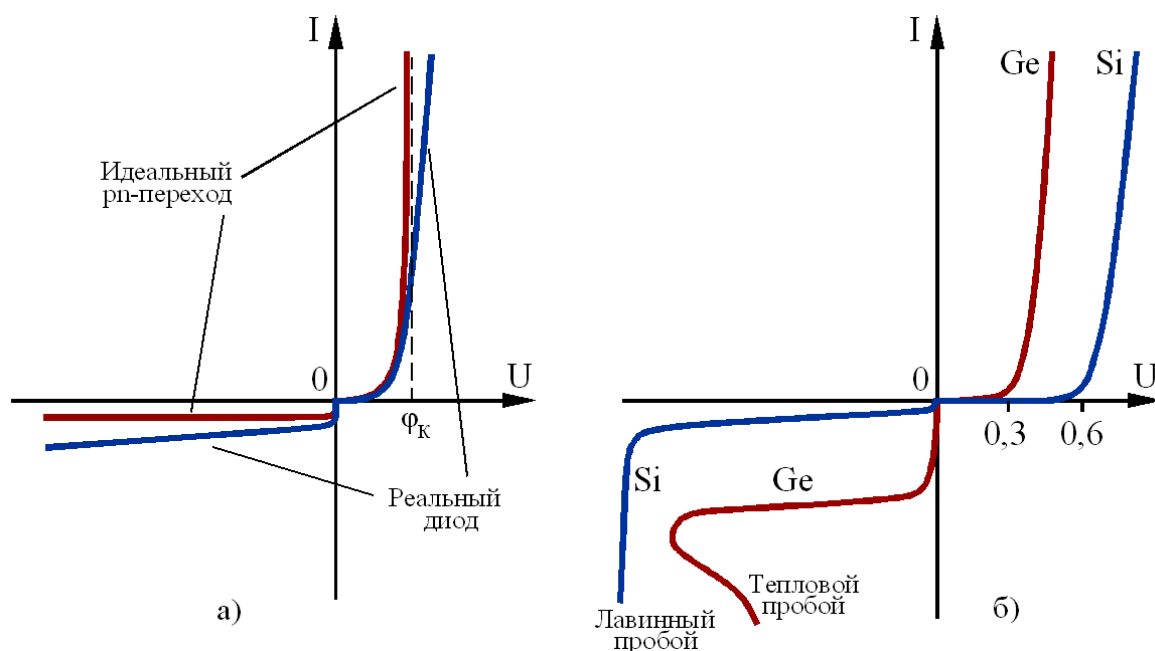


Рис. 3. ВАХ идеального р-п-перехода и реального диода (а); ВАХ германиевого и кремниевого диодов (б)

При больших прямых токах за счет инжекции носителей заряда в базу величина  $r_b$  уменьшается и ВАХ отклоняется от прямой линии.

Обратный ток реального диода может значительно превышать обратный ток идеального р-п-перехода, т. к. помимо теплового тока  $I_T$  он включает в себя ток утечки  $I_u$  и ток термической генерации носителей заряда в переходе  $I_{TG}$ . При увеличении обратного напряжения ток  $I_{TG}$  возрастает, поэтому обратный ток реального диода с уве-

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

личением обратного напряжения также будет возрастать, но вид обратной ветви ВАХ будет зависеть от соотношения токов  $I_T$ ,  $I_{TG}$  и  $I_U$ .

На рис. 3, б показаны ВАХ германиевого и кремниевого диодов. Прямые ветви ВАХ имеют похожий вид, однако ВАХ кремниевого диода расположена правее ВАХ германиевого диода, что объясняется разной величиной контактной разности потенциалов их р-п-переходов. Типовые значения  $\phi_K$  для кремниевых р-п-переходов 0,7-0,8 В, для германиевых 0,3-0,4 В, поэтому у кремниевых диодов прямые напряжения оказываются больше, чем у германиевых. Кремниевые диоды имеют обратные токи гораздо меньшие, чем германиевые, а разная форма обратных ветвей их ВАХ объясняется различным соотношением составляющих обратного тока  $I_T$ ,  $I_{TG}$  и  $I_U$ . В германиевых диодах  $I_T$  значительно превышает  $I_{TG}$  и  $I_U$ , поэтому при малых обратных напряжениях  $I_{обр}$  резко возрастает, а далее ВАХ может идти почти горизонтально. В кремниевых диодах  $I_T \ll I_{TG}$ , поэтому начальный скачок обратного тока мал, а зависимость обратного тока от обратного напряжения выражена гораздо сильнее, чем в германиевых диодах. Кроме того, для германиевых диодов типичным является тепловой пробой, а для кремниевых диодов – лавинный или (реже) туннельный.

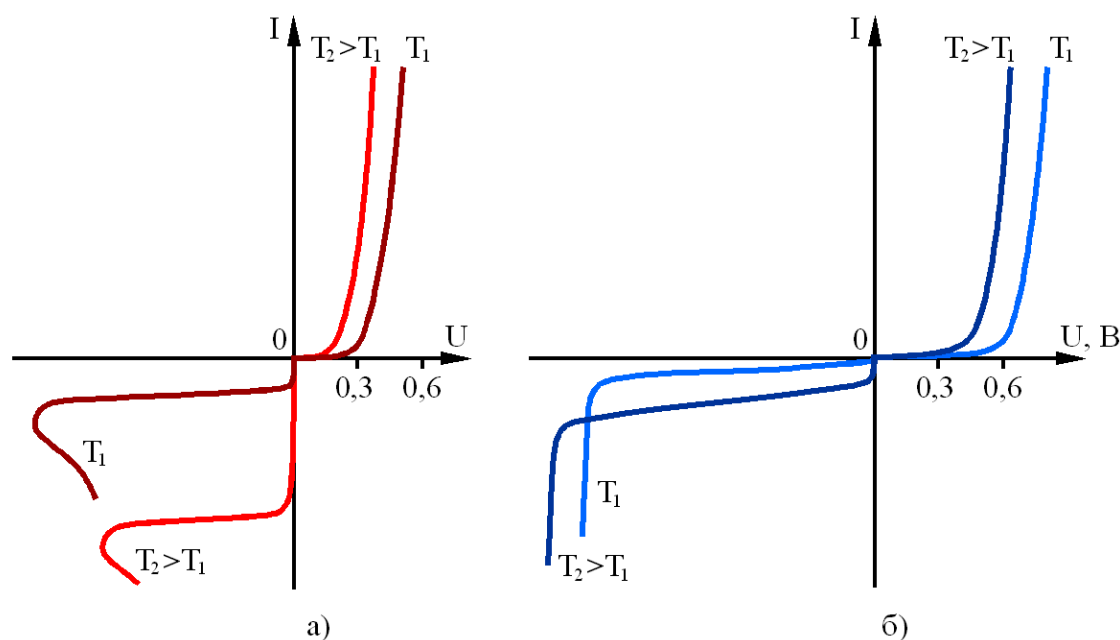


Рис.4. Влияние температуры на ВАХ германиевого (а) и кремниевого (б) диодов

Из-за нелинейности ВАХ диода его сопротивление переменному току, т.е. *дифференциальное сопротивление*  $r_{диф}$ , существенно отличается от сопротивления постоянному току  $R_0$ . Дифференциальное сопротивление диода, определяется выражением  $r_{диф} = dU/dI$  и связано с крутизной ВАХ диода в выбранной точке. Для идеального перехода  $r_{диф} = \phi_T (I + I_T)$ . Для реального диода в прямом включении  $r_{диф} = \phi_T (I + I_T) + r_б$ .

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

Влияние температуры на ВАХ диода показано на рис. 4. Изменение температуры оказывает большее влияние на обратную ветвь ВАХ, т. к. все составляющие обратного тока зависят от концентрации неосновных носителей заряда. Часто используется приближенная зависимость обратного тока диода от температуры:

$$I_{\text{обр}}(T) \approx I_{\text{обр}}(T_0) 2^{\Delta T/T_2},$$

где  $I_{\text{обр}}(T_0)$  – значение обратного тока, измеренное при заданной  $T_0$  (часто  $T_0=298$  К),  $\Delta T = T - T_0$ ,  $T_2$  – «температура удвоения», т. е. изменение температуры, при котором обратный ток удваивается. Для германия  $T_2$  обычно находится в пределах 8-10 К, для кремния – 6-7 К. Также при приближенных расчетах полагают, что при увеличении  $T$  на каждые 10 К обратный ток германиевых диодов увеличивается в 2 раза, а кремниевых в 2,5 раза. Прямое напряжение диода уменьшается в среднем на 2,2 мВ при увеличении температуры на 1 К.

*Стабилитроном* называется полупроводниковый диод, работа которого основана на использовании явления электрического пробоя, предназначенный для стабилизации напряжения. Рабочим участком ВАХ стабилитрона является участок пробоя (рис. 5), на котором большим изменениям тока соответствуют малые изменения напряжения. К основным параметрам стабилитрона, определяемым для заданного тока стабилизации, относятся: номинальное напряжение стабилизации  $U_{\text{ст.ном}}$  и его разброс; дифференциальное сопротивление  $r_{\text{диф}}$ , температурный коэффициент напряжения стабилизации  $\text{TK}U_{\text{ст.}}$ .

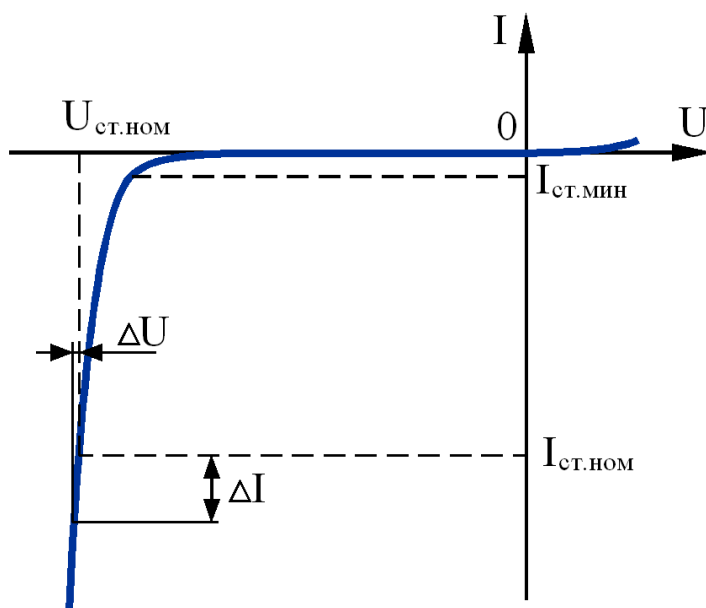


Рис. 5. ВАХ стабилитрона

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

Стабилитроны с низким (менее 5 В)  $U_{ст}$  выполняются на основе p-n-переходов с низкоомной базой, поэтому пробой в них носит туннельный характер и с ростом температуры происходит уменьшение  $U_{ст}$  ( $TKU_{ст} < 0$ ). Для стабилитронов со сравнительно высокоомной базой напряжения стабилизации превышают 5-6 В, для них типичным является лавинный пробой, а с ростом температуры  $U_{ст}$  возрастает ( $TKU_{ст} > 0$ ). Дифференциальное сопротивление стабилитронов различных типов может находиться в пределах от десятых долей Ом до десятков Ом, с ростом тока стабилизации оно уменьшается.

### Задание и порядок выполнения работы

1. Начертить принципиальные схемы для снятия прямых и обратных ветвей ВАХ диода с указанием полярности подключения источника питания и типов измерительных приборов (рис. 6). Для приборов указать пределы измерений. Выписать из приложений 1-2 типы и основные параметры исследуемых диодов и стабилитрона. Исследуемые диоды обозначены на макете VD1 и VD2; один из диодов германиевый, другой кремниевый. Стабилитрон имеет обозначение VD3. Типы исследуемых приборов указаны на макете.

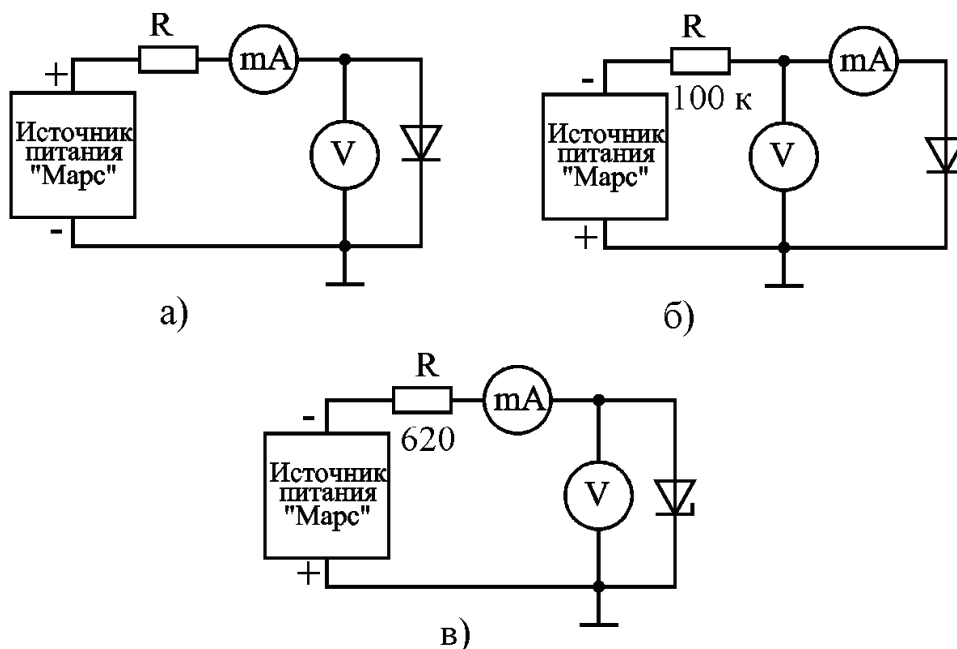


Рис. 6. Схемы для исследования прямой ветви ВАХ диода (а), обратной ветви ВАХ диода (б) и обратной ветви ВАХ стабилитрона (в)

**Замечание.** При снятии ВАХ нужно свести к минимуму погрешности, вносимые измерительными приборами из-за их неидеальности: внутреннее сопротивление вольт-

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

метра очень высокое, но не бесконечное, а внутреннее сопротивление измерителя тока отличается от нуля и зависит от предела измерения. Поэтому схемы снятия прямой и обратной ветвей ВАХ диода отличаются не только полярностью подключения источника питания, но и способом включения в схему измерительных приборов. Так, при снятии прямой ветви ВАХ (рис. 6, а) вольтметр подключен параллельно диоду и измеряет напряжение на нем, а миллиамперметр измеряет *сумму тока диода и тока, протекающего через вольтметр*, что и приводит к измерению тока с погрешностью. Однако из-за высокого внутреннего сопротивления вольтметра (порядка 10 МОм) ток вольтметра будет составлять единицы мкА, т. е. для большей части измеряемой ВАХ будет минимум на 2-3 порядка меньше тока диода. Поэтому погрешность измерения тока диода будет небольшой. Если же подсоединить вольтметр к схеме так, как показано на рис. 6, б, то он будет измерять сумму прямого напряжения на диоде и *падения напряжения на внутреннем сопротивлении миллиамперметра*, которые могут оказаться соизмеримыми. В этом случае погрешность измерения будет гораздо большей.

Однако при снятии обратной ветви ВАХ именно вариант, показанный на рис. 6, б обеспечивает минимальную погрешность измерения, т. к. падение напряжения на внутреннем сопротивлении микроамперметра (достаточно далеко от нуля), создаваемое очень малым обратным током диода, будет на несколько порядков меньше обратного напряжения диода. Если же вольтметр подключить непосредственно к диоду, то он будет измерять только обратное напряжение диода, но микроамперметр будет измерять *сумму обратного тока диода и тока вольтметра*. Малый обратный ток диода может быть соизмерим с током вольтметра, а для кремниевых диодов может быть и гораздо меньше, и в этом случае погрешность измерения обратного тока диода может быть недопустимо большой.

## **2. Снять прямую ветвь ВАХ диодов VD1 и VD2.**

Собрать схему для снятия характеристики; диод VD1 включить в прямом направлении в соответствии со схемой рис. 6, а. При снятии начального участка прямой ветви ВАХ (токи менее 150 мкА) последовательно с диодом включить резистор 100 кОм. Изменяя выходное напряжение источника питания, последовательно устанавливать токи диода 50 мкА, 100 мкА; 500 мкА, 1 мА, 2 мА, 5 мА, 7 мА, 10 мА и измерять соответствующие им напряжения на диоде. Для получения токов 500 мкА и более заменить резистор 100 кОм на 620 Ом, предварительно отключив источник питания (либо уменьшив его выходное напряжение до нуля). Аналогично снять прямую ветвь ВАХ диода VD2.

## [Оглавление](#)

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



По результатам измерений построить графики прямых ветвей ВАХ диодов VD1 и VD2 в одной системе координат.

### 3. Снять обратную ветвь ВАХ диодов VD1 и VD2.

Собрать схему снятия обратной ветви ВАХ с диодом VD1 (рис. 6, б). Последовательно с диодом включить резистор 100 кОм. Изменяя выходное напряжение источника напряжения, последовательно устанавливать напряжения на диоде 0,5 В, 1 В, 2 В, 5 В, 7 В, 10 В и измерять соответствующие им токи диода.

Аналогично снять обратную ветвь диода VD2. По результатам измерений построить графики обратных ветвей диодов VD1 и VD2 в одной системе координат.

### 4. Снять обратную ветвь ВАХ стабилитрона VD3.

Собрать схему снятия обратной ветви ВАХ стабилитрона VD3 (рис. 6, в). Последовательно со стабилитроном включить резистор 620 Ом. Медленно увеличивая выходное напряжение источника питания, добиться увеличения обратного тока стабилитрона до 0,5 мА (стабилитрон входит в режим электрического пробоя) и измерить напряжение на стабилитроне. Далее, изменяя выходное напряжение источника питания, последовательно устанавливать токи стабилитрона 1 мА, 2 мА, 5 мА, 7 мА, 10 мА и измерять соответствующие им напряжения на стабилитроне. По результатам измерений построить график обратной ветви ВАХ стабилитрона.

### 5. Определить внутреннее сопротивление измерителя тока для всех использованных при снятии ВАХ пределов измерения.

Для этого из схемы исключить диод, т.е. собрать схему рис. 7, а. Для пределов 20 и 200 мкА последовательно с измерителем тока включить резистор 100 кОм, для остальных пределов – 620 Ом.

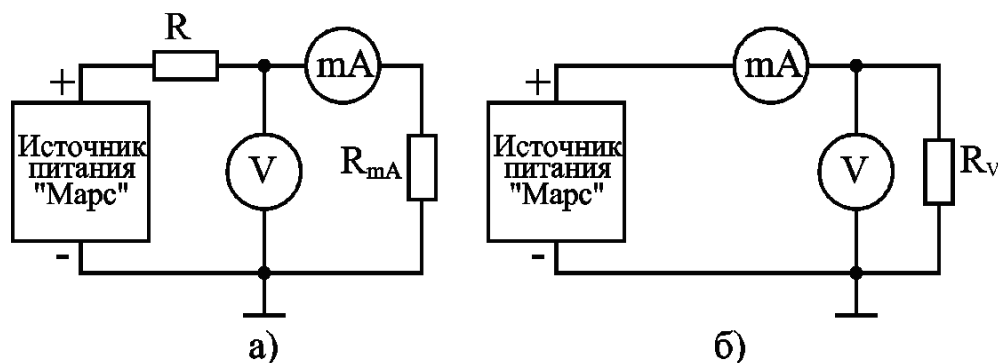


Рис. 7. Схемы для определения внутреннего сопротивления миллиамперметра (а) и вольтметра (б)

Изменяя напряжение источника питания, установить ток, протекающий через измеритель тока (для удобства можно устанавливать ток, кратный 10, например 10 мА),

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

измерить падение напряжение на измерителе тока и по результатам определить его внутреннее сопротивление.

### 6. Определить внутреннее сопротивление вольтметра для всех использованных при снятии ВАХ пределов измерения.

Для этого собрать схему рис. 7. б. Изменяя напряжение источника питания, установить по вольтметру напряжение 10 В (для предела 20 В) или 1 В (для предела 2 В), измерить ток и по результатам измерений определить внутреннее сопротивление вольтметра.

### Обработка экспериментальных данных

1. По измеренным ВАХ определить:

1) сопротивление по постоянному току и дифференциальное сопротивление диодов VD1 и VD2 в прямом включении для  $I_{пр.0} = 5 \text{ mA}$ ;

2) сопротивление по постоянному току и дифференциальное сопротивление диодов VD1 и VD2 в обратном включении для  $U_{обр.0} = 5 \text{ V}$ ;

3) дифференциальное сопротивление стабилитрона при токах стабилизации 2 мА и 7 мА.

Способы определения дифференциального сопротивления диода по ВАХ показаны на рис. 8.

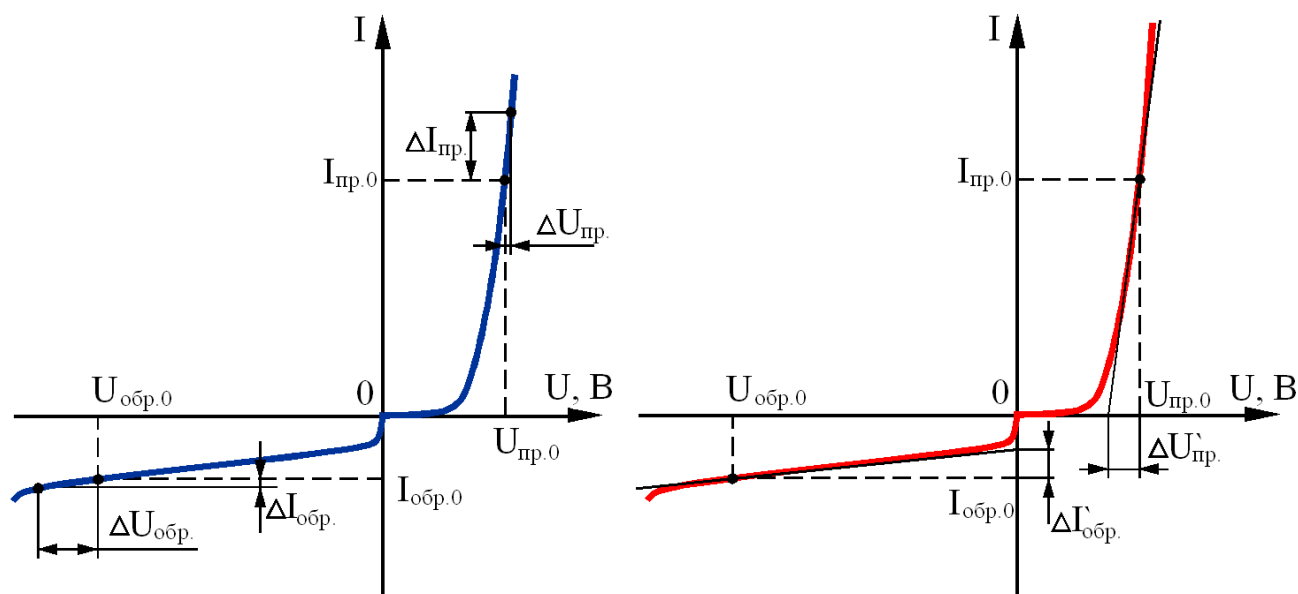


Рис. 8. Определение дифференциального сопротивления диода по ВАХ

2. Использовать результаты измерений для определения параметров математической модели диода (для РЛ-1).

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

## Выполнение отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется индивидуально каждым студентом и должен содержать:

- 1) название и цель работы;
- 2) схемы проведения измерений с указанием типов измерительных приборов;
- 3) параметры исследованных диодов и стабилитрона;
- 4) графики измеренных ВАХ;
- 5) результаты обработки экспериментальных данных;
- 6) выводы по результатам работы.

### Вопросы для самоконтроля и подготовки к защите

1. Нарисовать энергетические диаграммы р-п-перехода при отсутствии внешнего напряжения, при прямом и обратном включении.
2. Что такое контактная разность потенциалов?
3. Нарисовать ВАХ идеального р-п-перехода и реального диода. Объяснить различия.
4. Нарисовать ВАХ германиевого и кремниевого диода. Объяснить различия.
5. Что такое дифференциальное сопротивление диода? Каким образом оно соотносится с сопротивлением постоянному току?
6. Показать способ определения дифференциального сопротивления диода по его ВАХ.
7. Каким образом и почему изменяются прямое напряжение и обратный ток диода при изменении температуры?
8. Перечислить и кратко охарактеризовать виды пробоя р-п-перехода.
9. Нарисовать схемы снятия прямой и обратной ветвей ВАХ диода. Обосновать способ подключения измерительных приборов.
10. Дать определение стабилитрона, перечислить основные параметры.
11. На чем основано применение стабилитрона для стабилизации напряжения?
12. Нарисовать схему снятия ВАХ стабилитрона, обосновать выбор элементов и способ подключения измерительных приборов.

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА.

### МОДЕЛЬ ЭБЕРСА-МОЛЛА

**Цель работы** - исследование характеристик и параметров биполярного транзистора, изучение методики измерения вольтамперных характеристик, расчет параметров модели Эберса-Молла.

#### Краткие сведения о биполярных транзисторах

*Биполярным транзистором* называется полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими p-n-переходами и тремя внешними выводами. Он выполняется на основе кристалла полупроводника, в котором создаются три области с чередующимся типом электропроводности. В зависимости от порядка чередования типа электропроводности областей в транзисторе различают p-n-p- и n-p-n-транзисторы. Крайние области - *эмиттер* и *коллектор*, причем в эмиттере области концентрация примеси гораздо выше, чем в коллекторе. Область между эмиттером и коллектором называется *базой*, концентрация примеси в ней еще ниже, чем в коллекторе. Переход между эмиттером и базой называется эмиттерным, между коллектором и базой – коллекторным. Биполярный транзистор обычно используется таким образом, что на один из его выводов подается входной сигнал, а с другого снимается выходной. Третий вывод является общим для входной и выходной цепей. В зависимости от этого различают три схемы включения биполярного транзистора – с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). Работа биполярного транзистора определяется напряжениями, приложенными к его переходам. В зависимости от полярности напряжений на переходах различают

- режим отсечки: оба перехода находятся под обратным напряжением;
- режим насыщения: оба перехода находятся под прямым напряжением;
- активный режим: эмиттерный переход находится под прямым напряжением, коллекторный под обратным;
- инверсный режим: эмиттерный переход находится под обратным напряжением, коллекторный под прямым.

При работе в активном режиме биполярный транзистор используется для усиления сигнала. При увеличении прямого напряжения на эмиттерном переходе понижается его потенциальный барьер и поэтому возрастает ток, определяемый инжекцией носите-

#### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

лей заряда из эмиттера в базу  $I_{э-б}$  и из базы в эмиттер  $I_{б-э}$ . При этом  $I_{э-б} \gg I_{б-э}$ , что обусловлено соотношением концентраций примеси в эмиттерной и базовой областях. Носители заряда, инжектированные из эмиттера в базу, диффундируют к коллекторному переходу. При этом часть их рекомбинирует, а недостаток основных носителей в базе, возникающий из-за их рекомбинации, компенсируется носителями, поступающими в базу из внешней цепи и образующими *рекомбинационную составляющую тока базы*  $I_{б\text{ рек}}$ . Из-за малой толщины базы число рекомбинирующих в ней носителей заряда мало, поэтому  $I_{б\text{ рек}}$  также мал. Таким образом, большинство носителей заряда, инжектированных из эмиттера в базу, достигают коллекторного перехода и под действием ускоряющего поля коллекторного перехода совершают экстракцию в коллектор, образуя *управляемую составляющую коллекторного тока*  $\alpha I_э = \gamma \psi I_э$ , где  $\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера,  $\gamma = I_{э-б} / (I_{э-б} + I_{б-э})$  – коэффициент инжекции,  $\psi = (I_{э-б} - I_{б\text{ рек}}) / I_{э-б}$  – коэффициент переноса. Отметим, что обычно  $\alpha \approx 0,9 \dots 0,99$ . Кроме того, в цепи коллектора протекает обратный ток коллекторного перехода  $I_{кбо}$ . Таким образом, независимо от схемы включения транзистора

$$I_к = \alpha I_э + I_{кбо} \approx \alpha I_э, \quad I_б = I_{б\text{ рек}} + I_{э-б} - I_{кбо} \approx I_{б\text{ рек}} \ll I_к.$$

Кроме того,  $I_э = I_б + I_к$ .

Полученные формулы непосредственно относятся к схеме ОБ, т. к. при включении с ОБ входным током является ток эмиттера, выходным – ток коллектора. Т. к.  $\alpha$  несколько меньше 1, то в схеме ОБ нет усиления по току, однако может быть достигнуто усиление по напряжению. В схеме ОЭ входное напряжение также подается на эмиттерный переход, однако входным током является ток базы, также изменяющийся при изменении напряжения на эмиттерном переходе. Связь коллекторного тока с базовым может быть получена из формул, приведенных выше:

$$I_к = \alpha I_э / (1 - \alpha) + I_{кбо} / (1 - \alpha) = \beta I_б + I_{кэо} = \beta I_б + (1 + \beta) I_{кбо},$$

где  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$  – коэффициент передачи тока базы;  $I_{кэо}$  – ток коллектора в схеме ОЭ при  $I_б = 0$ . Обычно  $\beta \gg 1$  (для маломощных транзисторов  $\beta$  достигает нескольких сотен), поэтому в схеме ОЭ помимо усиления напряжения происходит усиление тока.

Связь между токами и напряжениями биполярного транзистора может быть наглядно показана с помощью семейств вольт-амперных характеристик (ВАХ):

- 1) входные ВАХ – зависимости  $I_{вх}$  от  $U_{вх}$  при  $U_{вых} = \text{const}$ ;
- 2) выходные ВАХ – зависимости  $I_{вых}$  от  $U_{вых}$  при  $I_{вх} = \text{const}$ ;
- 3) ВАХ передачи – зависимости  $I_{вых}$  от  $I_{вх}$  при  $U_{вх} = \text{const}$ ;

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

4) ВАХ обратной связи – зависимости  $U_{вх}$  от  $U_{вых}$  при  $I_{вых} = \text{const}$ .

Наиболее часто для анализа работы биполярных транзисторов и устройств на их основе используются семейства выходных и входных ВАХ. Их типовой вид для р-п-р-транзистора в схеме ОБ приведен на рис. 9.

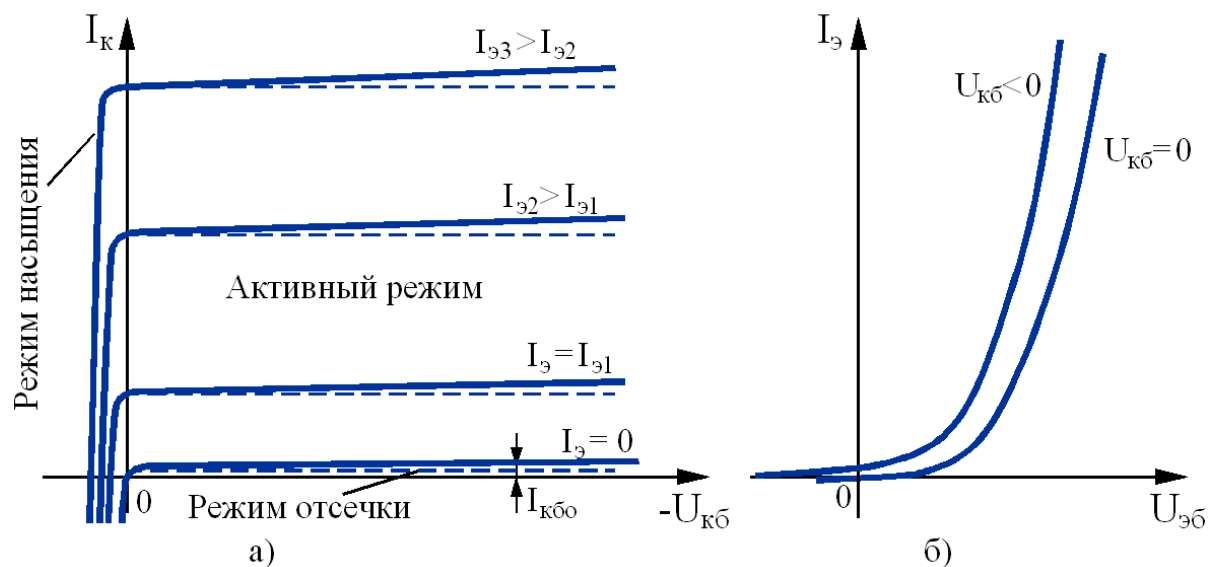


Рис. 9. Семейства выходных (а) и входных (б) ВАХ биполярного р-п-р-транзистора в схеме ОБ.

Семейство выходных ВАХ схемы с ОБ (рис. 9, а) представляет собой зависимости  $I_k$  от  $U_{кб}$  при заданных значениях  $I_b$ . Для идеализированного транзистора выходные ВАХ в области активного режима горизонтальны (пунктир на рис. 9, а). При  $I_b=0$  выходная ВАХ транзистора представляет собой обратную ветвь ВАХ коллекторного перехода, с увеличением  $I_b$  ВАХ смещается вверх на величину  $\alpha I_b$ . Выходные ВАХ реального транзистора имеют наклон (сплошные линии на рис. 9, а), обусловленный *эффектом модуляции ширины базы* (эффектом Эрли): с ростом  $|U_{кб}|$  растёт толщина коллекторного перехода и уменьшается толщина базы, что приводит к росту градиента концентрации носителей заряда в базе, т. е. к дополнительному росту  $I_k$ . Для учета эффекта Эрли в формулу для  $I_k$  вводится дополнительное слагаемое:

$$I_k = \alpha I_b + I_{кб0} + U_{кб}/r_k,$$

где  $r_k$  – выходное сопротивление транзистора в схеме ОБ. Режим насыщения соответствует прямым напряжениям как на эмиттерном, так и на коллекторном переходе (для р-п-р-транзистора  $U_{кб} > 0$ ).

Семейство входных ВАХ схемы с ОБ (рис. 9, б) представляет собой зависимости  $I_b$  от  $U_{эб}$  при заданных значениях  $U_{кб}$ . При  $U_{кб}=0$  входная ВАХ транзистора представляет собой ВАХ эмиттерного перехода. При подаче обратного напряжения на коллектор-

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



ный переход входная ВАХ смещается вверх (при неизменном  $U_{\beta 6}$  возрастает  $I_{\beta}$ ) из-за эффекта Эрли.

На рис. 10 показаны ВАХ р-п-р-транзистора в схеме ОЭ.

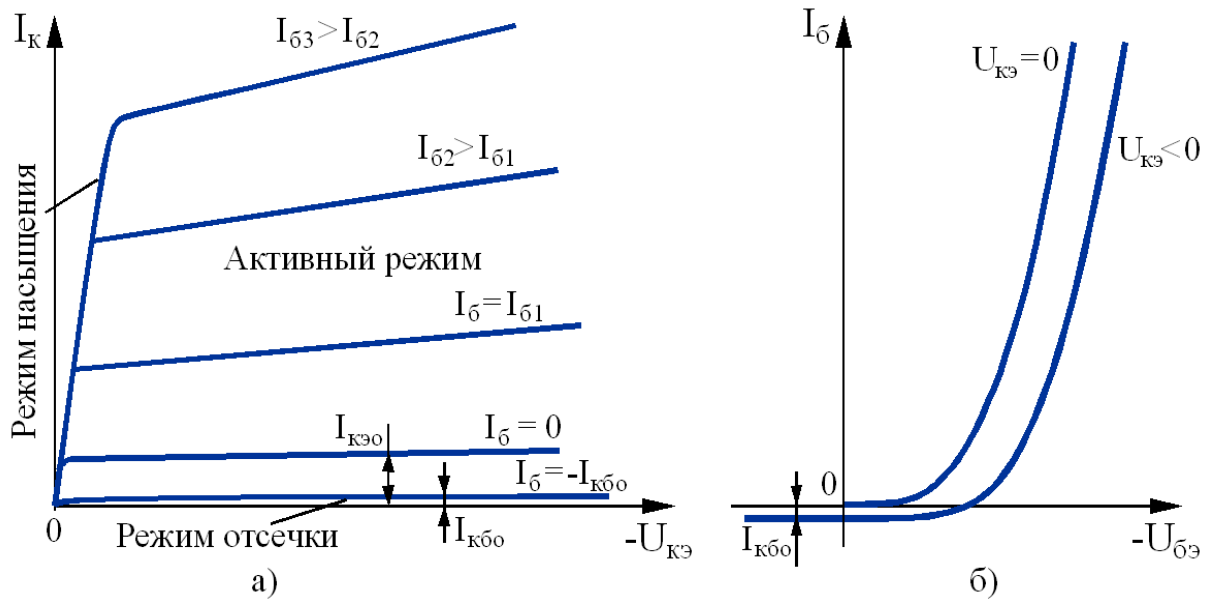


Рис. 10. Семейства выходных (а) и входных (б) ВАХ биполярного р-п-р-транзистора в схеме ОЭ

Семейство выходных ВАХ схемы с ОЭ (рис. 10, а) представляет собой зависимости  $I_K$  от  $U_{KЭ}$  при заданных значениях  $I_{\beta}$ . С ростом  $I_{\beta}$  происходит смещение выходной ВАХ вверх. Крутые начальные участки выходных ВАХ соответствуют режиму насыщения: при малых  $|U_{KЭ}|$   $U_{K\beta} = U_{KЭ} - I_{\beta}$  оказывается прямым; при увеличении  $|U_{KЭ}|$   $U_{K\beta}$  меняет знак, и транзистор переходит в активный режим, соответствующий пологой части выходной ВАХ. В схеме ОЭ наклон выходных ВАХ также обусловлен эффектом Эрли, но выражен гораздо сильнее, чем в схеме ОБ. С ростом  $|U_{KЭ}|$  (а значит и  $|U_{K\beta}|$ ) из-за уменьшения толщины базы уменьшается рекомбинационная составляющая базового тока. Для поддержания постоянства  $I_{\beta}$  (условие снятия выходной ВАХ для схемы с ОЭ) приходится увеличивать  $|U_{\beta Э}|$ , что и приводит к дополнительному росту  $I_{\beta}$  и  $I_K$ . Участок выходной ВАХ для схемы с ОЭ может быть приближенно описан ранее полученной формулой с дополнительным слагаемым, учитывающим особенности проявления эффекта Эрли в схеме с ОЭ:

$$I_K = \beta I_{\beta} + I_{KЭ0} + U_{KЭ}/r_k^* = \beta I_{\beta} + (1 + \beta)I_{K\beta 0} + U_{KЭ}(1 + \beta)/r_k$$

где  $r_k^* = r_k/(1 + \beta)$  – выходное сопротивление транзистора в схеме ОЭ.

Семейство входных ВАХ схемы с ОЭ (рис. 10, б) представляет собой зависимости  $I_{\beta}$  от  $U_{\beta Э}$  при заданных значениях  $U_{KЭ}$ . Для  $U_{KЭ} = 0$  входная ВАХ соответствует режи-

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

му насыщения, т. к. оба перехода транзистора оказываются под прямым напряжением. Для  $U_{кэ} < 0$  (для р-п-р-транзистора) входная ВАХ соответствует активному режиму. В любом случае с ростом  $|U_{бэ}|$  растет  $I_э$ , растет число носителей, рекомбинирующих в базе; следовательно, растет  $I_{б \text{ рек}}$ . Таким образом,  $I_б$  изменяется почти пропорционально  $I_э$ , поэтому вид входной ВАХ для схемы с ОЭ практически такой же, как для схемы с ОБ. С ростом  $|U_{кэ}|$  входная ВАХ смещается вниз, что обусловлено действием эффекта Эрли (уменьшение  $I_{б \text{ рек}}$  из-за уменьшения толщины базы).

Приведенные выше выражения являются упрощенными и могут применяться только при активном режиме работы транзистора. Более точные расчетные формулы, связывающие токи и напряжения в транзисторе (т. е. математическая модель транзистора) могут быть получены на основе анализа нелинейной эквивалентной схемы биполярного транзистора (рис. 11). Два встречно включенных диода имитируют эмиттерный и коллекторный переходы транзистора, а их взаимодействие учитывается введением источников тока.

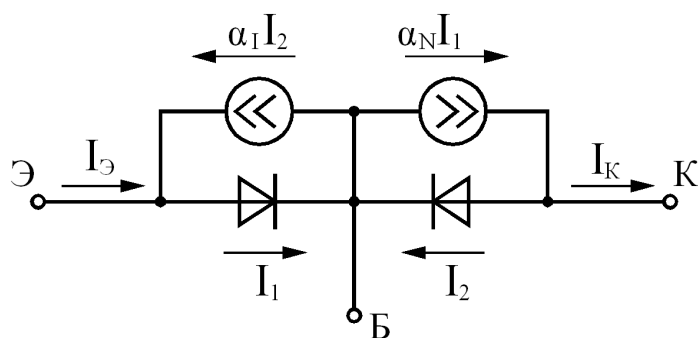


Рис. 11. Нелинейная эквивалентная схема биполярного транзистора

При нормальном активном режиме эмиттерный переход открыт, а коллекторный заперт. Через эмиттерный переход протекает ток  $I_1$ ; носители, совершающие экстракцию в коллектор, создают ток  $\alpha_N I_1$ , где  $\alpha_N$  – коэффициент передачи тока коллектора при нормальном включении. Аналогично, при инверсном включении открыт коллекторный переход, а эмиттерный заперт. Тогда через коллекторный переход протекает ток  $I_2$ , а экстракция носителей в эмиттер создает ток  $\alpha_1 I_2$ , где  $\alpha_1$  – коэффициент передачи тока эмиттера при инверсном включении. Из схемы (рис. 11) следует:

$$I_э = I_1 - \alpha_1 I_2, \quad I_к = \alpha_N I_1 - I_2.$$

Токи через переходы  $I_1$  и  $I_2$  могут быть выражены по уравнениям ВАХ р-п-перехода:

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

$$I_1 = I_{Э0} \left( \exp \frac{U_{ЭБ}}{m_{Э} \varphi_T} - 1 \right), \quad I_2 = I_{К0} \left( \exp \frac{U_{КБ}}{m_{К} \varphi_T} - 1 \right),$$

где  $I_{Э0}$  – обратный ток эмиттерного перехода при коротком замыкании коллекторного,  $I_{К0}$  – обратный ток коллекторного перехода при коротком замыкании эмиттерного;  $m_{Э}$  и  $m_{К}$  – коэффициенты неидеальности эмиттерного и коллекторного переходов. Практически проще измерить обратный ток перехода при разрыве в цепи другого перехода. Соответствующие токи  $I_{ЭБО}$  и  $I_{КБО}$  связаны с  $I_{Э0}$  и  $I_{К0}$  следующим образом:

$$I_{Э0} = I_{ЭБО} / (1 - \alpha_I \alpha_N), \quad I_{К0} = I_{КБО} / (1 - \alpha_I \alpha_N).$$

Тогда с учетом соотношений, приведенных выше,

$$I_{Э} = \frac{I_{ЭБО}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left( \exp \frac{U_{ЭБ}}{m_{Э} \varphi_T} - 1 \right) - \frac{\alpha_I I_{КБО}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left( \exp \frac{U_{КБ}}{m_{К} \varphi_T} - 1 \right),$$

$$I_{К} = \frac{\alpha_N I_{ЭБО}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left( \exp \frac{U_{ЭБ}}{m_{Э} \varphi_T} - 1 \right) - \frac{I_{КБО}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left( \exp \frac{U_{КБ}}{m_{К} \varphi_T} - 1 \right)$$

Полученные уравнения называются *уравнениями Эберса-Молла* и при  $m_{Э}=m_{К}=1$  представляют собой математическую модель идеализированного биполярного транзистора. Достоинство модели Эберса-Молла заключается в том, что она может применяться для анализа транзистора как в активном режиме, так и в режимах отсечки, насыщения и инверсном. Однако ее применение ограничивается постоянными напряжениями и токами или низкими частотами. Кроме того, модель Эберса-Молла не учитывает эффект Эрли.

Параметры модели Эберса-Молла ( $I_{Э0}$ ,  $I_{К0}$ ,  $\alpha_I$ ,  $\alpha_N$ ,  $m_{Э}$  и  $m_{К}$ ) могут быть определены по ВАХ транзистора, снятым для нормального и инверсного включения.

При работе в режиме малого сигнала, когда переменные составляющие токов и напряжений транзистора оказываются гораздо меньше постоянных составляющих, рабочая точка транзистора смещается по ВАХ относительно точки покоя на небольшую величину. Тогда участки ВАХ, в пределах которых перемещается рабочая точка, можно приближенно считать линейными. Таким образом, в режиме малого сигнала биполярный транзистор может быть представлен как активный квазилинейный четырехполюсник (рис. 12, а), в котором малые изменения токов и напряжений можно связать между собой с помощью систем линейных уравнений. По ним можно определить соотношения между малыми изменениями токов и напряжений в транзисторе, которые называются *дифференциальными или малосигнальными параметрами*. При малом синусои-

дальном входном сигнале те же системы линейных уравнений связывают между собой малые амплитуды входных и выходных синусоидальных напряжений и токов.

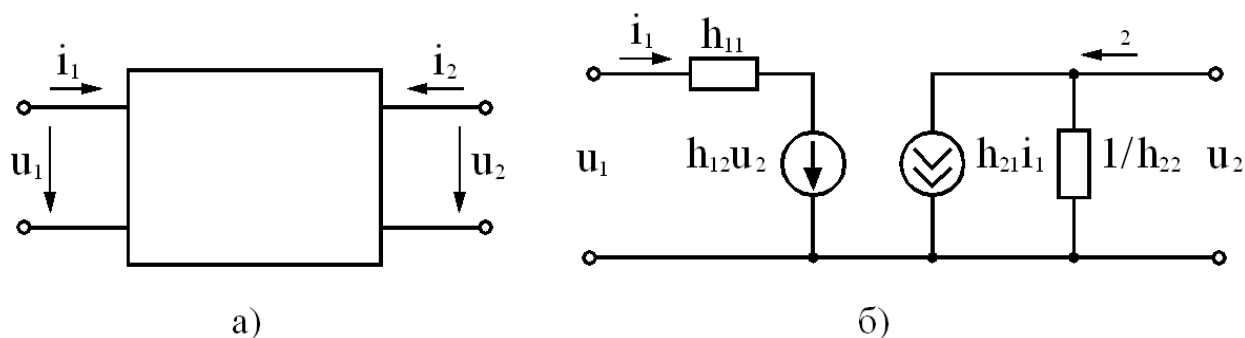


Рис. 12. Представление биполярного транзистора в виде квазилинейного четырехполюсника (а); формальная эквивалентная схема транзистора в системе h-параметров.

Как для квазилинейного четырехполюсника для биполярного транзистора могут быть определены z- и y-параметры, однако при их практическом измерении возникают трудности, связанные с обеспечением условия холостого хода по переменному току в высокоомной выходной цепи и условия короткого замыкания по переменному току в низкоомной входной цепи биполярного транзистора. Поэтому при работе на низких частотах обычно применяется более удобная для практического измерения система h-параметров:

$$\begin{cases} U_{m1} = h_{11}I_{m1} + h_{12}U_{m2} \\ I_{m2} = h_{21}I_{m1} + h_{22}U_{m2} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} du_1 = h_{11}di_1 + h_{12}du_2 \\ di_2 = h_{21}di_1 + h_{22}du_2 \end{cases}$$

Тогда получаем следующие выражения и физический смысл h-параметров биполярного транзистора:

$$h_{11} = \frac{U_{m1}}{I_{m1}} \Big|_{U_{m2} = 0} = \frac{\partial u_1}{\partial i_1} \Big|_{u_2 = \text{const}} -$$

*входное сопротивление при коротком замыкании по переменному току в выходной цепи,*

$$h_{12} = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \Big|_{I_{m1} = 0} = \frac{\partial u_1}{\partial u_2} \Big|_{i_1 = \text{const}} -$$

*коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе по переменному току во входной цепи,*

$$h_{21} = \frac{I_{m2}}{I_{m1}} \Big|_{U_{m2} = 0} = \frac{\partial i_2}{\partial i_1} \Big|_{u_2 = \text{const}} -$$

*коэффициент передачи тока при коротком замыкании по переменному току в выходной цепи,*

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

$$h_{22} = \frac{I_{m2}}{U_{m2}} \Big|_{I_{m1} = 0} = \frac{\partial i_2}{\partial u_2} \Big|_{i_1 = const} -$$

выходная проводимость при холостом ходе по переменному току во входной цепи.

Простота измерения h-параметров обусловлена легкостью обеспечения режимов холостого хода по переменному току в низкоомной входной цепи и короткого замыкания по переменному току в высокоомной выходной цепи транзистора. Транзистор в схемах ОБ и ОЭ имеет различные значения h-параметров, что учитывается в их обозначении введением дополнительного символа в индекс (например,  $h_{11Э}$  – входное сопротивление транзистора в схеме ОЭ,  $h_{22Б}$  – выходная проводимость транзистора в схеме ОБ).

На рис. 12, б показана *формальная эквивалентная схема* биполярного транзистора, элементы которой выражены через h-параметры. Она широко применяется для анализа работы усилительных каскадов на биполярных транзисторах, работающих в режиме малого сигнала. Формальной данная схема называется потому, что при измерении h-параметров не учитывается суть физических процессов в транзисторе.

h-параметры биполярного транзистора могут быть определены по семейству его ВАХ (рис. 13). При этом бесконечно малые изменения токов и напряжений или малые амплитуды токов и напряжений в формулах для определения h-параметров заменяются на конечные приращения этих же токов и напряжений, которые могут быть отображены на графиках ВАХ.

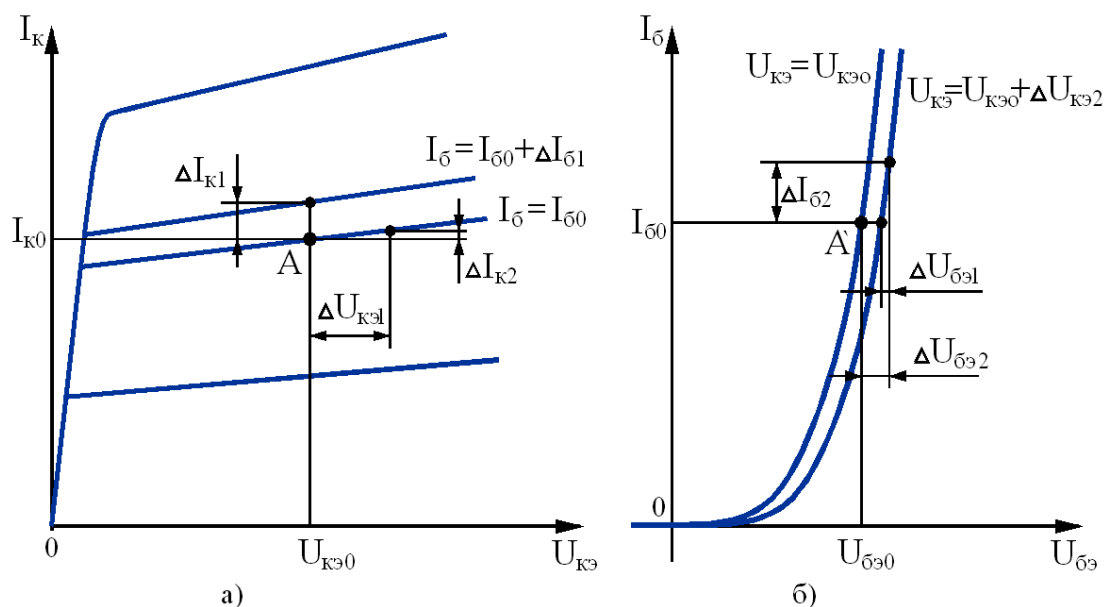


Рис. 13. Определение h-параметров биполярного транзистора по семейству его выходных (а) и входных (б) ВАХ

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

Необходимые построения на выходных ВАХ показаны на рис. 13, а. Для определения  $h_{22Э}$  используется выходная ВАХ для тока  $I_{Б0}$ . На ней отмечается точка покоя А с координатами  $U_{кЭ0}$ ,  $I_{к0}$ , после чего для заданного приращения  $\Delta U_{кЭ1}$  находится соответствующее  $\Delta I_{к2}$ . Для нахождения  $h_{21Э}$  используются выходные ВАХ для токов базы  $I_{Б0}$  и  $I_{Б0} + \Delta I_{Б1}$ , по которым для  $U_{кЭ} = U_{кЭ0}$  определяют соответствующее  $\Delta I_{к1}$ . Таким образом,

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_{к1}}{\Delta I_{Б1}} \text{ при } U_{кЭ} = U_{кЭ0} = \text{const},$$

$$h_{22Э} = \frac{\Delta I_{к2}}{\Delta U_{кЭ1}} \text{ при } I_{Б} = I_{Б0} = \text{const}.$$

На рис. 13, б показано определение  $h_{11Э}$  по входной ВАХ для  $U_{кЭ} = U_{кЭ0}$  и определение  $h_{12Э}$  по входным ВАХ для  $U_{кЭ0}$  и  $U_{кЭ0} + \Delta U_{кЭ2}$ , при этом приращения токов и напряжений задаются относительно точки покоя А' на ВАХ для  $U_{кЭ} = U_{кЭ0}$ , соответствующей  $I_{Б} = I_{Б0}$ .

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ1}}{\Delta I_{Б2}} \text{ при } U_{кЭ} = U_{кЭ0} = \text{const},$$

$$h_{12Э} = \frac{\Delta U_{БЭ2}}{\Delta U_{кЭ2}} \text{ при } I_{Б} = I_{Б0} = \text{const}.$$

### Задание и порядок выполнения работы

**1. Начертить принципиальные схемы для измерения ВАХ биполярного транзистора в схеме ОЭ с указанием полярности подключения источников питания и измерительных приборов. В состав макета входят 2 биполярных транзистора: германиевый (VT1) и кремниевый (VT2). Исследуемый транзистор задается преподавателем. Выписать из приложения 3 тип и основные параметры исследуемого транзистора.**

**2. Снять семейство выходных ВАХ транзистора в нормальном включении для трёх значений тока базы.**

Собрать схему измерения в соответствии с рис. 14. В цепь базы включить резистор 51 кОм. На графике-заготовке выходной характеристики построить кривую допустимой мощности исследуемого транзистора. Изменяя напряжение источника питания в коллекторной цепи  $E_{к}$ , установить  $U_{кЭ} = -5$  В. Плавно изменяя напряжение источника питания в базовой цепи  $E_{Б}$ , установить ток коллектора  $I_{к} = 5$  мА и измерить соответствующий ему ток базы  $I_{Б}'$ . З тип и основные параметры исследуемого транзистора.

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



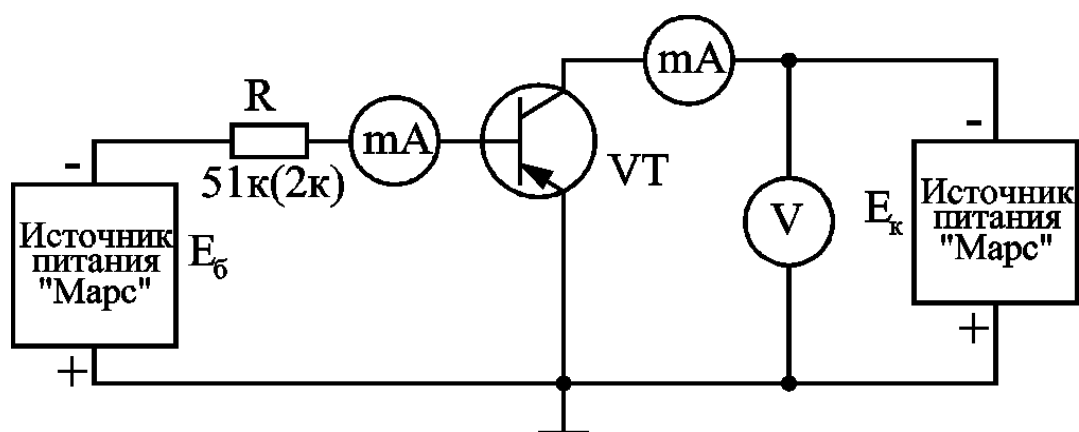


Рис. 14. Схема для исследования выходных ВАХ биполярного транзистора

Снять семейство выходных характеристик транзистора при трех значениях тока базы:  $I_b = 0,5I_b'$ ;  $I_b'$ ;  $1,5I_b'$ . Изменяя  $E_k$ , устанавливать по вольтметру в коллекторной цепи необходимые значения  $U_{кэ}$  и измерять соответствующие значения  $I_k$ . При измерениях следить за тем, чтобы выходные характеристики не выходили за пределы области допустимой мощности; особое внимание обратить на начальный участок ВАХ (при изменении  $U_{кэ}$  от 0 до -1 В). При снятии каждой из трёх выходных ВАХ необходимо контролировать постоянство базового тока. Построить графики снятых выходных ВАХ на графике-заготовке.

**3. Снять выходную характеристику транзистора при инверсном включении.** Для этого переключки, подходящие к коллектору и эмиттеру транзистора, поменять местами. Аналогично п. 2 определить ток базы  $I_b''$ , при котором ток коллектора равен 5 мА при напряжении на коллекторе -5 В, и снять выходную характеристику при токе базы  $I_b''$ .

**4. Определить статический коэффициент передачи тока базы для нормального и инверсного включений транзистора** для точки с напряжением на коллекторе -5 В и токов базы соответственно  $I_b'$  и  $I_b''$ .

**5. Снять входные характеристики транзистора при нормальном включении.**

Собрать схему в соответствии с рис. 15. Установить  $U_{кэ} = -5$  В. Изменяя  $E_b$ , устанавливать по миллиамперметру в базовой цепи необходимые значения  $I_b$  и измерять соответствующие значения  $U_{бэ}$ . Ток базы изменять от 0 до  $1,5I_b'$ , шаг изменения выбрать таким, чтобы получить в указанном диапазоне не менее 8 точек.

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

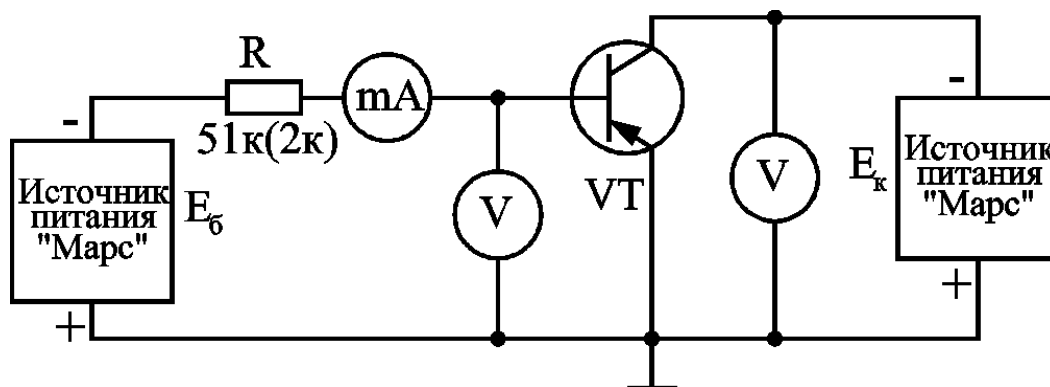


Рис. 15. Схемы для исследования входной ВАХ биполярного транзистора

Аналогично снять входную характеристику при напряжении на коллекторе 0 В (для этого необходимо уменьшить напряжение источника коллекторного питания до нуля и после этого соединить коллектор с эмиттером (т.е. с общим проводом).

**6. Снять входную характеристику транзистора при инверсном включении при  $U_{кэ} = -5$  В. Ток базы изменять от 0 до  $1,5 I_B$ .**

### Обработка экспериментальных данных

1. По снятым ВАХ графически определить h-параметры для  $I_k = 5$  мА и  $U_{кэ} = -5$  В.
2. Использовать результаты измерений в прямом и инверсном включении для определения параметров модели Эберса-Молла (для РЛ-1).

### Выполнение отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) название и цель работы;
- 2) схемы проведения измерений с указанием типов измерительных приборов;
- 3) параметры исследованного биполярного транзистора;
- 4) графики измеренных ВАХ;
- 5) результаты обработки экспериментальных данных;
- 6) выводы по результатам работы.

### Вопросы для самоконтроля и подготовки к защите

1. Перечислить и кратко охарактеризовать режимы работы и схемы включения биполярного транзистора.

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

2. Описать принцип работы биполярного транзистора в схемах ОБ, ОЭ.
3. Нарисовать семейства входных и выходных ВАХ биполярного транзистора в схемах ОБ и ОЭ. Провести с их помощью сопоставление свойств биполярного транзистора в схемах ОБ и ОЭ.
4. В чем причина наклона выходных ВАХ биполярного транзистора в области, соответствующей активному режиму? Почему наклон выходных ВАХ в схеме ОЭ выражен сильнее, чем в схеме ОБ?
5. Нарисовать нелинейную эквивалентную схему биполярного транзистора.
6. Что такое модель Эберса-Молла?
7. Дать определение h-параметров биполярного транзистора.
8. Нарисовать формальную эквивалентную схему биполярного транзистора.
9. Показать, каким образом можно определить h-параметры биполярного транзистора по его ВАХ.
10. Нарисовать схемы снятия входных и выходных ВАХ биполярного транзистора.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА**

**Цель работы** - исследование характеристик и параметров полевого транзистора, изучение методики измерения характеристик полевого транзистора, расчёт параметров эквивалентной схемы.

#### **Краткие сведения о полевых транзисторах**

*Полевыми транзисторами* называются полупроводниковые приборы, в которых управление величиной выходного тока производится с помощью электрического поля, изменяющего сопротивление токопроводящего слоя полупроводника (канала). Их также часто называют *униполярными транзисторами*, т. к. их выходной ток создается движением носителей заряда одного типа (основными носителями). Различают полевые транзисторы с управляющим переходом и полевые транзисторы с изолированным затвором; последние подразделяются на транзисторы со встроенным и индуцированным каналом. *Полевыми транзисторами с управляющим переходом* называются полевые транзисторы, в которых управление выходным током осуществляется с помощью об-

#### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

ратно включенного электрического перехода. Наиболее часто в качестве управляющего перехода используется р-п-переход, реже – переходы Шоттки и гетеропереходы. Для пояснения принципа действия на рис. 16 показана упрощенная структура полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и п-каналом.

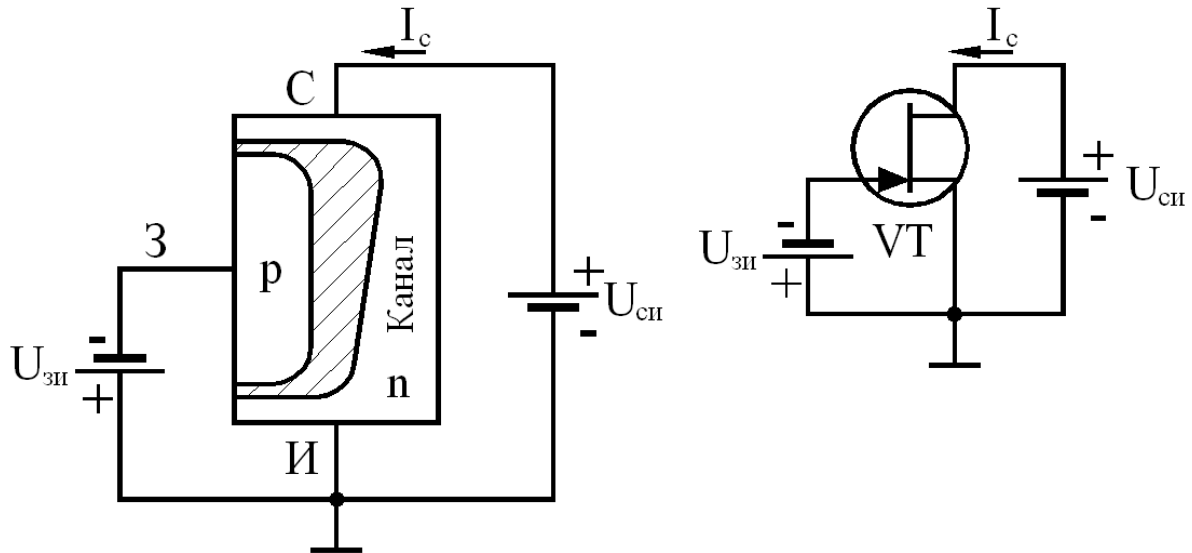


Рис. 16. Упрощенная структура полевого транзистора с управляющим переходом

Основа транзистора – пластина полупроводника n-типа, к краям которой подсоединены внешние выводы (*сток* и *исток*). Вдоль пластины выполнена р-область, к которой подсоединен внешний вывод, называемый *затвором*. На границе р- и n-областей образуется управляющий р-п-переход или обедненный слой (выделен штриховкой). Часть n-полупроводника, не перекрытая обедненным слоем, называется *каналом*. К транзистору подключены два внешних источника напряжения, общий провод которых соединен с истоком транзистора, т. е. транзистор включен *по схеме с общим истоком*, в которой входной цепью является цепь затвора, а выходной – цепь стока. При подключении внешнего напряжения между стоком и истоком  $U_{си}$  в канале возникает электрический ток, практически полностью определяемый движением основных носителей. Полярность  $U_{си}$  выбирается так, чтобы основные носители заряда двигались по каналу от истока к стоку. Напряжение, поданное на затвор, должно быть обратным для управляющего перехода, т. е. для n-канального транзистора  $U_{зи} < 0$ . При увеличении модуля  $U_{зи}$  растет толщина управляющего перехода, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения канала, росту его сопротивления и к уменьшению тока стока.

Следует отметить, что ток стока, протекая по каналу, делает его неэквипотенциальным, поэтому к разным областям управляющего перехода оказывается приложен-

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

ным различным напряжением. Так, напряжение на переходе вблизи истока минимально и равно  $U_{зи}$ , а вблизи стока максимально и равно  $|U_{зи}| + U_{си}$ . Поэтому толщина обедненного слоя увеличивается от истока к стоку и оказывается максимальной вблизи стока.

Входной ток полевого транзистора чрезвычайно мал, т. к. представляет собой обратный ток управляющего перехода, поэтому полевые транзисторы и устройства на их основе обладают очень высоким входным сопротивлением.

Для анализа работы полевого транзистора с управляющим переходом могут быть использованы семейства выходных ВАХ и ВАХ передачи, показанные на рис. 17.

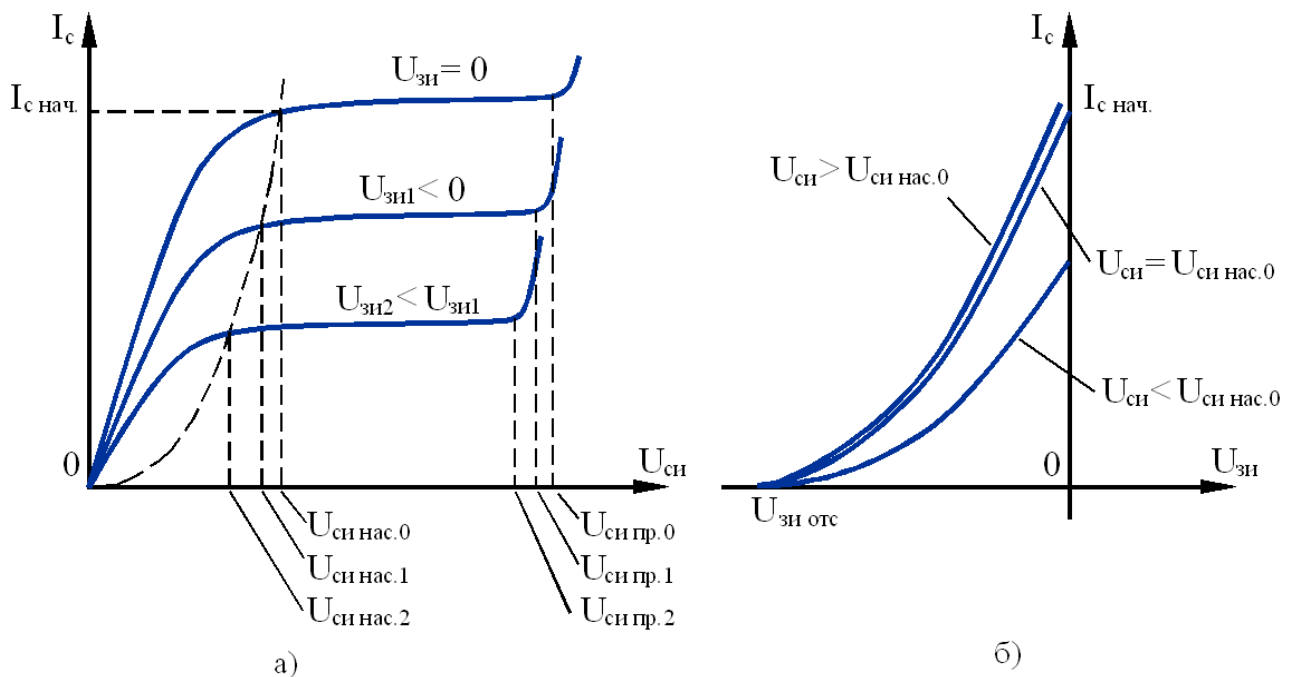


Рис. 17. Выходные ВАХ (а) и ВАХ передачи (б) полевого транзистора с управляющим переходом

Для схемы ОИ *выходные характеристики* представляют собой зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения  $U_{си}$  при различных постоянных напряжениях  $U_{зи}$  (рис. 17, а). При малых  $U_{си}$  вначале происходит практически линейное возрастание  $I_c$ . Чем больше  $|U_{зи}|$ , тем сильнее изначально канал перекрывается обедненным слоем вблизи стока, тем больше начальное сопротивление канала и тем больше наклон начального участка выходной ВАХ. По мере роста  $U_{си}$  выходная ВАХ все сильнее отклоняется от прямой линии из-за возрастания сопротивления канала в стоковой области. При  $U_{си} = U_{си \text{ нас}}$  канал вблизи стока практически перекрывается обедненным слоем и транзистор переходит в режим насыщения:  $I_c$  меняется незначительно, т. к. возрастание  $I_c$  из-за роста  $U_{си}$  компенсируется убыванием  $I_c$  из-за роста сопротивления канала. Чем боль-

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

ше  $|U_{зи}|$ , тем меньше  $U_{си\text{ нас}}$  и тем меньше  $I_c$ , при котором наступает насыщение. При значительном увеличении  $U_{си}$  происходит пробой управляющего перехода в области стока, причем с ростом  $|U_{зи}|$  напряжение пробоя уменьшается.

Таким образом, на выходной ВАХ полевого транзистора с управляющим переходом можно выделить три характерных области:

- крутая область ( $U_{си}=0 \dots U_{си\text{ нас}}$ ), соответствующая режиму управляемого сопротивления; в этой области транзистор может использоваться как электрически управляемый резистор;

- пологая область ( $U_{си}=U_{си\text{ нас}} \dots U_{си\text{ проб}}$ ), соответствующая режиму насыщения; в этой области ВАХ горизонтальна для идеализированных транзисторов и имеет некоторый наклон для реальных; поэтому транзистор представляет собой управляемый напряжением источник тока и может быть использован в усилительном каскаде;

- область пробоя ( $U_{си} > U_{си\text{ проб}}$ ).

По выходной ВАХ для  $U_{зи}=0$  определяются начальный ток стока  $I_{c\text{ нач}}$  и напряжение насыщения  $U_{си\text{ нас}0}$ .

*ВАХ передачи* полевого транзистора представляют собой зависимости  $I_c$  от  $U_{зи}$  при различных постоянных  $U_{си}$  (рис. 17, б). При  $U_{си} > U_{си\text{ нас}}$  ВАХ передачи почти не меняет свое положение. При любом  $U_{си}$  ток стока уменьшается практически до нуля при одном и том же напряжении на затворе, которое называется *напряжением отсечки*. Из-за сложностей в измерении малых токов реально напряжением отсечки  $U_{зи\text{ отс}}$  считают такое значение  $U_{зи}$ , при котором  $I_c$  уменьшается до заданного малого значения (например, до 1 мкА).

Усилительные свойства полевого транзистора *характеризуются крутизной ВАХ передачи*  $S = dI_c/dU_{зи}$  при  $U_{си} = \text{const}$ . При  $U_{си} > U_{си\text{ нас}}$  выражение для ВАХ передачи может быть записано как

$$I_c = I_{c\text{ нач}} (1 - U_{зи}/U_{зи\text{ отс}})^2,$$

$$\text{тогда } S = S_{\text{макс}}(1 - U_{зи}/U_{зи\text{ отс}}).$$

Таким образом, крутизна максимальна и равна  $S_{\text{макс}} = 2I_{c\text{ нач}} / U_{зи\text{ отс}}$  при  $U_{зи}=0$ , а с ростом  $|U_{зи}|$  уменьшается.

### Задание и порядок выполнения работы

**1. Начертить принципиальную схему для измерения ВАХ полевого транзистора в схеме с общим истоком с указанием полярности измерительных приборов и**

#### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

источников питания. Выписать из приложения 4 тип и основные параметры исследуемого транзистора.

## 2. Снять семейство выходных характеристик полевого транзистора.

Собрать схему измерения (рис. 18).

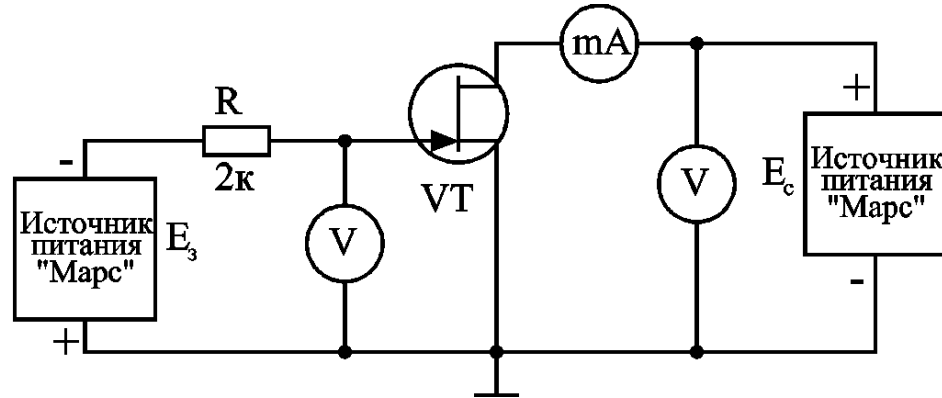


Рис. 18. Схема для исследования ВАХ полевого транзистора

На графике-заготовке для выходных характеристик построить кривую допустимой мощности. Напряжение сток-исток  $U_{си}$  выставить равным 10 В. Экспериментально определить напряжение отсечки  $U_{отс}$ , т. е. такое напряжение на затворе, при котором  $I_c = 1$  мкА. Снять семейство выходных характеристик для значений  $U_{зи}=0; 0,2U_{отс}; 0,4U_{отс}; 0,6U_{отс}; 0,8U_{отс}$ , изменяя  $U_{си}$  от 0 до 10 В.

Указать значение тока насыщения  $I_{с.нас}$  и напряжения насыщения  $U_{си.нас}$ , используя выходную ВАХ для  $U_{зи}=0$ .

3. Снять семейство проходных характеристик для  $U_{си}=0,5$  В; 1 В; 2 В;  $U_{си.нас}$ ;  $U_{си}>U_{си.нас}$ .

### Обработка экспериментальных данных

1. Определить крутизну  $S_{макс}$  характеристики, снятой для  $U_{си.нас}$  в точке  $U_{зи}=0$ .

2. Определить напряжение отсечки, используя соотношение

$$U_{отс} = 2I_{с.нас} / S_{макс}$$

3. Определить крутизну и внутреннее сопротивление полевого транзистора при  $U_{си} > U_{си.нас}$  и  $U_{зи}=0,4U_{отс}$ .

### Выполнение отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется индивидуально каждым студентом и должен содержать:

#### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



- 1) название и цель работы;
- 2) схемы проведения измерений с указанием типов измерительных приборов;
- 3) параметры исследованного полевого транзистора;
- 4) графики измеренных ВАХ;
- 5) результаты обработки экспериментальных данных;
- 6) выводы по результатам работы.

### **Вопросы для самоконтроля и подготовки к защите**

1. Перечислить основные типы полевых транзисторов и дать им краткую характеристику.
2. Нарисовать упрощенную структуру полевого транзистора с управляющим переходом и описать принцип его работы.
3. Нарисовать семейства выходных ВАХ и ВАХ передачи полевого транзистора с управляющим переходом.
4. Каким образом может быть использован полевой транзистор с управляющим переходом при работе на крутой и пологой областях выходных ВАХ?
5. Что такое крутизна полевого транзистора и как она определяется по ВАХ?
6. Что такое напряжения отсечки и как оно определяется по ВАХ?
7. Что такое начальный ток стока и как он определяется по ВАХ?
8. Нарисовать схему снятия ВАХ полевого транзистора с управляющим переходом с n- и p- каналом.
9. Каким образом влияет изменение температуры на ВАХ полевого транзистора с управляющим переходом?
10. Перечислить основные достоинства полевых транзисторов по сравнению с биполярными.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В РЕЖИМЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

**Цель работы** – изучение работы биполярного транзистора в ключевом режиме, исследование влияния режима работы транзистора и элементов схемы ключа на длительность переходных процессов в ключевой схеме.

#### Краткие сведения о работе биполярного транзистора в ключевом режиме

На основе биполярного транзистора может быть построен электронный ключ - устройство, которое под действием управляющего сигнала замыкает или размыкает электрическую цепь. При этом транзистор в режиме отсечки эквивалентен разомкнутому ключу, а в режиме насыщения – замкнутому. На рис. 19, а, б представлены схема и временные диаграммы работы простейшего ключа на р-п-р транзисторе, включенном в схеме ОЭ. Для ряда пояснений на рис 19, в приведены выходные ВАХ биполярного транзистора и нагрузочная прямая для выходной цепи ключа.

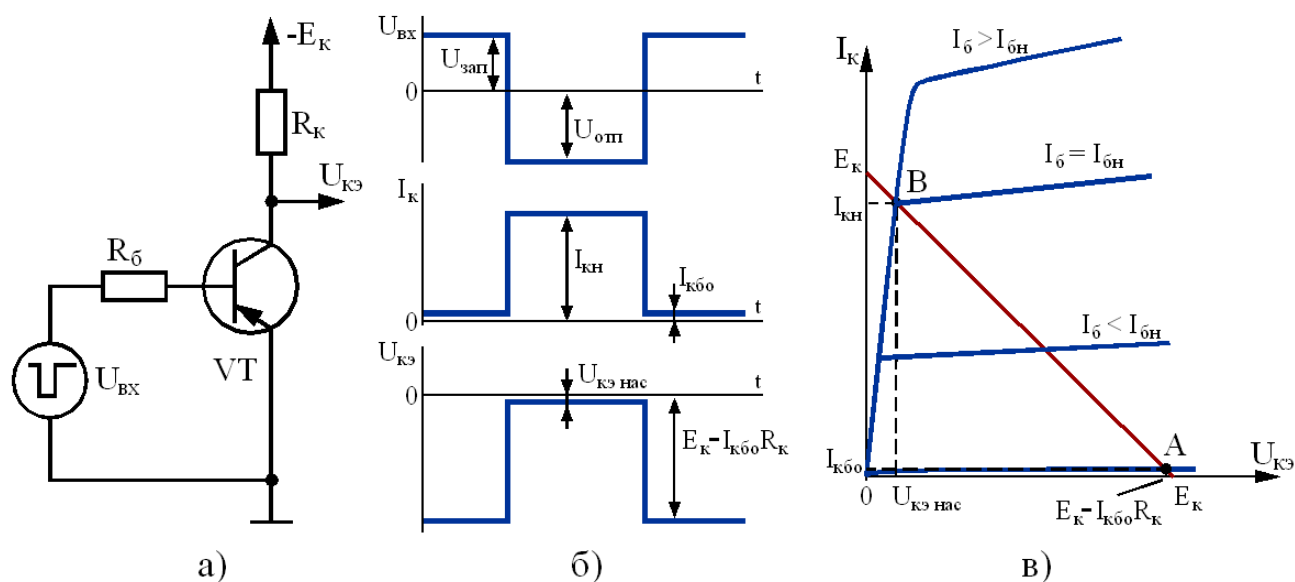


Рис. 19. Схема ключа на биполярном транзисторе (а), упрощенные временные диаграммы его работы (б), выходные ВАХ биполярного транзистора с нагрузочной прямой (в)

При  $U_{вх} = U_{зап} > 0$  транзистор заперт, т. е. находится в режиме отсечки (рис. 19, в, точка А), т. к. оба его перехода под обратным напряжением. Через нагрузку протекает чрезвычайно малый обратный коллекторного перехода  $I_{кбо}$ , а напряжение на коллекторе

#### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

$U_{кэ} = E_k - I_{кб0} R_k \approx E_k$ . Если теперь на вход подать отрицательное напряжение  $U_{отп} < 0$  и увеличивать его по модулю, то возрастает базовый ток  $I_b$  и рабочая точка транзистора двигается по нагрузочной прямой от т. А вверх. При этом  $I_k$  возрастает, а  $|U_{кэ}|$  уменьшается, а также уменьшается напряжение на коллекторном переходе  $|U_{кб}|$ . Пока оно остается обратным, транзистор остается в активном режиме. Транзистор переходит в режим насыщения, когда напряжение на коллекторном переходе меняет знак, т. е. становится прямым. Для этого нужно, чтобы  $I_b$  превысил *базовый ток насыщения*  $I_{бн}$ , тогда при дальнейшем росте  $I_b$  ток коллектора остается неизменным и равным *коллекторному току насыщения*  $I_{кн} = \beta I_{бн}$ , а  $U_{кэ}$  также остается неизменным и равным  $U_{кэ \text{ нас}}$  (рис. 19, в, точка В). С другой стороны

$$I_{кн} = (E_k - U_{кэ \text{ нас}}) / R_k \approx E_k / R_k,$$

т. к. обычно  $U_{кэ \text{ нас}} \ll E_k$ . Таким образом, в режиме насыщения транзистор эквивалентен замкнутому ключу, т. к. ток через нагрузку  $R_k$ , равный  $I_{кн}$ , определяется  $R_k$  и  $E_k$  и практически не зависит от транзистора. Для характеристики режима насыщения вводится параметр, называемый *степенью насыщения*

$$S = I_b / I_{бн} = \beta I_b / I_{кн}$$

Обычно  $S$  выбирают в пределах 2 – 10. Входное напряжение, обеспечивающее режим насыщения с заданным значением  $S$ , определяется следующим образом:

$$U_{отп} = I_b R_b + U_{бэ \text{ нас}},$$

причем  $I_b = S I_{бн} = S I_{кн} / \beta$ .

Переход транзистора из режима отсечки в режим насыщения и наоборот происходит не мгновенно. Длительность процессов включения и выключения определяется процессами накопления и рассасывания зарядов в базе транзистора, а также перезарядом емкостей его переходов. На рис. 20 представлены временные диаграммы работы ключа для случая, когда длительность импульса входного напряжения соизмерима с длительностью переходных процессов в схеме.

На интервале  $0 \dots t_1$  входное напряжение  $U_{вх} = U_{зап} > 0$ , транзистор находится в режиме отсечки. В момент  $t_1$  напряжение на входе скачком меняется на  $U_{отп} < 0$ , но  $I_k$  остается близким к 0, а  $U_{кэ}$  остается практически равным  $-E_k$ , т.е. наблюдается *задержка включения*.  $U_{бэ}$  не может измениться мгновенно, т. к. происходит заряд входной емкости ключа  $C_{вх} = C_{эб} + C_{кб}$  через  $R_b$ . Поэтому  $U_{бэ}$  уменьшается с постоянной времени  $\tau_{вх} = R_b C_{вх}$ , стремясь к уровню  $U$ . В момент  $t_2$   $U_{бэ}$  достигает порогового значения  $U_{бэ \text{ пор}}$ , при

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

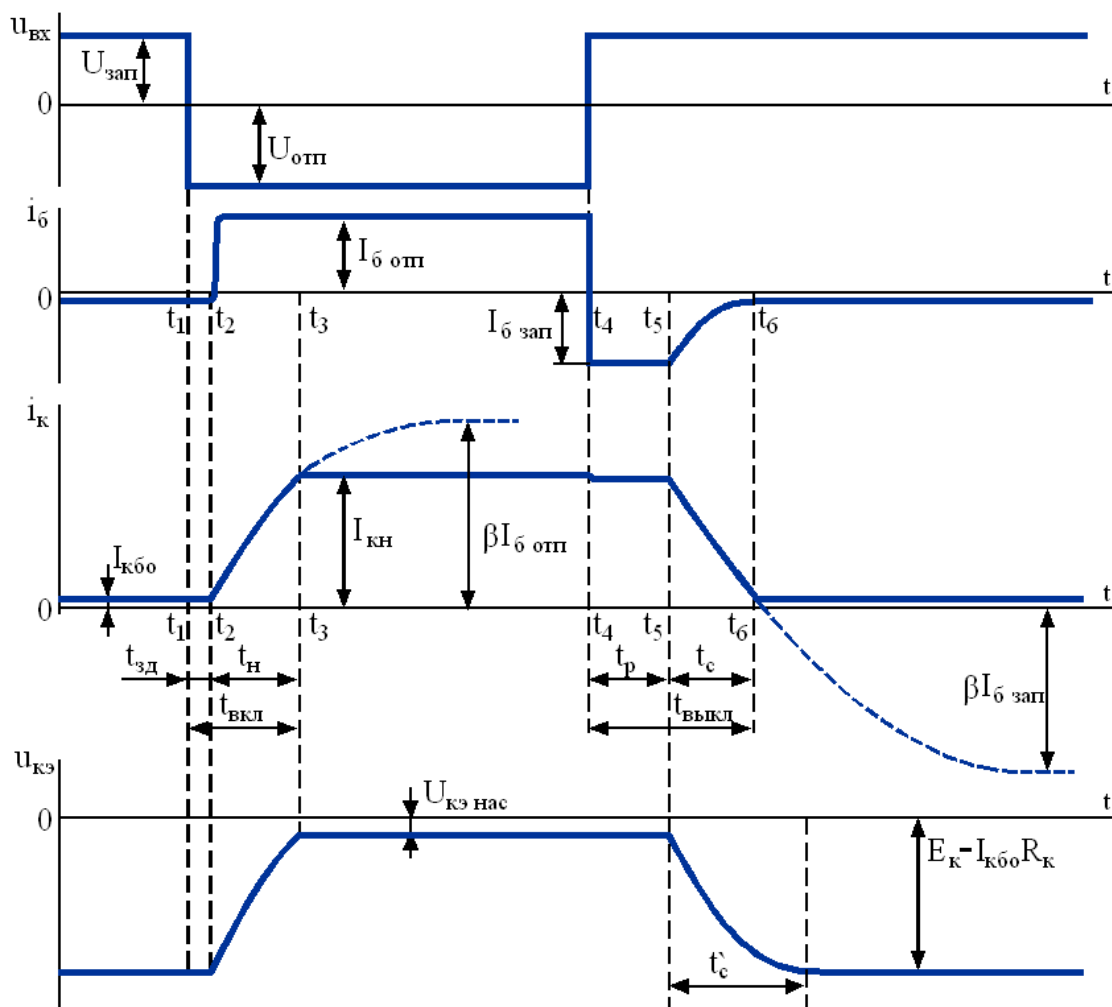


Рис. 20. Переходные процессы в ключе на биполярном транзисторе

котором транзистор начинает открываться (примерно 0,3 В для германиевых и 0,6 В для кремниевых транзисторов). *Время задержки включения*  $t_{зд}$  можно найти по формуле

$$t_{зд} = \tau_{BX} \ln \left[ \frac{U_{отп} - U_{зап}}{U_{отп} - U_{БЭПОР}} \right]$$

На интервале  $t_2-t_3$  ток базы остается неизменным и равен  $I_{б\text{ отп}}$ , а  $i_k$  возрастает с постоянной времени  $\tau_{\beta\text{ экв}} = \tau_{\beta} + \beta R_k C_{кб}$  и стремится достигнуть уровня  $\beta I_{б\text{ отп}}$ . Однако в момент  $t_3$  транзистор входит в режим насыщения и  $i_k$  ограничивается величиной  $I_{кн}$ . *Время нарастания коллекторного тока*  $t_n = t_3 - t_2$  можно определить следующим образом:

$$t_n = \tau_{\beta\text{ экв}} \ln \left[ \frac{\beta I_{б\text{ отп}}}{\beta I_{б\text{ отп}} - I_{кн}} \right] = \tau_{\beta\text{ экв}} \ln \left[ \frac{S}{S - 1} \right]$$

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

Напряжение  $U_{кэ}$  на интервале  $t_1-t_3$  меняется синхронно с током коллектора, достигая в момент  $t_3$  значения  $U_{кэ \text{ нас.}}$ . Время, необходимое для перевода ключа в замкнутое состояние, называют *временем включения*:

$$t_{\text{вкл}} = t_{\text{зд}} + t_{\text{н}}$$

Обычно  $t_{\text{зд}}$  значительно меньше  $t_{\text{н}}$ , поэтому при выполнении экспериментальной части данной лабораторной работы измерение  $t_{\text{зд}}$  не проводится.

Пока транзистор находится в режиме насыщения, за счет инжекции носителей заряда из эмиттера и коллектора в базу происходит накопление в базе избыточного заряда. Этот процесс можно охарактеризовать постоянной времени накопления  $\tau_{\text{нак}}$ , которая обычно превышает  $\tau_{\beta \text{ экв.}}$ . За время порядка  $3\tau_{\text{нак}}$  накопление избыточного заряда в базе завершается. Очевидно, с ростом степени насыщения накопленный в базе заряд возрастает. Далее до момента смены полярности входного напряжения токи и напряжения в схеме остаются неизменными.

В момент  $t_4$  входное напряжение вновь становится равным  $U_{\text{зап.}}$ . Имеет место бросок обратного тока базы  $I_{\text{б зап}} = U_{\text{зап.}} / R_{\text{б}}$ , обусловленный движением неосновных носителей, накопленных в базе на этапе насыщения, обратно в эмиттер. На интервале  $t_4-t_5$  этот ток остается постоянным. Пока в базе транзистора сохраняется избыточный заряд, транзистор насыщен, поэтому на интервале  $t_4-t_5$  коллекторный ток также остается постоянным и практически равным  $I_{\text{кн}}$ . Токи базы и коллектора на интервале  $t_4-t_5$ , а также рекомбинация носителей заряда в базе являются причиной *рассасывания заряда в базе*, т. е. уменьшения накопленного в базе заряда с постоянной времени  $\tau_{\text{нак}}$ . Время рассасывания  $t_{\text{р}} = t_5-t_4$  может быть определено по формуле

$$t_{\text{р}} = \tau_{\text{нак}} \ln \left[ \frac{I_{\text{б отп}} + I_{\text{б зап}}}{I_{\text{кн}} / \beta + I_{\text{б зап}}} \right].$$

В момент  $t_5$  процесс рассасывания заряда в базе завершается, транзистор переходит из режима насыщения в активный режим. На интервале  $t_5-t_6$  коллекторный ток уменьшается с постоянной времени  $\tau_{\beta \text{ экв.}}$ , стремясь к уровню  $-\beta I_{\text{б зап}}$ . Однако в момент  $t_6$  коллекторный ток уменьшается до  $I_{\text{кбо}}$ , близкого к нулю, и транзистор входит в режим отсечки. *Время спада тока коллектора*  $t_{\text{с}} = t_6-t_5$  может быть определено по формуле

$$t_{\text{с}} = \tau_{\beta \text{ экв.}} \ln \left[ 1 + \frac{I_{\text{кн}}}{\beta I_{\text{б зап}}} \right].$$

Базовый ток на интервале  $t_5-t_6$  также плавно уменьшается от  $I_{\text{б зап}}$  практически до 0.

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

Время, необходимое для перевода ключа в разомкнутое состояние, называют *временем выключения*:

$$t_{\text{выкл}} = t_p + t_c$$

Следует отметить, что если в выходной цепи ключа имеется емкость  $C_{\text{вых}}$ , то одновременно с запирающим транзистора происходит заряд  $C_{\text{вых}}$  через резистор  $R_k$ . При больших  $\tau_{\text{вых}} = R_k C_{\text{вых}}$  этот процесс может продолжаться даже после перехода транзистора в режим отсечки, тогда на интервале  $t_5-t_6$  напряжение  $U_{кэ}$  меняется от  $-U_{кэ \text{ нас}}$  до  $-E_k$  медленнее, чем  $i_k$ , т. е. время спада выходного напряжения  $t'_c > t_c$ .

### Задание и порядок выполнения работы

1. Начертить схему для исследования транзистора в режиме переключения (рис. 21, а) с указанием полярности включения приборов и источников питания, указать типы измерительных приборов.

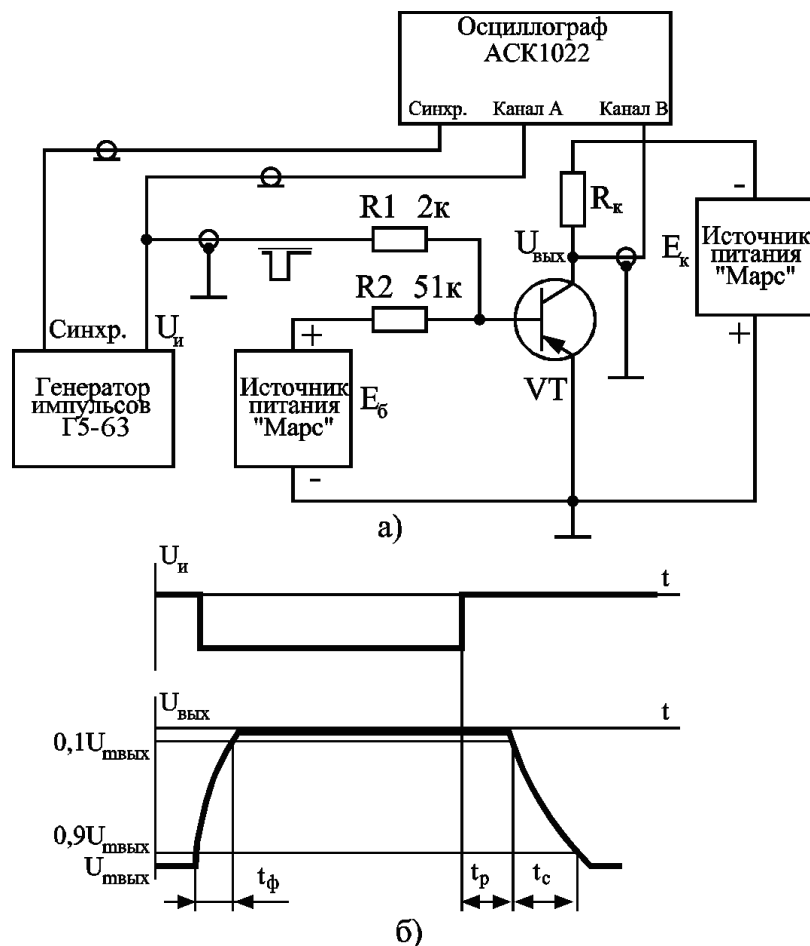


Рис. 21. Схема для исследования биполярного транзистора в режиме переключения (а); временные диаграммы работы транзисторного ключа и правила определения параметров выходного импульса (б)

## 2. Собрать схему измерений (рис. 21, а).

Импульс отрицательной полярности длительностью 10 мкс с выхода генератора импульсов подается на базу транзистора и одновременно на вход канала А осциллографа АСК-1022. Выходной импульс ключа подается на канал В. Импульс синхронизации с генератора подается на вход "Х" осциллографа, работающего в режиме внешней синхронизации. Импульс с выхода генератора на вход исследуемой схемы подается с задержкой, которая подбирается в ходе эксперимента так, чтобы на экране осциллографа достаточно хорошо просматривался передний фронт импульса с выхода исследуемой схемы. Правила измерения времен фронта  $t_f$  и спада  $t_c$  импульса иллюстрируются рис. 6, б. Результаты эксперимента заносятся в таблицу 1 (см. ниже).

Для повышения точности измерений следует использовать вспомогательную разметку на экране осциллографа (уровни 0, 10, 90 и 100%). Для этого, перемещая изображение импульса по вертикали, установить вершину выходного импульса на уровень 100 % (переключатель входа должен находиться в положении DC). Установить такую цену деления по вертикали (положение переключателя В/дел.), чтобы начало импульса было ниже уровня 0 %. Медленно вращая регулятор «Var» (соосный с переключателем В/дел.) из крайнего правого положения влево и тем самым плавно меняя масштаб по вертикали, установить начало импульса на уровень 0 %. После этого измерение  $t_f$ ,  $t_r$  и  $t_c$  можно выполнять по уровням 10 – 90 % на экране осциллографа. Кроме того, для повышения точности измерений, особенно  $t_f$ , можно использовать режим дополнительной растяжки осциллограммы по времени (выдвинутая ручка перемещения осциллограммы по горизонтали <POSITION>), в этом режиме цена деления по времени уменьшается в 10 раз.

При проведении последующих измерений следует зарисовать осциллограммы работы транзисторного ключа как минимум для одного из случаев, указанных в таблице 1. В дальнейшем их необходимо включить в отчет по работе, показав на них способ измерения  $t_f$ ,  $t_r$  и  $t_c$ .

**3. Снять зависимости  $t_f$ ,  $t_r$  и  $t_c$  выходного импульса от величины напряжения смещения на базе  $E_{см}$  при напряжении питания  $E_{п}=-15$  В, амплитуде входного импульса  $U_{и}=-6$  В. Величину  $E_{см}$  изменять в пределах от 0 до 14 В с шагом 2 В.**

**4. Снять зависимости  $t_f$ ,  $t_r$  и  $t_c$  выходного импульса от величины напряжения коллекторного питания  $E_{к}$  при  $E_{см}=12$  В,  $U_{и}=-6$  В. Величину  $E_{к}$  изменять в пределах от 0 до -14 В с шагом 2 В.**

## Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

5. Снять зависимости  $t_{\phi}$ ,  $t_p$  и  $t_c$  от величины сопротивления  $R_k$  при  $E_{\Pi}=-15$  В,  $E_{СМ}=12$  В,  $U_{и}=-6$  В.

6. Снять зависимости  $t_{\phi}$ ,  $t_p$  и  $t_c$  выходного импульса от амплитуды входного импульса  $U_{и}$  при  $E_{СМ}=4$  В,  $E_{\Pi}=-15$  В,  $R_k=3$  кОм. Амплитуду импульсов изменять от -2 до -8 В с шагом 2 В.

Таблица 1

Зависимость $t_{\phi}(E_{\delta})$ , $t_c(E_{\delta})$ , $t_p(E_{\delta})$ при $E_k=-15$ В, $U_{и}=-6$ В, $R_k=3$ кОм			
$E_{\delta}$ , В	$t_{\phi}$ , мкс	$t_c$ , мкс	$t_p$ , мкс
0			
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
Зависимость $t_{\phi}(E_k)$ , $t_c(E_k)$ , $t_p(E_k)$ при $E_{\delta}=15$ В, $U_{и}=-6$ В, $R_k=3$ кОм.			
$-E_k$ , В	$t_{\phi}$ , мкс	$t_c$ , мкс	$t_p$ , мкс
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
Зависимость $t_{\phi}(R_k)$ , $t_c(R_k)$ , $t_p(R_k)$ при $E_k=-15$ В, $E_{\delta}=12$ В, $U_{и}=-6$ В			
$R_k$	$t_{\phi}$ , мкс	$t_c$ , мкс	$t_p$ , мкс
620 Ом			
3 кОм			
100 кОм			
4. Зависимость $t_{\phi}(U_{и})$ , $t_c(U_{и})$ , $t_p(U_{и})$ при $E_k=-15$ В, $E_{\delta}=4$ В, $R_k=3$ кОм.			
$-U_{и}$ , В	$t_{\phi}$ , мкс	$t_c$ , мкс	$t_p$ , мкс
2			
4			
6			
8			



### Выполнение отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется индивидуально каждым студентом и должен содержать:

- 1) название и цель работы;
- 2) схемы проведения измерений с указанием типов измерительных приборов;
- 3) осциллограммы работы ключевой схемы
- 4) результаты измерений;
- 5) выводы по результатам работы.

### Вопросы для самоконтроля и подготовки к защите

1. Нарисовать схему ключа на биполярном транзисторе.
2. Нарисовать упрощенные временные диаграммы работы ключа без детализации переходных процессов и с их помощью описать принцип работы ключа.
3. Что такое степень насыщения транзистора?
4. Написать выражения для токов и напряжений во входной и выходной цепях ключа для режимов отсечки и насыщения.
5. Нарисовать временные диаграммы работы ключа с детализацией переходных процессов. На них показать, каким образом измеряются временные параметры ключа
6. По нарисованным временным диаграммам дать описание процессов
  - задержки включения транзистора,
  - нарастания выходного тока,
  - задержки выключения транзистора,
  - спада выходного тока.
7. Каким образом можно увеличить степень насыщения и как это отразится на временных параметрах ключа?
8. Как и почему изменятся временные параметры ключа
  - при увеличении амплитуды отпирающего входного напряжения,
  - при увеличении сопротивления в коллекторной цепи,
  - при увеличении напряжения питания
  - при увеличении запирающего напряжения во входной цепи?

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

**СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ****Д7Б, Д7Ж**

Диоды выпрямительные германиевые сплавные. Выпускаются в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Среднее прямое напряжение при  $I_{пр}=300$  мА - не более 0,5 В.

Средний обратный ток - не более 100 мкА.

Предельный средний прямой ток – 300 мА.

Предельное постоянное обратное напряжение:

Д7Б – 100 В,

Д7Ж – 400 В.

**Д237А, Д237Б**

Диоды выпрямительные кремниевые диффузионные. Выпускаются в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Среднее прямое напряжение при  $I_{пр}=300$  мА - не более 1 В.

Средний обратный ток - не более 50 мкА.

Предельный средний прямой ток – 300 мА.

Предельное импульсное обратное напряжение:

Д237А – 200 В,

Д237Б – 400 В.

**Д219А, Д220, Д220А, Д220Б**

Диоды универсальные кремниевые сплавные. Выпускаются в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Постоянное прямое напряжение при  $I_{пр}=50$  мА, не более:

Д219А – 1 В,

Д220, Д220А, Д220Б – 1,5 В.

Постоянный обратный ток - не более 1 мкА.

Общая ёмкость диода при  $U_{обр}=5$  В – не более 15 пФ.

Предельный постоянный (средний)/импульсный прямой ток – 50 мА/500 мА.

Предельное постоянное (импульсное) обратное напряжение:

Д219, Д220А – 70 В,

Д220 – 50 В,

Д220А, Б – 100 В.

**Д310**

Диод универсальный германиевый диффузионный. Выпускается в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Постоянное прямое напряжение при  $I_{пр}=500$  мА - не более 0,5 В.

Постоянный обратный ток - не более 20 мкА

Общая ёмкость диода при  $U_{обр}=20$  В – не более 15 пФ

Предельный постоянный /импульсный прямой ток – 500 мА/800 мА

Предельное постоянное или импульсное обратное напряжение – 20 В

Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

### Д311, Д311А, Д311Б

Диоды универсальные германиевые мезадиффузионные. Выпускаются в металло-стеклянном корпусе с гибкими выводами.

Постоянное прямое напряжение при  $I_{пр}=10$  мА, не более:

Д311, Д311А – 0,4 В

Д311Б – 1,5 В

Постоянный обратный ток - не более 100 мкА

Общая ёмкость диода при  $U_{обр}=5$  В, не более:

Д311 – 1,5 пФ,

Д311А – 3 пФ,

Д311Б – 2 пФ.

Предельный постоянный (средний) прямой ток:

Д311 – 40 мА,

Д311А – 80 мА,

Д311Б – 20 мА.

Предельное постоянное или импульсное обратное напряжение – 30 В.

### КД105В

Диод выпрямительный кремниевый диффузионный. Выпускается в пластмассовом корпусе с гибкими выводами.

Среднее прямое напряжение при  $I_{пр}=300$  мА - не более 1 В.

Средний обратный ток - не более 100 мкА.

Предельный средний прямой ток – 300 мА.

Предельное импульсное обратное напряжение – 600 В.

#### Примечания.

1. Указанные параметры даны для температуры 298 – 343 К.

2. Прямое напряжение указывается для предельного прямого тока, обратный ток – для предельного обратного напряжения (если не указано иного).

## Приложение 2

### Справочные данные стабилитронов

#### Д814А, Д814Б

Стабилитроны общего назначения кремниевые сплавные. Выпускаются в метал-лостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Номинальное напряжение стабилизации при  $I_{пр}=5$  мА:

Д814А – 8 В,

Д814Б – 9 В.

Разброс напряжения стабилизации при  $I_{пр}=5$  мА:

Д814А – от 7,0 до 8,5 В,

Д814Б – от 8,0 до 9,5 В.

Температурный коэффициент напряжения стабилизации при температуре от 303 до 398 К не более:

#### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

Д814А – 0,07 %/К,

Д814Б – 0,08 %/К.

Дифференциальное сопротивление при  $I_{пр}=5$  мА, не более:

Д814А – 6 Ом,

Д814Б – 10 Ом.

Постоянное прямое напряжение при  $I_{пр}=50$  мА - не более 1 В.

Минимальный ток стабилизации – 3 мА.

Максимальный ток стабилизации:

Д814А – 40 мА,

Д814Б – 36 мА.

Предельный постоянный прямой ток – 100 мА.

### **КС133А, КС139А, КС147А, КС156А**

Стабилитроны общего назначения кремниевые сплавные. Выпускаются в метал-лостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Номинальное напряжение стабилизации при  $I_{пр}=10$  мА:

КС133А – 3,3 В,

КС139А – 3,9 В,

КС147А – 4,7 В,

КС156А – 5,6 В.

Разброс напряжения стабилизации при  $I_{пр}=10$  мА:

КС133А – от 3,0 до 4,1 В,

КС139А – от 3,5 до 4,8 В,

КС147А – от 4,0 до 5,6 В,

КС156А – от 4,7 до 6,6 В.

Температурный коэффициент напряжения стабилизации при температуре от 303 до 398 К :

КС133А – не хуже -0,11 %/К,

КС139А – не хуже -0,10 %/К,

КС147А – от -0,09 до 0,01 %/К,

КС156А –  $\pm 0,05$  %/К.

Дифференциальное сопротивление при  $I_{пр}=3$  мА, не более:

КС133А, КС139А – 180 Ом,

КС147А, КС156А – 160 Ом.

Дифференциальное сопротивление при  $I_{пр}=10$  мА, не более:

КС133А – 65 Ом,

КС139А – 60 Ом,

КС147А – 56 Ом,

КС156А – 46 Ом.

Постоянное прямое напряжение при  $I_{пр}=50$  мА - не более 1 В.

Минимальный ток стабилизации – 3 мА.

Максимальный ток стабилизации:

КС133А – 81 мА,

КС139А – 70 мА,

КС147А – 58 мА,

КС156А – 55 мА.

Примечание. Номинальные напряжения стабилизации и их разброс, дифференциальные сопротивления даны для температуры 298 К.

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

## СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

### МП26, МП26А

Транзисторы германиевые сплавные р-п-р универсальные низкочастотные мало-мощные. Предназначены для усиления и переключения сигналов низкой частоты. Выпускаются в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала:

МП26 – 10 – 25,

МП26А – 20 – 50.

Обратный ток коллектора – не более 75 мкА.

Предельная частота коэффициента передачи тока при  $U_{кб}=35$  В – не менее 250 кГц.

Емкость коллекторного перехода при  $U_{кб}=35$  В – не более 50 пФ.

Предельное постоянное напряжение коллектор-эмиттер – 70 В.

Предельное постоянное напряжение эмиттер-база – 70 В.

Предельный постоянный ток коллектора – 70 мА.

Предельная постоянная рассеиваемая мощность – 200 мВт.

### МП40, МП40А, МП41, МП41А

Транзисторы германиевые сплавные р-п-р усилительные низкочастотные мало-мощные. Предназначены для усиления сигналов низкой частоты. Выпускаются в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала:

МП40, МП40А – 20 – 40,

МП41 – 30 -60,

МП41А – 50 – 100.

Обратный ток коллектора при  $U_{кб}=5$  В – не более 15 мкА.

Предельная частота коэффициента передачи тока при  $U_{кб}=5$  В – не менее 1 МГц.

Емкость коллекторного перехода при  $U_{кб}=5$  В – не более 60 пФ.

Предельное постоянное напряжение коллектор-эмиттер:

МП40, МП41, МП41А – 15 В,

МП40А – 30 В.

Предельное постоянное напряжение эмиттер-база – 10 В.

Предельный постоянный ток коллектора – 30 мА.

Предельная постоянная рассеиваемая мощность – 150 мВт.

### МП42, МП42А, МП42Б

Транзисторы германиевые сплавные р-п-р переключательные низкочастотные мало-мощные. Предназначены для применения в схемах переключения. Выпускаются в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами.

Статический коэффициент передачи тока в схеме ОЭ:

МП42 – 20 – 35,

МП42А – 30 -50,

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

МП42Б – 45 – 100.

Обратный ток коллектора при  $U_{кэ}=15$  В – не более 25 мкА.

Предельная частота коэффициента передачи тока при  $U_{кб}=5$  В – не менее 1 МГц.

Емкость коллекторного перехода при  $U_{кб}=5$  В – не более 60 пФ.

Предельное постоянное напряжение коллектор-эмиттер – 15 В.

Предельное постоянное напряжение эмиттер-база – 10 В.

Предельный импульсный ток коллектора – 200 мА.

Предельная постоянная рассеиваемая мощность – 200 мВт.

### **КТ203Б, КТ 203БМ**

Транзисторы кремниевые эпитаксиально-планарные р-п-р усилительные мало-мощные. Предназначены для применения в усилителях и импульсных устройствах. Выпускаются в металlostеклянном (КТ203Б) и пластмассовом (КТ203БМ) корпусе с гибкими выводами.

Коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала – 30 – 150.

Обратный ток коллектора при  $U_{кб}=5$  В – не более 1 мкА.

Предельная частота коэффициента передачи тока в схеме ОБ при  $U_{кб}=5$  В – не менее 5 МГц.

Емкость коллекторного перехода при  $U_{кб}=5$  В – не более 10 пФ.

Предельное постоянное напряжение коллектор-эмиттер – 30 В.

Предельное постоянное напряжение эмиттер-база – 15 В.

Предельный постоянный ток коллектора – 10 мА.

Предельная постоянная рассеиваемая мощность – 150 мВт.

### **КТ501М**

Транзисторы кремниевые эпитаксиально-планарные р-п-р усилительные низкочастотные маломощные. Предназначены для применения в усилителях и импульсных устройствах. Выпускаются в металlostеклянном корпусе с гибкими выводами.

Статический коэффициент передачи тока в схеме ОЭ – 40 – 120.

Обратный ток коллектора при  $U_{кб}=5$  В – не более 1 мкА.

Предельная частота коэффициента передачи тока в схеме ОБ при  $U_{кб}=5$  В – не менее 5 МГц.

Емкость коллекторного перехода при  $U_{кб}=5$  В – не более 50 пФ.

Предельное постоянное напряжение коллектор-эмиттер – 60 В.

Предельное постоянное напряжение эмиттер-база – 20 В.

Предельный постоянный ток коллектора – 300 мА.

Предельная постоянная рассеиваемая мощность – 350 мВт.

Примечание. Указанные параметры даны для температуры 298 К.

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

**СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ****КП302АМ**

Транзисторы кремниевые планарные полевые с затвором на основе р-п-перехода с каналом n-типа. Предназначены для применения в широкополосных усилителях и переключающих устройствах. Выпускаются в пластмассовом корпусе с гибкими выводами.

Крутизна характеристики при  $U_{си}=7$  В,  $U_{зи}=0$  В - не менее 5 мА/В.

Начальный ток стока при  $U_{зи}=0$  В - 3 – 24 мА.

Напряжение отсечки при  $U_{си}=7$  В – не более 5 В.

Входная ёмкость при  $U_{си}=10$  В,  $I_c=3$  мА - не более 20 пФ.

Проходная ёмкость при  $U_{си}=10$  В,  $I_c=3$  мА - не более 8 пФ.

Предельное напряжение затвор-исток – 10 В.

Предельное напряжение сток-исток – 20 В.

Предельный постоянный ток стока – 24 мА.

Предельная постоянная рассеиваемая мощность – 300 мВт.

**ФОРМЫ ОТЧЕТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ****Форма отчета по Лабораторной работе № 1**

Московский Ордена Ленина, Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э.БАУМАНА

---



Кафедра РЛ-1, Секция № 1

Дисциплина

*« Указать название дисциплины »*

Отчёт по лабораторной работе

*« Исследование характеристик и параметров  
полупроводниковых диодов »*

Студент *Указать ф. и. о.*

Группа *Указать группу.*

Преподаватель *Указать ф. и. о.*

МОСКВА 20\_\_ г.

Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



**Цель работы** - исследование характеристик германиевого и кремниевого диодов, изучение методики измерения характеристик и расчет параметров математической модели диода по характеристикам.

### Снятие ВАХ германиевого и кремниевого диодов

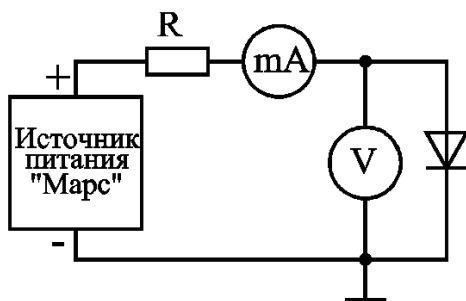
Исследуемые диоды (указать тип и основные параметры диодов, см. приложение 1)

VD1 –

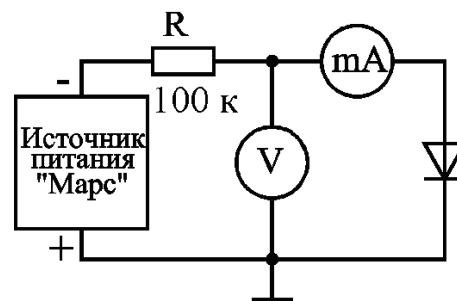
VD2 –

Исследуемый стабилитрон

VD3 –



а)



б)

Схема снятия прямой (а) и обратной (б) ветвей ВАХ диодов

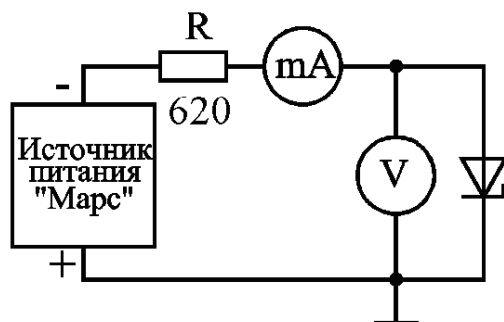
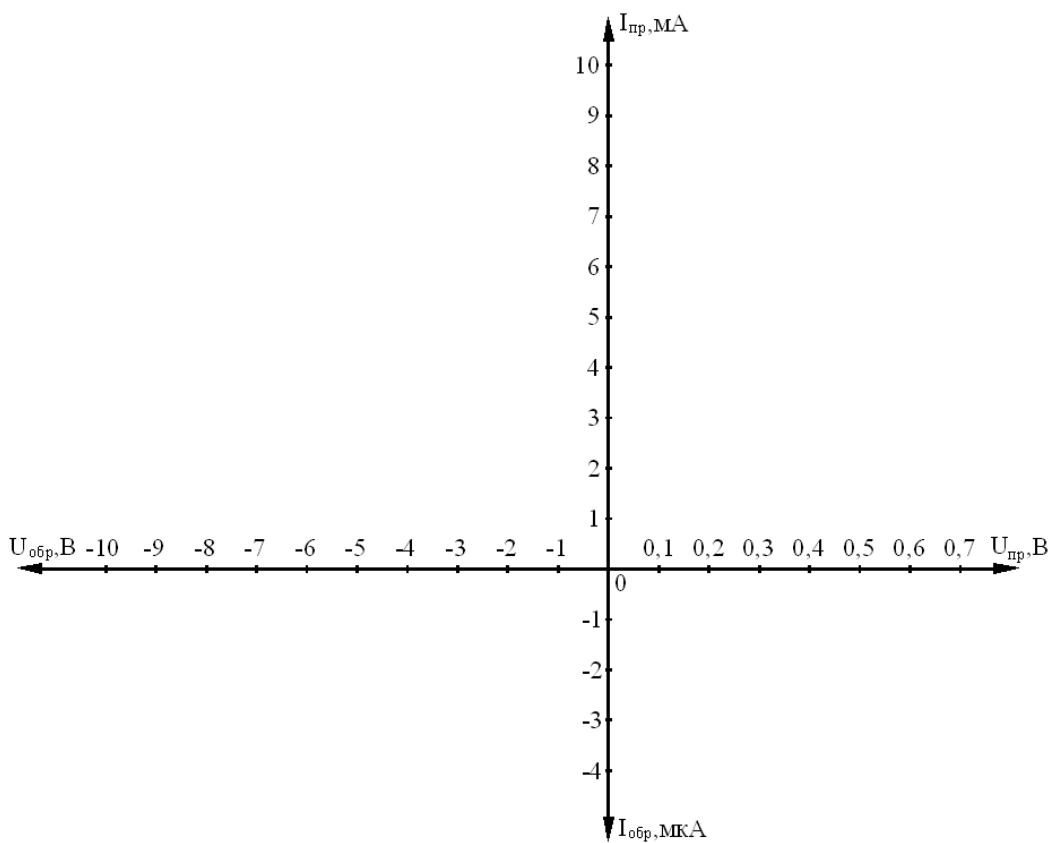
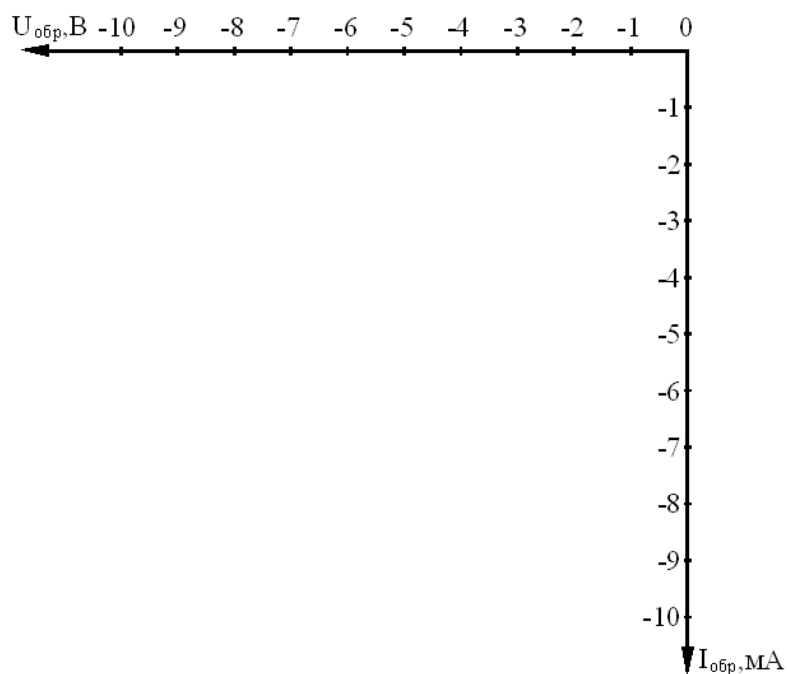


Схема снятия ВАХ стабилитрона

На схемах указать тип используемых измерительных приборов



ВАХ германиевого и кремниевого диодов



ВАХ стабилитрона

*Здесь и далее показан вид графиков-заготовок ВАХ. Размеры и масштабы при выполнении отчета выбирать самостоятельно в зависимости от конкретных результатов.*

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

**Определение по ВАХ параметров  
германиевого и кремниевого диодов**

VD1

 $I_{пр} = 5 \text{ мА}$  $R_{0пр} =$  $r_{диф пр} =$  $U_{обр} = -5 \text{ В}$  $R_{0обр} =$  $r_{диф обр} =$ 

VD2

 $I_{пр} = 5 \text{ мА}$  $R_{0пр} =$  $r_{диф пр} =$  $U_{обр} = -5 \text{ В}$  $R_{0обр} =$  $r_{диф обр} =$ 

**Определение по ВАХ параметров стабилитрона**

 $I_{ст} = -2 \text{ мА}$  $r_{диф обр} =$  $I_{ст} = -7 \text{ мА}$  $r_{диф обр} =$ 

*Расчеты представлять по форме: формула – подстановка значений – ответ.*

*На ВАХ должны быть показаны все построения, с помощью которых были определены параметры диодов.*

**Выводы по результатам работы**

## Форма отчета по Лабораторной работе № 2

Московский Ордена Ленина, Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного  
Знамени

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э.БАУМАНА

---



Кафедра РЛ-1, Секция № 1

Дисциплина

*« Указать название дисциплины »*

Отчёт по лабораторной работе

*« Исследование биполярного транзистора.  
Модель Эберса-Молла »*

Студент *Указать ф. и. о.*

Группа *Указать группу.*

Преподаватель *Указать ф. и. о.*

МОСКВА 20\_\_ г.

Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

**Цель работы** - исследование характеристик и параметров биполярного транзистора, изучение методики измерения вольтамперных характеристик, расчет параметров модели Эберса-Молла.

### Снятие ВАХ биполярного транзистора

Исследуемый транзистор - указать тип и основные параметры, см. приложение 2.

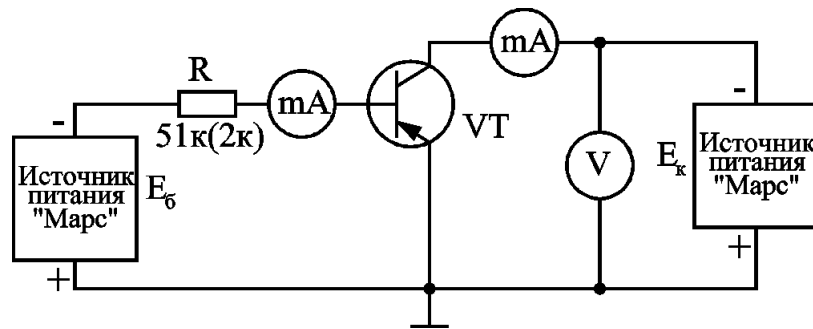


Схема снятия выходных ВАХ биполярного транзистора

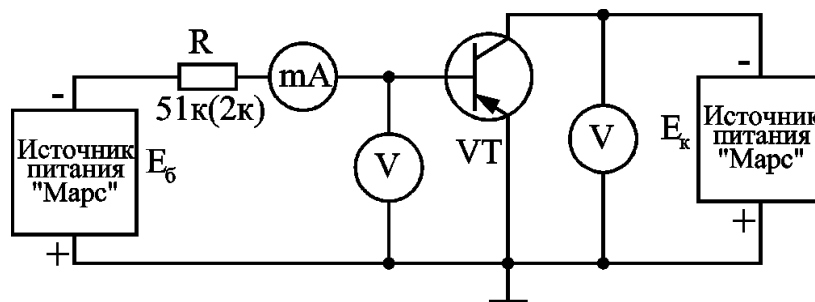
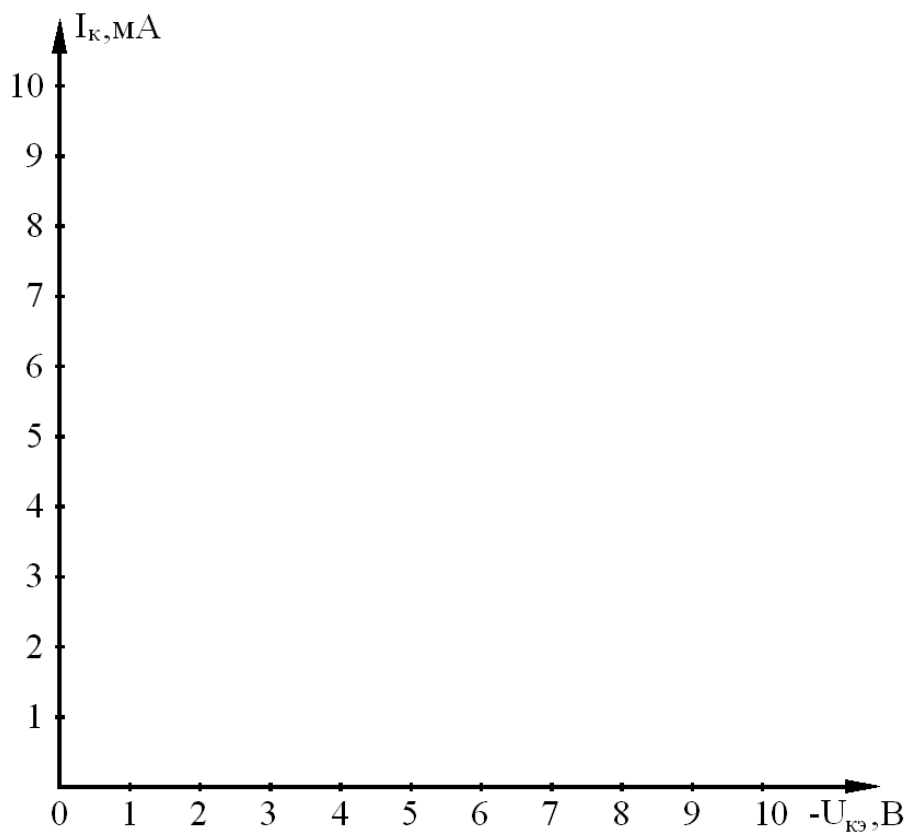
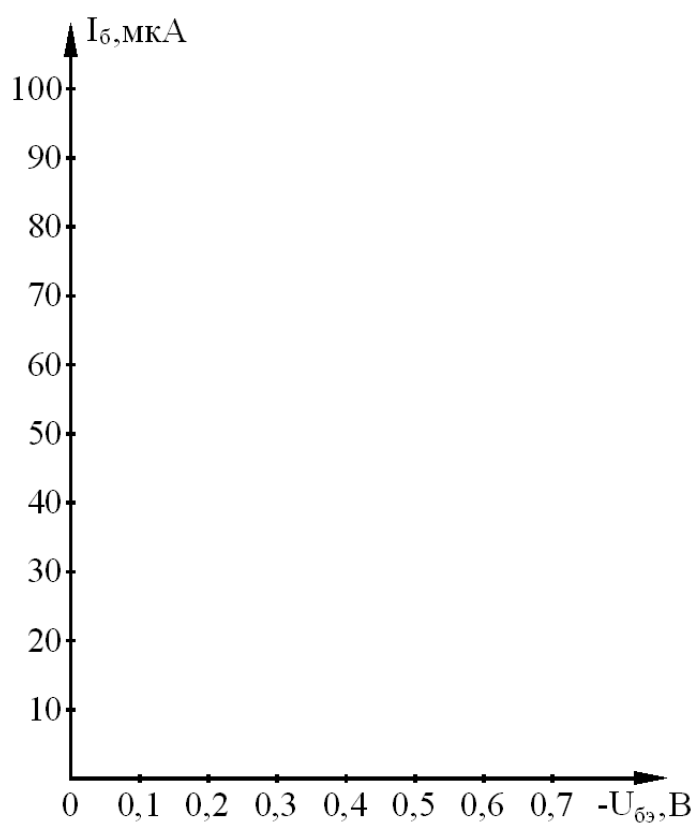


Схема снятия входных ВАХ биполярного транзистора

На схемах указать тип используемых измерительных приборов



Семейство выходных ВАХ биполярного транзистора



Семейство входных ВАХ биполярного транзистора

Здесь и далее показан вид графиков-заготовок ВАХ. Размеры и масштабы при выполнении отчета выбирать самостоятельно в зависимости от конкретных результатов (особенно это касается входных ВАХ).

### Определение h-параметров биполярного транзистора по ВАХ

$$h_{11э} =$$

$$h_{12э} =$$

$$h_{21э} =$$

$$h_{22э} =$$

Расчеты представлять по форме: формула – подстановка значений – ответ. На ВАХ должны быть показаны все построения, с помощью которых были определены параметры

### Определение параметров модели Эберса-Молла (для РЛ-1)

### Выводы по результатам работы

## Форма отчета по Лабораторной работе № 3

Московский Ордена Ленина, Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э.БАУМАНА

---



Кафедра РЛ-1, Секция № 1

Дисциплина

*« Указать название дисциплины »*

Отчёт по лабораторной работе

*« Исследование полевого транзистора »*

Студент *Указать ф. и. о.*

Группа *Указать группу.*

Преподаватель *Указать ф. и. о.*

МОСКВА 20\_\_ г.

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



**Цель работы** - исследование характеристик и параметров полевого транзистора, изучение методики измерения характеристик полевого транзистора, расчёт параметров эквивалентной схемы.

Исследуемый транзистор - указать тип и основные параметры, см. приложение 3.

### Снятие ВАХ полевого транзистора

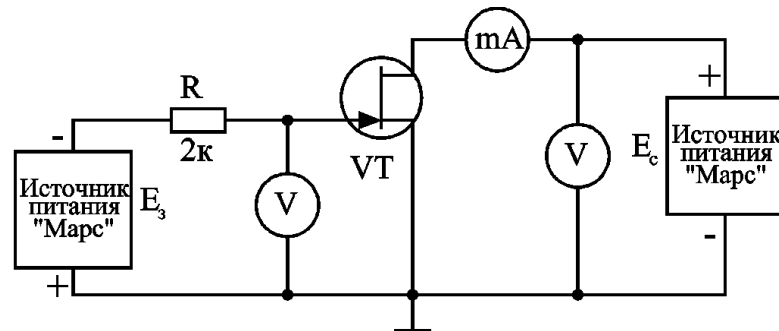
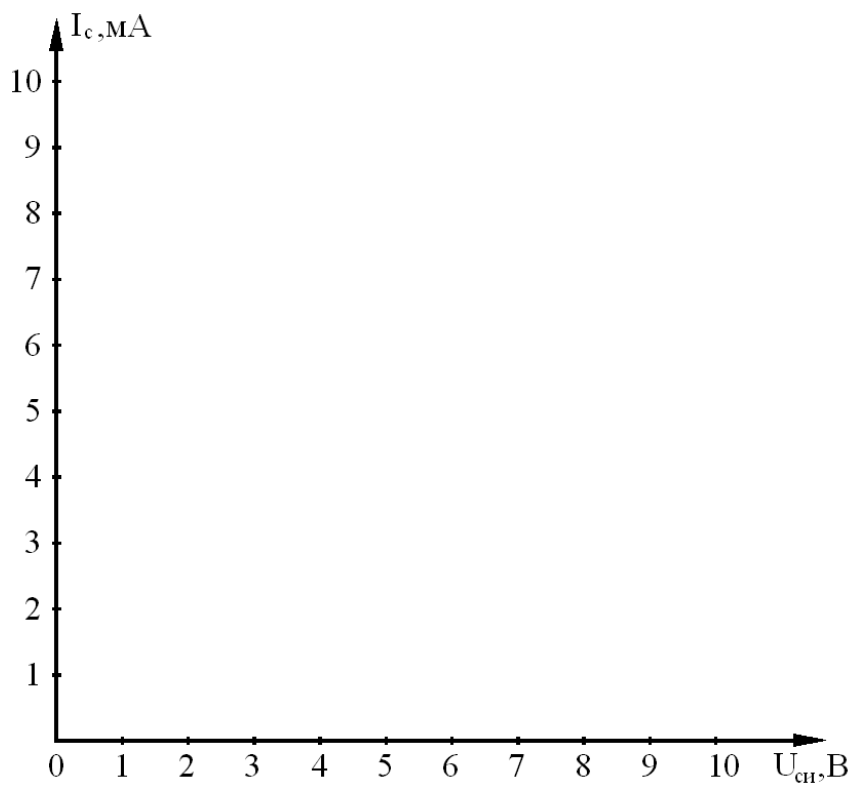


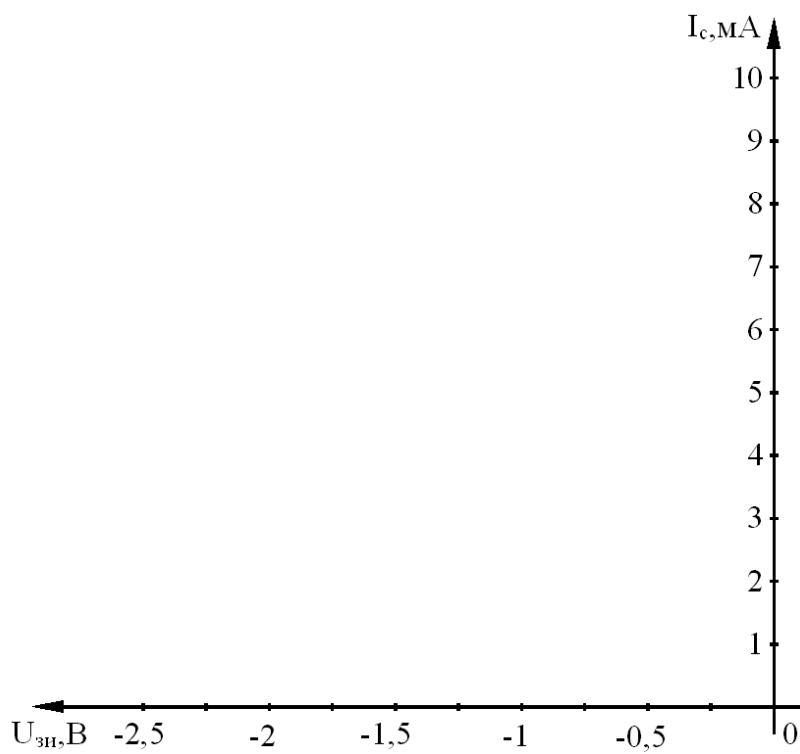
Схема снятия ВАХ полевого транзистора



Семейство выходных ВАХ полевого транзистора

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.



Семейство проходных ВАХ полевого транзистора

### Обработка экспериментальных данных

1.  $U_{зи}=0$ ,  $U_{си}=U_{си.нас}=\quad$

$S_{\text{макс}}=\quad$

$U_{зи \text{ отс}}=\quad$

2.  $U_{си}=\quad$ ,  $U_{зи}=0,4U_{\text{отс}}=\quad$

$r_{си}=\quad$

$S=\quad$

### Выводы по результатам работы

## Форма отчета по Лабораторной работе № 4

Московский Ордена Ленина, Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э.БАУМАНА

---



Кафедра РЛ-1, Секция № 1

Дисциплина

*« Указать название дисциплины »*

Отчёт по лабораторной работе

*« Исследование биполярного транзистора  
в режиме переключения »*

Студент *Указать ф. и. о.*

Группа *Указать группу.*

Преподаватель *Указать ф. и. о.*

МОСКВА 20\_\_ г.

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

**Цель работы** - изучение работы биполярного транзистора в ключевом режиме, исследование влияния режима работы транзистора и элементов схемы ключа на длительность переходных процессов в ключевой схеме.

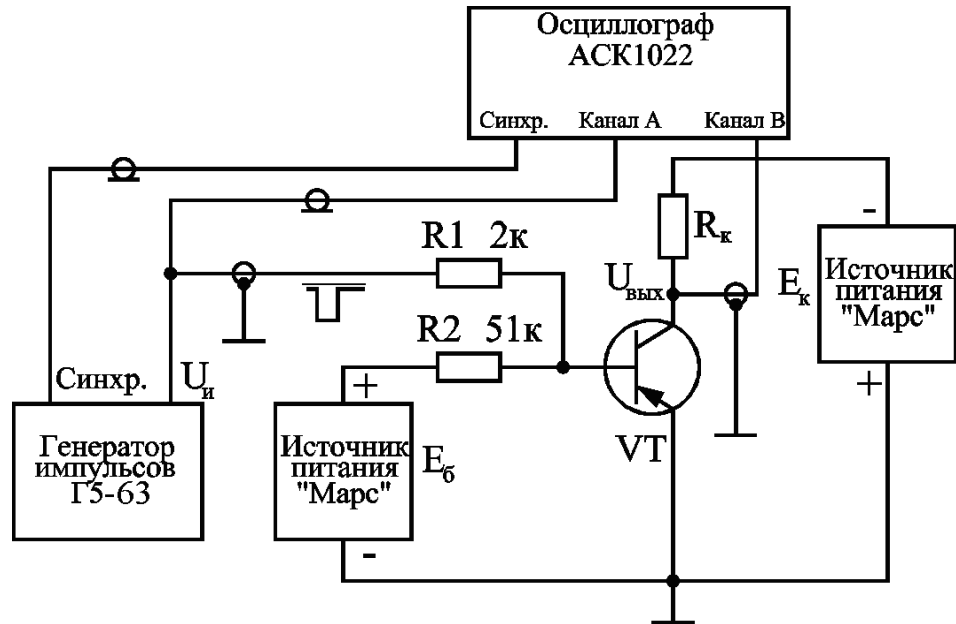
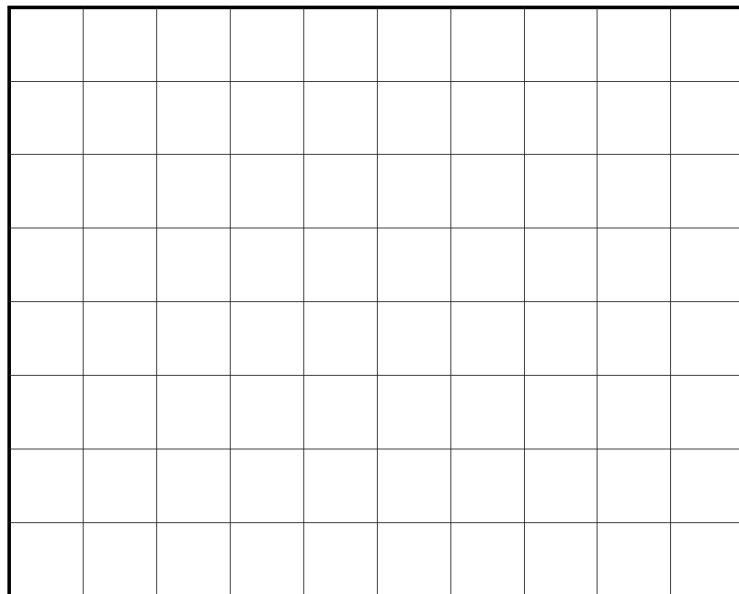


Схема исследования биполярного транзистора в ключевом режиме



Осциллограммы работы ключа на биполярном транзисторе; правила определения параметров выходного импульса

*Для приведенных осциллограмм в обязательном порядке указывать масштабы по времени и напряжению.*

### Оглавление

Д.В.Бутенко, Б.Л.Созинов, Г.С.Черкасова. Исследование полупроводниковых приборов.

## Результаты измерений

1. Зависимость $t_n(E_0)$ , $t_c(E_0)$ , $t_p(E_0)$ при $E_k=-15$ В, $U_n=-6$ В, $R_k=3$ кОм			
$E_0$ , В	$t_n$ , мкс	$t_c$ , мкс	$t_p$ , мкс
0			
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
2. Зависимость $t_n(E_k)$ , $t_c(E_k)$ , $t_p(E_k)$ при $E_0=15$ В, $U_n=-6$ В, $R_k=3$ кОм.			
$-E_k$ , В	$t_n$ , мкс	$t_c$ , мкс	$t_p$ , мкс
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
3. Зависимость $t_n(R_k)$ , $t_c(R_k)$ , $t_p(R_k)$ при $E_k=-15$ В, $E_0=12$ В, $U_n=-6$ В			
$R_k$	$t_n$ , мкс	$t_c$ , мкс	$t_p$ , мкс
620 Ом			
3 кОм			
100 кОм			
4. Зависимость $t_n(U_n)$ , $t_c(U_n)$ , $t_p(U_n)$ при $E_k=-15$ В, $E_0=4$ В, $R_k=3$ кОм.			
$-U_n$ , В	$t_n$ , мкс	$t_c$ , мкс	$t_p$ , мкс
2			
4			
6			
8			

## Выводы по результатам работы

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайсбурд Ф. И., Панаев Г. А., Савельев Б. Н. - Электронные приборы и усилители. Изд. 4-е – М.: КомКнига, 2007 г. – 474 с.: ил.
2. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: Учебное пособие. - 8-е изд.– Ростов-н/Д.: Изд-во «Феникс», 2010 г. – 703 с.: ил.
3. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы : Учеб. пособие для вузов / Пасынков В. В., Чиркин Л. К. - 8-е изд., испр. - СПб. : Лань, 2006 г. - 478 с. : ил.
4. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006 г. - 521 с.: ил.
5. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций.- 6-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2009 г.- 416 с., ил.
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004 г. - 488 с.: ил.
7. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учебное пособие для вузов/ Ю.А.Бобровский, С.А.Корнилов, И.А.Кратиров и др.; Под ред. проф. Н.Д.Федорова. – М.: Радио и связь, 2002 г. – 559 с.: ил.