

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет

К.В. ТАТМЫШЕВСКИЙ Н.Ю. МАКАРОВА

# ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие

*Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200100 – Приборостроение, специальностей 200101 – приборостроение и 200106 - информационно-измерительная техника и технологии*

Владимир 2010

УДК 621.3  
ББК 32.97  
Т23

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ»

*Е.М. Антонюк*

Доктор технических наук, профессор кафедры управления и информатики в технических и экономических системах Владимирского государственного университета

*С.И. Малафеев*

Печатается по решению редакционного совета  
Владимирского государственного университета

**Татмышевский, К. В.**

Т23      Элементы электронных устройств : учеб. пособие / К. В. Татмышевский, Н.Ю. Макарова ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 124 с.  
ISBN 978-5-9984-0014-8

Приведены основные теоретические сведения о работе полупроводниковых устройств, параметры и характеристики, схемы включения, методики выполнения лабораторных работ по исследованию основных элементов электронных устройств. Рассматривается принцип действия исследуемых схем в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

Предназначено для студентов дневного отделения, обучающихся по специальностям 200101 - приборостроение и 200106 - информационно-измерительная техника и технологии, изучающих дисциплину «Элементы электронных устройств».

Ил. 51. Табл. 24. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.3  
ББК 32.97

ISBN 978-5-9984-0014-8

© Владимирский государственный университет, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ .....	8
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ .....	10
Лабораторная работа № 1. Исследование вольт-амперной характеристики полупроводникового диода.....	10
Лабораторная работа № 2. Исследование вольт-амперной характеристики стабилитрона .....	28
Лабораторная работа № 3. Исследование вольт-амперной характеристики туннельного диода .....	35
Лабораторная работа № 4. Исследование вольт-амперных характеристик транзистора с общим эмиттером .....	38
Лабораторная работа № 5. Исследование вольт-амперных характеристик транзистора с общей базой .....	57
Лабораторная работа № 6. Исследование основных характеристик полевого транзистора с управляющим <i>p-n</i> -переходом.....	62
Лабораторная работа № 7. Исследование вольт-амперной характеристики триодного тиристора.....	71
Лабораторная работа № 8. Исследование вольт-амперной характеристики светоизлучающего диода .....	78
Лабораторная работа № 9. Исследование основных характеристик диодной оптопары .....	85
Приложения.....	92
Библиографический список .....	120

## Список принятых сокращений

### Диоды

$E_d$  – диффузионное электрическое поле  $p$ - $n$ -перехода.

$\Phi_{\text{конт}}$  – контактная разность потенциалов.

$I_{\text{пр}}$  – прямой ток через диод (диффузионный).

$I_{\text{обр}}$  – обратный ток через диод (дрейфовый).

$I_{\text{пр. макс}}$  ( $I_{\text{пр.и. макс}}$ ) – максимальный (импульсный) прямой ток.

$U_{\text{обр. макс}}$  – максимальное постоянное обратное напряжение, приложенное к диоду.

$U_{\text{пр}}$  – падение напряжения на диоде при его прямом включении.

$f_{\text{max}}$  – максимальная частота, на которой ещё сохраняется свойство односторонней проводимости диода.

$C_{\text{диф}}$  – диффузионная емкость.

$C_b$  – барьерная емкость.

### Стабилитроны

$I_{\text{ст}}$  – номинальный ток стабилизации стабилитрона.

$I_{\text{с. макс}}$  – максимальный ток стабилизации стабилитрона.

$r_d$  – динамическое сопротивление стабилитрона.

$\alpha$  (ТКСН) – температурный коэффициент стабилизации стабилитрона.

$U_{\text{ст}}$  – номинальное напряжение стабилизации стабилитрона.

### Туннельные диоды

$I_{\text{п}}$  – пиковый ток.

$U_{\text{п}}$  – напряжение пика.

$I_{\text{в}}$  – ток впадины.

$U_{\text{в}}$  – напряжение впадины.

$U_{\text{р}}$  – напряжение раствора.

$L_d$  – индуктивность туннельного диода.

### Биполярные транзисторы

$I_{\text{э}}$  – ток эмиттера транзистора.

$I_{\text{к}}$  – ток коллектора транзистора.

$I_b$  – ток базы транзистора.  
 $I_{\text{кобр}}$  – обратный ток коллектора.  
 $\alpha$  – статический коэффициент передачи тока эмиттера.  
 $\beta$  – статический коэффициент передачи тока базы.  
 $K_U$  – коэффициент усиления по напряжению.  
 $K_I$  – коэффициент усиления по току.  
 $f_{\text{гр}}$  – граничная частота коэффициента передачи тока.  
 $P_{\text{макс}}$  – максимально допустимая постоянно рассеиваемая мощность.  
 $U_{\text{кб}}$  – напряжение коллектор – база транзистора.  
 $U_{\text{кэ}}$  – напряжение коллектор – эмиттер транзистора.  
 $U_{\text{кэ.нас}}$  – напряжение насыщения между коллектором и эмиттером транзистора.  
 $r_{\text{э}}$  – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода.  
 $r_{\text{к}}$  – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода.  
 $C_{\text{кэ}}, C_{\text{кб}}, C_{\text{эб}}$  – межэлектродные емкости.

### **Полевые транзисторы**

$I_{\text{з.ут}}$  – ток утечки затвора.  
 $I_c$  – ток стока полевого транзистора.  
 $I_{\text{с.макс}}$  – максимально допустимый постоянный ток стока.  
 $S$  – крутизна характеристики полевого транзистора.  
 $U_{\text{зи}}$  – напряжение затвор – исток.  
 $U_{\text{зи.отс}}$  – напряжение отсечки полевого транзистора.  
 $U_{\text{си}}$  – напряжение сток – исток.

### **Тиристоры**

$U_{\text{ос}}$  – напряжение тиристора в открытом состоянии.  
 $U_{\text{у.от}}$  – отпирающее постоянное напряжение управления.  
 $I_{\text{у.от}}$  – отпирающий постоянный ток управления.  
 $t_y$  – длительность импульса тока или напряжения управления.  
 $U_{\text{вкл}}$  – напряжение включения.  
 $U_{\text{зс}}$  – постоянное напряжение, прикладываемое к тиристорам в закрытом состоянии.  
 $U_y$  – постоянное напряжение управления.

## Светодиоды

$I_v$  – фотометрическая сила света.

$L_v$  – фотометрическая яркость.

$\lambda$  – длина волны.

$\lambda_{\text{макс}}$  – максимум спектрального распределения.

$\Theta$  – угол раскрытия диаграммы направленности излучения. Угол раскрытия

диаграммы направленности излучения светодиода, измеренный на уровне 0,5.

$\tau$  – длительность импульса.

## Оптроны

$I_{\text{вх}}$  – входной ток.

$I_{\text{вх.макс}}$  – максимальный постоянный входной ток оптопары.

$I_{\text{вх.и.макс}}$  – максимальный импульсный входной ток оптопары.

$I_{\text{вых}}$  – выходной ток.

$U_{\text{вх}}$  – входное напряжение.

$U_{\text{вх.обр.макс}}$  – максимальное входное обратное напряжение.

$U_{\text{вых.обр.макс}}$  – максимальное выходное обратное напряжение.

$I_{\text{вых.обр.т}}$  – выходной обратный ток (темновой).

$t_{\text{нр}}$  - время нарастания выходного сигнала.

$t_{\text{сп}}$  - время спада выходного сигнала.

$K_I$  - коэффициент передачи тока.

$R_{\text{из}}$  - сопротивление изоляции.

$C_{\text{из}}$  - проходная емкость.

$U_{\text{из.мах}}$  - максимальное напряжение изоляции.

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Элементы электронных устройств» необходима для освоения студентами учебных курсов по электронике и микропроцессорной технике, оптоэлектронике и устройствам индикации, электронным методам измерения. Изучив эту дисциплину, студенты получают представление о современной электронной элементной базе, принципах действия, особенностях применения электронных устройств.

В данном учебном пособии изложены принципы работы основных электронных устройств, применяющихся в измерительной технике и других областях. В лабораторных работах исследуются вольт-амперные и другие характеристики и параметры основных элементов электронных устройств. Для изучения предлагаются полупроводниковые выпрямительные диоды, стабилитроны, полевые и биполярные транзисторы, светодиоды и оптопары, тиристоры.

В некоторых лабораторных работах предусмотрено исследование схемы в среде схемотехнического моделирования *Electronics Workbench (Multisim)*. Студентам предлагается провести сравнительный анализ результатов исследования реальных и виртуальных устройств.

В предлагаемом учебном пособии приведены основные сведения о работе в среде схемотехнического моделирования *Electronics Workbench (Multisim)*. Изложены основные правила безопасности при выполнении лабораторных работ.

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров и магистров по направлению подготовки 200100 – приборостроение специальностей 200101 – приборостроение и 200106 – информационно-измерительная техника и технологии в рамках дисциплины «Элементы электронных устройств».

## **ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ**

1. К самостоятельной работе на стенде 87Л-01 допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

2. Для обеспечения безопасности работающих при эксплуатации стенда должны быть выполнены следующие условия:

– все части стенда, которые могут оказаться под напряжением, должны быть надежно заземлены;

– запрещается заменять съемные элементы и производить пайку соединений, находящихся под напряжением;

– запрещается пользоваться неисправной аппаратурой и инструментом;

– все операции, связанные с установкой переносных приборов и измерениями, должны исключать касание токоведущих частей.

3. Все работы на стенде следует производить только после надежного его закрепления на столе.

4. Винт заземления на корпусе стенда необходимо соединить с контуром заземления изолированным медным проводом, площадь сечения которого не менее  $1,5 \text{ мм}^2$ .

5. Включение питания стенда должно производиться только после разрешения преподавателя.

6. Сборку и разборку схем необходимо производить только при отключенном электропитании стенда.

7. Лабораторные работы следует производить только в определенной последовательности: произвести все соединения на сменной панели, включить измерительные приборы и источники сигналов, затем подключить собранную схему к клеммам источников питания. Разборку рабочих схем осуществлять в обратной последовательности.

8. Не допускается превышение токов и напряжений, указанных в таблице.



Источник питания	Пределы регулирования	Максимальный ток нагрузки, мА
Постоянного напряжения ГН1	+0,5 – - 7В	5 (при $U=7В$ )
Постоянного напряжения ГН2	0,5 – 15 В	200 (при $U=15 В$ )
Постоянного напряжения ГН3	0 – 100 В	5 (при $U=100 В$ )
Постоянного тока ГТ	0 – 10 мА	11, не менее
Переменного напряжения ИП	15 В +15 %	50

## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### Лабораторная работа № 1

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы. Исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) кремниевого и германиевого диодов.

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-01, сменная панель 1, среда схемотехнического моделирования *Multisim (Electronics Workbench)*.

Объект исследования. Полупроводниковые диоды КД103А и Д9 или аналогичные.

### 1. Общие сведения

**Полупроводниковые диоды** - это электронные приборы с одним выпрямляющим электронным переходом и двумя выводами, в которых выполняется какое-либо свойство выпрямляющего электронного перехода (рис. 1.1).

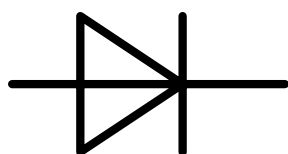


Рис. 1.1. Условно-графическое изображение полупроводникового диода

В качестве выпрямляющих электронных переходов могут быть:

- гомогенный переход, *p*- и *n*-переход (материалы *p*- и *n*-областей одинаковые);
- гетеропереход (материалы *p*- и *n*-областей разные (разная ширина запрещенной зоны));
- переход Шоттки (переход типа металл - полупроводник).

Электронно-дырочный переход образуется при контакте двух полупроводников (*p/p*) (обычно Si или Ge) с разной электропроводно-

стью, обусловленной либо  $e$  (тогда это  $n$ -тип), либо дырками (полупроводник  $p$ -типа).

Из-за разности концентрации носителей заряда возникает их **диффузия**, в результате которой в полупроводниках  $n$ -типа вблизи контакта остаются некомпенсированные ионизированные атомы доноров (положительные неподвижные заряды), а в  $p$ -типа – некомпенсированные ионизированные атомы акцепторов (отрицательные неподвижные заряды) (рис. 1.2). Между этими некомпенсированными зарядами возникает электрическое поле, которое называется **диффузионным** ( $E_d$ ). Между областями возникает контактная разность потенциалов  $\Phi_{\text{конт}}$ .

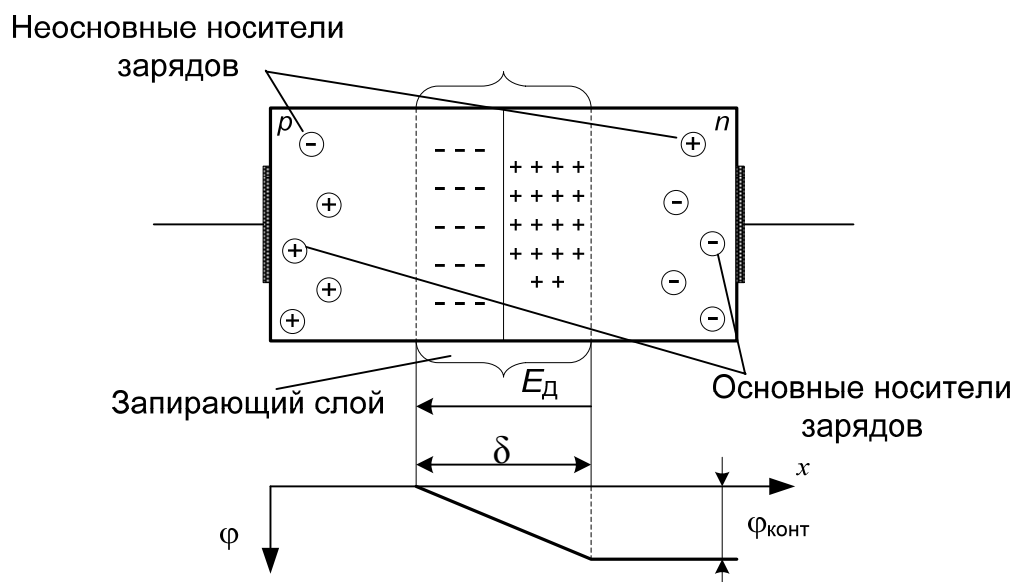


Рис. 1.2. Структура  $p$ - $n$ -перехода

Таким образом, между  $p$ - и  $n$ -областями образуется переходный слой с диффузной напряженностью. Он и называется  $p$ - $n$ -переходом. Ширина слоя зависит от концентрации носителей заряда. Этот слой обеднен подвижными носителями, поэтому обладает высоким электрическим сопротивлением.

Напряженность  $E_d$  направляется от  $n$ - к  $p$ -области, при отсутствии внешнего электрического поля возникшее внутреннее поле  $E_d$  препятствует дальнейшей диффузии носителей через границу раздела и устанавливается равновесное динамическое состояние.

Если концентрация основных носителей в  $p$ - и  $n$ -областях одинакова, то такой переход называется **симметричным**. Обедненные области с разной проводимостью будут равны по ширине. Если же концентрация основных носителей заряда не одинакова, то переход несимметричен.

Обычно концентрация носителей в одной области в 100 – 1000 раз больше, чем в другой. Такие несимметричные переходы в основном и применяются в электронике.

Здесь ширина части запирающего слоя в области с малой концентрацией будет в 100 – 1000 раз больше, чем в области с большей концентрацией.  $\varphi_{\text{конт}}$  определяется свойствами материала. Для Si  $\varphi_{\text{конт}} = 0,60,8$  В, для Ge  $\varphi_{\text{конт}} = 0,3/0,5$  В.

### ***P-n-переход при прямом смещении***

Если к  $p$ - $n$ -переходу приложить внешнее напряжение, причем положительное к  $p$ -области, а отрицательное к  $n$ -области, то напряженность внешнего поля будет направлена противоположно  $E_{\text{д}}$  внутреннего поля (рис. 1.3). В результате суммарное поле в  $p$ - $n$ -переходе будет уменьшено, соответственно снизится высота потенциального барьера  $\varphi_{\text{конт}}$  и сузится запирающий слой.

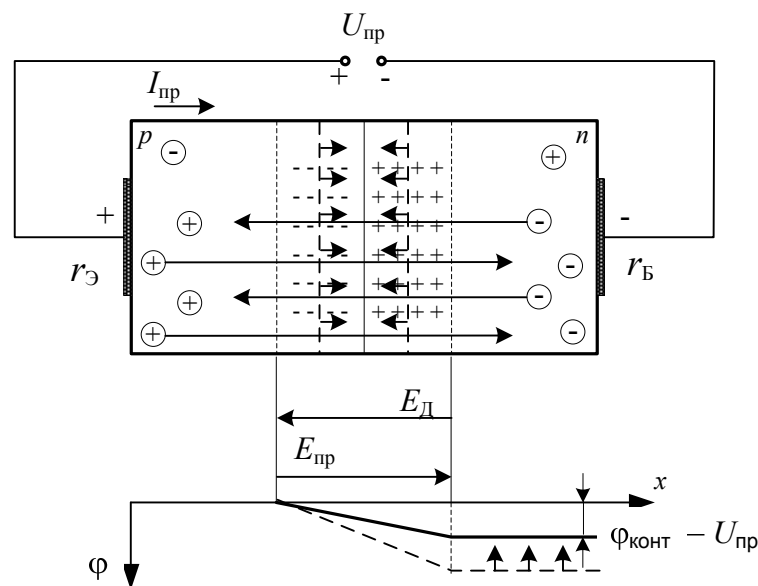


Рис. 1.3.  $P$ - $n$ -переход в прямом смещении

В результате этого значительная часть основных носителей заряда окажется способной преодолеть понизившийся барьер  $p$ - $n$ -перехода и через переход начнет протекать значительный ток, возрастающий с увеличением внешнего поля и соответствующего внешнего напряжения. Такое напряжение называется прямым и считается положительным.

Носители, преодолевшие потенциальный барьер, попадают в область, в которой не являются основными. Такой процесс называется *инжекцией*.

Область, в которой осуществляется инжекция, называется базой, область, из которой осуществляется инжекция, – эмиттером.

Ширина запирающего слоя с увеличением  $U_{пр}$  уменьшается, сопротивление  $p$ - $n$ -перехода падает, что приводит к возрастанию  $I_{пр}$ , который по своей физической сути является диффузионным. Дальнейшее увеличение  $U_{пр}$  приводит к исчезновению запирающего слоя и образованию свободной диффузии основных носителей заряда в соседней области.

При протекании ток ограничивается сопротивлением внешней цепи и сопротивлением слаболегированной области базы, внутри которой возникает некое падение напряжения, обусловленное внутренним сопротивлением базы.

### ***P-n-переход при обратном смещении***

Если к  $p$ - $n$ -переходу приложить напряжение противоположной полярности, т.е. отрицательное к  $p$ -области, а положительное к  $n$ -области, то электрическое поле внешнего источника совпадет по направлению с  $E_d$  (рис. 1.4).

При этом увеличится отток основных носителей из области контакта и увеличится ширина запирающего слоя. Потенциальный барьер возрастет. Такое внешнее напряжение называется обратным. Повышение потенциального барьера вызовет уменьшение  $I_{диф}$  через переход.

Однако в  $p$ - и  $n$ -областях существуют незначительные концентрации неосновных носителей заряда, которые возникают вследствие тепловой генерации. Эти носители могут втягиваться электрическим полем в  $p$ - $n$ -переход и преодолевать потенциальный барьер,

т.е. проходить в соседнюю область. Такой процесс называется *экстракцией*. При этом протекает обратный ток  $I_{обр}$ , который называется дрейфовым.

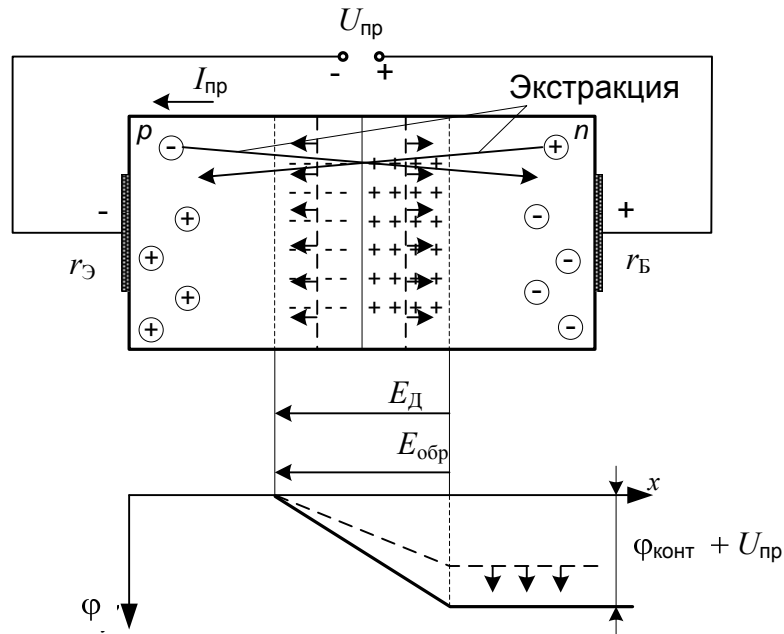


Рис. 1.4. *p-n*-переход в обратном смещении

Дрейф носителей заряда осуществляется за счет электрического поля. Поскольку концентрация неосновных носителей зависит в основном от температуры, обратный ток практически не зависит от обратного напряжения, а зависит от температуры окружающей среды и иногда называется током насыщения.

### ***Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода***

**ВАХ** п/п диода (*p-n*-перехода) представляет собой зависимость прямого тока от  $U_{пр}$  и  $I_{обр}$  от  $U_{обр}$ . Такая характеристика имеет две ветви: прямую и обратную (рис. 1.5).

**Прямая ветвь:**  $I_{пр}$  создается диффузией носителей заряда через *p-n*-переход. С увеличением  $U_{пр}$  от 0 до  $\phi_{конт}$  прямой ток растет медленно и остается очень малым. Это объясняется наличием потенциального барьера (запирающего слоя), который препятствует диффузии носителей. С увеличением  $U_{пр}$  больше  $\phi_{конт}$  барьер исчезает и  $I_{пр}$

очень быстро возрастает. Наклон характеристики на этом участке определяется наибольшим  $R_{\text{базы}}$ .

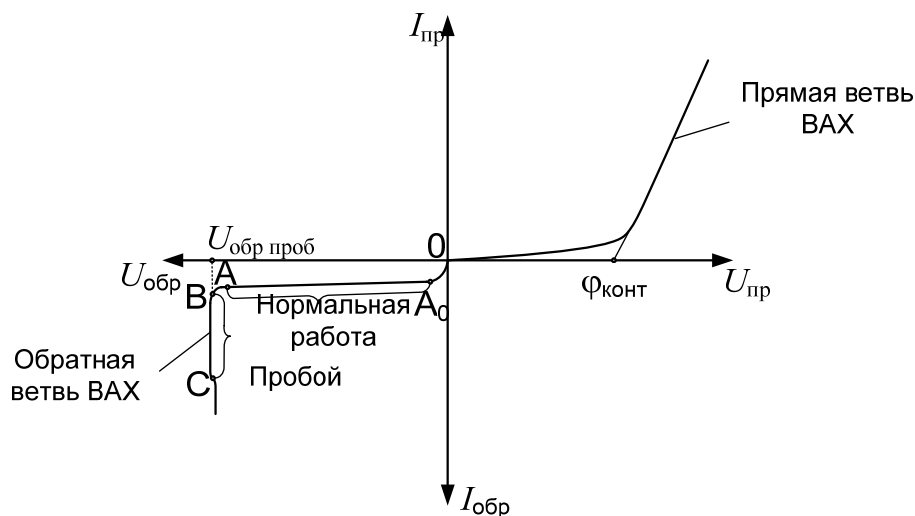


Рис. 1.5. Вольт-амперная характеристика p/n диода

**Обратная ветвь:**  $I_{\text{обр}}$  создается дрейфом через  $p$ - $n$ -переход неосновных носителей заряда. Так как концентрация неосновных носителей заряда много меньше, чем основных, то  $I_{\text{обр}} \ll I_{\text{пр}}$ . С увеличением  $U_{\text{обр}}$  обратный ток сначала резко возрастает до значения, равного величине теплового тока  $A_0$ , и при дальнейшем увеличении  $U_{\text{обр}}$  остается приблизительно постоянным ( $A_0$  A). Это объясняется тем, что при малых  $U_{\text{обр}}$  существует незначительная диффузия основных носителей, встречное движение которых (относительно дрейфующих носителей) уменьшает результирующий ток в обратном направлении.

Повышение  $U_{\text{обр}}$  до определенного значения, которое называется напряжением пробоя, приводит к пробую  $p$ - $n$ -перехода и диода.

**Пробой** – это резкое уменьшение обратного сопротивления, приводящее к резкому увеличению  $I_{\text{обр}}$  (участок BC на рис. 1.5).

Различают два вида пробоя  $p$ - $n$ -перехода: электрический и тепловой (рис. 1.6).

**Электрический пробой:**  $I_{\text{обр}}$  увеличивается при практически постоянном  $U_{\text{обр}}$ , и при уменьшении  $U_{\text{обр}}$  работоспособность восстанавливается. Это обратимый пробой. Есть две разновидности электрического пробоя:

- а) лавинный;
- б) туннельный.

- При лавинном пробое носители заряда проходят через  $p-n$ -переход в сильном электрическом поле и набирают при этом энергию, которой достаточно для образования новых электронно-дырочных пар посредством ударной ионизации атомов полупроводника. В результате ударной ионизации возрастает  $I_{обр}$ . Такой вид пробоя возникает в высокоомных п/п с большой шириной  $p-n$ -перехода (малые концентрации легирующей примеси).
- Туннельный пробой объясняется эффектом туннелирования носителей заряда, когда вследствие малой толщины перехода (потенциального барьера) возникает высокая вероятность прохождения зарядов сквозь барьер. Туннельный пробой возникает в п/п с тонкими потенциальными барьерами (высокая концентрация легирующей примеси), он происходит при обратных напряжениях в несколько вольт.

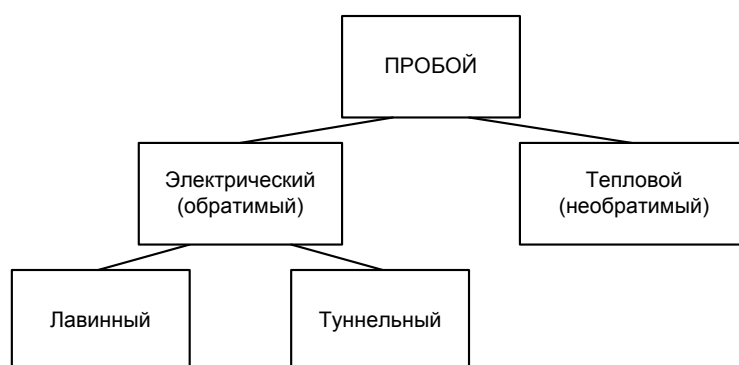


Рис. 1.6. Виды пробоя  $p-n$ -перехода

**Тепловой пробой** возникает вследствие разогрева  $p-n$ -перехода проходящим через него током, если теплоотвод недостаточен, т.е. проводимая энергия превышает рассеиваемую. При этом температура перехода повышается, в результате увеличивается концентрация неосновных носителей. Это приводит к увеличению  $I_{обр}$  (теплового). Увеличение  $I_{обр}$  повышает температуру и т.д. В результате диод сгорает и выходит из строя. Тепловой пробой является необратимым, обычно носит локальный характер.



## Емкость $p$ - $n$ -перехода

При приложении к  $p$ - $n$ -переходу импульсных или переменных напряжений проявляется его емкость.

Эквивалентная схема п/п диода представлена на рис. 1.7.

Различают барьерную и диффузионную емкости диода. Обычно  $C_k \ll C_{\text{пер}}$ ,  $r_b \ll R_{\text{пер}}$ .

**Барьерная емкость** обусловлена неподвижными зарядами, создающими в  $p$ - $n$ -переходе подобие плоского конденсатора (см.  $p$ - $n$ -переход при обратном смещении). Эта емкость возрастает с увеличением площади  $p$ - $n$ -перехода и с уменьшением ширины перехода.

Ширина  $p$ - $n$ -перехода при увеличении  $U_{\text{пр}}$  уменьшается, следовательно,  $C_b$  будет увеличиваться. При увеличении  $U_{\text{обр}}$  ширина перехода увеличивается, а барьерная емкость  $C_b$  уменьшается. Этот эффект используется в специальных приборах, которые называются **варикапы**. В целом, величина  $C_b$  составляет 10 – 100 пФ (рис. 1.8).

**Диффузионная емкость** обуславливается объемными зарядами инжектированных дырок и электронов по обе стороны  $p$ - $n$ -перехода, где их концентрация достаточно велика. Инжекция возникает при прямом смещении, поэтому  $C_{\text{диф}}$  проявляется при прямом смещении.  $C_{\text{диф}}$  значительно больше барьерной и равна 100 – 1000 пФ. При обратных напряжениях  $C_{\text{диф}}$  отсутствует.

Таким образом, при обратных смещениях следует учитывать  $C_b$ , при прямых -  $C_{\text{диф}}$ .

$C_{\text{диф}}$  не проявляется у диодов Шоттки, так как у них отсутствуют процессы накопления и рассасывания неосновных носителей в базе.

Поэтому диоды Шоттки имеют лучшие частотные свойства по сравнению с диодами на  $p$ - $n$ -переходах.

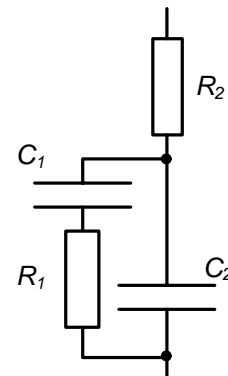


Рис. 1.7. Эквивалентная схема п/п диода

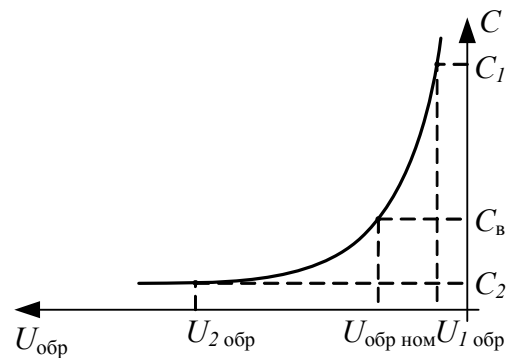


Рис. 1.8. Вольт-фарадная характеристика варикапа

## *Классификация полупроводниковых диодов*

Современная классификация диодов делается по следующим признакам:

- по назначению;
- физическим свойствам;
- электрическим параметрам;
- конструктивно-технологическим признакам;
- исходному материалу.

Практичнее всего рассмотреть классификацию, отражающую систему условных обозначений, в основе которой лежит буквенно-цифровой код. Система включает следующие элементы:

1. 1 или Г – германий;  
2 или К – кремний;  
3 или А – арсенид галлия;  
4 или И - соединение индия.

Если первым элементом является буква, значит, прибор – широкого применения, если цифра – прибор специального назначения. У приборов специального назначения меньшие допуски на основные параметры, т. е. меньше разброс свойств внутри одной партии.

2. Д – выпрямительные, импульсивные и универсальные диоды.  
Ц – выпрямительные столбы и блоки.  
В – варикапы.  
С – стабилитроны.  
И – туннельные диоды.  
А – сверхвысокочастотные диоды (СВЧ).  
Л – излучающие диоды.  
Г – генераторы шума.  
О – оптопары.

3) Внутри подклассов третий элемент обозначает различные эксплуатационные признаки отдельно для каждого подкласса. Например, для подкласса выпрямительных диодов это будет диапазон значений средневыпрямленного тока; для импульсных диодов – диапазон времени восстановления обратного сопротивления  $t_{\text{восст}}$ ; для стабилитронов – номинальное напряжение стабилизации и т.д.

По различным классифицирующим признакам полупроводниковые диоды разделяются на следующие группы:

- по конструкции: 1) точечные;  
2) плоскостные;

- по материалу: 1) кремниевые;  
2) германиевые;  
3) арсенид-галлиевые;
- по назначению: 1) выпрямительные;  
2) импульсные;  
3) СВЧ;  
4) стабилитроны;  
5) варикапы;
- по принципу действия: 1) лавинно-пролетный;  
2) туннельный;  
3) диоды Шоттки;  
4) светоизлучающие (СИД);  
5) фотодиоды (ФД);  
6) диоды Ганна.

Полупроводниковые диоды изготавливают с использованием диффузионной или сплавной технологий.

### **Конструктивные признаки диодов**

**1. Точечные диоды.** Здесь линейные размеры  $p$ - $n$ -перехода сравнимы с его толщиной (рис. 1.9). При изготовлении таких диодов тонкая проволока с нанесенной примесью приваривается к пластине  $n$ -типа с определенным типом проводимости. В результате получаем  $p$ - $n$ -переход с малыми размерами, соответственно такой диод имеет малую емкость за счет малой площади и может работать на высоких частотах. Недостатками являются малое значение  $I_{пр}$  и относительно небольшое значение обратного допустимого напряжения.

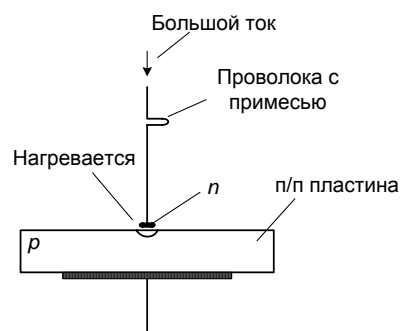


Рис. 1.9. Точечный диод

**2. Плоскостные диоды.** Изготавливаются методами диффузии или сплавления. На пластину с проводником  $n$ -типа наплавляют индий, который образует слой с проводимостью  $p$ -типа. К обеим областям приваривают металлические контакты (рис. 1.10). В результате ли-

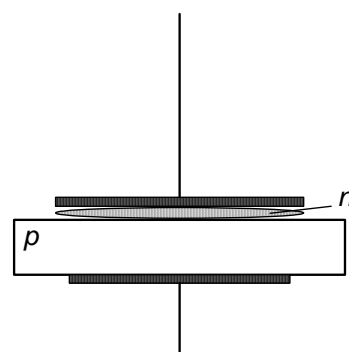
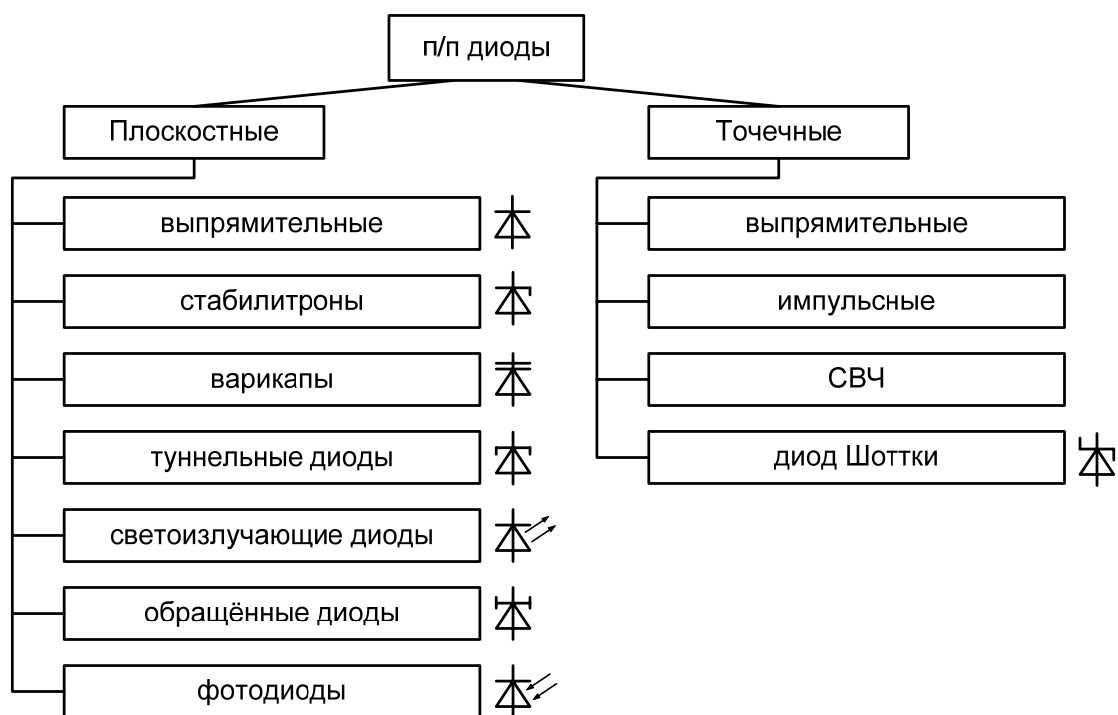


Рис. 1.10. Плоскостной диод

нейные размеры перехода получаются много больше толщины. Емкость диода может быть очень большой. Эти диоды не могут работать на высоких частотах, но могут пропускать большие значения  $I_{пр}$  (порядка 100 мА – 10А) и выдерживают значительное  $U_{обр}$ .

В основном классификация диодов производится по разделению их на точечные и плоскостные.

### Классификация диодов по назначению



**Выпрямительные диоды** – самая распространенная группа. Они предназначены для преобразования переменного тока в постоянный по направлению. Эти диоды могут пропускать  $I_{пр}$  до 100 А и выдерживать  $U_{обр}$  до нескольких киловольт.

В цепях с более высоким напряжением применяются выпрямительные столбы. **Выпрямительный столб** представляет собой несколько последовательно соединенных диодов, каждый из которых дополнительно шунтирован высокоомным резистором, а вся конструкция залита эпоксидным компаундом. К затвердевшему корпусу присоединяются контакты.

**Выпрямительный блок** представляет собой четыре выпрямляющих диода, соединенных по мостовой схеме внутри, которая предназначена для двух полупериодного выпрямления переменных напряжений.

**Высокочастотные, или универсальные, диоды** применяются для преобразования высокочастотных сигналов, а именно:

- выделения низкочастотного сигнала из модулированного высокочастотного сигнала. Это **детекторные** диоды;
- изменения несущей частоты модулирующего сигнала. Это **смесительные** диоды;
- модуляции высокочастотного сигнала. Это **модуляторные** диоды.

Все ВЧ и СВЧ диоды являются точечными и работают на частотах до 100 МГц.

**Импульсные диоды** предназначены для использования в импульсных схемах в качестве коммутирующих элементов, отсекаателей, ограничителей.

Для импульсных диодов характерным является режим, когда к диоду после действия прямого напряжения очень быстро прикладывается обратное. В момент переключения через диод идет значительный обратный ток, который объясняется так называемым рассасыванием накоплений в базе неосновных носителей, которые в период действия  $U_{пр}$  образовали определенный заряд. Интервал времени от момента прохождения тока через ноль до момента достижения  $I_{обр}$  заданного низкого значения называется временем восстановления обратного сопротивления. Это основной классифицирующий параметр импульсных диодов (3-й элемент маркировки). Чем это время меньше, тем быстрее действие больше.

### **Основные параметры выпрямительных, импульсных и ВЧ диодов**

В целом выделяются различные группы параметров:

- собственные;
- физические;
- основные;

- электрические;
- предельно допустимые эксплуатационные.

Здесь в качестве основных будут рассмотрены предельно допустимые эксплуатационные и прочие параметры, приводимые в справочной литературе.

1.  $U_{\text{пр}}$  ( $U_{\text{пр ср}}$ ,  $U_{\text{пр имп}}$ ) – прямое напряжение, задается в вольтах. Это напряжение на диоде при протекании постоянного (переменного, периодического или импульсного) прямого тока.

2.  $I_{\text{пр}}$  ( $I_{\text{пр ср}}$ ,  $I_{\text{пр имп}}$ ) – постоянный (средний за период, импульсный) прямой ток, протекающий через диод.  $I_{\text{пр ср}}$ , является основным классифицирующим признаком выпрямительных диодов.

3.  $U_{\text{обр}}$  ( $U_{\text{обр ср}}$ ,  $U_{\text{обр имп}}$ ) – постоянное (среднее, переменное, импульсное) обратное напряжение.

4.  $I_{\text{обр}}$  ( $I_{\text{обр ср}}$ ,  $I_{\text{обр имп}}$ ) – постоянный (средний, импульсный) обратный ток, обусловленный приложением обратного напряжения.

5.  $f_{\text{max}}$  - максимальная рабочая частота (выпрямляющий диод).

6.  $t_{\text{восст}}$  – время восстановления обратного сопротивления (импульсный диод) (рис. 1.11).

7.  $r_{\text{диф}}$  – дифференциальное сопротивление диода, определяется как отношение приращения напряжения к вызвавшему его приращению тока:

$$r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (\text{в справочниках задается редко}).$$

По сути  $f_{\text{max}}$  и  $t_{\text{восст}}$  в разных терминах описывают одно и то же свойство диода - **быстродействие**.

Как правило, задаются предельно допустимые эксплуатационные параметры. Эти параметры нельзя превышать для обеспечения длительной и надежной работы прибора.

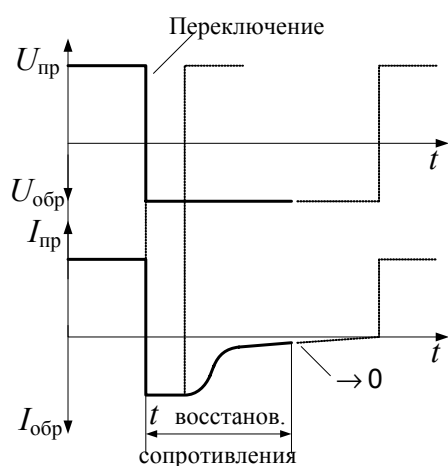


Рис. 1.11. Пояснение параметра  $t_{\text{восст}}$

### Основные предельно допустимые параметры

1.  $U_{пр}$  (определяется использованием материала, Si 0,6 – 0,8 В).
2. Максимальное значение  $I_{пр\ max}$  постоянного (среднего, импульсного) прямого тока.
3.  $U_{обр\ max}$  – максимально допустимое значение обратного напряжения ( $U_{обр\ max} < U_{пробоя}$ ).
4.  $I_{обр\ max}$  – максимальное значение обратного тока, обусловлено приложением  $U_{обр\ max}$ .
5.  $f_{max}$  ( $t_{восст}$ ).
6.  $P_{max}$  – максимально допустимая рассеиваемая мощность.
7.  $\Delta t^{\theta}$ ; - диапазон рабочих температур (Si -60 °С +(120 – 160) °С; Ge: -60 °С +(70 – 80) °С).
8.  $U_{обр\ max} \approx 200 – 800$  В.
9.  $I_{обр\ max} \approx 1 – 100$  мкА.

Обратная характеристика у Ge хуже, чем у Si. Поэтому кремниевые диоды получили наибольшее распространение (уступающие германиевому диоду только по прямому току).

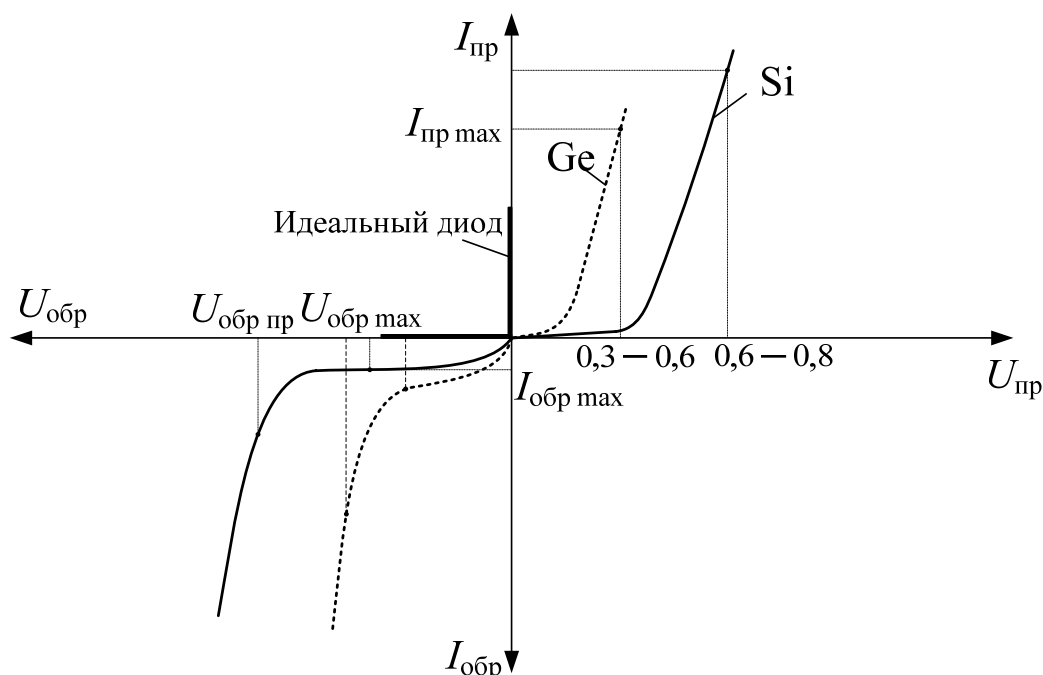


Рис. 1.12. ВАХ германиевого и кремниевого диодов

Падение прямого напряжения на диоде при протекании прямого тока у германиевых диодов меньше, чем у кремниевых, и не превы-

шает 0,2 – 0,4 и 0,6 – 0,8 В соответственно. Рабочий диапазон температур для германиевых диодов равен -60 – +85 °С, для кремниевых -60 – +150 °С.

## 2. Методика выполнения работы

### 2.1. Исследование прямой ветви ВАХ полупроводникового диода.

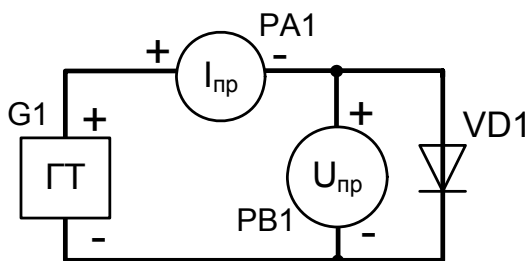


Рис. 1.13. Схема для исследования прямой ветви ВАХ диода

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования прямой ветви ВАХ (рис. 1.13), подключить источники питания и измерительные приборы с помощью соединительных проводов и съемных элементов.

Проверить правильность установки диода в съемном элементе. Диоды КД103А маркируются точками, а диоды Д9 – кольцами на корпусе у положительного вывода (анода).

Измерение прямого тока осуществляется амперметром АВМ1 с пределом измерения 10 мА. Для измерения прямого напряжения используется вольтметр АВМ2 с пределами измерения 0,5 и 1,0 В. Собранный схему показать преподавателю.

Включить тумблер «Сеть».

2.1.2. Установить на источнике тока ГТ максимальное значение выходного тока (около 10 мА). Результат измерения прямого тока и соответствующего ему прямого напряжения свести в табл. 1.1. Плавно уменьшать значение прямого тока таким образом, чтобы прямое напряжение изменялось приблизительно на 0,1 В. Получить не менее 6 – 8 отсчетов значений прямого тока. Результаты занести в табл. 1.1. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно. При необходимости уменьшить предел измерения прямого тока. Наиболее точные измерения выполняются при условии, что стрелка прибора отклоняется не менее чем на 2/3 длины шкалы.



Таблица 1.1

$I_{пр}, \text{мА}$							
$U_{пр}, \text{В}$							

Заполнить табл. 1.1 для германиевого и кремниевого диодов.

По результатам измерений построить график прямой ветви ВАХ для каждого диода.

2.2. Исследование обратной ветви ВАХ полупроводникового диода.

2.2.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования обратной ветви ВАХ (рис. 1.14), подключить источники питания и измерительные приборы с помощью соединительных проводов и съемных элементов.

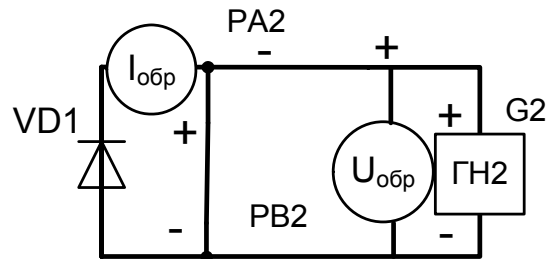


Рис. 1.14. Схема для исследования обратной ветви ВАХ диода

Измерение обратного тока осуществлять микроамперметром АВО с пределом измерения 10 мкА. Для измерения обратного напряжения использовать вольтметр АВМ2 с пределами измерения 50 и 10 В. Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер «Сеть».

2.2.2. Установить при помощи ручек «ГРУБО» и «ТОЧНО» на источнике обратного напряжения ГН2 максимальное значение выходного напряжения (около 15 В). Результат измерения величины обратного тока и соответствующего ему напряжения занести в табл. 1.2. Плавно уменьшать значения обратного напряжения приблизительно через 2 – 3 В. Получить не менее 4 – 6 отсчетов обратного тока. Результаты занести в табл. 1.2. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно. При необходимости уменьшить пределы измерения.

Таблица 1.2

$U_{обр}, \text{В}$							
$I_{обр}, \text{мкА}$							

Заполнить табл. 1.2 для германиевого и кремниевого диодов. По результатам измерений построить графики обратной ветви ВАХ для каждого диода. Графики ВАХ, построенные по табл. 1.1, 1.2, должны иметь одну систему координат.

### 3. Исследование полупроводникового диода в среде схемотехнического моделирования *Multisim*

Исследование напряжения и тока диода производится при прямом и обратном смещении *p-n*-перехода. На рис. 1.15 представлена схема для исследования прямой ветви ВАХ. В прил. 1 приведены рекомендации по исследованию схем в программе Multisim (Electronics Workbench).

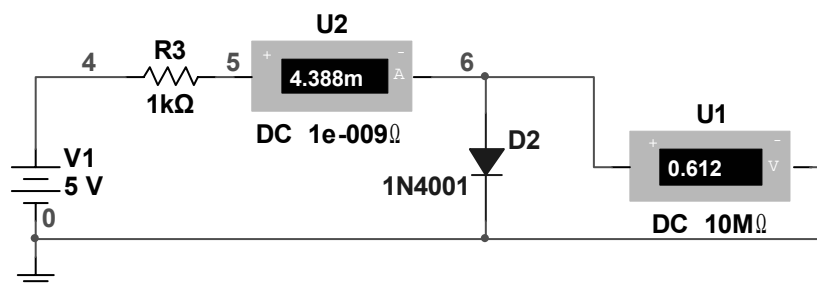


Рис. 1.15. Схема для исследования ВАХ в Electronics Workbench

Для исследования обратной ветви необходимо изменить полярность включения диода. Результаты измерений свести в табл. 1.3, 1.4.

Таблица 1.3

$E, \text{В}$	5	4	3	2	1	0,5	0
$U_{\text{пр}}, \text{мВ}$							
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$							

Таблица 1.4

$E, \text{В}$	1	5	10	15	1
$U_{\text{обр}}, \text{мВ}$					
$I_{\text{обр}}, \text{мкА}$					

Построить графики ВАХ.

Из-за нелинейности диода его нельзя характеризовать величиной сопротивления как линейный резистор. Отношение напряжения на диоде к току на нем, называемое статическим сопротивлением, зависит от тока. Рассчитайте статическое сопротивление диода в прямом и обратном включении по данным из табл. 1.3 и 1.4 и сравните с сопротивлением, измеренным с помощью мультиметра.

Определите по ВАХ дифференциальное (динамическое) сопротивление диода.

#### **4. Содержание отчета**

- 4.1. Титульный лист.
- 4.2. Цель работы.
- 4.3. Схемы электрические принципиальные для исследования прямой и обратной ветвей ВАХ диодов (прил. 2).
- 4.4. Результаты измерений, сведенные в таблицы.
- 4.5. Результаты измерений в виде графика зависимости  $I=f(U)$  (прил. 3).
- 4.6. Результаты исследования диода с использованием Multisim.
- 4.7. Основные справочные параметры кремниевого диода.
- 4.8. Выводы по работе.

#### **5. Контрольные вопросы и задания**

- 5.1. Дайте классификацию полупроводниковых диодов.
- 5.2. Назовите основные справочные параметры выпрямительных диодов.
- 5.3. Объясните параметр импульсного диода – время восстановления обратного сопротивления.
- 5.4. Какие полупроводниковые диоды, плоскостные или точечные, могут работать на более высоких частотах и почему?
- 5.5. Назовите численные значения прямого падения напряжения для германиевых и кремниевых полупроводниковых диодов.
- 5.6. Какова величина допустимого обратного напряжения у кремниевых плоскостных выпрямительных диодов?

5.7. В каких пределах лежат значения обратных токов германиевых и кремниевых выпрямительных диодов малой и средней мощности?

5.8. Какие диоды (кремниевые или германиевые) получили наибольшее распространение и почему?

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБИЛИТРОНА

Цель работы. Исследовать вольт-амперные характеристики кремниевого стабилитрона Д814А.

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-01, сменная панель 2, среда схемотехнического моделирования *Multisim (Electronics Workbench)*.

Объект исследования. Стабилитрон Д814А или аналогичный.

#### 1. Общие сведения

**Стабилитрон** (опорный диод Зенера) – это  $p-n$  диод, напряжение на котором слабо зависит от проходящего тока, использующий явление электрического пробоя и предназначенный для стабилизации напряжения.

Принцип действия стабилитронов основан на использовании свойства  $p-n$ -перехода при электрическом пробое сохранять практически постоянную величину напряжения в определенном диапазоне изменения обратного тока. Механизм пробоя может быть туннельным, лавинным или смешанным. У низковольтных стабилитронов (с низким сопротивлением базы) наиболее вероятен туннельный пробой. У стабилитронов с высокоомной базой (сравнительно высокоомных) пробой носит лавинный характер.

**Стабилизация напряжения** – это поддержание напряжения постоянным в независимости от проходящего тока, температуры и времени.

### **Основные параметры стабилизатора**

1.  $U_{ст}$  – номинальное напряжение стабилизации – это напряжение на стабилизаторе, определенное при номинальном токе ( $I_{ном ст}$ , при котором определяется классифицирующий признак). Основным классифицирующим признаком –  $U_{ст}$ .

2.  $I_{ст min}$  ( $I_{ст max}$ ) – минимальные и максимальные токи стабилизации, при которых стабилизатор выполняет свои функции.

3.  $r_{диф}$  – дифференциальное сопротивление стабилизатора, определяется на рабочем участке ВАХ через  $\Delta U_{ст}$  и  $\Delta I_{ст}$ .

4.  $\alpha$  – температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКНС). Показывает относительное изменение  $U_{ст}$ , %, при изменении температуры окружающей среды на 1 °С.

5.  $\delta_{U_{ст}}$  – временная нестабильность  $U_{ст}$ , показывает максимальное отклонение  $U_{ст}$ , мкВ или %, в течение длительного времени работы (1000, 2000 ч).

6.  $P_{max}$  – максимально допустимая рассеиваемая мощность.

Стабилизаторы изготавливают из кремния. При прямом включении он ведет себя как обычный выпрямительный диод. Это нерабочее включение.

Обратное включение является для стабилизатора рабочим.  $I_{стаб min}$  и  $I_{стаб max}$  указывают на обратной ветви ВАХ рабочий участок характеристики.

Чем вертикальнее АВ, тем лучше стабилизатор. АВ – участок электрического пробоя (см. рис. 1.5).

При увеличении  $I > I_{ст max}$  происходит тепловой пробой, прибор сгорает.

Фактически зависимость  $U_{ст}$  от проходящего тока на рабочем участке описывается параметром  $r_{ст}$  – дифференциальным сопротивлением стабилизатора.

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} \text{ показывает зависимость } U_{ст} \text{ от } I_{ст}.$$

### **Классификация стабилизаторов**

Выделяют стабилизаторы общего назначения, термокомпенсируемые, прецизионные, импульсные и двуханодные.

Стабилитроны общего назначения используются в стабилизаторах и ограничителях постоянного тока или импульсного напряжения.

Термокомпенсируемые и прецизионные стабилитроны применяются в качестве источников эталонного или опорного напряжения в электронных устройствах, где необходима высокая точность стабилизации уровня напряжения.

Импульсные стабилитроны применяются при необходимости стабилизировать или ограничивать короткие импульсы напряжения (десятки наносекунд – сотни микросекунд). Такие стабилитроны имеют пониженное значение емкости и малую длительность переходного процесса.

Двуханодные стабилитроны обеспечивают стабилизацию и ограничение двухполярных напряжений.

Кроме стабилитронов определенное распространение получили стабисторы и полупроводниковые ограничители напряжения (трансорбы).

Стабисторы используются для стабилизации напряжения до 1 В. В них используется прямая ветвь ВАХ  $p-n$ -перехода. По основным параметрам они близки к стабилитронам, но включаются в цепь в прямом направлении.

Полупроводниковые ограничители напряжения (трансорбы) применяются для защиты аппаратуры от воздействия перенапряжений, возникающих при переходных процессах, а также при воздействии статического электричества или грозовых разрядов. Принцип их действия аналогичен принципу действия стабилитронов. В отличие от обычных стабилитронов трансорбы изготавливают на основе трехслойных эпитаксиальных  $p-n-n^+$ -структур. Эпитаксиальная технология обеспечивает стабильный порог срабатывания, наличие  $n^+$ -слоя повышает скорость срабатывания прибора.

## **2. Методика выполнения работы**

### **2.1. Исследование прямой ветви ВАХ стабилитрона.**

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования прямой ветви ВАХ (рис. 2.1), подключить генера-

тор тока ГТ и измерительные приборы с помощью соединительных проводов.

Проверить правильность установки стабилитрона в съемном элементе. Схема соединения электродов с выводами находится на корпусе стабилитрона.

Измерение прямого тока осуществлять амперметром АВМ1 с пределом измерения 10 мА. В случае необходимости уменьшить предел измерения. Для измерения прямого напряжения использовать вольтметр АВМ2 с пределами измерения 0,5 и 1,0 В.

Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер «Сеть».

2.1.2. Установить на источнике тока ГТ максимальное значение выходного тока (около 10 мА). Результат измерения прямого тока и соответствующего ему прямого напряжения занести в табл. 2.1. Плавно уменьшать значение прямого тока таким образом, чтобы прямое напряжение изменялось приблизительно на 0,1 В. Получить не менее 6 – 8 отсчетов прямого тока. Результаты занести в табл. 2.1. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно. При необходимости уменьшить предел измерения прямого тока. Наиболее точные измерения выполняются при условии, что стрелка прибора отклоняется не менее чем на 2/3 длины шкалы.

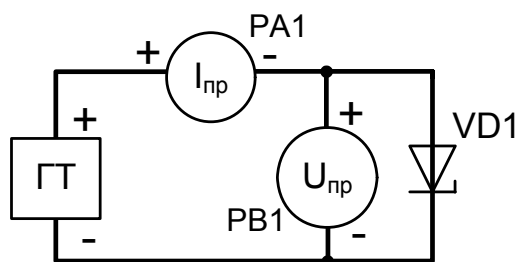


Рис. 2.1. Схема для исследования прямой ветви ВАХ стабилитрона

Таблица 2.1

$I_{пр}, \text{мА}$							
$U_{пр}, \text{В}$							

По результатам измерений построить график прямой ветви ВАХ.

2.2. Исследование обратной ветви стабилитрона.

2.2.1. Из съемных элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования обратной ветви ВАХ (рис. 2.2), подключить генераторы тока ГТ и напряжения ГН2 и измерительные приборы с помощью соединительных проводов.

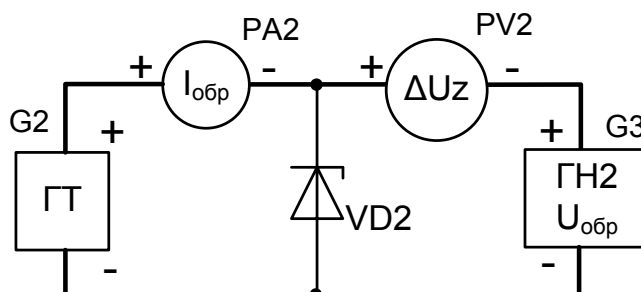


Рис. 2.2. Схема для исследования обратной ветви ВАХ стабилитрона

Измерение обратного напряжения, т.е.  $U_{ст}$ , производится компенсационным методом. Генератор тока ГТ формирует обратный ток (ток стабилизации), который создает на стабилитроне падение напряжения. От генератора напряжения ГН2 на стабилитрон подается напряжение такой же полярности, что и на стабилитроне. В момент равенства этих напряжений вольтметр АВМ2 (PV2) должен показывать нуль, т.е.  $\Delta U_z = 0$ , следовательно,  $U_{ст}$  равно напряжению на ГН2. Такой метод измерения связан с тем, что на нерабочем участке обратной ветви ВАХ сопротивление стабилитрона весьма велико и сравнимо с внутренним сопротивлением вольтметра. Поэтому непосредственное измерение обратного напряжения на стабилитроне приведет к значительным погрешностям.

В качестве измерителя обратного тока используется миллиамперметр АВМ1 с пределами измерения 10 и 5 мА и микроамперметр АВО с пределом измерения 10 мкА. Для измерения обратного напряжения применяется измеритель выхода ИВ в положении «ГН2» (предел измерения – 25 В). Определение равенства напряжений  $\Delta U_z$  производится при помощи вольтметра АВМ2 с пределом измерения 0,5 В. Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер «Сеть».



2.2.2. Установить на генераторе ГТ максимальный ток (около 10 мА). С помощью ручек «ГРУБО» и «ТОЧНО» увеличивать напряжение генератора ГН2 до тех пор, пока на вольтметре АВМ2 не установится значение напряжения, равное нулю. Определить значения тока стабилизации по амперметру АВМ1, а напряжения стабилизации – по прибору ИВ. Плавно уменьшая значения тока  $I_{ст}$  приблизительно через каждые 2 мА, зафиксировать значения обратного напряжения. Результаты измерений (не менее 4 – 6 значений) занести в табл. 2.2.

2.2.3. Подключить вместо миллиамперметра АВМ1 микроамперметр АВО с пределом измерения 10 мкА. Установить на генераторе ГТ небольшой ток (менее 10 мкА). С помощью ручек «ГРУБО» и «ТОЧНО» увеличивать напряжение генератора ГН2 до тех пор, пока на вольтметре АВМ2 не установится значение напряжения, равное нулю. Определить значения тока стабилизации по микроамперметру АВО, а напряжения стабилизации по прибору ИВ. Плавно изменить значение тока  $I_{ст}$  на несколько микроампер. Результаты измерений (не менее двух значений) занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$I_{ст}, \text{ мА (мкА)}$							
$U_{ст}, \text{ В}$							

По результатам измерений построить график ВАХ стабилитрона. Графики ВАХ, построенные по табл. 2.1, 2.2, должны иметь одну систему координат.

### 3. Исследование стабилитрона в среде схемотехнического моделирования *Multisim*

При подключении стабилитрона к источнику питания получается следующая схема (рис. 2.3).

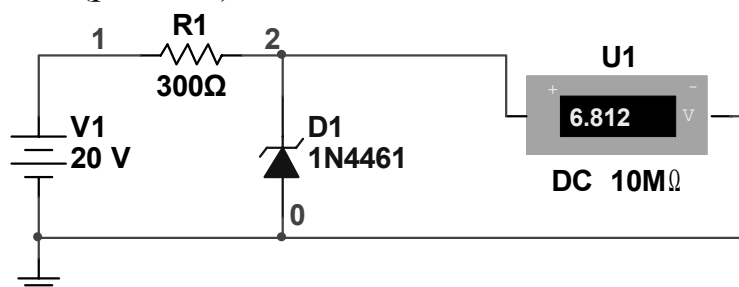


Рис. 2.3. Схема для исследования прямой ветви ВАХ стабилитрона в Electronics Workbench

Данные для вычисления тока и напряжения стабилизации оформляют в табл. 2.3.

Таблица 2.3

$E, В$	0	4	6	10	15	20	25	30
$U_{пр}, мВ$								
$I_{пр}, мА$								

По результатам построить ВАХ стабилитрона.  
 Оценить по ВАХ напряжение стабилизации.  
 Определить рассеиваемую мощность на стабилитроне при  $E=20 В$ .  
 По ВАХ рассчитать дифференциальное сопротивление стабилитрона.

#### 4. Содержание отчета

- 4.1. Титульный лист.
- 4.2. Цель работы.
- 4.3. Схемы электрические принципиальные для исследования прямой и обратной ветвей ВАХ стабилитрона.
- 4.4. Результаты измерений, сведенные в таблицы.
- 4.5. Результаты измерений в виде графика зависимости  $I=f(U)$ .
- 4.6. Результаты исследования стабилитрона с использованием Multisim.
- 4.7. Основные справочные параметры стабилитрона Д814А.
- 4.8. Выводы по работе.

#### 5. Контрольные вопросы и задания

- 5.1. Нарисуйте условно графическое обозначение стабилитрона.
- 5.2. Объясните параметры стабилитрона – дифференциальное сопротивление, температурный коэффициент напряжения.
- 5.3. Расшифруйте условные обозначения КС133А, 2С133А. Чем они отличаются друг от друга?
- 5.4. Приведите классификацию стабилитронов.
- 5.5. Что такое стабистор?
- 5.6. Назовите основные области применения стабилитронов.
- 5.7. При какой полярности напряжения работают стабилитроны?

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

Цель работы. Исследовать вольт-амперные характеристики туннельного диода.

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-01, сменная панель 3, среда схемотехнического моделирования *Multisim (Electronics Workbench)*.

Объект исследования. Туннельный диод АИ301А или аналогичный.

#### 1. Общие сведения

Туннельный диод - п/п диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на ВАХ при прямом смещении участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

**Вырожденный полупроводник** имеет очень большую концентрацию примесей, за счет чего резко возрастает его электропроводность.

Наличие участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) на ВАХ (рис. 3.1) позволяет применять туннельные диоды в усилителях, генераторах и переключающих устройствах, работающих на частотах 100 – 1000 МГц. Классифицируются такие диоды по назначению.

Участок ОАВ получен вследствие туннельного эффекта. Участок ВС – обычная ВАХ *p-n*-перехода.

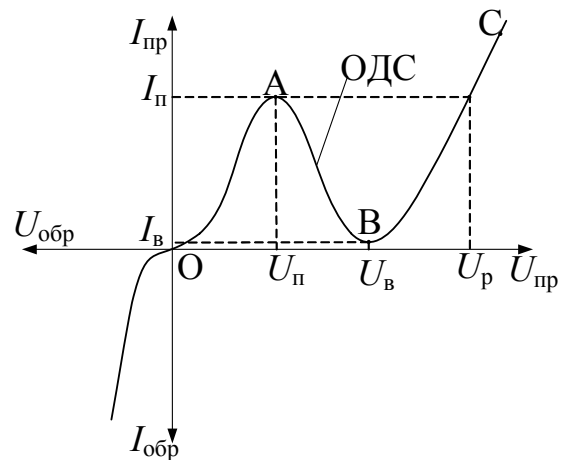


Рис. 3.1. ВАХ туннельного диода: ОА – первая восходящая ветвь, ВС – вторая восходящая ветвь, АВ – отрицательное дифференциальное сопротивление

### Основные параметры туннельного диода

1.  $I_{\text{п}}$  – ток пика – значение прямого тока в точке максимума ВАХ, при котором значение дифференциального сопротивления равно нулю.
2.  $I_{\text{в}}$  – ток впадины – значение прямого тока в точке минимума ВАХ, при котором дифференциальное сопротивление равно нулю.
3.  $U_{\text{п}}$  – напряжение пика – значение  $U_{\text{п}}$ , соответствующее  $I_{\text{п}}$ .
4.  $U_{\text{в}}$  – напряжение впадины – значение  $U_{\text{пр}}$ , соответствующее  $I_{\text{в}}$ .
5.  $U_{\text{р}}$  – напряжение раствора (характеристики) – значение  $U_{\text{пр}}$  на второй восходящей ветви ВАХ, при котором  $I = I_{\text{п}}$ .
6.  $L_{\text{д}}$  – индуктивность выводов диода.

### Обращенный диод

Это полупроводниковый диод на основе п/п с критической концентрацией примеси, у которой проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом.

Фактически обращенный диод является разновидностью туннельного, у которого  $I_{\text{п}}$  очень близок к нулю. Основные параметры обращенного диода совпадают с параметрами туннельного.

Область применения – выпрямление малых переменных напряжений (меньших 0,5 – 0,7 В). Обращенным диод называется потому, что его прямая и обратная ветви характеристики обращаются, т.е. используются наоборот.

## 2. Методика выполнения работы

2.1. Исследование прямой ветви ВАХ туннельного диода.

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему

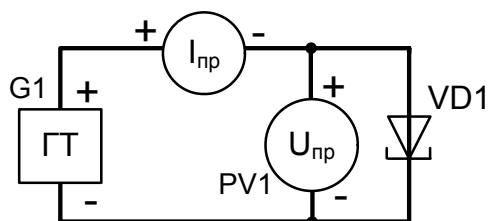


Рис. 3.2. Схема для исследования ВАХ туннельного диода

для исследования прямой ветви ВАХ (рис. 3.2), подключить генератор тока ГТ и измерительные приборы с помощью соединительных проводов. Проверить правильность установки диода в съемном элементе. Минусовой электрод имеет более широкое основание.

Измерение прямого тока осуществлять амперметром АВМ1 с пределом измерения 10 мА. В случае необходимости уменьшить предел измерения. Для измерения прямого напряжения использовать амперметр АВМ2 с пределами измерения 0,5 В. Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер «Сеть».

### 2.1.2. Исследование первой восходящей ветви ВАХ.

Установить на источнике тока ГТ минимальное значение выходного тока. Плавно увеличивать значения тока. Результаты измерения занести в таблицу.

$I_{пр}, \text{мА}$							
$U_{пр}, \text{В}$							

Получить не менее 3 – 4 отсчетов. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно. При необходимости уменьшить предел измерения прямого тока. Наиболее точные измерения выполняются при условии, что стрелка прибора отклоняется не менее чем на  $2/3$  длины шкалы.

Начиная с некоторого значения тока (тока пика  $I_{п}$ ), в показаниях вольтметра возникнет скачок напряжения. Это соответствует переходу на вторую восходящую ветвь характеристики.

### 2.1.3. Исследование второй восходящей ветви ВАХ.

Увеличить предел измерения вольтметра АВМ2 до 1 или 5 В. Далее следует установить на источнике тока ГТ максимальное значение выходного тока. Далее плавно уменьшать значение тока при помощи ручек «ГРУБО» и «ТОЧНО», регистрируя при этом значения тока и напряжения на второй восходящей ветви ВАХ. Записать в таблицу не менее 3 – 4 отсчетов. Начиная с некоторого значения, произойдет обратный скачок напряжения в показаниях вольтметра. Это соответствует переходу на первую восходящую ветвь ВАХ. Закончить измерения.

По результатам измерений построить график прямой ветви ВАХ для туннельного диода.

**ВНИМАНИЕ! Обратная ветвь ВАХ туннельного диода не исследуется!**

### 3. Содержание отчета

- 3.1. Титульный лист.
- 3.2. Цель работы.
- 3.3. Схема электрическая принципиальная для исследования прямой ветви ВАХ туннельного диода.
- 3.4. Результаты измерений, сведенные в таблицы.
- 3.5. Результаты измерений в виде графика зависимости  $I=f(U)$ .
- 3.6. Основные справочные параметры туннельного диода АИЗ01А.
- 3.7. Выводы по работе.

### 4. Контрольные вопросы и задания

- 4.1. Объясните туннельный пробой  $p-n$ -перехода.
- 4.2. Приведите основные параметры туннельного диода.
- 4.3. Можно ли экспериментально определить ток и напряжение впадины?
- 4.4. Каковы различия между туннельными диодами, имеющими обозначения АИЗ01А и ЗИЗ01А?
- 4.5. В каких схемах применяются туннельные диоды?

### Лабораторная работа № 4

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Цель работы. Исследовать вольт-амперные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ).

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-01, сменная панель 6, среда схемотехнического моделирования *Multisim (Electronics Workbench)*.

Объект исследования. Транзистор МП40А или аналогичный.

## 1. Общие сведения

**Биполярный транзистор** – это п/п прибор с двумя  $p$ - $n$ -переходами и тремя выводами, которые используются для усиления мощности электрического сигнала.

В основе конструкции – трехслойная структура с различными типами электропроводности. В соответствии с чередующимися типами электропроводные биполярные транзисторы делятся на  $p$ - $n$ - $p$ - (рис. 4.1, а) и  $n$ - $p$ - $n$ -типы (рис. 4.1, б).

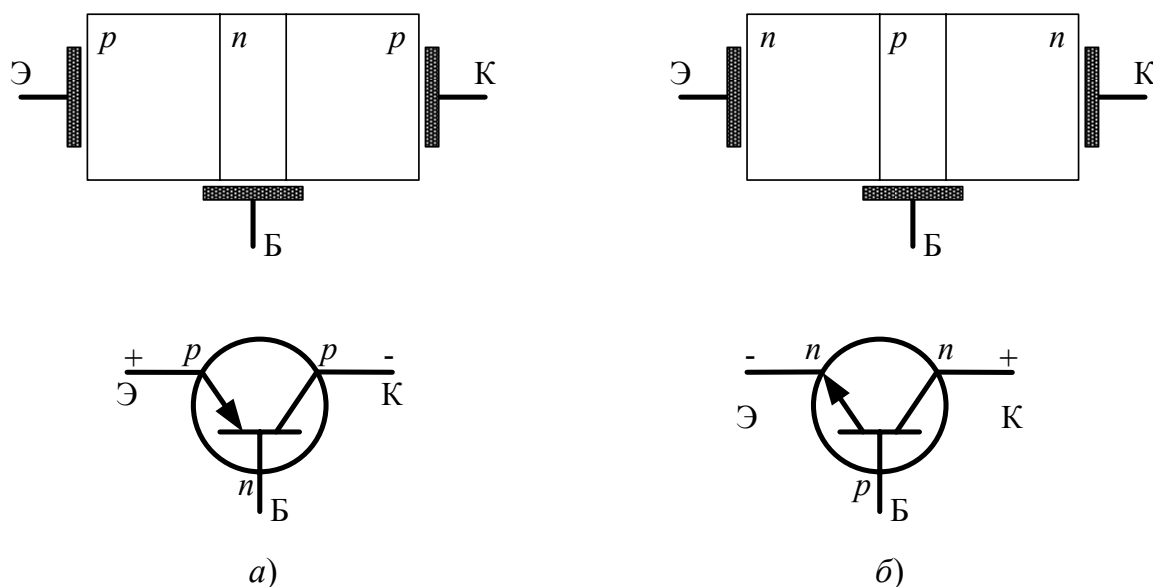


Рис. 4.1. Структура и условно-графическое обозначение  $p$ - $n$ - $p$ - и  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторов

Реальная конструкция выглядит следующим образом: реальная толщина базы  $\delta$  достигает единицы доли микрометра, а данная конструкция, в которой область К охватывает область Э, обеспечивает хорошее собирание носителей зарядов, испускаемых эмиттером (рис. 4.2).

В такой конструкции наружная область, в которой концентрация примесей максимальна [ $C_{p1} > C_{p2}$ ], называется **эмиттером**, вторая наружная область с меньшей концен-

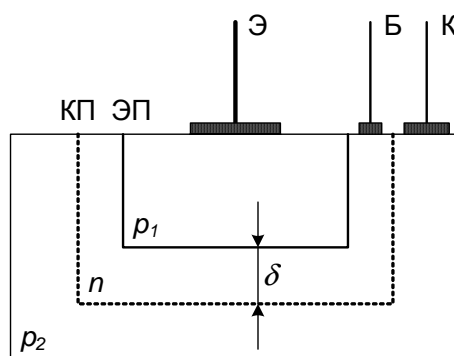


Рис. 4.2. Конструкция биполярного транзистора

трацией примесей – *коллектором*, внутренняя тонкая область – *базой*. Электронно-дырочный переход между базой и эмиттером называется *эмиттерным переходом*, соответствующий между коллектором и базой – *коллекторным переходом*. Основные свойства транзистора определяются процессами, происходящими в базе.

Возможны четыре режима работы в соответствии с тем, какое смещение, прямое или обратное, подается на коллекторный или эмиттерный переходы:

1. *Режим отсечки* – на оба перехода подано обратное смещение. Транзистор закрыт и неуправляем.
2. *Режим насыщения* – на оба перехода подано прямое смещение. Транзистор открыт и неуправляем.
3. *Активный режим* – на ЭП подано прямое напряжение, а на КП – обратное. Транзистор приоткрыт и управляем. Это основной режим работы транзистора.
4. *Инверсный режим* – на ЭП подается обратное напряжение, а на КП – прямое. Этот режим применяется очень редко.

Первые два режима используются, когда транзистор работает в качестве электронного ключа, т.е. подавляющее время своей работы транзистор либо полностью открыт, либо закрыт и находится в отсечке, а время перехода из одного состояния в другое чрезвычайно мало. Транзисторы в таком режиме работают в цифровых схемах.

### ***Физические основы работы транзистора (активный режим)***

К эмиттерному переходу прикладывается прямое напряжение. При этом возникает инжекция носителей заряда из Э в Б, где они являются неосновными (рис. 4.3). Движение дырок в процессе инжекции через ЭП создает ток эмиттера  $I_e$ . Дырки, прошедшие в базу, имеют вблизи ЭП повышенную концентрацию, что приводит к их диффузии по толщине базы по направлению к КП.

Толщина базы очень мала, поэтому дырки оказываются вблизи КП и большая их часть не успевает рекомбинировать с электронами базы, а втягивается ускоряющим полем КП в область К. Такой процесс называется *экстракцией*, происходящей под действием обратно-



го напряжения на КП. Движение дырок в процессе экстракции приводит к появлению  $I_k$ .

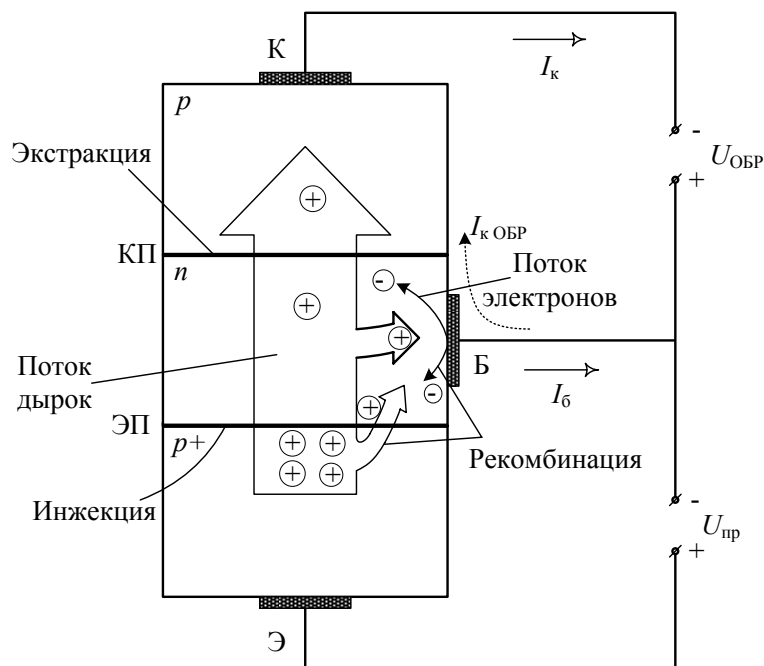


Рис. 4.3. Физические основы работы биполярного транзистора

Основное условие работы транзистора – малая толщина базы, которая должна быть меньше длины свободного пробега. Под такой длиной понимаем расстояние, которое должны преодолеть носители заряда в процессе диффузии, чтобы точно произошла рекомбинация.

В том случае если в базе преобладают диффузионные процессы и распределение поля по толщине базы равномерное, такие транзисторы называются **диффузионными**.

Если за счет подбора проводимости слоя базы электрическое поле внутри неё неравномерно, то движение носителей зарядов в базе определяется не только диффузией, но и дрейфом, и транзисторы называются **дрейфовыми**. Они, как правило, по частотным и другим свойствам лучше диффузионных.

Тем не менее незначительная часть инжектированных дырок в базе перерекомбинирует с электронами. Количество электронов в базе постоянно пополняется из внешней цепи за счет источника  $E_3$ . При этом в цепи базы будет протекать ток  $I_b$ . Этот ток очень мал вследствие малой толщины базы и малой концентрации в ней электронов.

Рассмотрим схему протекания токов:  $I_3 = I_k + I_6, I_6 \rightarrow 0, I_3 \approx I_k$ .

Процессы рекомбинации (количественно) на 2 – 3 порядка меньше процессов инжекции и экстракции. Среди незначительных процессов можно выделить процесс генерации пар носителей заряда в коллекторе за счет приложения  $U_{обр}$ . Этот ток носит тепловой характер, аналогичен  $I_{обр}$  через  $p$ - $n$ -переход и называется обратным током коллектора  $I_{кобр}$ .

Второй процесс, снижающий эффективность работы, связан с движением электронов из Б в Э в результате снижения потенциального барьера между Б и Э.

Таким образом,  $I_k$  управляется током эмиттера. Если увеличивается  $I_3$ , то пропорционально возрастает  $I_k$ . В свою очередь,  $I_3$  может измениться в большом диапазоне при достаточно малых изменениях  $U_{пр}$  на ЭП.

Поэтому можно сказать, что транзистор является прибором, в котором за счет создания достаточно небольшого  $I_6$  можно получать большие  $I_k$ . Ток  $I_3$  как прямой ток через  $p$ - $n$ -переход изменяется при небольших изменениях напряжения между Б и Э и вызывает соответствующие изменения  $I_k$ . На этом и основаны усилительные свойства транзистора.

Если на ЭП нет напряжения, т.е. цепь эмиттера разорвана, то в любом случае через коллекторный переход будет протекать небольшой ток  $I_{кобр}$ . В большинстве случаев по сравнению с  $I_k$  им можно пренебречь, но его следует учитывать, если транзистор работает в режиме отсечки. Для количественного описания свойств транзистора вводятся два коэффициента:  $\alpha$  – статический коэффициент передачи

тока эмиттера:  $\alpha = \frac{I_k}{I_3} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_3}$  (на линейных участках),  $\alpha < 1$ ,

$\alpha = 0,95/0,99$ .

Чем больше коэффициент  $\alpha$ , тем транзистор лучше.

$\beta$  – статический коэффициент передачи тока базы.

$$\beta = \frac{I_k}{I_6} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} = h_{213} \gg 1, \beta = 40 - 1000.$$

Фактически  $\beta$  характеризует усилительные свойства транзистора. Обычно  $I_b$  является входным, а  $I_k$  выходным (схема с общим эмиттером). Поэтому отношение выходного тока к входному будет коэффициентом усиления тока.

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \text{ (в справочниках задают } \beta\text{).}$$

### **Схема включения транзистора**

Транзистор имеет три электрода Э, К, Б, из которых в схеме включения один будет общим для входной и выходной цепи. Два оставшихся электрода будут входным и выходным.

В зависимости от того, какой электрод будет общим, возможны три варианта включения:

- с общим Э;
- общей Б;
- общим К.

При любой схеме включения постоянный ток проходит от положительного источника питания через транзистор к отрицательному. Принцип работы транзистора и свойства собственно транзистора от схемы включения не меняются, но свойства самих схем существенно различны.

В схемах «Общая база», «Общий эмиттер» выходной сигнал выделяется на сопротивлении  $R_n$ , схема «Общий коллектор» называется эмиттерным повторителем.

Схема с общим эмиттером получила наибольшее распространение, так как обеспечивает усиление и по току, и по напряжению.

Обычно каждая схема характеризуется входным сопротивлением  $R_{вх} = U_{вх} / I_{вх} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх}$  и коэффициентами усиления по току и напряжению:  $K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$ ;  $K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}$ .

Рассмотрим эти параметры для схем с общей Б и общим Э. Обычно для различения параметра к определенной схеме ставится индекс:  $R_{вхБ}$ ,  $R_{вхЭ}$  и т.п.

Схема с ОЭ (рис. 4.4) наиболее широко употребляема, так как обеспечивает усиление не только входной мощности, но и входного тока (тока базы).

$$K_{I\Omega} = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \beta, [40 \leq \beta \leq 1000],$$

$$R_{\text{ВХ}\Omega} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Б}}} \cdot \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{Э}}} = R_{\text{ВХБ}} (\beta + 1).$$

Схема с общим эмиттером обеспечивает большее входное сопротивление, чем схема с общей базой.

$$K_{U\Omega} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{ЭБ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} \cdot R_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Б}} \cdot R_{\text{ВХ}\Omega}} = \beta \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХБ}} (\beta + 1)} \cong \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХБ}}} \gg 1, \text{ так как } R_{\text{Н}} \gg R_{\text{ВХБ}}.$$

Для описания свойств схем с общей базой и общим эмиттером

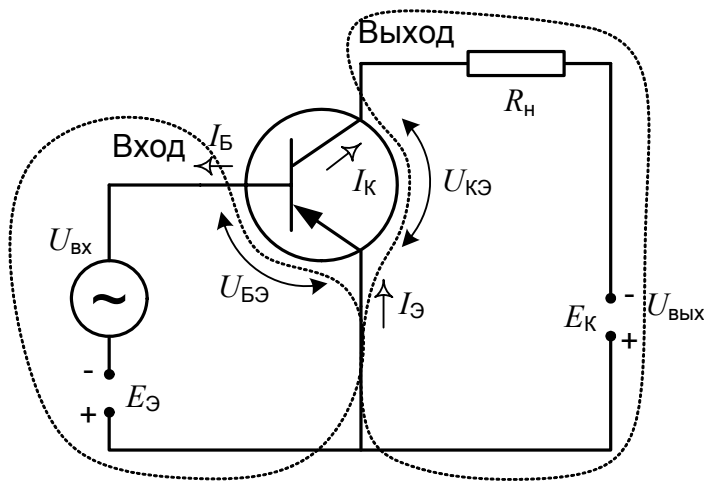


Рис. 4.4. Схема с общим эмиттером

используют семейство характеристик: характеристики транзистора представляют собой зависимость одной величины от другой при неизменной третьей величине. Наибольшее распространение получили два вида характеристик: входные и выходные.

Входной характеристикой транзистора называют зависимость  $I_{\text{ВХ}}$  от  $U_{\text{ВХ}}$  при неизменном  $U_{\text{ВЫХ}}$ :  $I_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВХ}}) | U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$ .

Выходной характеристикой называется зависимость  $I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}}) | I_{\text{ВХ}} = \text{const}$ .

Вид характеристик зависит от способа включения, но для схем с ОЭ и ОК виды характеристик практически одинаковы. Поэтому в основном различают два вида характеристик: для схем с ОБ и ОЭ.

### **Статические характеристики транзистора для схемы с ОЭ**

**Входные характеристики** показывают зависимость  $I_{\text{Б}}$  от  $U_{\text{БЭ}}$  при постоянном  $U_{\text{КЭ}}$ :  $I_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}}) | U_{\text{КЭ}} = \text{const}$  (рис. 4.5).

При  $U_{кэ} = 0$  характеристика имеет вид прямой ветви ВАХ диода.

С увеличением  $U_{кэ}$  характеристика сдвигается незначительно вправо. Это объясняется тем, что увеличение обратного напряжения приводит к расширению коллекторного перехода за счет области базы. Так как толщина базы уменьшается, уменьшается и число рекомбинаций в ней. Это приводит к уменьшению тока базы для тех же значений  $U_{бэ}$ . В целом отдельные характеристики семейства располагаются близко друг к другу, поэтому на практике пользуются одной входной характеристикой, полученной при типовом значении  $U_{кэ}$ .  $U_{кэ} \approx 10 - 15$  В.

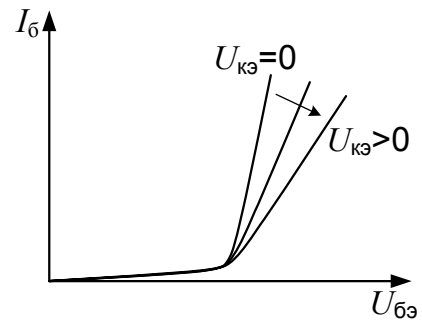


Рис. 4.5. Входные характеристики транзистора для схемы с ОЭ

**Выходные характеристики** – зависимость  $I_к = f(U_{кэ}) | I_б = \text{const}$  (рис. 4.6).

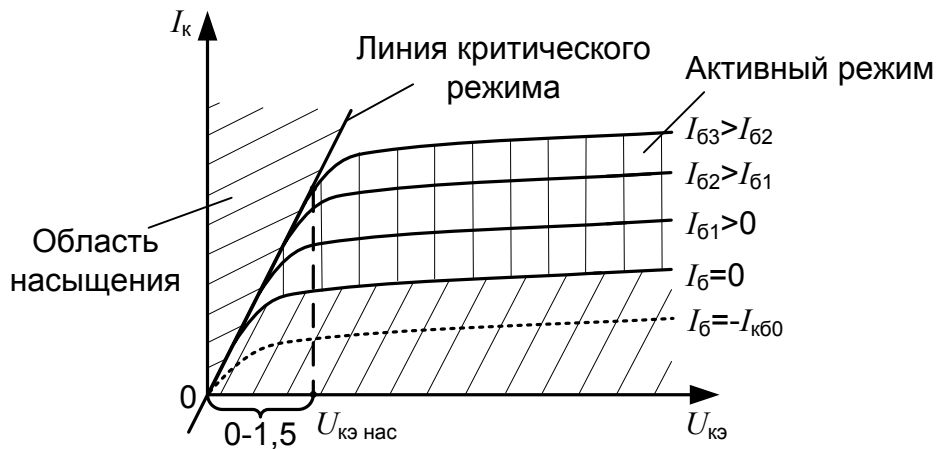


Рис. 4.6. Выходные характеристики транзистора для схемы с ОЭ

Все характеристики выходят из начала координат, так как при  $U_{кэ} = 0$  ток  $I_к = 0$ . При  $U_{кэ} = 0$  цепь между коллектором и эмиттером можно считать закороченной, а коллекторный переход подключенным параллельно к эмиттерному, на котором действует  $U_{пр}$ . Выходная характеристика  $I_б = 0$  имеет вид, аналогичный обратной ветви ВАХ диода.

Чем больше значение  $I_{\delta}$ , тем выше проходит характеристика, тем ярче проявляется процесс экстракции. При этом более интенсивно проходит инжекция в базу неосновных носителей и больше получаем  $I_k$ . Начальный круто входящий участок каждой характеристики является нерабочим. На рабочем участке, который практически горизонтален, наблюдается независимость тока  $I_k$  от  $U_{кэ}$ , т.е. транзистор выполняет функции стабилизатора тока. В целом с увеличением  $I_{\delta}$  наклон характеристик меняется, но обычно  $I_k$  определяется  $I_{\delta}$ .

Для большинства случаев применение транзистора в активном режиме можно считать, что самая нижняя выходная характеристика соответствует  $I_{\delta} = 0$ .

Однако при анализе схем с положительной обратной связью и схем транзисторных включений следует учитывать более точную модель работы транзистора. Так, в действительности самая нижняя характеристика будет соответствовать  $I_{\delta} = -I_{кбо}$  (обратному току коллекторного перехода). Это обратный ток, протекающий через коллекторный переход при обратном смещении и при разорванной цепи эмиттера.

Суммарный ток с учетом  $I_{\delta} = 0$  называется сквозным током и получается при смещении эмиттерного перехода, когда суммарный  $I_{\delta} = 0$ .

$$I_{кэо} = I_{кбо} + I_{кбо} \cdot \beta = I_{кбо}(\beta + 1) - \text{сквозной ток.}$$

При анализе работы схем различают токи перехода по двойным индексам. Для обозначения  $I_{кбо}$  применимо обозначение  $I_{кобр}$ .

Эта величина для большинства транзисторов не превышает 10 – 15 мкА.

В большинстве случаев и обратным и сквозным токами можно пренебречь, а вся область выходящих характеристик, лежащая ниже характеристики при  $I_{\delta} = 0$  называется областью отсечки (где транзистор неуправляем).

**Линия критического режима** отделяет область активного режима от области насыщения (соединяет точки перегиба отдельных характеристик). Эти точки соответствуют выходу характеристики на горизонтальный участок. Точка пересечения линии критического режима с самой верхней характеристикой определяет значение напряже-

ния насыщения  $U_{кэ\text{ нас}}$ . Фактически это напряжение, которое падает между коллектором и эмиттером, если транзистор полностью открыт.  $U_{кэ\text{ нас}}$  для транзисторов с большой мощностью не превышает 1 – 1,5 В, для маломощных 0,1 – 0,3 В. Модель транзистора в режиме насыщения называется «транзистор стянут в точку». Остальная область называется областью активного режима.

Положение рабочей точки на выходных характеристиках определяется с помощью нагрузочной прямой, а координаты рабочей точки определяют текущее значение тока коллектора и напряжение между коллектором и эмиттером (рис. 4.7). Для построения нагрузочной прямой необходимо знать напряжение питания схемы и сопротивление коллекторной цепи. Пересечение нагрузочной прямой и характеристики дает положение рабочей точки.

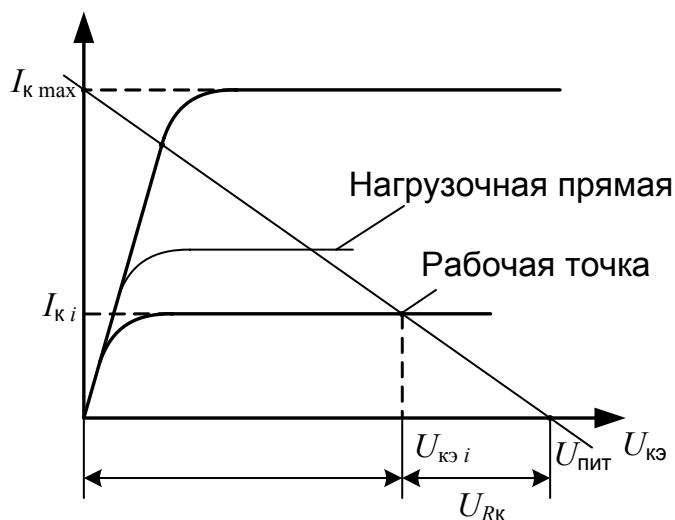


Рис. 4.7. Построение нагрузочной прямой и определение рабочей точки на выходной характеристике

При увеличении  $I_b$  рабочая точка переместится вверх,  $I_k$  увеличится и произойдет перераспределение напряжения между  $U_{кэ}$  и  $U_{Rк}$ .

Таким образом можно анализировать работу транзисторных схем. Эти характеристики называются **динамическими**.

### **Параметры транзистора**

При анализе транзисторных схем выделяют различные группы параметров: собственные физические;  $h$ -параметры, электрические, предельно эксплуатационные.

При расчете транзисторных схем наибольшее распространение получили  $h$ -параметры. Они основаны на представлении транзистора в виде четырехполюсника, т.е. два входных и два выходных зажима.

Определение входных токов и напряжений возможно при решении системы уравнений

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2, \\ \Delta I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2. \end{cases} \quad 1 - \text{входная цепь, } 2 - \text{выходная цепь.}$$

$h$ -параметры (коэффициенты) имеют соответствующую трактовку. Нижний индекс показывает схему.  $h_{11э}$  – с общим эмиттером,  $h_{11б}$  – с общей базой.

$$h_{11э} (\text{входное сопротивление}) = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{кэ}} \Big|_{U_{кэ} = \text{const}},$$

$$h_{12э} (\text{коэффициент внутренней обратной связи}) = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{кэ}} \Big|_{I_{б} = \text{const}},$$

$$h_{21э} = \beta (\text{коэффициент передачи тока}) = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} \Big|_{U_{кэ} = \text{const}},$$

$$h_{22э} (\text{выходная проводимость}) = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}} \Big|_{I_{б} = \text{const}}.$$

В систему основных параметров входят различные параметры, описывающие то или иное свойство транзистора.

### ***Система основных параметров.***

#### ***Собственные физические параметры***

1.  $r_э$  – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода (очень мало, 1 – 10 Ом).
2.  $R_к$  – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода (1 – 10 кОм).
3.  $r_б$  – объемное сопротивление базы (1 – 10 Ом).
4.  $C_{кэ}$ ,  $C_{кб}$ ,  $C_{эб}$  – емкости, которые влияют на частотные свойства транзисторных схем.

Усилительные свойства транзистора определяются статическим коэффициентом передачи тока:  $\beta = h_{21э}$  или  $\alpha$ .

*Электрические параметры* задаются с предельно допустимыми значениями. К ним относятся предельно допустимые значения максимально допустимых  $I$  и  $U$ .

$U_{кэ \text{ max}}$ ,  $U_{бэ \text{ max}}$ ,  $U_{кб \text{ max}}$  – межэлектродные напряжения;

$I_{к \text{ max}}$ ,  $I_{э \text{ max}}$ ,  $I_{б \text{ max}}$  – токи, при превышении которых происходит пробой;

$P_{к \text{ max}}$  – рассеивание на коллекторе мощности.

$U_{кэ \text{ нас}}$ ,  $I_{к \text{ обр}}$ .



Частотные свойства транзистора задаются двумя параметрами:  
 $f_{гр}$  – граничная частота, на которой  $\beta$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз;  
 $f_{пр}$  – предельная частота, на которой  $\beta = \alpha$  (в различной литературе по-разному) (рис. 4.8).

С увеличением  $f$   $R$  не меняется, а  $X_c$  изменяется ( $X_c < r_k$ ). Ток начинает протекать через  $C$ , а не через переход. Уменьшится  $\beta$ .

$f_{пр}$  и  $f_{гр}$  относятся к основным параметрам. Выделим рабочую область транзистора. Усилительные свойства:  $\beta$  и  $\alpha$ . Частотные свойства:  $f_{гр}$ ,  $f_{пр}$ ,  $C$ .

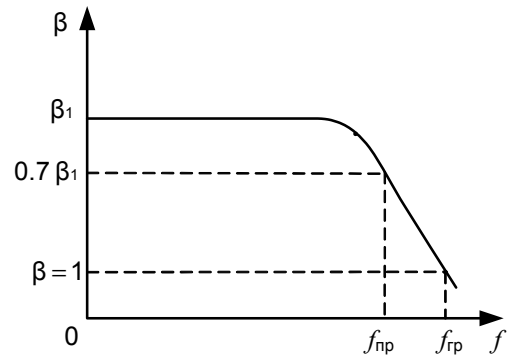


Рис. 4.8. Частотная характеристика транзистора

### Эквивалентная электрическая схема биполярного транзистора (для малого сигнала)

Приложение малого сигнала не приводит ни к насыщению, ни к отсечке, он работает в активном усилительном режиме. Это Т-образная схема замещения, наиболее удобная для анализа работы различных схем (рис. 4.9).

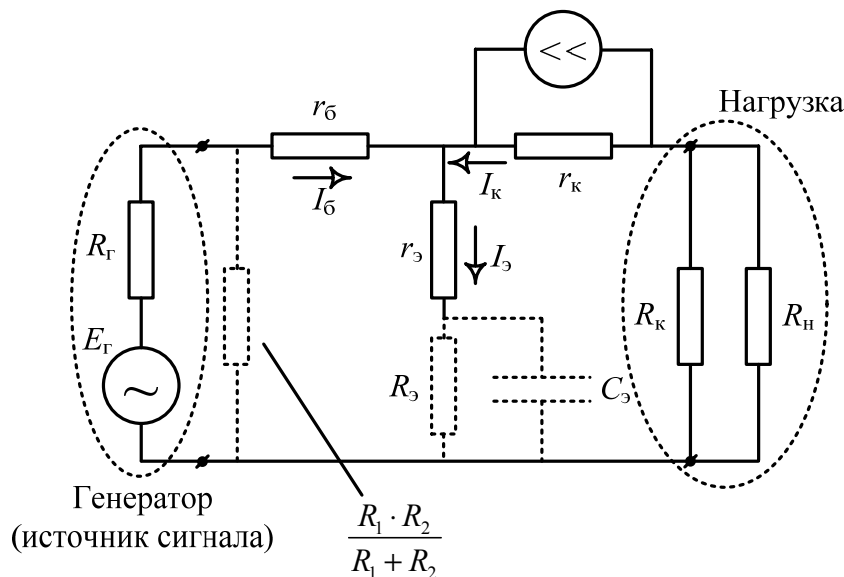


Рис. 4.9. Эквивалентная схема биполярного транзистора

Назначение элементов:

$R_1, R_2$  - резистивный делитель для подачи на базу постоянного смещения, определяющего положение рабочей точки и режим усиления;

$R_3$  - эмиттерный резистор для создания отрицательной обратной связи по постоянному току (совместно с  $R_1$  и  $R_2$  обеспечивают термостабилизацию схемы);

$R_k$  – сопротивление коллекторной нагрузки для выделения выходного сигнала;

$C_{p1}, C_{p2}$  – разделительные конденсаторы для разделения схемы по постоянному току от источника сигнала и нагрузки;

$R_n$  - сопротивление нагрузки;

$R_T$  – внутреннее сопротивление источника сигнала;

$C_3$  – эмиттерный конденсатор, предназначенный для исключения отрицательной обратной связи по переменному току.

Ниже представлена сравнительная таблица основных свойств трех схем включения транзистора (табл. 4.1)

Таблица 4.1

№ п/п	Параметр	ОЭ	ОБ	ОК
1	$K_I$	Не меньше 1	Меньше 1	Не меньше 1
2	$K_U$	Не меньше 1	Не меньше 1	Меньше 1
3	$K_P$	Не меньше 1	Не меньше 1	Не меньше 1
4	$R_{вх}$ , Ом	$10^2 - 10^3$	1 – 10	$10^4 - 10^5$
5	$R_{вых}$ , Ом	$10^3 - 10^4$	$10^5 - 10^6$	$10^2 - 10^3$
6	Фазовый сдвиг между $U_{вх}$ и $U_{вых}$ , град	180	0	0

### **Маркировка биполярных транзисторов**

Система маркировки аналогична системе маркировки диодов. В нее входят следующие элементы:

1-й элемент – буква или цифра: Г(1) – германиевый;

К (2) – кремний;

А(3) – арсенид галлия.

2-й элемент – Т – транзистор.

Далее следует комбинация из трех или четырех цифр. Первая цифра этой комбинации определяет допустимую рассеиваемую мощность и граничную частоту транзистора в соответствии с табл. 4.2.

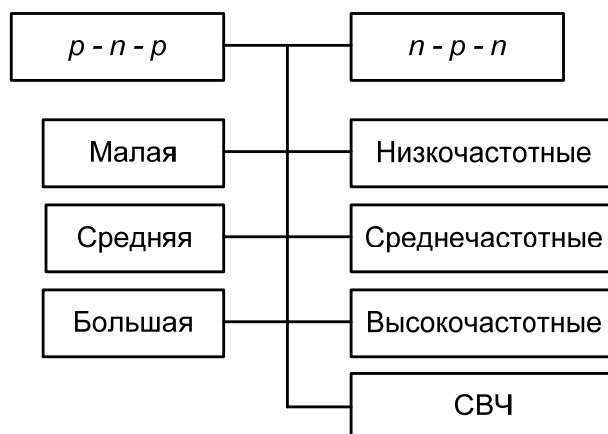
4-й элемент – группа по параметру.

Например, КТ342А, 2Т603В.

Таблица 4.2

$P$ , Вт	Тип транзистора $f$ , МГц		
	Меньше 3 НЧ	3 – 30 СрЧ	Больше 30 ВЧ и СВЧ
Малая, меньше 0,3	1	2	3
Средняя, 0,3 – 3	4	5	6
Высокая, больше 3	7	8	9

### *Классификация биполярных транзисторов*



## **2. Методика выполнения работы**

### 2.1. Исследование входных ВАХ транзистора по схеме ОЭ.

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования основных характеристик транзистора (рис. 4.10), подключить генератор тока ГТ, генератор напряжения ГН2 и измерительные приборы с помощью соединительных проводов и съёмных элементов. Проверить правильность установки транзистора в съёмном элементе.

Измерение тока базы  $I_b$  осуществляется амперметром АВМ1 с пределом измерения 10 мА. Для измерения напряжения  $U_{бэ}$  используется вольтметр АВМ2 с пределами измерения 0,5 и 1 В. Напряжение  $U_{кэ}$  задаётся от ГН2, а контролируется измерителем выхода ИВ (положение переключателя «ГН2» с пределом измерения 25 В).

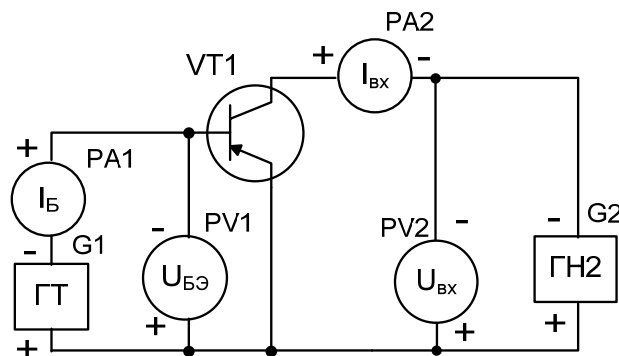


Рис. 4.10. Схема для исследования основных характеристик транзистора

Гнёзда амперметра РА2 на сменной панели замкнуть между собой коротким соединительным проводом.

Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер "Сеть".

2.1.2. Установить напряжение  $U_{кэ} = 0$ . Для этого отключить отрицательный соединительный провод между ГН2 и панелью. Установить на источнике тока ГТ максимальное значение тока (около 10 мА). Результат измерения входного тока базы и соответствующего ему входного напряжения  $U_{бэ}$  занести в табл. 4.3. Плавно уменьшать значение тока базы таким образом, чтобы входное напряжение изменялось приблизительно на 0,1 В. Получить не менее 6 – 8 отсчетов. Результаты занести в табл. 4.3. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно по всему диапазону изменения тока базы. При необходимости изменить предел измерений тока.

Таблица 4.3

$U_{кэ} = 0 \text{ В}$							
$I_б, \text{ мА}$							
$U_{бэ}, \text{ В}$							
$U_{кэ} = 5 \text{ В}$							
$I_б, \text{ мА}$							
$U_{бэ}, \text{ В}$							
$U_{кэ} = 10 \text{ В}$							
$I_б, \text{ мА}$							
$U_{бэ}, \text{ В}$							

2.1.3. Установить напряжение  $U_{кэ}=5 \text{ В}$ . Для этого подключить отрицательный соединительный провод между ГН2 и сменной панелью. Ручками "ГРУБО" и "ТОЧНО" выставить на выходе ГН2 напряжение 5 В. Повторить измерения тока базы и напряжения  $U_{кэ}$ . Результаты занести в табл. 4.3. Повторить измерения ещё раз при  $U_{кэ}=10 \text{ В}$ .

По результатам измерений построить график входных ВАХ транзистора.

2.2. Исследование выходных ВАХ транзистора по схеме ОЭ.

2.2.1. Собрать схему выходной цепи транзистора, не разбирая при этом входную цепь.

Измерение выходного тока коллектора осуществляется амперметром АВМ1 с пределами измерения 0,5, 1 и 5 мА (при токе  $I_б = 0$  использовать микроамперметр АВО). Ток базы измеряется амперметром АВМ2. Напряжение  $U_{бэ}$  не измеряется. Выходное напряжение  $U_{кэ}$  определяется по прибору ИВ. Собранный схему показать преподавателю.

Включить тумблер "Сеть".

2.2.2. Установить значение  $I_б = 0$ . Для этого разомкнуть отрицательный соединительный провод между ГТ и панелью. Ручками "ГРУБО" и "ТОЧНО" увеличивать на ГН2 напряжение приблизительно через 2 – 3 В. Регистрировать значения коллекторного тока  $I_к$  и напряжения  $U_{кэ}$  в табл. 4.4. Получить не менее 6 – 8 отсчетов. Экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно по всему диапазону изменения напряжения.

2.2.3. Установить значение  $I_{\bar{6}} = 0,1$  мА. Для этого замкнуть отрицательный соединительный провод между ГТ и панелью. Установить на выходе ГТ требуемый ток. Повторить измерения, описанные в п. 2.2.2. Результаты занести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

$I_{\bar{6}} = 0$ мА							
$U_{кэ}, В$							
$I_{к}, мА$							
$I_{\bar{6}} = 0,1$ мА							
$U_{кэ}, В$							
$I_{к}, мА$							
$I_{\bar{6}} = 0,2$ мА							
$U_{кэ}, В$							
$I_{к}, мА$							
$I_{\bar{6}} = 0,4$ мА							
$U_{кэ}, В$							
$I_{к}, мА$							

Повторить измерения для значений  $I_{\bar{6}} = 0,2$  и  $0,4$  мА. При необходимости изменить пределы измерения тока.

По результатам измерений построить график выходных ВАХ транзистора.

### 3. Исследование биполярного транзистора в среде схемотехнического моделирования *Multisim*

Для исследования транзистора необходимо собрать схему, представленную на рис. 4.11. Включить схему.

Записать результаты измерения тока коллектора, тока базы и напряжения коллектор-эмиттер в табл. 4.5. Рассчитать статический коэффициент передачи тока транзистора.

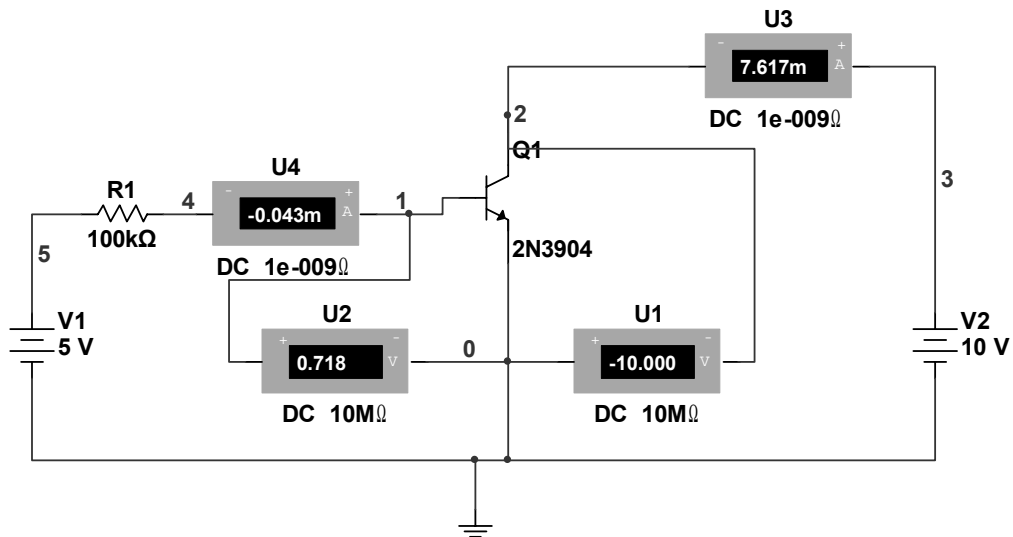


Рис. 4.11. Схема для исследования основных характеристик транзистора в *Electronics Workbench*

Таблица 4.5

$E_{\text{б}} = 5,7 \text{ В}$		$E_{\text{б}} = 2,68 \text{ В}$		$E_{\text{к}} = 5 \text{ В}$	
$I_{\text{б}}$		$I_{\text{б}}$		$I_{\text{б}}$	
$I_{\text{к}}$		$I_{\text{к}}$		$I_{\text{к}}$	
$U_{\text{бэ}}$		$U_{\text{бэ}}$		$U_{\text{бэ}}$	
$\beta$		$\beta$		$\beta$	

Для получения выходной характеристики необходимо для каждого  $E_{\text{к}}$  и  $E_{\text{б}}$  измерить ток коллектора  $I_{\text{к}}$  (табл. 4.6). Построить зависимость тока коллектора от напряжения  $E_{\text{к}}$ .

Таблица 4.6

$E_{\text{б}}, \text{ В}$	$I_{\text{б}}, \text{ мкА}$	$I_{\text{к}}, \text{ мА}$					
		0,1	0,5	1	5	10	20
1,6							
2,6							
3,6							
4,6							
5,7							

Для получения входной характеристики установить напряжение  $E_k = 10$  В. Провести измерение напряжения тока эмиттера, напряжения база-эмиттер, тока эмиттера для различных значений источника напряжения  $E_b$ .

#### 4. Содержание отчета

- 4.1. Титульный лист.
- 4.2. Цель работы.
- 4.3. Схемы электрические принципиальные для исследования входной и выходной ВАХ транзистора.
- 4.4. Результаты измерений, сведенные в таблицу.
- 4.5. Результаты измерений в виде графиков зависимости  $I_b = f(U_{бэ})$ ,  $I_k = f(I_{кэ})$ .
- 4.6. Основные справочные параметры исследуемого транзистора.
- 4.7. Выводы по работе.

#### 5. Контрольные вопросы и задания

- 5.1. Какой из  $p-n$ -переходов транзистора обычно имеет большую площадь и почему?
- 5.2. Почему коэффициент передачи тока эмиттера меньше единицы?
- 5.3. Объясните принцип действия транзистора  $p-n-p$ -типа.
- 5.4. Что такое граничная частота  $f_{гр}$ ?
- 5.5. Существуют ли принципиальные различия между транзисторами типов  $p-n-p$  и  $n-p-n$ ?
- 5.6. Назовите основные схемы включения транзисторов.
- 5.7. Чем различаются транзисторы КТ312А и 2Т312А?
- 5.8. Приведите входные и выходные характеристики кремниевого транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером.



## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

Цель работы. Исследовать вольт-амперные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой (ОБ).

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-01, сменная панель 5.

Объект исследования. Транзистор МП40А или аналогичный.

#### 1. Общие сведения

Схема с ОБ (рис. 5.1) менее распространена, чем схема с ОЭ, так как не даёт усиления по току. Ток во входной цепи  $I_{\text{Э}}$  практически равен току в выходной цепи  $I_{\text{К}}$ . Поэтому усиление по току в данной схеме отсутствует. В ней происходит усиление по мощности, поскольку источник питания цепи коллектора имеет большее напряжение, чем в цепи эмиттера.

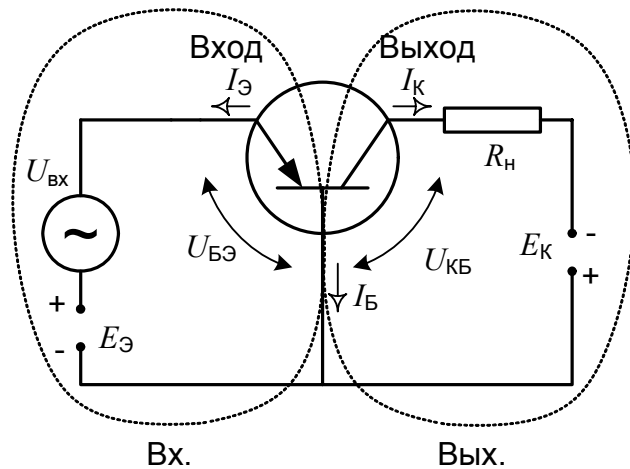


Рис. 5.1. Схема с общей базой

В схеме с ОБ входной цепью является цепь эмиттера, а выходной - цепь коллектора (см. рис. 5.1).

$$R_{\text{вхОБ}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Э}}}, \text{ (составляет десятки Ом);}$$

$$K_{U_{\text{ОБ}}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{ЭБ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} \cdot R_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Э}} \cdot R_{\text{вхОБ}}} = \alpha \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{вхОБ}}} \gg 1, \text{ (так как } R_{\text{Н}} \gg R_{\text{вхОБ}});$$

$$K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Э}}} = \alpha \leq 1 \text{ (ток не усиливается).}$$

Эта схема обеспечивает усиление по напряжению, обладает малым  $R_{\text{вх}}$ , не усиливает ток.

Наибольшее значение для применения транзисторов имеют два вида характеристик - входные и выходные.

Входные характеристики транзистора показывают зависимость тока эмиттера от напряжения Э-Б при постоянном напряжении К-Б:  $I_э = f(U_{эб})$  при  $U_{кб} = \text{const}$ .

Выходные характеристики транзистора  $I_к = f(U_{кб})$  при  $I_э = \text{const}$  показывают зависимость тока коллектора от напряжения К-Б при постоянном токе эмиттера. Выходная характеристика при  $I_э = 0$  имеет вид, соответствующий обратной ветви вольт-амперной характеристики диода, так как коллекторный переход включен в обратном направлении. При построении этих характеристик вправо принято откладывать обратное напряжение коллектора (отрицательное напряжение для  $p-n-p$ -транзисторов).

Термины, определения и обозначения параметров биполярных транзисторов приведены в ГОСТ 20003-74. Различают собственные параметры транзистора,  $h$ -параметры, предельные эксплуатационные и электрические параметры. (Основные параметры биполярных транзисторов смотри в лабораторной работе № 4). Отличительными параметрами транзистора для схемы с ОБ являются:

- 1) статический коэффициент передачи тока эмиттера в режиме малого сигнала  $h_{21б} (\alpha)$ ;
- 2) обратный ток коллектора  $I_{кб0}$  - ток через коллекторный переход при разомкнутом выводе эмиттера.

## 2. Методика выполнения работы

### 2.1. Исследование входных ВАХ транзистора по схеме с ОБ.

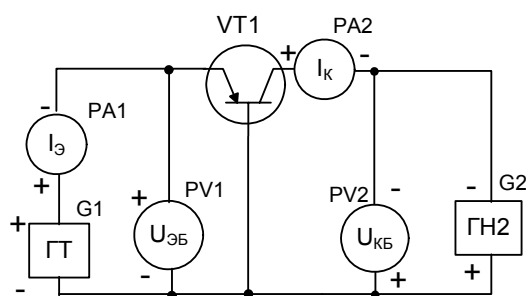


Рис. 5.2. Схема для исследования основных характеристик транзистора

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования основных характеристик транзистора (рис. 5.2), подключить генератор тока ГТ, генератор напряжения ГН2 и измерительные приборы с помощью соединительных проводов и съёмных элементов. Проверить правильность установки транзистора в съёмном элементе.

Измерение тока эмиттера  $I_э$  осуществляется амперметром АВМ1 с пределом измерения 10 мА. Для измерения напряжения  $U_{эб}$  используется вольтметр АВМ2 с пределами измерения 0,5 и 1 В. Напряжение  $U_{кб}$  задаётся от ГН2, а контролируется измерителем выхода ИВ (положение переключателя "ГН2") с пределом измерения 25 В.

Гнёзда амперметра РА2 на сменной панели замкнуть между собой коротким соединительным проводом. Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер "Сеть".

2.1.2. Установить напряжение  $U_{кб} = 0$ . Для этого отключить отрицательный соединительный провод между ГН2 и панелью. Установить на источнике тока ГТ максимальное значение тока (около 10 мА). Результат измерений входного тока эмиттера и соответствующего ему входного напряжения  $U_{эб}$  занести в табл. 5.1. Плавно уменьшать значение тока базы таким образом, чтобы входное напряжение изменялось приблизительно на 0,1 В. Получить не менее 6 – 8 отсчетов. Результаты занести в табл. 5.1. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно по всему диапазону изменения тока базы. При необходимости изменить предел измерения тока.

Таблица 5.1

$U_{кб} = 0$ В							
$I_э$ , мА							
$U_{эб}$ , В							
$U_{кб} = 5$ В							
$I_э$ , мА							
$U_{эб}$ , В							
$U_{кб} = 10$ В							
$I_э$ , мА							
$U_{эб}$ , В							

2.1.3. Установить напряжение  $U_{кб} = 5$  В. Для этого подключить отрицательный соединительный провод между ГН2 и панелью. Ручками "ГРУБО" и "ТОЧНО" выставить на выходе ГН2 напряжение 5 В. Повторить измерения тока эмиттера  $I_э$  и напряжения  $U_{эб}$ . Результаты занести в табл. 5.1. Повторить измерения ещё раз при  $U_{кб} = 10$  В.

По результатам измерений построить график входных ВАХ транзистора.

## 2.2. Исследование выходных ВАХ транзистора по схеме с ОБ.

2.2.1. Собрать схему выходной цепи транзистора, не разбирая при этом входную цепь и соблюдая полярность, указанную на панели.

Измерение выходного тока коллектора осуществляется амперметром АВМ2 с пределами измерения 0,5, 1, 5 и 10 мА. Ток эмиттера измеряется амперметром АВМ1. Напряжение  $U_{эб}$  не измеряется. Выходное напряжение  $U_{кб}$  определяется по прибору ИВ. Собранный схему показать преподавателю.

Включить тумблер "Сеть".

2.2.2. Установить значение  $I_э = 0$ . Для этого разомкнуть отрицательный соединительный провод между ГТ и панелью. Ручками "ГРУБО" и "ТОЧНО" увеличивать на ГН2 напряжение приблизительно через 2 – 3 В. Регистрировать значения коллекторного тока  $I_к$  и напряжения  $U_{кб}$  в табл. 5.2. Получить не менее 6 – 8 отсчетов. Экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно по всему диапазону изменения напряжения.

2.2.3. Установить значение  $I_э = 0,1$  мА. Для этого замкнуть отрицательный соединительный провод между ГТ и панелью. Установить на выходе ГТ требуемый ток. Повторить измерения, описанные в п. 2.2.2. Результаты занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

$I_э = 0$ мА							
$U_{кб}$ , В							
$I_к$ , мА							
$I_э = 0,1$ мА							
$U_{кб}$ , В							
$I_к$ , мА							
$I_э = 0,2$ мА							
$U_{кб}$ , В							
$I_к$ , мА							
$I_э = 0,4$ мА							
$U_{кб}$ , В							
$I_к$ , мА							

Повторить измерения для значений  $I_э = 0,2$  и  $0,4$  мА. При необходимости изменить пределы измерения.

По результатам измерений построить график выходных ВАХ транзистора.

### 3. Исследование биполярного транзистора в среде схемотехнического моделирования *Multisim*

Для исследования транзистора необходимо собрать схему, представленную на рис. 5.3. Включить схему.

Записать результаты измерения тока эмиттера (в схеме U1), напряжения эмиттер-база (в схеме U3) в табл. 5.1. Исследование входной ВАХ провести при разных напряжениях коллектор-база (в схеме V2).

Построить входную ВАХ для полевого транзистора, включенного по схеме с общей базой.

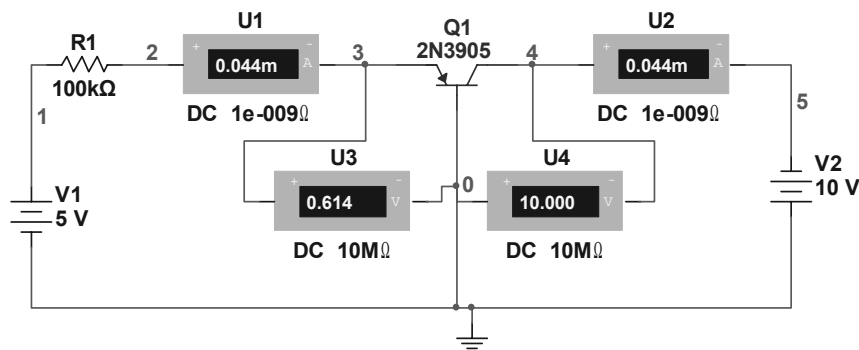


Рис. 5.3. Схема для исследования основных характеристик транзистора в *Electronics Workbench*

Для разных значений тока эмиттера (в схеме U1) измерить значения тока коллектора (в схеме U2) и напряжение коллектор-база (в схеме U4). Результаты измерений записать в табл. 5.2 и построить выходную ВАХ.

### 4. Содержание отчета

- 4.1. Титульный лист.
- 4.2. Цель работы.
- 4.3. Схемы электрические принципиальные для исследования входной и выходной ВАХ транзистора по схеме с ОБ.
- 4.4. Результаты измерений, сведенные в таблицу.
- 4.5. Результаты измерений в виде графиков зависимости  $I_3=f(U_{36})$ ,  $I_k=f(I_{кб})$ .
- 4.6. Основные справочные параметры исследуемого транзистора.
- 4.7. Выводы по работе.

## 5. Контрольные вопросы и задания

- 5.1. Приведите входные и выходные характеристики кремниевого транзистора при включении его по схеме с общей базой.
- 5.2. Как устроен биполярный транзистор?
- 5.3. Объясните принцип действия транзистора  $n-p-n$ -типа.
- 5.4. Существуют ли принципиальные различия между транзисторами типов  $n-p-n$  и  $p-n-p$ ?
- 5.5. Чем различаются транзисторы ГТ321А и 1Т321А?

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ $p-n$ -ПЕРЕХОДОМ

Цель работы. Исследовать вольт-амперные характеристики полевого транзистора.

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-01, сменная панель 1, среда схемотехнического моделирования *Multisim (Electronics Workbench)*.

Объект исследования. Транзистор КП 103А или аналогичный.

### 1. Общие сведения

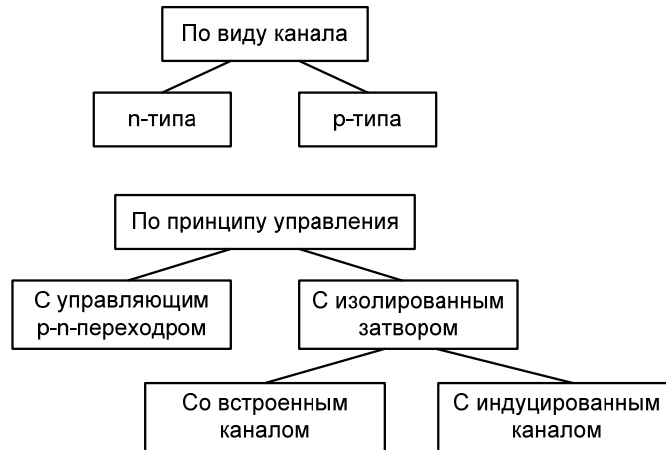
Полевой транзистор - это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей через проводящий канал и управляемым поперечным электрическим полем. В отличие от биполярного транзистора действие полевого транзистора обусловлено носителями заряда одной полярности: либо только электронами в канале  $n$ -типа, либо только дырками в канале  $p$ -типа. Поэтому такие транзисторы называют униполярными.

Конструкция полевого транзистора представляет собой некий проводящий канал, на котором выполнены электроды. Электроды называются «сток», «исток», «затвор».

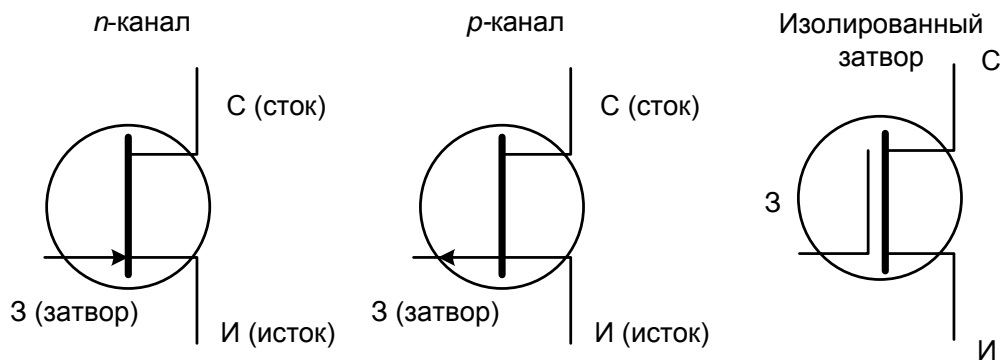
**Канал** – это центральная область транзистора. **Исток** – электрод, из которого в канал вводятся основные носители заряда. **Сток** – элек-

трод, через который основные носители заряда выводятся. *Затвор* – электрод, предназначенный для регулирования тока в канале. На затвор подается напряжение, которое изменяет поперечное сечение канала.

### Классификация полевых транзисторов



### Условное графическое обозначение



### Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом

Конструкция. В основе лежит брусок п/п материала с тем или иным типом проводимости (рис. 6.1). По бокам бруска делаются два омических контакта, один является истоком, другой – стоком. На других гранях – области р-типа, которые образуют два *n-p*-перехода. Электроды этих областей соединяются вместе. Такой объединенный электрод называется затвором, и на него подается управляющее напряжение.  $R_n$  включается в цепь стока.

При приложении напряжения между С и И через канал протекает ток стока. Если на затвор подать отрицательное напряжение  $U_{зи}$ , то

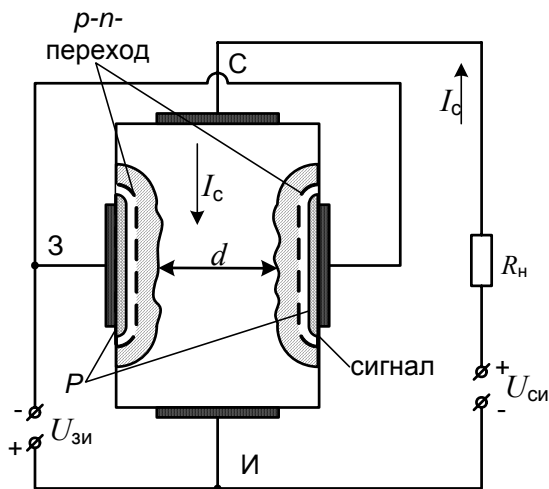


Рис. 6.1. Полевой транзистор с управляющим  $p-n$ -переходом

оба  $p-n$ -перехода сместятся в обратном направлении и увеличится их ширина (см. раздел « $p-n$ -переход при обратном смещении» в лабораторной работе № 1).

Следовательно, уменьшится ширина проводящего канала, так как в области обратно смещенного  $p-n$ -перехода отсутствуют подвижные носители заряда. Уменьшение толщины канала приведет к уменьшению  $I_c$ . Таким образом за счет обратного напряжения  $U_{зи}$

можно регулировать ток через канал. При некотором напряжении  $U_{зиотс}$  (отсечки) можно полностью перекрыть канал и  $I_c = 0$ . Канал перекрывается неравномерно по длине подзатворной области. Это связано с тем, что канал имеет распределенное по длине сопротивление. Потенциал точек  $p-n$ -перехода, расположенных ближе к стоку, оказывается выше точек, расположенных ближе к истоку. Поэтому ширина  $p-n$ -перехода будет меняться от малых значений у истока к большим значениям у стока.

Так как на затвор подается обратное напряжение  $U_{зи}$ , то ток через затвор по величине очень мал или отсутствует. Поэтому управление  $I_c$  осуществляется за счет электрического поля, и транзистор поэтому называется полевым. Ток стока обусловлен движением зарядов только одного знака (электронов), поэтому транзистор называется униполярным.

### **Основные характеристики полевых транзисторов**

Основными статическими характеристиками являются выходные и проходные. Для основной схемы включения транзистора с общим



истокom выходными характеристиками являются **стоковые характеристики**  $I_c = f(U_{зи})|U_{си} = \text{const}$  (рис. 6.2).

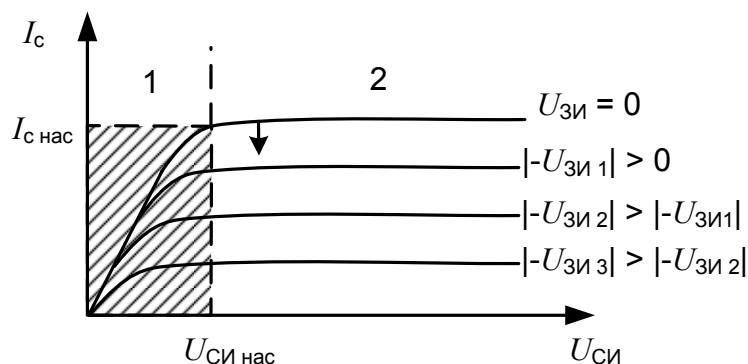


Рис. 6.2. Стоковые характеристики полевого транзистора по схеме с общим истоком

Характеристикой передачи является стоково-затворная характеристика:  $I_c = f(U_{зи})|U_{си} = \text{const}$  (рис. 6.3).

Выделяют две области: в 1-й области  $I_c$  линейно зависит от  $U_{си}$  и в ней транзистор может использоваться как управляемый  $R$ . Во 2-й области (активной или насыщения)  $I_c$  практически не зависит от  $U_{си}$ . Это область основного применения в усилительном режиме. Такой вид характеристик объясняется следующими причинами: при фиксированном  $U_{зи}$  проводящий канал имеет некоторое определенное сопротивление, которое зависит от его длины и поперечного сечения. Поэтому при начальном увеличении  $U_{си}$  ток стока увеличивается, так как сопротивление канала остается неизменным. По мере роста  $U_{си}$  к управляющему переходу прикладывается все большее обратное напряжение, которое приводит к уменьшению площади поперечного сечения канала. При некотором напряжении  $U_{си\text{нас}}$  канал практически полностью перекрывается и дальнейшее увеличение  $U_{си}$  не приводит к росту  $I_c$ . В этой области отсут-

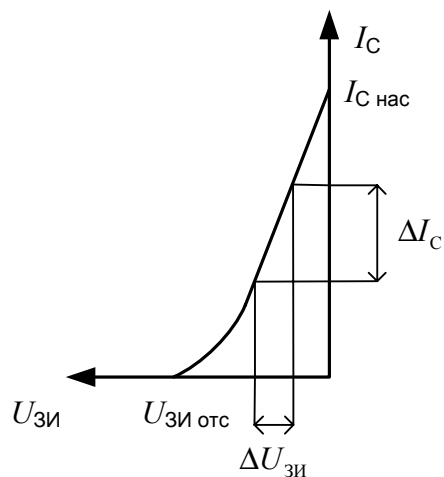


Рис. 6.3. Стоко-затворная характеристика

ствие роста тока с ростом напряжения объясняется двумя конкурирующими процессами: с одной стороны, рост напряжения вызывает увеличение  $I_c$ , с другой стороны, рост того же напряжения вызывает сужение поперечного сечения канала и соответственно рост сопротивления канала, что приводит к уменьшению тока через канал. В результате получается неизменное значение  $I_c$  на большом диапазоне напряжений  $U_{си}$ . Такой режим называется режимом насыщения, характеристики в нем горизонтальные.

Чем больше абсолютное значение напряжения на затворе, тем раньше наступает насыщение, тем в большей степени перекрывается канал. С увеличением  $U_{зи}$  стоковые характеристики будут располагаться ниже (см. рис. 6.2). При дальнейшем росте  $U_{си}$  будет происходить пробой  $p$ - $n$ -перехода и транзистор выйдет из строя.  $U_{нас}$  и  $U_{отсечки}$  связаны друг с другом следующим соотношением:  $U_{синас} = U_{зинас} - U_{зи}$ , если  $U_{зи} = 0$ , то  $U_{синас} = U_{зиотс}$ .

По стоко-затворной характеристике находится основной параметр усилительного свойства транзистора, который называется «**крутизна**».

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ мА/В.}$$

Достоинством полевого транзистора является слабая зависимость его характеристик от температуры. С одной стороны, изменение температуры влияет на потенциальный барьер  $p$ - $n$ -перехода, но с другой стороны, изменение температуры в противоположную сторону влияет на подвижность носителей заряда. В результате температура практически не влияет на  $I_c$ . Это выгодно отличает полевой транзистор от биполярного.

### **Основные параметры полевого транзистора**

1. Крутизна стоко-затворной характеристики:  $S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{сн}} =$   
 $= \text{const} = 10 \text{ мА/В.}$

2. Внутреннее дифференциальное сопротивление  $R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} | U_{зи} = \text{const}$  характеризует сопротивление канала. Чем больше  $R_i$ , тем более полого стоковая характеристика.

3. Входное сопротивление  $R_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_3} | U_{си} = \text{const}$ . Так как  $I_3$  очень мал, то  $R_{вх}$  будет большим (до сотен мегаом).

4. Напряжение отсечки при котором  $I_c = 0$ ,  $U_{зиотс}$ .

5. Ток утечки на затворе  $I_{ут.з}$  - это ток, протекающий через затвор при подаче  $U_{обр}$ .

6. Начальный ток стока, протекающий через сток при  $U_{зи} = 0$ .

7. Максимально допустимое значение тока стока  $I_{с\text{ max}}$ .

8. Максимально допустимое постоянное напряжение  $U_{си\text{ max}}$  - это предельное напряжение  $U_{зи\text{ max}}$ .

9. Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность  $P_{\text{ max}}$ .

10. Межэлектродные емкости  $C_{си}$ ,  $C_{зи}$ ,  $C_{зс}$ .

11. Максимальная частота усиления  $f_{\text{ max}}$ , на которой коэффициент усиления по мощности равен единице.

12. Статический коэффициент усиления напряжения  $\mu = SR_i$  показывает, во сколько раз изменение напряжения на затворе сильнее влияет на  $I_c$ , чем изменение напряжения между стоком и истоком:

$$\mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} | I_c = \text{const}.$$

В основном параметры полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом совпадают с параметрами полевых транзисторов с изолированным затвором, у которого могут быть дополнительно 1 – 2 параметра.

### ***Полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы, МОП-транзисторы)***

К этой группе относятся полевые транзисторы, у которых затвор представляет собой металлический слой, электрически изолированный от п/п области проводящего канала тонким слоем диэлектрика.

Внутренняя структура этого транзистора называется «металл-диэлектрик-полупроводник», или МДП. Очень часто в качестве диэлектрика используется пленка окисла кремния  $\text{SiO}_2$ . В этом случае эта структура называется «металл-окисел-полупроводник», или МОП.

В зависимости от технологии изготовления различают две группы МДП-транзистора.

- со встроенным каналом (создан при изготовлении);
- индуцированным каналом, который наводится электрическим полем под действующее напряжение, поданное на затвор, т.е. в процессе работы. Канал может быть  $p$ - и  $n$ -типа.

### **Маркировка полевых транзисторов**

Она в целом соответствует маркировке биполярных транзисторов, вторым элементом маркировки является буква «П». Третий элемент – частотные свойства и  $P_{\max}$  рассеиваемая (табл. 6.1).

Таблица 6.1

$P$ , Вт	Тип транзистора при $f$ , мГц		
	Меньше 3	3 – 30	Больше 30
Не больше 0,3	1	2	3
0,3 – 1,5	4	5	6
Больше 1,5	7	8	9

## **2. Методика выполнения работы**

2.1. Исследование стоковых характеристик полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом.

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования основных характеристик полевого транзистора (рис. 6.4), подключить генераторы напряжения ГН1, ГН2 и измерительные приборы с помощью соединительных проводов и съёмных элементов. Проверить правильность установки транзистора в съёмном элементе.

Измерение тока стока  $I_c$  осуществляется амперметром АВМ2 с пределом измерения 0,5, 1 и 5 мА. Напряжение  $U_{си}$  задается от ГН2, а измеряется вольтметром АВМ1 (PV2) с пределами измерения 10 и 25 В.

Напряжение  $U_{зи}$  задаётся от ГН1, а контролируется измерителем выхода ИВ (положение переключателя "ГН1") с пределом измерения 10 В. При этом соединительный провод от гнезда "+" ГН1 необходимо соединить с гнездом "-" панели, а гнездо "-" ГН1 - с гнездом "+" панели.

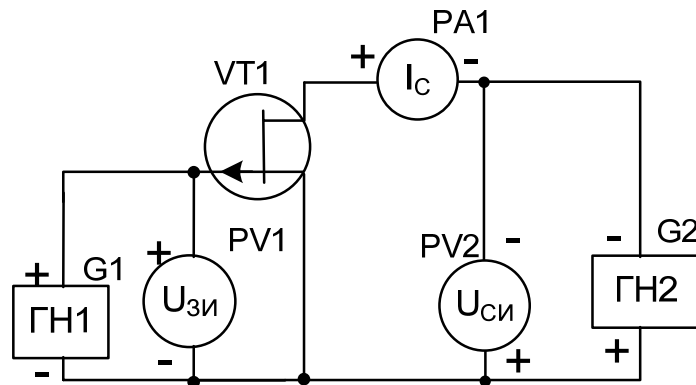


Рис. 6.4. Схема для исследования основных характеристик полевого транзистора

Знак "-" полярности напряжения  $U_{зи}$  не учитывать, считать это напряжение положительным.

Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер "Сеть".

2.1.2. Установить напряжение  $U_{зи} = 0$ . Для этого отключить положительный соединительный провод между ГН1 и панелью. Вращая ручки "ГРУБО" и "ТОЧНО" генератора ГН2, плавно увеличивать напряжение  $U_{си}$  приблизительно через 2 – 3 В. Получить не менее 6 – 8 отсчетов. Результаты занести в табл. 6.2. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно по всему диапазону изменения напряжения  $U_{си}$ . При необходимости изменить предел измерения тока и напряжения.

2.1.3. Установить напряжение  $U_{зи} = 0,4$  В. Для этого подключить положительный соединительный провод между ГН1 и панелью. Ручками "ГРУБО" и "ТОЧНО" выставить на выходе ГН1 напряжение 0,4 В. Повторить измерения напряжения  $U_{си}$  и тока  $I_c$ . Результаты занести в табл. 6.2. Повторить измерения при  $U_{зи} = 0,8$  и 1,2 В.

По результатам измерений построить графики стокowych характеристик.

2.2. Определить напряжение отсечки  $U_{ЗИ\text{ отс.}}$

2.3. По результатам, полученным в п. 2.1 (см. табл. 6.1) и п. 2.2, построить стоко-затворную характеристику.

Таблица 6.2

$U_{ЗИ} = 0\text{ В}$							
$I_c, \text{ мА}$							
$U_{СИ}, \text{ В}$							
$U_{ЗИ} = 0,4\text{ В}$							
$I_c, \text{ мА}$							
$U_{СИ}, \text{ В}$							
$U_{ЗИ} = 0,8\text{ В}$							
$I_c, \text{ мА}$							
$U_{СИ}, \text{ В}$							
$U_{ЗИ} = 1,2\text{ В}$							
$I_c, \text{ мА}$							
$U_{СИ}, \text{ В}$							

### 3. Исследование полевого транзистора в среде схемотехнического моделирования *Multisim*

Для исследования транзистора необходимо собрать схему, представленную на рис. 6.5. Включить схему.

Записать результаты измерения тока стока (в схеме U2), напряжения сток-исток (в схеме U3) и напряжения затвор-исток (в схеме U1) в табл. 6.2. Исследование провести при разных напряжениях затвор-исток (в схеме V1).

Построить стоковую и стоко-затворную характеристику.

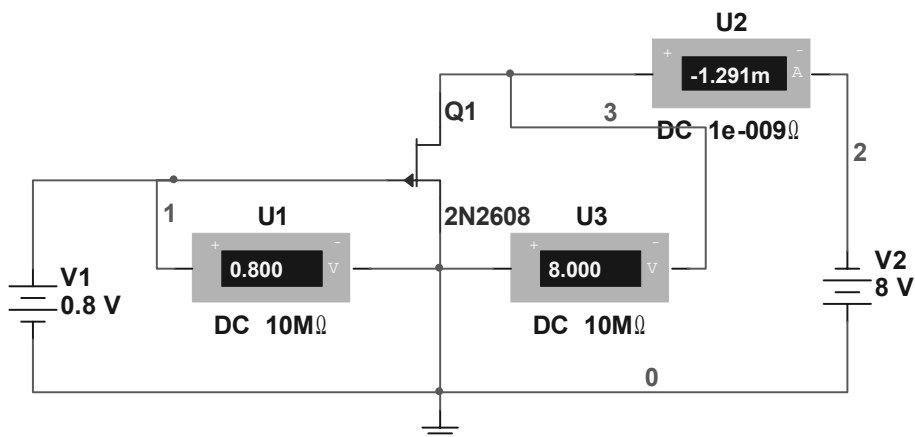


Рис. 6.5. Схема для исследования полевого транзистора в *Electronics Workbench*

## 4. Содержание отчета

- 4.1. Титульный лист.
- 4.2. Цель работы.
- 4.3. Схемы электрические принципиальные для исследования стоковой характеристики полевого транзистора.
- 4.4. Результаты измерений, сведенные в таблицу.
- 4.5. Результаты измерений в виде графиков стоковой и стоко-затворной характеристик.
- 4.6. Основные справочные параметры исследуемого транзистора.
- 4.7. Выводы по работе.

## 5. Контрольные вопросы и задания

- 5.1. Какой прибор называется полевым транзистором, какие существуют виды полевых транзисторов и чем различается их устройство?
- 5.2. Нарисуйте стоковые характеристики каждого вида полевого транзистора объясните, чем они различаются.
- 5.3. Покажите, как определяются по характеристикам основные параметры полевых транзисторов.
- 5.4. Приведите примеры обозначения полевых транзисторов в зависимости от мощности и частоты.
- 5.5. В чем главные отличия биполярных от транзисторов полевых?
- 5.6. Какова величина входного сопротивления полевого транзистора?

## Лабораторная работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИОДНОГО ТИРИСТОРА

Цель работы. Исследовать вольт-амперную характеристику триодного тиристора.

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-0Г, сменная панель 4, среда схемотехнического моделирования *Multisim (Electronics Workbench)*.

Объект исследования. Тиристор КУ101А или аналогичный.

## 1. Общие сведения

Тиристор - это полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, который имеет три (или более)  $p-n$ -перехода и может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот. Различают диодные и триодные тиристоры, или соответственно динисторы и тринисторы.

*Диодные тиристоры* подразделяют на запираемые в обратном направлении; проводящие в обратном направлении и симметричные (симисторы).

*Триодные тиристоры* подразделяют на запираемые в обратном направлении с управлением по аноду или катоду; проводящие в обратном направлении с управлением по аноду или катоду; симметричные (двунаправленные). Кроме того, выделяют группу выключаемых тиристоров.

### *Устройство и принцип работы тиристора (на примере динистора)*

Имеет четырехслойную структуру и образует три  $p-n$ -перехода. При подаче  $U_{\text{пит}}$  переходы П1 и П3 сместятся в прямом направлении, а

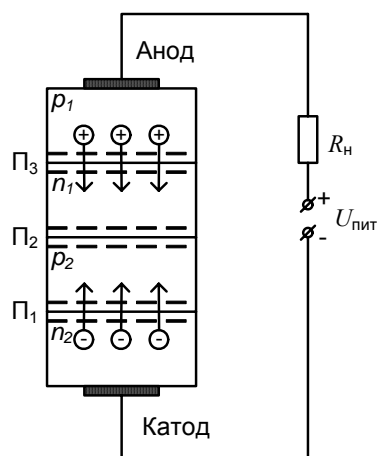


Рис. 7.1. Структура динистора

П2 – в обратном. При этом область  $p_1$  называется анодом, а область  $n_2$  - катодом. Все тиристоры делают из кремния. П1 и П2 – эмиттерные переходы, П2 – коллекторный переход (рис. 7.1).

Эмиттерные переходы при прямом смещении имеют небольшое сопротивление, а коллекторный – значительное, поэтому общее сопротивление между А и К определяется состоянием П2.

С увеличением  $U_{\text{пит}}$  через тиристор протекает небольшой обратный ток перехода П2, который незначительно увеличивается. На ВАХ это соответствует участку О-А (рис. 7.2).



На сопротивление перехода П2 влияют два взаимно противоположных физических процесса: с одной стороны, повышение  $U_{обр}$  увеличивает сопротивление П2, так как основные носители заряда уходят в разные стороны от границы перехода, т.е. область П2 обедняется носителями и расширяется ( $p-n$ -переход при  $U_{обр}$ ). С другой стороны, повышение  $U_{пр}$  на П1 и П2 усиливает инжекцию носителей через эти переходы, которые переходят в область  $P_2$  и обогащают ее носителями, снижая сопротивление П2.

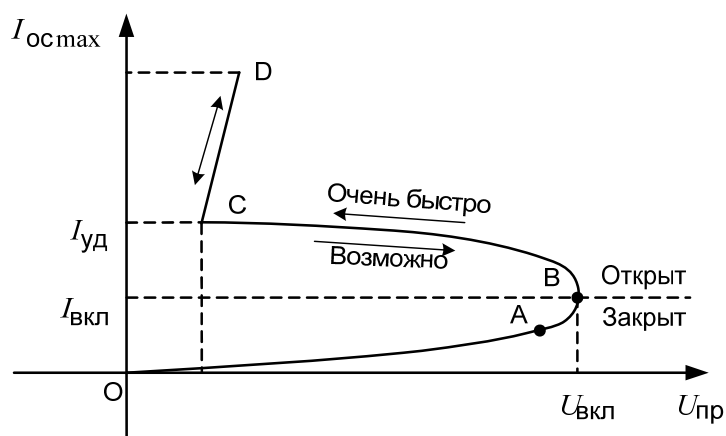


Рис. 7.2. ВАХ диностора

До точки А перевес имеет первый процесс, и сопротивление растет все медленнее, так как постепенно усиливается второй процесс. Вблизи точки В (при  $U=10 - 100$  В) влияние обоих процессов уравнивается и любое ничтожно малое повышение напряжения создает перевес второго процесса. При этом возникает лавинообразный процесс уменьшения сопротивления перехода П2. Ток сначала возрастает (ВС), так как увеличение  $U$  на П1 и П2 уменьшает сопротивление П2, еще больше возрастает  $U$  на П1 и П3, а это приводит к возрастанию  $I$  на П2 и т.д.

Ток в таком режиме определяется сопротивлением резистора внешней цепи  $R_n$ , т.е. почти все  $U$  будет падать на  $R_n$ . Сначала ток через диностор до некоторого значения  $I_{удерж}$ , плавно уменьшается, после — резко уменьшается,  $U$  возрастает, т.е. он закрывается. В открытом состоянии (участок CD) ВАХ соответствует ВАХ диода, т.е. сопротивление П2 можно не учитывать, сопротивление определяется последовательно включенными П1 и П3.

## Тринистор

Конструкция аналогична конструкции динистора. Отличие в том, что от одной из двух областей  $n_1$  или  $p_2$  сделан дополнительный электрод (управляющий электрод УЭ). Подавая на него соответствующее  $U$ , можно управлять прямым током одного из токов П1 или П3, т.е. задавая через УЭ ток управления  $I_y$ , можно изменять напряжение включения  $U_{\text{вкл}}$ . Чем больше  $I_y$ , тем меньше  $U_{\text{вкл}}$ . У симметричного тиристора обратная ветвь симметрична прямой (рис. 7.3).

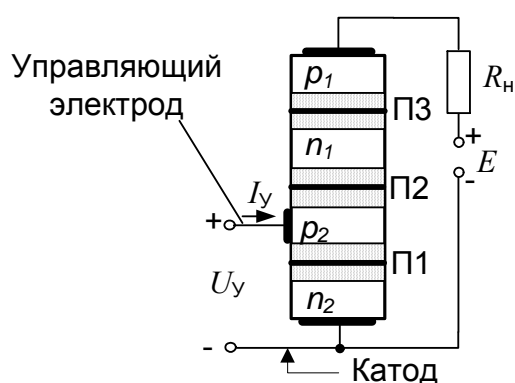


Рис. 7.3. Структура тринистора

Для того чтобы закрыть обычный триодный тринистор (незапираемый), необходимо уменьшить ток через него до значения меньше  $I_{\text{уд}}$ . Этого можно достичь двумя путями:

- 1) разорвать цепь нагрузки;
- 2) поменять полярность  $U_{\text{пит}}$ .

Разработаны запираемые тринисторы, которые можно запереть

подачей на УЭ короткого импульса  $U_{\text{обр}}$ .

Кроме этого запираемый тринистор также можно закрыть разрывом цепи нагрузки или сменой полярности  $U_{\text{пит}}$ . Эти тиристоры отличаются от незапираемых удобством управления. Для применения в цепях переменного тока используются симметричные тринисторы и динисторы, имеющие структуру  $n-p-n-p-n$  или  $p-n-p-n-p$ , которые могут отпираться при  $U_{\text{пит}}$  любой полярности, т.е. могут проводить ток в обоих направлениях. Принцип работы аналогичен принципу работы несимметричного прибора.

### Основные параметры тиристоров

1. Постоянное напряжение в открытом состоянии (до 5 В)  $U_{\text{ос}}$ .
2. Отпирающее напряжение управления  $U_{y \text{ от}}$ .
3. Отпирающий постоянный ток управления  $I_{y \text{ от}}$ .
4. Время включения/выключения тиристора  $t_{\text{вкл}} / t_{\text{выкл}}$  характеризует время быстрого действия.

5. Постоянный анодный ток в закрытом состоянии (ток утечки)  $I_{зс}$ .
6. Максимально допустимое постоянное анодное напряжение в закрытом состоянии  $U_{\max зс}$ .
7. Максимально допустимое обратное анодное напряжение  $U_{обр}$ .
8. Средний анодный ток в открытом состоянии  $I_{ос. ср.}$ .
9. Максимально допустимая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии  $dU_{зс}/dt$ .
10. Средняя рассеиваемая мощность в открытом состоянии  $P_{ос. ср.}$ .
11. Максимально допустимая скорость нарастания тока в открытом состоянии  $di_{ос}/dt$ .

Это типовые параметры тиристоров малой мощности. У тиристоров большой мощности система параметров может быть сложнее. Наибольшая группа тиристоров относится к элементам силовой электроники (энергетике) и в данном курсе не рассматривается.

### ***Маркировка тиристоров***

Рассмотрим маркировку тиристоров малой и средней мощности неспециализированных, остальные маркировки описываются в справочниках.

КН – кремниевый неуправляемый (динистор),

КУ – кремниевый управляемый (тринистор).

101 – 199 – малая мощность, 201-299 – средняя мощность, 501 – 599 – симистор малой мощности, 601 – 699 – симистор средней мощности.

КН 102А. (Группы по параметру отличаются  $U_{вкл}$ ), КУ 103Б, КУ 204Б.

## **2. Методика выполнения работы**

### 2.1. Исследование ВАХ триодного тиристора.

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования ВАХ тиристора (рис. 7.4), подключить генераторы тока ГТ и напряжения ГНЗ, измерительные приборы с помощью соединительных проводов и съёмных элементов. Проверить правильность установки тиристора в съёмном элементе.

Измерение анодного тока стока  $I_a$  осуществляется амперметром АВМ1 с пределом измерения 0,5, 1 и 5 мА. Напряжение на аноде  $U_a$  задаётся генератором ГНЗ, а определяется по измерителю выхода ИВ (положение переключателя "ГНЗ") с пределом измерения 100 В. Ток управляющего электрода  $I_y$  задаётся генератором ГТ и измеряется амперметром АВМ2 с пределами измерения 0,5 и 1 мА. Сопротивление нагрузки  $R=1\text{кОм}$ .

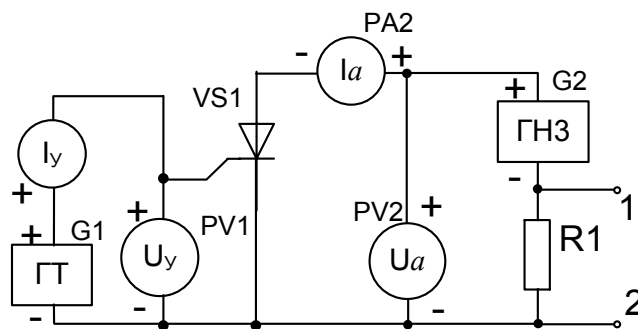


Рис. 7.4. Схема для исследования ВАХ тиристора

Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер "Сеть".

2.1.2. Установить ток управления  $I_y = 0$  мА. Для этого отключить положительный соединительный провод между ГТ и панелью. Плавно увеличивать анодное напряжение приблизительно через 10 – 20 В. Регистрировать значения анодного тока. Получить не менее 4 – 5 отсчётов. Результаты занести в таблицу. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно по всему диапазону изменения напряжения  $U_a$ . При необходимости изменить предел измерения тока.

2.1.3. Установить ток управления  $I_y = 0,1$  мА. Для этого подключить положительный соединительный провод между ГТ и панелью. Ручками "ГРУБО" и "ТОЧНО" генератора ГТ установить требуемый ток. Повторить измерения по п. 2.1.2. Результаты занести в таблицу.

Повторить измерения для  $I_y = 0,2$  и  $0,3$  мА, определить моменты переключения тиристора в открытое состояние. При включении анодный ток скачком возрастает, а напряжение на аноде падает. Результаты измерения  $I_a$  и  $U_a$  в открытом состоянии также занести в таблицу. Отметить значение тока удержания  $I_{уд}$ .

По результатам измерений построить график семейства ВАХ тиристора.

$I_y = 0 \text{ мА}$							
$U_a, \text{ В}$							
$I_a, \text{ мА}$							
$I_y = 0,1 \text{ мА}$							
$U_a, \text{ В}$							
$I_a, \text{ мА}$							
$I_y = 0,2 \text{ мА}$							
$U_a, \text{ В}$							
$I_a, \text{ мА}$							
$I_y = 0,3 \text{ мА}$							
$U_a, \text{ В}$							
$I_a, \text{ мА}$							

### 3. Исследование полевого транзистора в среде схемотехнического моделирования *Multisim*

Для исследования тиристора необходимо собрать схему, представленную на рис. 7.5. Включить схему. Измерить значения анодного тока (на схеме U3), напряжения на аноде (на схеме U4) при различных значениях тока управления (изменяется значение V1, регистрируется ток на индикаторе U2). Заполнить табл. 7.2. Построить семейство ВАХ тиристора.

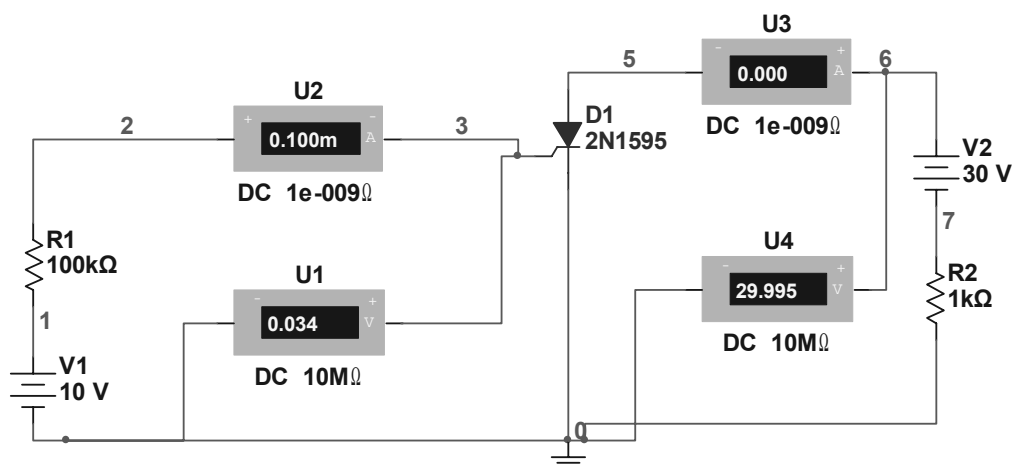


Рис. 7.5. Схема для исследования тиристора в *Electronics Workbench*

#### 4. Содержание отчета

- 4.1. Титульный лист.
- 4.2. Цель работы.
- 4.3. Схема электрическая принципиальная для исследования ВАХ тиристора.
- 4.4. Результаты измерений, сведенные в таблицу.
- 4.5. Результаты измерений в виде графика зависимости  $I_a=f(U_a)$ .
- 4.6. Основные справочные параметры тиристора КУ101А.
- 4.7. Выводы по работе.

#### 5. Контрольные вопросы и задания

- 5.1. Приведите условные обозначения динистора и тринистора.
- 5.2. Как перевести динистор из включенного состояния в выключенное?
- 5.3. Приведите классификацию тиристорov.
- 5.4. Можно ли перевести тринистор в закрытое состояние управляющим током?
- 5.5. Назовите основные параметры тиристорov и область их применения.
- 5.6. Расшифруйте следующие обозначения: КУ202Н, 2У202Н, ТВ-1000, ТЛ171-320-10-6.

#### Лабораторная работа № 8

##### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДА

Цель работы. Исследовать вольт-амперные характеристики светоизлучающего диода.

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-01, сменная панель 1.

Объект исследования. Светоизлучающий диод АЛ307АМ или аналогичный.

## 1. Общие сведения

Светоизлучающий диод (СИД) – полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения. Свечение в *p-n*-переходе возникает вследствие рекомбинаций носителей заряда (электронов и дырок). Оно наблюдается при смещении перехода в прямом направлении. При рекомбинациях происходит выделение фотонов и возникает некогерентное свечение (люминесценция). Сила света примерно пропорциональна числу зарядов, инжектированных *p-n*-переходом. Цвет свечения (частота излучения) светодиода зависит от материала и состава легирующих примесей в *p-n*-переходе. В качестве материалов используются арсенид галлия (GaAs), фосфид галлия (GaP), фосфид кремния (SiP), карбид кремния (SiC) и др.

В настоящее время дискретные светодиоды рассматриваются как простейшие полупроводниковые индикаторы.

В соответствии с частотным диапазоном генерируемого излучения различаются светоизлучающие диоды (светодиоды) и инфракрасные излучающие диоды (ИК диоды).

Излучение светоизлучающих диодов некогерентно, но в отличие от тепловых источников света имеет узкий спектр (как правило,  $\Delta\lambda$  не более 0,05 мкм), вследствие чего в видимой области воспринимается как одноцветное.

Светоизлучающие диоды в зависимости от назначения делятся на полупроводниковые генераторы излучения (ПГИ) и полупроводниковые индикаторы.

ПГИ предназначены для использования в волоконно-оптических линиях передачи информации, в составе оптоэлектронных пар.

Полупроводниковые индикаторы по конструкции делятся на монокристаллические и гибридные. Монокристаллическая конструкция используется обычно при малых размерах изображения (не более 3 мм), гибридная – при больших. В гибридных индикаторах взаимное расположение элементов изображения определяется взаимным расположением кристаллов, размещенных на основании корпуса. При этом размеры светящихся элементов формируются с помощью монокристаллического пластмассового

световода. Оптическое преобразование изображения точечного источника (одного кристалла) в изображение светящегося элемента индикатора осуществляется благодаря многократному отражению и рассеянию света внутри каждой полости световода. Полости оптически изолированы друг от друга.

Типичные значения силы света современных СИД составляют 0,5 – 1 мкд при токе 10 мА и напряжении 1,5 – 3 В. Промышленность выпускает светодиоды красного, желтого, зеленого и синего цветов свечения, а также диоды с управляемым цветом свечения.

Диоды типа АЛ307 представляют собой конструкцию с монолитной полимерной герметизацией, с полусферическим прозрачным куполом и использованием медного кристаллодержателя (рис. 8.1).

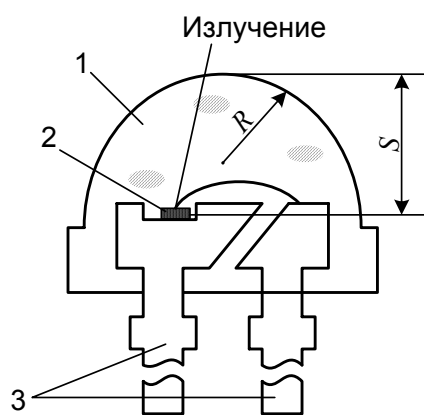


Рис. 8.1. Конструкция светодиода: 1 – полусферический прозрачный купол; 2 – кристалл люминофора; 3 – контакты

Угол излучения таких диодов определяется отношением  $S/R$ , где  $S$  – высота полимерного купола над кристаллом;  $R$  – радиус полусферы купола. Для СИД с широкоугольным излучением  $S/R = 1,6$ , что позволяет получить угол излучения  $\alpha = 50 \pm 10^\circ$ . Диоды с узкой диаграммой направленности излучения имеют  $S/R \approx 2$ , что позволяет получить угол излучения  $\alpha = 8 - 15^\circ$ .

Светоизлучающие диоды в основном применяются как элементы индикации включения, готовности аппаратуры к работе, наличия напряжения питания в блоке, аварийной ситуации и других состояний. Индикацией называется представление результатов контроля и измерений в виде, удобном для зрительного (визуального) восприятия. Контроль, как правило, осуществляется по принципу «больше – меньше», «включен – выключен».

Дискретные светодиоды в пластмассовых корпусах применяются также для набора матриц и линейных шкал, служащих средствами отображения крупноразмерной цифровой и линейно изменяющейся информации.



ИК диоды находят применение в разнообразных устройствах, принцип действия которых основывается либо на электрическом управлении мощностью излучения диода, либо на управлении коэффициентом передачи оптического канала при постоянной мощности излучения. ИК диоды широко применяются в системах дистанционного управления бытовой радиоаппаратурой, в различных датчиках бесконтактного типа, узлах и линиях, требующих гальванической развязки.

*Основные характеристики СИД:*

1. Световая характеристика (яркостная), показывает зависимость силы света от прямого тока (рис. 8.2).

2. Спектральная характеристика показывает зависимость интенсивности излучения от длины волны излучающего света. Чем меньше  $\Delta\lambda$ , тем чище цвет свечения. Квазимонохроматичность наблюдается, когда  $\Delta\lambda \ll \Delta\lambda_{\max}$  (спектры не перекрываются) (рис. 8.3).

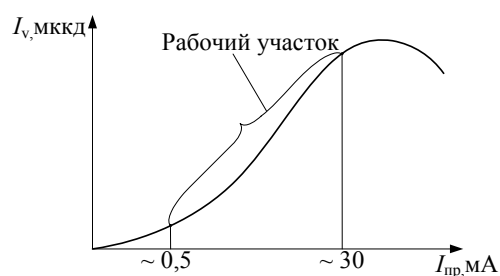


Рис. 8.2. Световая характеристика светодиода

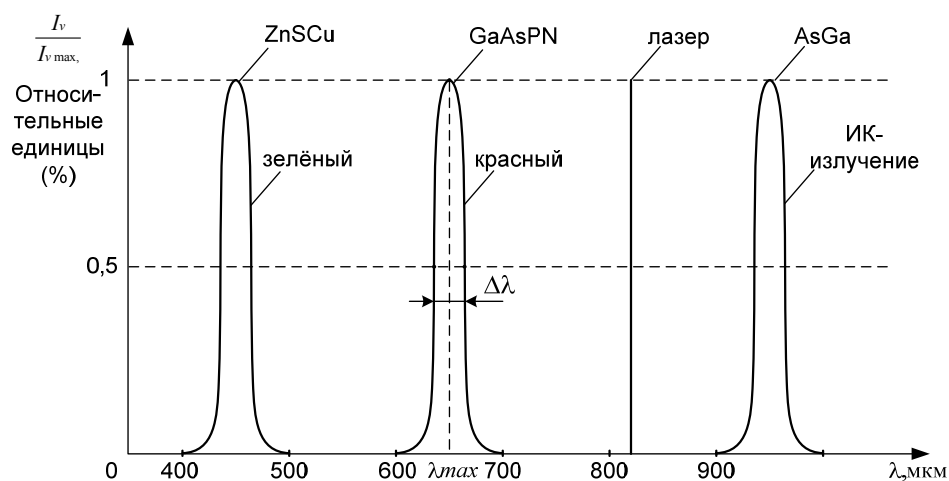


Рис. 8.3. Спектральная характеристика светодиодов

3. Диаграмма направленности излучения показывает пространственное распределение излучения или зависимость силы света от угла

наблюдения (рис. 8.4, б). У различных СИД диаграммы разные. На диаграмме есть параметр – угол излучения (рис. 8.4).

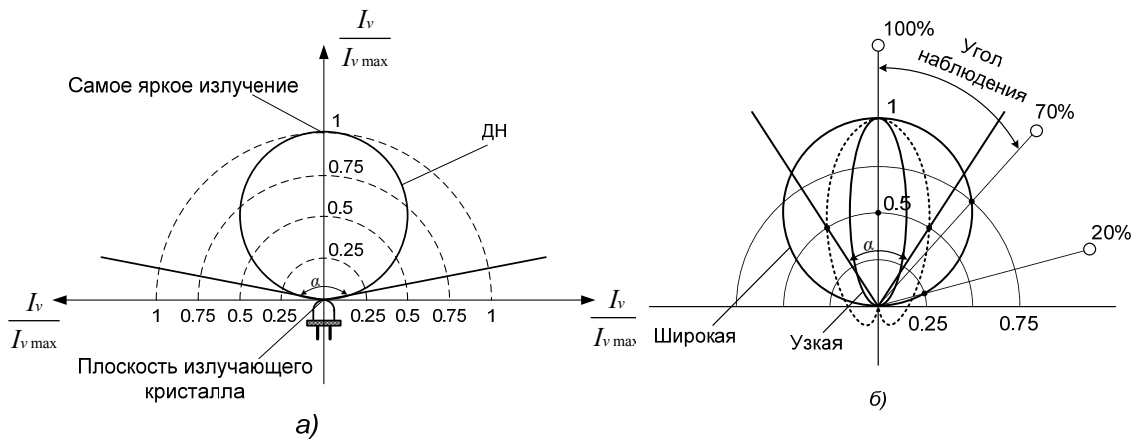


Рис. 8.4. Диаграмма направленности СИД

4. ВАХ показывает зависимость тока через СИД от приложенного прямого напряжения. При обратном напряжении СИД не используется. Основным материал СИД – арсенид галлия. Значения  $U_{пр} \approx 2 - 3$  В (рис. 8.5).

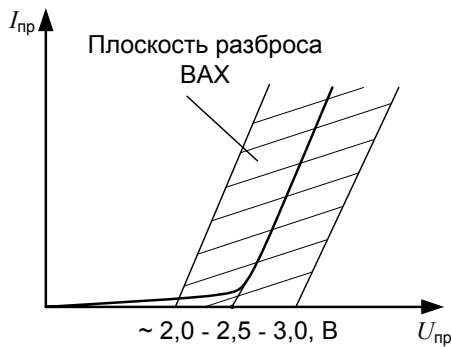


Рис. 8.5. ВАХ светодиода

*Основные параметры СИД:*

1. Сила света – это световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла (иногда задается яркость или светимость)

$I_v$  – сила света, мккд;  $L$  – яркость мккд/м<sup>2</sup>.

2. Постоянное прямое напряжение  $U_{пр}$  – напряжение на СИД при протекающем  $I_{пр}$ .

3. Максимально допустимый прямой ток  $I_{пр\ max}$ , при котором обеспечивается надежность при длительной работе диода.

4. Максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр\ max}$  – максимальное постоянное напряжение, приложенное к диоду, которое обеспечивает надежность при длительной работе.

5. Максимум спектрального распределения  $\lambda_{\max}$  – длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики (определяет цвет свечения).

6. Ширина спектра излучения  $\Delta\lambda$  – интервал длин волн, в котором интенсивность излучения составляет половину максимального.

7. Угол излучения  $\alpha$  – плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины максимального значения.

## 2. Методика выполнения работы

2.1. Исследование прямой ветви ВАХ светоизлучающего диода.

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования прямой ветви ВАХ (рис. 8.6), подключить источники питания и измерительные приборы с помощью соединительных проводов и съемных элементов.

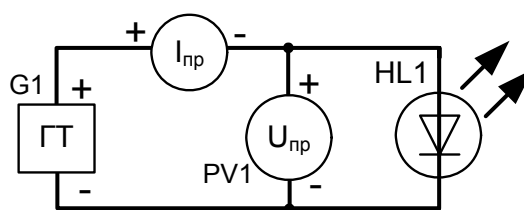


Рис. 8.6. Схема для исследования светодиода

Проверить правильность установки диода в съемном элементе. На съемном элементе указана полярность его включения в цепь.

Измерение прямого тока осуществляется амперметром АВМ1 с пределом измерения 10 мА. Для измерения прямого напряжения используется вольтметр АВМ2 с пределами измерения 1 и 5 В. Собранную схему показать преподавателю.

Включить тумблер «Сеть».

2.1.2. Установить на источнике тока ГТ минимальное значение выходного тока. Плавно увеличивать значение прямого тока таким образом, чтобы прямое напряжение изменялось приблизительно на 0,1 В. Получить не менее 6 – 8 отсчетов значений прямого тока. Результаты занести в таблицу. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно. При необходимости уменьшить предел измерения прямого тока. Наиболее точные измерения выполняются при условии, что стрелка прибора отклоняется не менее чем на  $2/3$  длины шкалы.

$I_{пр}, \text{мА}$							
$U_{пр}, \text{В}$							

Отметить величину прямого тока, начиная с которой свечение диода становится безусловно заметным визуально.

По результатам измерений построить график прямой ветви ВАХ.

**ВНИМАНИЕ! Обратная ветвь ВАХ светодиода не исследуется!**

### 3. Содержание отчета

- 3.1. Титульный лист.
- 3.2. Цель работы.
- 3.3. Схема электрическая принципиальная для исследования прямой ветви ВАХ светоизлучающего диода.
- 3.4. Результаты измерений, сведенные в таблицу.
- 3.5. Результаты измерений в виде графика зависимости  $I=f(U)$ .
- 3.6. Основные справочные параметры исследуемого светодиода.
- 3.7. Выводы по работе.

### 4. Контрольные вопросы и задания

- 4.1. Что представляет собой светоизлучающий диод и для чего он используется?
- 4.2. Нарисуйте световую характеристику и объясните ее.
- 4.3. Чем определяется цвет свечения светодиода?
- 4.4. Можно ли использовать инфракрасный светодиод в качестве фотоприемника инфракрасного излучения?
- 4.5. Укажите основные достоинства и недостатки светодиодов.
- 4.6. Приведите условные графическое и буквенно-цифровое обозначения светодиодов.
- 4.7. Назовите диапазон рабочих токов светодиодов.

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДНОЙ ОПТОПАРЫ

Цель работы. Исследовать основные характеристики диодной оптопары.

Оборудование. Лабораторный стенд 87Л-01, сменная панель 1.

Объект исследования. Оптопара АОД101Г или аналогичная.

#### 1. Общие сведения

Оптопара – это полупроводниковый оптоэлектронный прибор, в котором конструктивно объединены в общем корпусе излучатель и фотоприемник, имеющие между собой оптическую связь. В излучателе электрические сигналы преобразуются в световые, которые воздействуют на фотоприемник и создают в нем снова электрические сигналы. На входе и выходе оптопары всегда имеются электрические сигналы, а связь входа с выходом осуществляется оптическими сигналами. Цепь излучателя является управляющей, а цепь фотоприемника – управляемой. Оптопары обеспечивают практически идеальную электрическую (гальваническую) развязку, высокое напряжение изоляции, однонаправленность передачи информации и широкополосность.

Классификация оптопар проводится по трем основным признакам: виду излучателя, виду фотоприемника и по виду оптического канала.

Излучателем в оптопарах, как правило, служит инфракрасный светодиод (раньше применялись миниатюрные лампы накаливания). В качестве фотоприемников применяются фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры, фоторезисторы.

Существуют три разновидности оптического канала между излучателем и фотоприемником:

1) закрытый оптический канал – простой светопровод, предназначенный для передачи энергии излучения на фотоприемник; чаще всего он выполняется в виде иммерсионной среды (среды, показатель преломления которой больше единицы);

2) открытый оптический канал – оптический канал такой конструкции, при которой в зазор между излучателем и фотоприемником возможен доступ извне;

3) управляемый оптический канал – оптический канал, в котором в качестве иммерсионной среды использован материал, светопропускание которого изменяется при внешних воздействиях.

Наиболее распространены оптопары с закрытым оптическим каналом.

Диодные оптопары применяются в основном в цепях передачи цифровых информационных сигналов между блоками радиоэлектронной аппаратуры, для управления работой различных микросхем, создания оптоэлектронных трансформаторов. Диодные оптопары обычно содержат кремниевый фотодиод и инфракрасный арсенид-галлиевый светодиод. Фотодиод может работать в фотогенераторном режиме, создавая фотоЭДС до 0,5 – 0,8 В, или в фотодиодном режиме. Диодные оптопары обладают наилучшим быстродействием (время задержки распространения сигнала  $t_{\text{зад}} \approx 10^{-7} - 10^{-9}$  с).

Важной разновидностью диодных оптопар являются дифференциальные оптопары – приборы, в которых один излучатель воздействует на два идентичных фотодиода. Это позволяет обеспечить неискаженную передачу аналоговых сигналов. Причем один канал служит для непосредственной передачи информации, а другой применяется для создания цепи обратной связи, корректирующей температурные, деградационные и другие изменения мощности излучателя. Разновидностью диодных оптопар являются оптопары, в которых фотоприемником служит фотоварикап.

Диодные оптопары имеют весьма низкий коэффициент передачи тока ( $k_1 = 1 - 3 \%$ ) и требуют обязательного усиления выходного сигнала, поэтому используются либо с дополнительными электронными усилителями, либо в составе оптоэлектронных микросхем, содержащих несколько оптопар и дополнительное электронное обрамление.

Транзисторные оптопары работают главным образом в ключевом режиме и применяются в коммутаторных схемах, устройствах

связи различных датчиков с измерительными блоками, для бесконтактного управления и т.д. Они не требуют дополнительного усиления выходного сигнала, но отличаются от диодных оптопар низким быстродействием. Это наиболее распространенный класс оптопар.

Тиристорные оптопары имеют в качестве фотоприемника кремниевый фототиристор и применяются исключительно в ключевом режиме. Основными областями применения тиристорных оптопар являются схемы для коммутации высоковольтных силовых цепей, управления мощными тиристорами и т.п.

Резисторные оптопары применяются преимущественно в аналоговых устройствах и отличаются высокой линейностью ВАХ, низким уровнем шумов. Выходное сопротивление фоторезистора может изменяться в  $10^7 - 10^8$  раз. Основными недостатками таких оптопар являются низкое быстродействие (0,01 – 1 с) и значительная температурная нестабильность параметров. Резисторные оптопары применяются для автоматического регулирования усиления, управления бесконтактными делителями напряжения, модуляции и формирования различных сигналов.

Термины, определения и обозначения параметров оптопар приведены в ГОСТ 23562-79. Основные параметры диодных оптопар:

1) входное напряжение  $U_{вх}$  – постоянное прямое напряжение на диоде излучателе при заданном входном токе;

2) максимальный (импульсный) входной ток  $I_{вх. макс}$  ( $I_{вх и макс}$ ) – максимальные постоянный входной ток или амплитуда входного импульса, проходящего через входную цепь оптопары, при которых обеспечивается заданная надежность при длительной работе;

3) максимальное входное обратное напряжение  $U_{вх. обр. макс}$  – максимальное постоянное напряжение, приложенное к входу в обратном направлении, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе;

4) максимальное выходное обратное постоянное  $U_{вых. обр. макс}$  и импульсное напряжения  $U_{вых. обр и макс}$ , максимальные напряжения в выходной цепи оптопары, при которых обеспечивается ее надежная работа;

5) выходной обратный ток (темновой)  $I_{\text{вых.обр.т}}$ , протекающий в выходной цепи при отсутствии входного тока и заданном напряжении на выходе;

6) время нарастания выходного сигнала  $t_{\text{нр}}$  – интервал времени, в течение которого выходной сигнал изменяется от 0,1 до 0,5 максимального значения;

7) время спада выходного сигнала  $t_{\text{сп}}$  – интервал времени, в течение которого выходной сигнал изменяется от 0,9 до 0,5 максимального значения;

8) коэффициент передачи тока  $K_I$  – отношение разности выходного и выходного темнового токов к входному, выраженное в процентах; так как темновой выходной ток значительно меньше светового, коэффициент передачи тока выражается как  $K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$ ;

9) сопротивление изоляции  $R_{\text{из}}$  – активное сопротивление между входной и выходной цепями оптопары;

10) проходная емкость  $C_{\text{из}}$  – емкость между входной и выходной цепями оптопары;

11) максимальное напряжение изоляции  $U_{\text{из.мах}}$  – максимальное постоянное напряжение изоляции, приложенное между входом и выходом оптопары, при котором обеспечивается ее электрическая прочность.

Свойства элементарной оптопары определяются тремя основными характеристиками: входной, передаточной и выходной. Входной является ВАХ излучателя, а выходной – ВАХ фотодиода (при заданном токе на входе оптопары). Передаточной характеристикой называется зависимость тока  $I_{\text{вых}}$  на выходе оптопары от тока  $I_{\text{вх}}$  на ее входе.

## 2. Методика выполнения работы

### 2.1. Исследование входной ВАХ диодной оптопары.

2.1.1. Из элементов, приготовленных к работе, собрать схему для исследования основных характеристик оптопары (см. рисунок), подключить источник тока ГТ и измерительные приборы с помощью соединительных проводов и съемных элементов. Съемный элемент с оптопарой установить на панель таким образом, чтобы излучатель (жесткие выводы элемента) был включен в цепь для исследования



прямой ветви ВАХ диода, а фотодиод – в цепь для обратной ветви (гибкие выводы элемента).

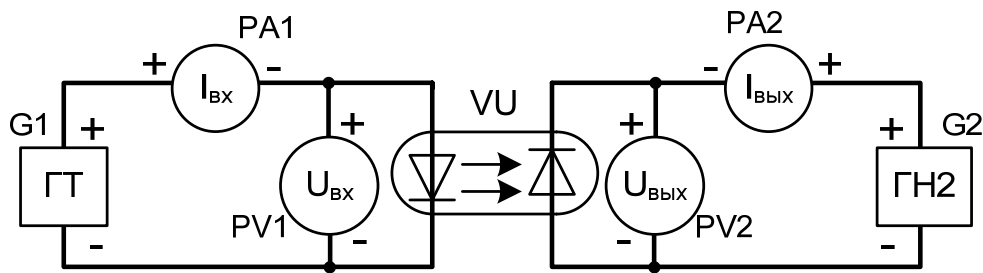


Схема для исследования диодной оптопары

Элементы выходной цепи не подсоединять.

Проверить правильность установки оптопары. На съемном элементе указаны полярности включения входной и выходной цепей.

Измерение входного тока осуществляется амперметром АВМ1 с пределом измерения 10 мА. Для измерения входного напряжения используется вольтметр АВМ2 с пределами измерения 1 и 5 В. Собранный схему показать преподавателю.

Включить тумблер «Сеть».

2.1.2. Установить на источнике тока ГТ максимальное значение тока (около 10 мА). Результат измерения входного тока и соответствующего ему входного напряжения занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

$I_{\text{вх}}, \text{ мА}$							
$U_{\text{вх}}, \text{ В}$							

Плавно уменьшать значение входного тока таким образом, чтобы входное напряжение изменялось приблизительно на 0,1 – 0,3 В. Получить не менее 6 – 8 отсчетов. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно по всему диапазону изменения входного тока. При необходимости изменить предел измерения входного тока.

По результатам измерений построить график входной ВАХ диодной оптопары.

2.2. Исследование передаточной характеристики диодной оптопары.

2.2.1. Собрать схему выходной цепи оптопары, не разбирая при этом входную цепь (см. рисунок). Гнезда для включения генератора напряжения ГН2 на сменной панели замкнуть коротким проводом.

Измерение выходного тока осуществляется амперметром АВМ2 с пределом измерения 0,5 мА. Входное и выходное напряжения не измеряются. Собранный схему показать преподавателю.

Включить тумблер «Сеть».

2.2.2. Установить на источнике тока ГТ максимальное значение тока (около 10 мА). Результат измерения входного тока и соответствующего значения выходного тока занести в табл. 9.2. Плавно уменьшать значение входного тока приблизительно через 1 – 2 мА.

Таблица 9.2

$I_{\text{ВХ}}, \text{ мА}$							
$I_{\text{ВЫХ}}, \text{ мА}$							

Получить не менее 6 – 8 отсчетов значений входного и выходного токов. Результаты занести в табл. 9.2. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно по всему диапазону изменения тока. При необходимости изменить пределы измерения токов.

По результатам измерений построить график передаточной характеристики оптопары. Определить значение  $K_1$ .

2.3. Исследование выходной ВАХ диодной оптопары.

2.3.1. Подключить к схеме генератор напряжения ГН2. Измерение выходного напряжения осуществлять при помощи измерителя выхода ИВ (положение переключателя - "ГН2"). Предел измерения 25 В. Входной ток измеряется амперметром АВМ1 (предел измерения 10 мА), выходной ток - амперметром АВМ2 (пределы измерения 0,5 и 1 мА).

2.3.2. Установить на источнике тока ГТ значение входного тока  $I_{\text{ВЫХ}} = 1 \text{ мА}$ . Плавно увеличивать значение выходного напряжения приблизительно через каждые 2 – 3 В. Зарегистрировать значения выходного напряжения и соответствующие им значения выходного тока. Получить не менее 6 – 8 отсчетов. Результаты занести в табл. 9.3. По длине ВАХ экспериментальные точки должны быть расположены приблизительно равномерно.

Таблица 9.3

$I_{\text{вх}} = 1 \text{ мА}$							
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$							
$I_{\text{вых}}, \text{ мА}$							
$I_{\text{вх}} = 5 \text{ мА}$							
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$							
$I_{\text{вых}}, \text{ мА}$							
$I_{\text{вх}} = 10 \text{ мА}$							
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$							
$I_{\text{вых}}, \text{ мА}$							

Повторить измерения для значений входного тока 5 и 10 мА.

По результатам измерений построить семейство выходных характеристик диодной оптопары для трёх значений входного тока.

### 3. Содержание отчета

- 3.1. Титульный лист.
- 3.2. Цель работы.
- 3.3. Схемы электрические принципиальные для исследования входной, передаточной и выходной характеристик оптопары.
- 3.4. Результаты измерений, сведенные в таблицу.
- 3.5. Результаты измерений в виде графика зависимости  $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$ ,  $I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$ ,  $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$ .
- 3.6. Основные справочные параметры оптопары АОД101Г.
- 3.7. Выводы по работе.

### 4. Контрольные вопросы и задания

- 4.1. Назовите основные типы оптопар.
- 4.2. Приведите основные достоинства и недостатки оптопар.
- 4.3. Назовите основные параметры и характеристики диодных оптопар.
- 4.4. Укажите области применения оптопар.
- 4.5. Приведите примеры условных графических и буквенно-цифровых обозначений различных типов оптопар.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### *Программа Electronics Workbench (Multisim)*

Программа *Electronics Workbench* позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифроаналоговые схемы большой степени сложности. Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя большой набор широко распространенных электронных компонентов. Есть возможность подключения и создания новых библиотек компонентов. Параметры компонентов можно изменять в широком диапазоне значений. Простые компоненты описываются набором параметров, значения которых можно изменять непосредственно с клавиатуры, активные элементы - моделью, представляющей собой совокупность параметров и описывающей конкретный элемент или его идеальное представление. Модель выбирается из списка библиотек компонентов, параметры модели также могут быть изменены пользователем. Широкий набор приборов позволяет производить измерения различных величин, задавать входные воздействия, строить графики. Все приборы изображаются в виде, максимально приближенном к реальному, поэтому работать с ними просто и удобно. Результаты моделирования можно вывести на принтер или импортировать в текстовый или графический редактор для их дальнейшей обработки. Программа *Electronics Workbench* совместима с программой *P-SPICE*, т. е. предоставляет возможность экспорта и импорта схем и результатов измерений в различные её версии.

В библиотеки компонентов программы входят пассивные элементы, транзисторы, управляемые источники, управляемые ключи, гибридные элементы, индикаторы, логические элементы, триггерные устройства, цифровые и аналоговые элементы, специальные комбинационные и последовательные схемы. Активные элементы могут быть представлены моделями как идеальных, так и реальных элемен-

тов. Возможно также создание своих моделей элементов и добавление их в библиотеки элементов. В программе используется большой набор приборов для проведения измерений: амперметр, вольтметр, осциллограф, мультиметр, Боде-плоттер (графопостроитель частотных характеристик схем), функциональный генератор, генератор слов, логический анализатор и логический преобразователь.

В программе *Electronics Workbench* можно проводить анализ схем на постоянном и переменном токах. При анализе на постоянном токе определяется рабочая точка схемы в установившемся режиме работы. Результаты этого анализа не отражаются на приборах, они используются для дальнейшего анализа схемы. Анализ на переменном токе использует результаты анализа на постоянном токе для получения линеаризованных моделей нелинейных компонентов. Анализ схем в режиме АС может проводиться как во временной, так и в частотной областях. Программа также позволяет производить анализ цифроаналоговых и цифровых схем. В *Electronics Workbench* можно исследовать переходные процессы при воздействии на схемы входных сигналов различной формы.

### **Компоненты *Electronics Workbench***

Окно программы *Electronics Workbench* (рис. П1.1) содержит поле меню, линейку контрольно-измерительных приборов и линейку библиотек элементов. В рабочем поле программы располагаются моделируемая схема с подключенными к ней иконками контрольно-измерительных приборов и краткое описание схемы. При необходимости каждый прибор может быть развернут для установки режимов работы и наблюдения результатов. Линейки прокрутки используются только для перемещения схемы.

Все компоненты разбиты на группы:

- базовые компоненты;
- источники;
- линейные элементы;
- ключи;
- нелинейные элементы;

- индикаторы;
- логические компоненты;
- аналоговые компоненты;
- цифровые компоненты;
- гибридные компоненты.

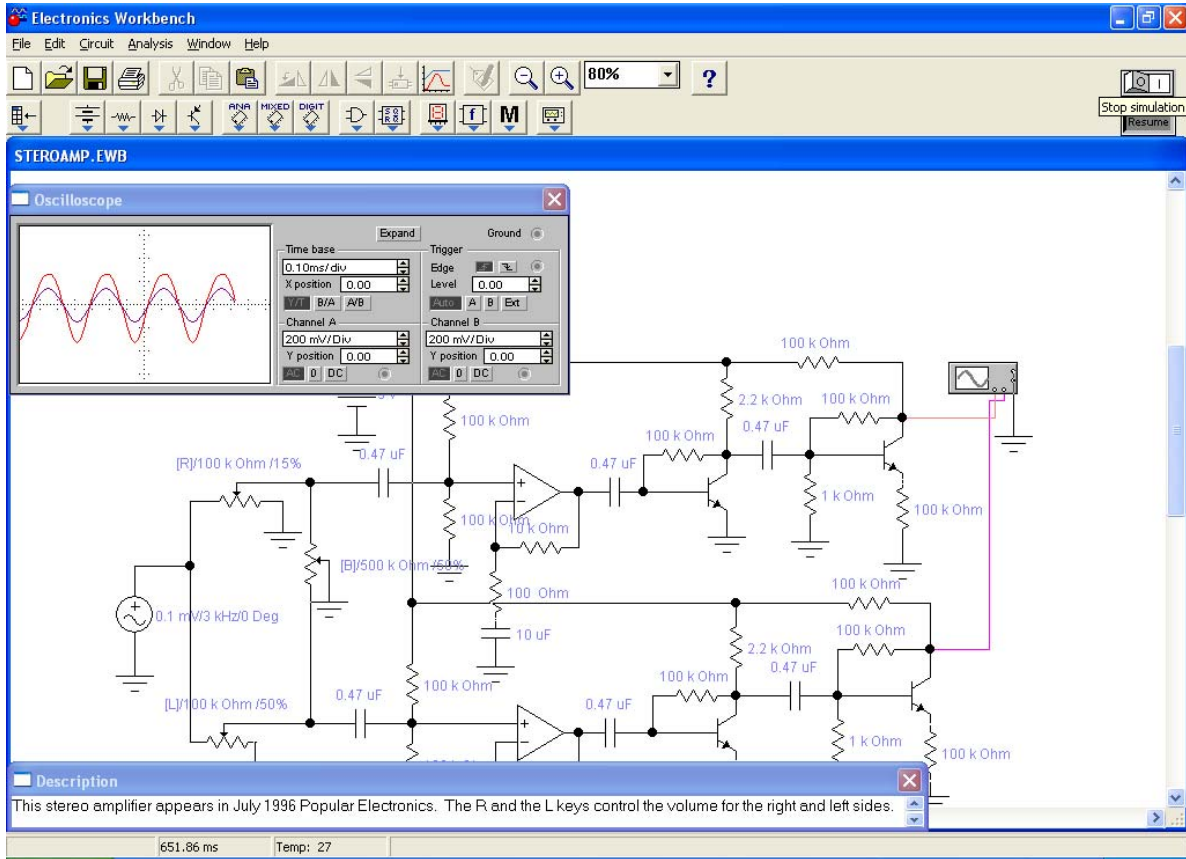


Рис. П1.1

На рис. П1.2 представлена панель источников тока и напряжения в *Electronics Workbench*.



Рис. П1.2

*Источники постоянного напряжения и тока*

Все источники в *Electronics Workbench* идеальные (табл. П1.1). Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно

нулю, поэтому его выходное напряжение не зависит от нагрузки. Идеальный источник тока имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление, его ток не зависит от сопротивления нагрузки.

Таблица П1.1

Обозначение			
Источник	Постоянного напряжения	Напряжения для цифровых схем	Постоянного тока

Источники переменного напряжения и тока применяются в качестве источников входных сигналов в электронных схемах.

В источнике переменного напряжения задается эффективное значение напряжения, частота и фаза сигнала (рис. П1.3).

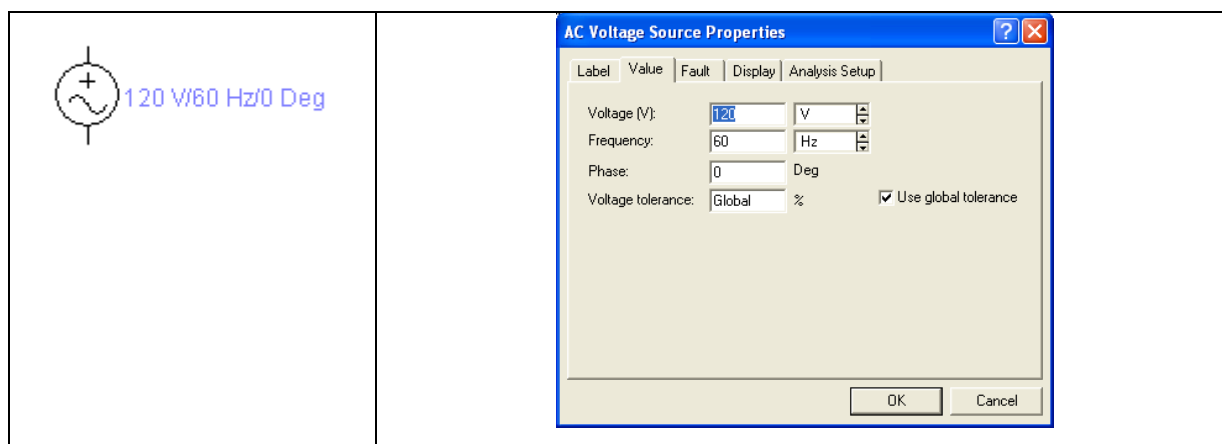


Рис. П1.3

В источнике переменного тока задается эффективное значение тока, частота и фаза сигнала (рис. П1.4).

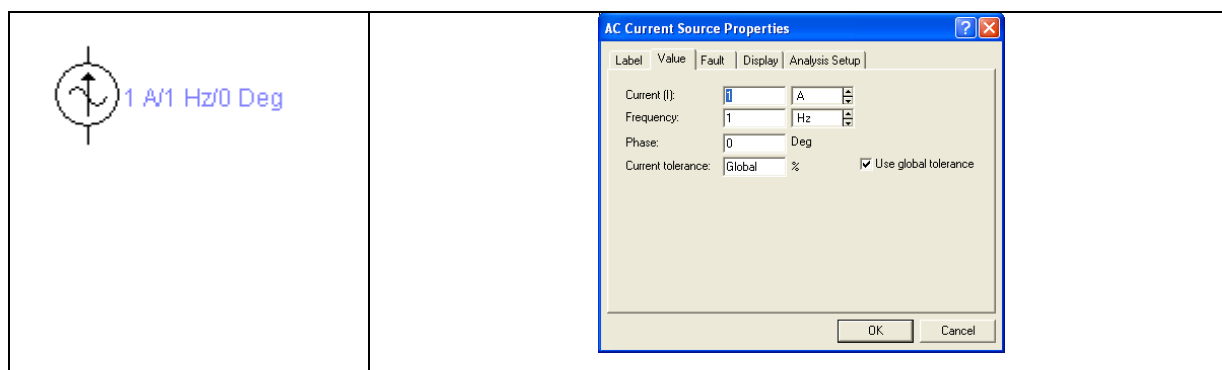


Рис. П1.4

В источнике прямоугольных импульсов задается амплитуда, частота и коэффициент заполнения импульсов (величина, обратная скважности) (рис. П1.5).

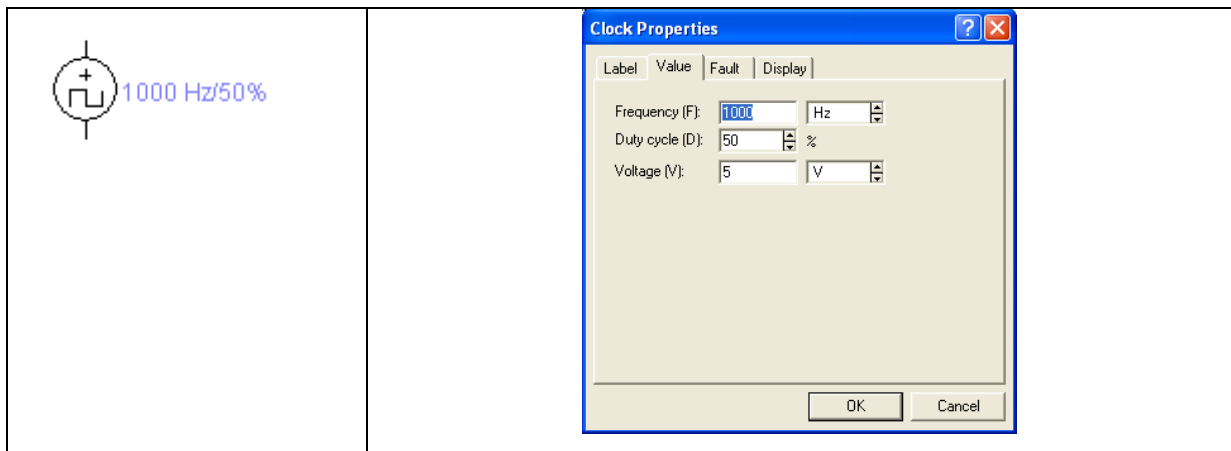


Рис. П1.5

Функциональный генератор имеет два противофазных выхода и может генерировать сигналы синусоидальной, треугольной и прямоугольной форм (рис. П1.6).

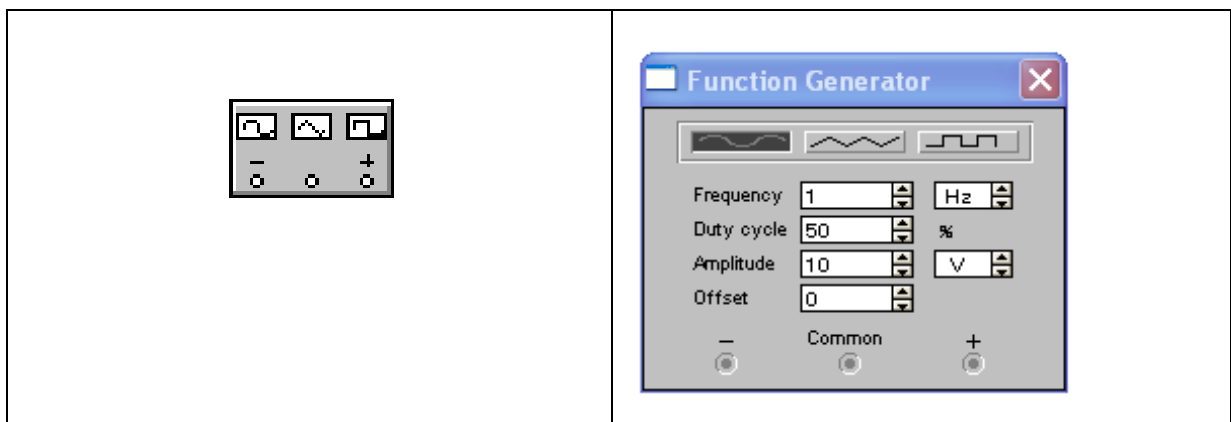


Рис. П1.6

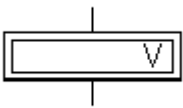
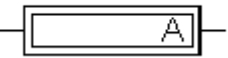

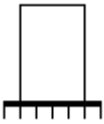
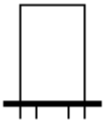

Панель индикаторов представлена на рис. П1.7.



Рис. П1.7



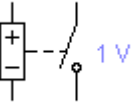


Таблица П1.2

Условное обозначение	Элемент
	Вольтметр. Измеряет в режиме DC постоянное напряжение, в режиме AC – переменное напряжение
	Амперметр. Также работает в режимах AC и DC
	Пробник
	Семисегментный индикатор
	Индикатор, подключаемый к счетчику
	Звуковая сигнализация

Коммутационные устройства представлены в табл. П1.3

Таблица П1.3

Условное обозначение	Устройство
	Однополюсный тумблер, переключаемый клавишей пробел
	Программируемое реле
	Выключатель, срабатывающий в заданном диапазоне входных напряжений

На рис. П1.8 – П1.13 представлены компоненты для создания схем.  
 Базовые элементы

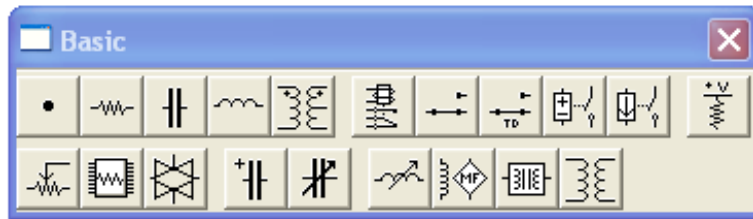


Рис. П1.8

Панель диодов



Рис. П1.9

Панель транзисторов

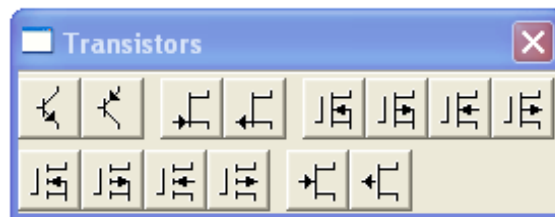


Рис. П1.10

Аналоговые микросхемы



Рис. П1.11

Цифровые микросхемы: полусумматоры, сумматоры, триггеры

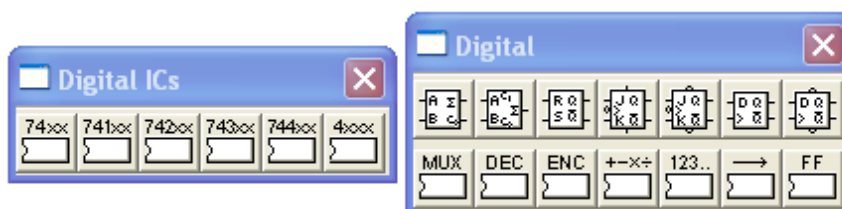


Рис. П1.12

## Гибридные микросхемы: ЦАП, АЦП, 555-таймер

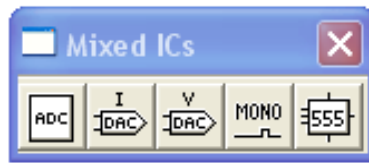








Рис. П1.13

### Логические элементы

*Electronics Workbench* содержит полный комплект логических элементов (табл. П1.4) и позволяет задавать различные характеристики, в том числе тип элемента ТТЛ или КМОП. Также можно указывать количество входов от двух до восьми, но логический выход может быть только один.

Таблица П1.4

Обозначение	Элемент	Обозначение	Элемент
	Элемент «НЕ»		Элемент «ИЛИ-НЕ»
	Элемент «И»		Элемент «И-НЕ»
	Элемент «ИЛИ»		Исключающее «ИЛИ-НЕ»

### Установка значений компонентов

Простые аналоговые элементы, такие как источники, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности имеют один или несколько параметров. Сложные элементы имеют несколько взаимосвязанных параметров, которые вместе формируют модель конкретного элемента. Параметры, установленные по умолчанию, приведены в табл. П1.5.

Таблица П1.5

Компонент	Характеристика	Значение единиц
Источник постоянного напряжения	Напряжение	12 В
Источник постоянного тока	Ток	1 А
Источник переменного напряжения	Напряжение	1 В
	Частота	1 Гц
	Фаза	0 град
Источник переменного тока	Ток	1 А
	Частота	1 Гц
	Фаза	0 град
Источник напряжения, управляемый напряжением	Коэффициент пропорциональности	1 В/В
Источник напряжения, управляемый током	Проводимость	1/Ом
Источник тока, управляемый напряжением	Коэффициент пропорциональности	1А/А
Источник тока, управляемый током	Передаточное сопротивление	1 Ом
Резистор	Сопротивление	1 Ом
Конденсатор	Емкость	1 мФ
Катушки взаимной индуктивности	Коэффициент отношения витков первичной обмотки к виткам вторичной	2
	Индуктивность рассеивания	1 мкГн
	Индуктивность намагничивания	0,1 мГн
	Сопротивление первичной обмотки	0 Ом
	Сопротивление первичной обмотки	0 Ом
Реле	Катушка индуктивности	0,025 Гн
	Ток включения	0,05 А
Ключ	Ключи	Символы
Временное реле	Начальное время	0,5 с
	Конечное время	0 с
Ключ, управляемый напряжением	Напряжение включения	1 В
	Напряжение отключения	0 В
Ключ, управляемый током	Ток включения	1 А
	Ток выключения	0 А

Для установки значений параметров элемента необходимо:

- двойным щелчком мыши по изображению элемента открыть диалоговое окно свойств элемента (можно через *Preferences* меню *Circuit*);
- в появившемся окне изменить нужный параметр;
- установить значение, нажав на *Accept*, вернуться в рабочее окно.

## Приборы для проведения экспериментов

Обозначение приборов представлено на панели инструментов на рис. П1.14.

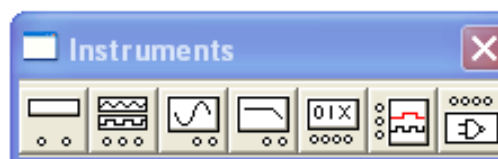


Рис. П1.14

Мультиметр (рис. П1.15) используется для измерения постоянного и переменного напряжения и тока, сопротивления. Двойным щелчком мыши на компоненте открывается окно для выбора режима измерения.

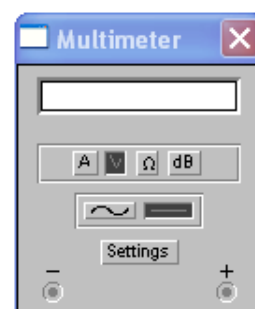


Рис. П1.15

На панели настройки мультиметра выбирается измеряемая величина по единицам измерения: А, В, Ω, dB (измерение уровня напряжения в децибелах), вид измеряемого сигнала: переменный или постоянный, режим установки параметров мультиметра (*settings*) (рис. П1.16).

### Двулучевой осциллограф (Oscilloscope)

Лицевая панель осциллографа показана на рис. П1.17.

Осциллограф имеет два канала *A* и *B* (*Channel*) с раздельной регулировкой чувст-

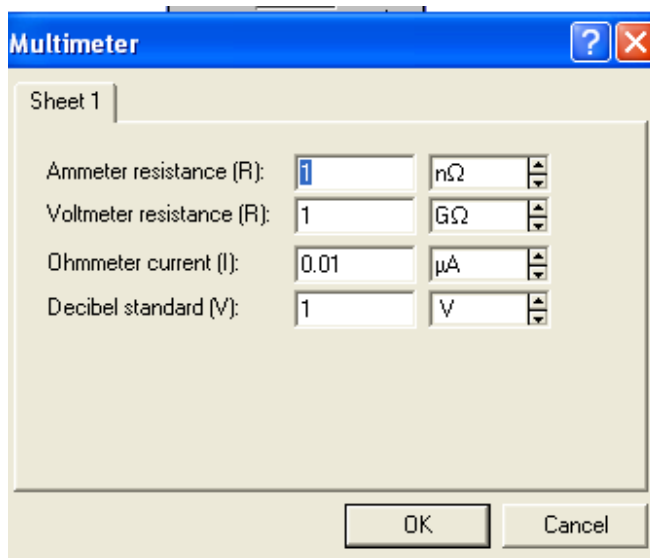


Рис. П1.16

вительности в диапазоне от 10 мкВ/дел ( $mV/Div$ ) до 5 кВ/дел ( $kV/Div$ ) и регулировкой смещения по вертикали ( $YPOS$ ). Выбор режима осуществляется нажатием кнопок  $AC$ ,  $0$ ,  $DC$ . Режим  $AC$  предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (режим «закрытого входа»), в котором на вход включается разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую). В режиме  $0$  входной зажим замыкается на землю. В режиме  $DC$  (включен по умолчанию) измеряются как постоянные, так и переменные сигналы. Это режим «открытого входа», так как входной сигнал поступает на вход вертикального усилителя непосредственно.

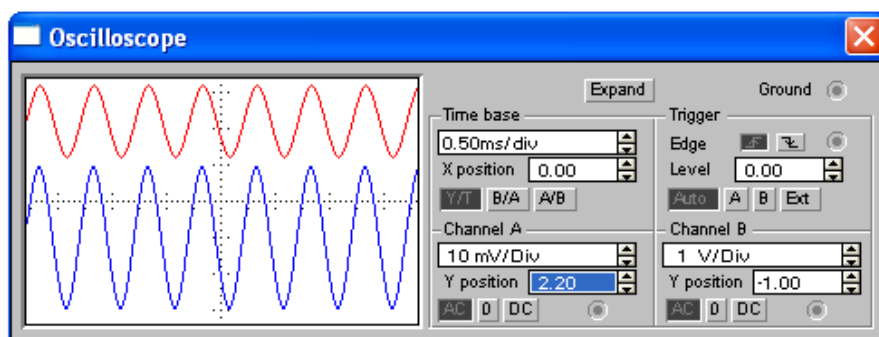


Рис. П1.17

Режим развертки выбирается кнопками  $Y/T$ ,  $B/A$ ,  $A/B$ . В режиме  $Y/T$  длительность развертки (обычный режим, включен по умолчанию) реализуются следующие режимы развертки: по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время; в режиме  $B/A$ : по вертикали – сигнал канала  $B$ , по горизонтали – сигнал канала  $A$ ; в режиме  $A/B$ : по вертикали – сигнал канала  $A$ , по горизонтали – сигнал канала  $B$ .

В режиме  $Y/T$  длительность развертки ( $TIME\ BASE$ ) может быть задана в диапазоне от 0,1 нс/дел ( $ns/div$ ) до 1 с ( $s/div$ ) с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали, т.е. по оси  $X$  ( $X\ POS$ ).

В режиме  $Y/T$  предусмотрен также ждущий режим ( $TRIGGER$ ) с запуском развертки ( $EDGE$ ) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала при регулируемом уровне ( $LEVEL$ ) запуска, а также

в режиме *AUTO* (от канала *A* или *B*) или от внешнего источника (*EXT*), подключаемого к зажиму в блоке управления *TRIGGER*.

Заземление осциллографа осуществляется с помощью клеммы *GROUND* в правом верхнем углу прибора.

При нажатии на кнопку *ZOOM* лицевая панель осциллографа существенно изменяется: увеличивается размер экрана (рис. П1.8), появляется возможность прокрутки изображения по горизонтали и его сканирования с помощью вертикальных визирных линий (синего и красного цвета), которые за треугольные ушки (они обозначены цифрами 1 и 2) могут быть курсором установлены в любое место экрана. При этом в индикаторных окошках под экраном приводятся результаты измерения напряжения, временных интервалов и их приращений (между визирными линиями).

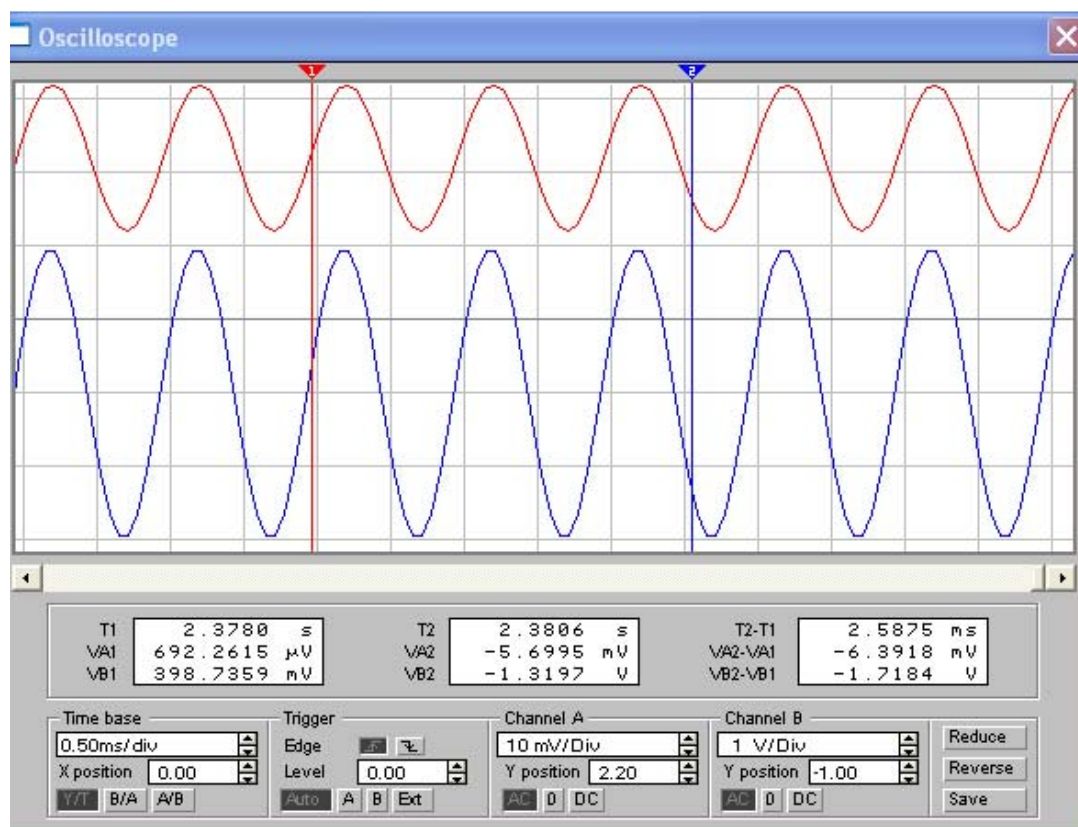


Рис. П1.18

Изображение можно инвертировать нажатием на кнопки *REVERSE* и записать данные в файл нажатием кнопки *SAVE*. Возврат к исходному состоянию производится нажатием кнопки *REDUCE*.

## Измеритель АЧХ и ФЧХ (Bode Plotter)

Измеритель предназначен для анализа амплитудно-частотных характеристик (при нажатой кнопке *MAGNITUDE*, включена по умолчанию) и фазочастотных характеристик (при нажатой кнопке *PHASE*), характеристик при логарифмической (кнопка *LOG*, включена по умолчанию) или линейной (кнопка *LIN*) шкале по осям *Y* (*VERTICAL*) и *X* (*HORIZONTAL*). Лицевая панель измерителя АЧХ-ФЧХ представлена на рис. П1.19.

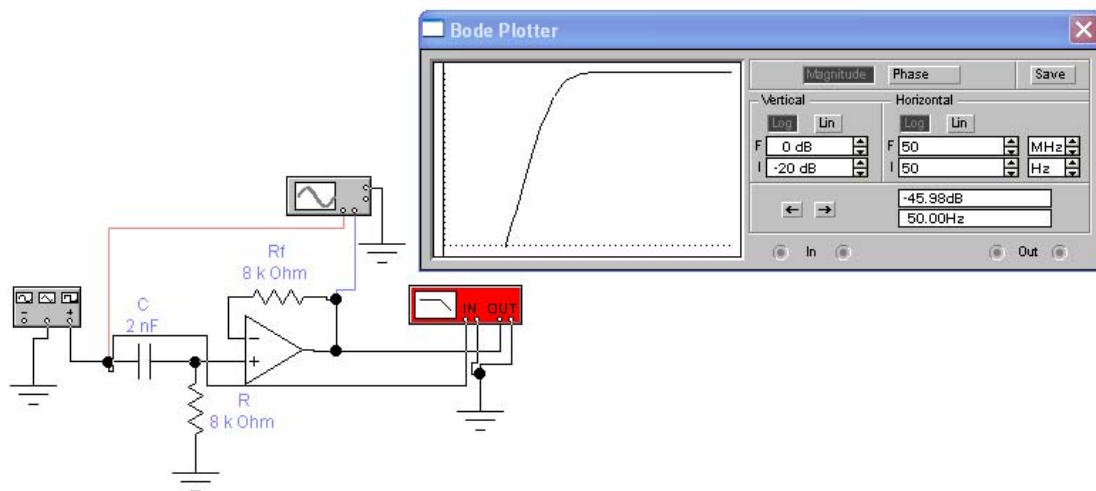


Рис. П1.19

Настройка измерителя осуществляется при выборе пределов измерения коэффициента передачи и вариации частоты с помощью кнопок в окошках  $F$  – максимальное значение и  $I$  – минимальное. Значение частоты и соответствующее ей значение коэффициента передачи или фазы индицируется в окошках в правом нижнем углу измерителя. Значения указанных величин в отдельных точках можно получить с помощью вертикальной визирной линейки, находящейся в исходном состоянии в начале координат и перемещаемой по графику мышью или кнопками. В результате измерения можно записать в текстовый файл. Для этого необходимо нажать кнопку *SAVE*. В полученном файле с расширением *.bod* АЧХ и ФЧХ представляются в табличном виде.

Подключение прибора к исследуемой схеме осуществляется с помощью зажимов *IN* (вход) и *OUT* (выход). Левые клеммы зажимов подключаются ко входу и выходу исследуемого устройства, а правые – к



общей шине. Ко входу устройства необходимо подключить функциональный генератор или другой источник переменного напряжения, при этом каких-либо настроек в этом устройстве не требуется.

### Генератор слова (*Word Generator*)

Генератор (кодový генератор) предназначен для генерации 16-8-разрядных двоичных слов, которые набираются пользователем на экране, расположенном в левой части лицевой панели (рис. П1.20).

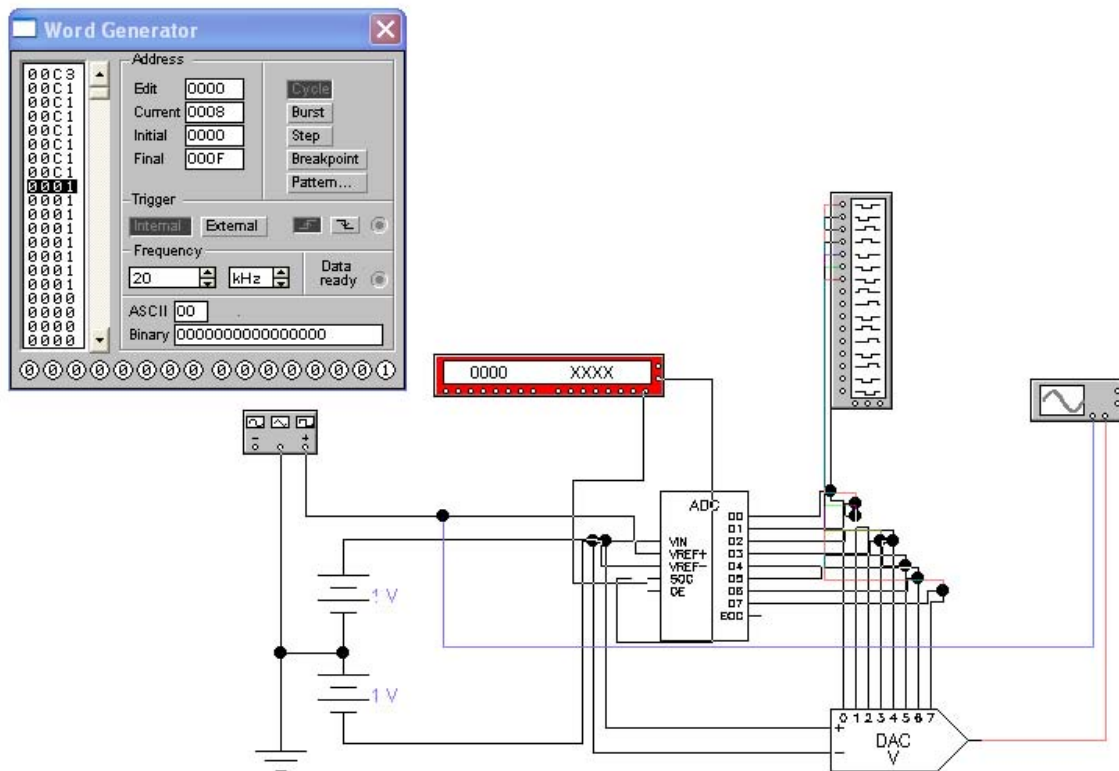


Рис. П1.20

Для набора двоичных комбинаций необходимо щелкнуть мышью на соответствующем разряде и затем ввести с клавиатуры 0 или 1. Дальнейшие перемещения по полю экрана удобнее проводить не с помощью мыши, а клавишами управления курсором. Содержимое экрана можно стереть, загрузить новое значение или записать в файл кнопками *Clear*, *Load*, *Save*.

Сформированные слова выдаются на восемь расположенных в нижней части прибора выходных клемм-индикаторов:

- с индикацией выходного сигнала в двоичном коде на клеммах-индикаторах и в шестнадцатеричном коде в окне *HEX*;
- в пошаговом (при нажатии кнопки *STEP*), циклическом (при нажатии кнопки *CYCLE*) или с выбранного слова до конца (при нажатии кнопки *BURST*) при заданной частоте посылок (установка производится нажатиями кнопок в окнах *FREQUENCY*);
- при внутреннем (при нажатии кнопки *INTERNAL*) или внешнем запуске (*EXTERNAL*);
- при запуске по переднему или заднему фронту.

### Логический анализатор (Logic Analyzer)

Анализатор предназначен для отображения на экране монитора 8-разрядных кодовых последовательностей одновременно в восьми точках схемы, а также в виде двоичных чисел на входных клеммах-индикаторах и в виде шестнадцатеричных чисел в окне *HEX*. Длительность развертки задается в окне *TIME BASE*.

Лицевая панель логического анализатора показана на рис. П1.21.

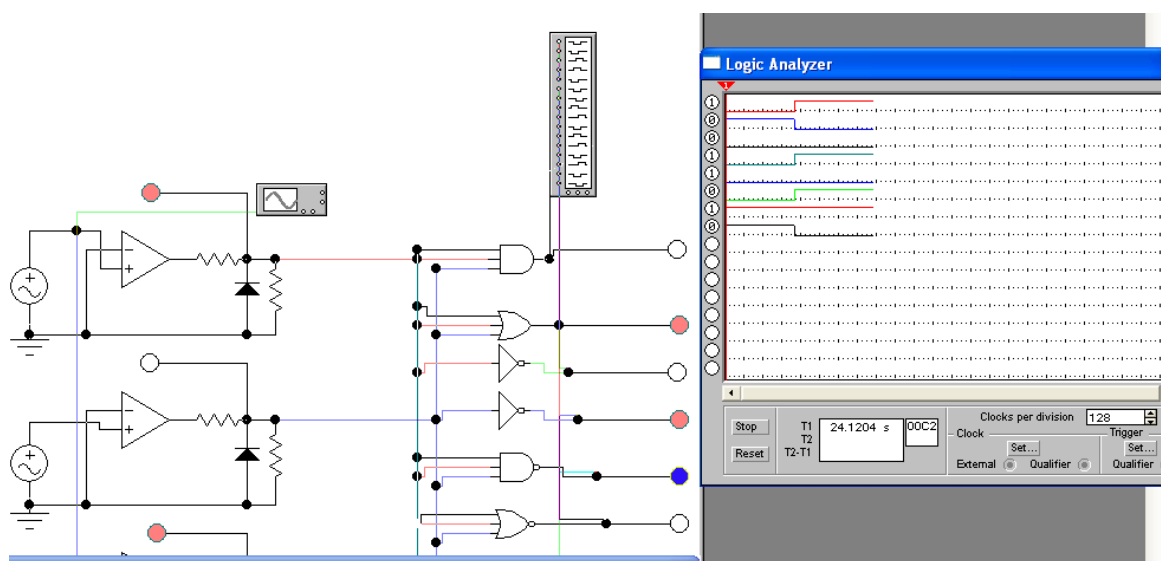


Рис. П1.21

В блоке *TRIGGER* расположены кнопка запуска по положительному (включена по умолчанию) или отрицательному спаду сигнала и клеммы для подключения внешнего источника синхронизации, например генератора слова.

### Логический преобразователь (Logic Converter)

Прибор не имеет аналогов в реальной измерительной технике. Он предназначен для выполнения различных преобразований в схеме. С его помощью можно осуществлять следующие преобразования:

- получение таблицы истинности исследуемой схемы;
- преобразование таблицы истинности в логическое выражение;
- преобразование логического выражения в таблицу истинности;
- создание логических схем по заданному логическому выражению;
- синтез логических схем на элементах «И-НЕ» по заданному логическому выражению.

Логический преобразователь имеет 8 входов ( $A, B, C \dots H$ ) и один выход ( $OUT$ ), экран для отображения таблицы истинности исследуемой схемы, экран-строку для отображения выражения булевой алгебры (рис. П1.22).

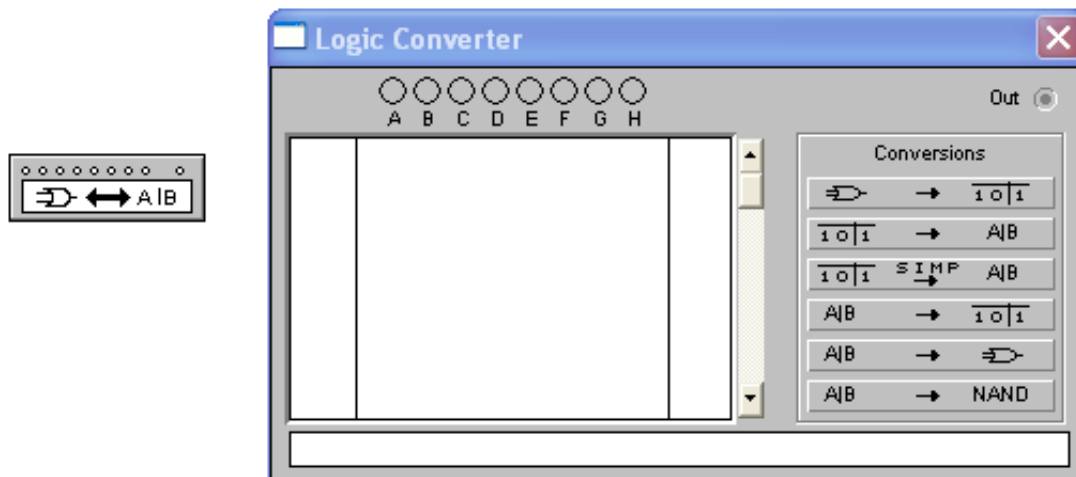


Рис. П1.22

### Моделирование схем

*Electronics Workbench* позволяет строить аналоговые, цифровые и цифроаналоговые схемы различной степени сложности. Исследуемая схема собирается на рабочем поле при одновременном использовании мыши и клавиатуры. При построении и редактировании схем выполняются следующие операции:

- выбор компонента из библиотеки компонентов;

- выделение объекта;
- перемещение объекта;
- копирование объектов;
- удаление объектов;
- соединение компонентов схемы проводниками;
- установка значений компонентов;
- подключение приборов.

Для удобства размещения компонентов можно сделать видимой сетку по команде *Circuit/Schematic Options/ Show Grid* (рис. П1.23).

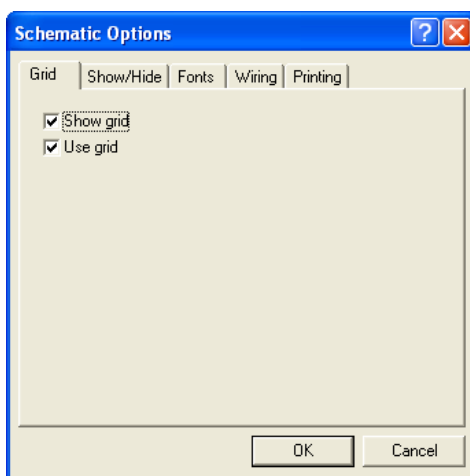


Рис. П1.23

Компоненты электрической схемы, измерительные приборы, источники сигналов и питания извлекаются из соответствующих меню при нажатии левой кнопки мыши (ЛКМ) и устанавливаются на экране. Соединение элементов производится в автоматическом режиме: курсор подводится к выводу элемента, появляется точка, затем при нажатии и удерживании в нажатом состоянии ЛКМ перемещением мышки прокладывается прямолинейная цепь до другого вывода элемента, на котором также появляется точка. ЛКМ отпускается. Цепь прорисовывается в ортогональном режиме и состоит из горизонтальных и вертикальных отрезков, которые огибают установленные элементы схемы. Цепи можно отредактировать следующим образом:

- участки цепи можно переместить. Для этого курсор подводится к участку цепи. Нажимая и удерживая ЛКМ, перемещением мышки изменяем положение цепи. Аналогично перемещаются и узлы схемы;

- цепи можно окрасить в любой цвет. Для этого цепь выделяется щелчком ЛКМ, и затем в контекстном меню выбирается команда *Wire Properties*, после чего в диалоговом окне (рис. П1.24) в секции *Schematic Options* выбираем из палитры цвет проводников. Рекомендуется окрашивать в разные цвета цепи, подводимые к входам осциллографа, так как графикам, отображаемым на экране осциллографа, присваивается цвет подсоединенных к его входам цепей;

- удаление цепи. Удаляемая цепь выделяется и нажимается на клавиатуре клавиша *Del* или выбирается в контекстном меню команда *Delete*.

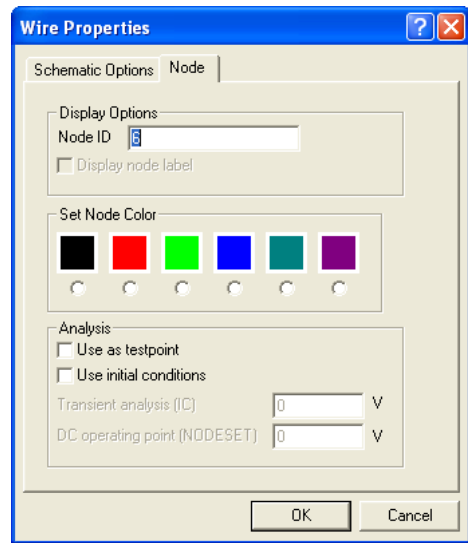


Рис. П1.24

После создания схемы сетку можно отключить. Кроме того, можно просмотреть автоматически проставленные номера узлов схемы по команде *Circuit/Schematic Options/Show nodes* (рис. П1.25). Номера узлов могут использоваться в последующем для просмотра результатов моделирования в выбранных узлах.

Если в схеме установлены измерительные приборы, то она запускается на моделирование включением напряжения питания тумблером, расположенным в правой верхней части экрана. Там же расположена кнопка *Stop*, с помощью которой можно зафиксировать процесс моделирования в определенном состоянии.

На экране осциллографа просматриваются графики сигналов в выбранных узлах. Для лучшего визуального просмотра на осциллографе подбираются необходимые чувствительность по вертикальному каналу и длительность развертки.

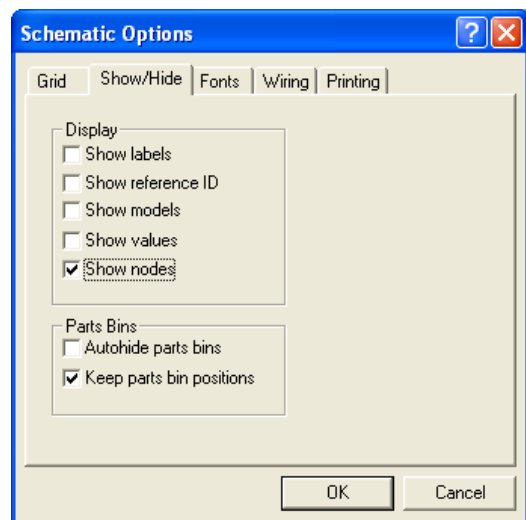


Рис. П1.25

Исследование схем можно выполнять без установки приборов. Желательно сделать видимыми номера узлов. Затем назначается вид анализа из меню *Analysis* (рис. П1.26) Например, анализ АЧХ выполняется по команде *Analysis/AC Frequency*, анализ переходных процессов – по команде *Analysis/Transient*, анализ по постоянному току – по команде *Analysis/DC Operating Point* и др. Далее в диалоговом окне устанавливаются параметры анализа и узлы, в которых просматриваются результаты моделирования. Процесс моделирования запускается нажатием на кнопку *Simulate*.

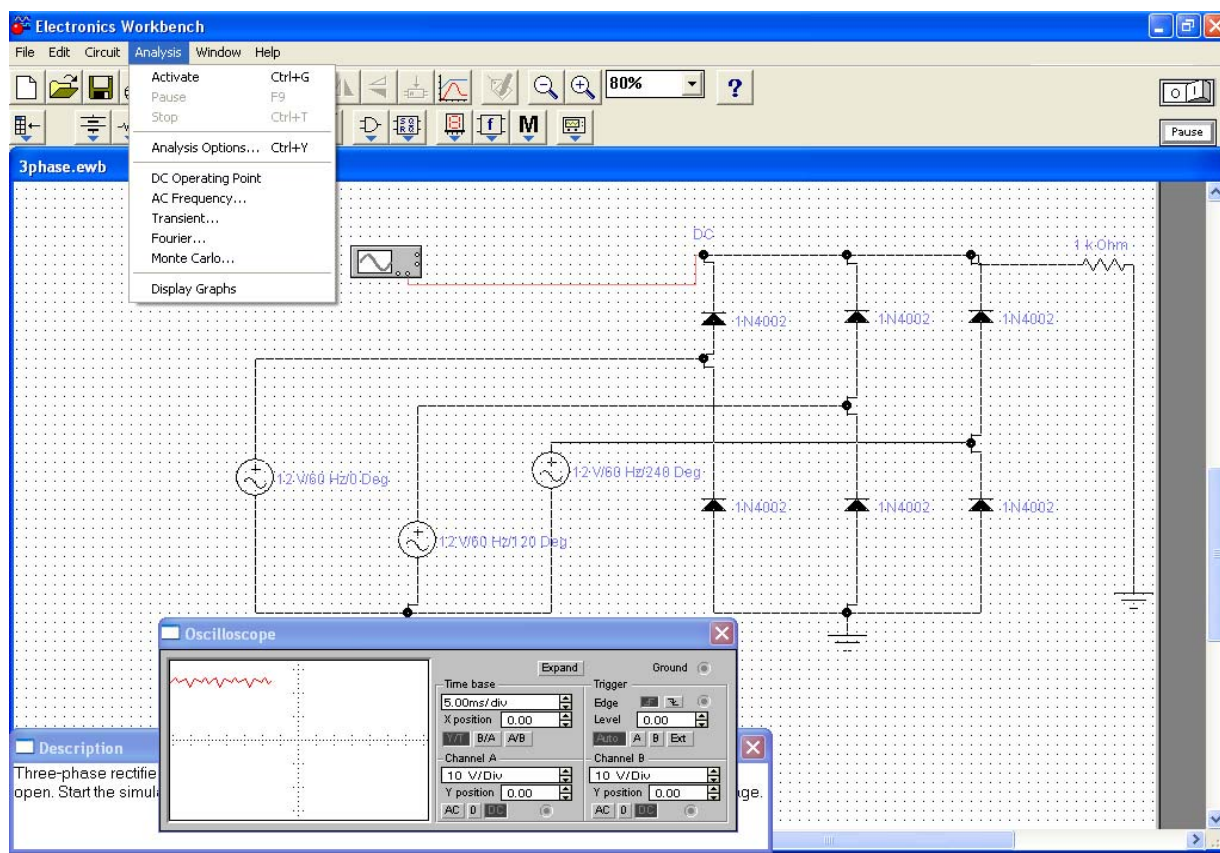


Рис. П1.26

Графики моделирования представляются в окне *Analysis Graphs*. Окно можно распахнуть на весь экран. Параметры сигналов просматриваются с помощью двух визирных линий, появляющихся после щелчка ЛКМ на значке *Toggle Cursor*. Визирные линии перемещаются мышкой и устанавливаются в необходимом месте. Параметры сигналов отражаются в динамическом окне.

**Обозначения условные графические в схемах  
Полупроводниковые приборы  
ГОСТ 2.730-73**

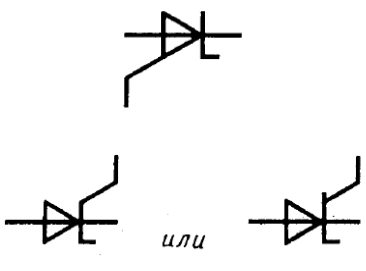


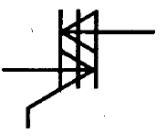
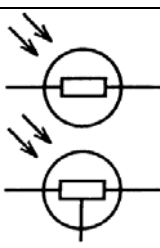
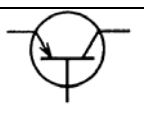
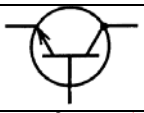
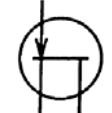
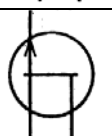
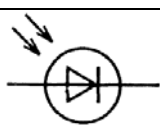

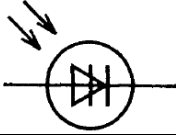


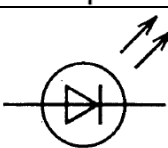
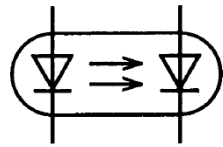
В стандарте установлены правила построения условных графических обозначений (УГО) полупроводниковых приборов на схемах, выполняемых вручную или автоматическим способом, во всех отраслях промышленности. Обозначения элементов приведены в табл. П2.1.

Таблица П2.1

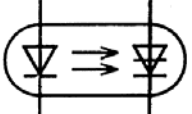
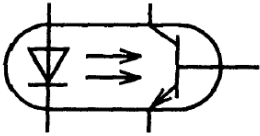
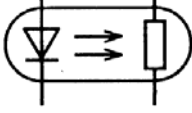
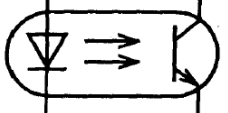
Прибор	Обозначение	Прибор	Обозначение
1. Диод Общее обозначение		7. Тиристор диодный, запираемый в обратном направлении	
2. Диод туннельный		8. Тиристор диодный, проводящий в обратном направлении	
3. Диод обращенный		9. Тиристор диодный симметричный	
4. Стабилитрон; а) односторонний		10. Тиристор триодный. Общее обозначение	
б) двухсторонний		11. Тиристор триодный, запираемый в обратном направлении с управлением: по аноду по катоду	
5. Варикап		12. Тиристор триодный, запираемый в обратном направлении, выключаемый, с управлением: по аноду по катоду	
6. Диод Шоттки			



Продолжение табл. П2.1

Прибор	Обозначение	Прибор	Обозначение
13. Тиристор триодный, проводящий в обратном направлении, с управлением: по аноду по катоду		г) обедненного типа с $n$ -каналом	
		20. Транзистор полевой с изолированным затвором обогащенного типа с $p$ -каналом с выводом от подложки	
14. Тиристор триодный симметричный (двунаправленный)		21. Фоторезистор: а) общее обозначение  б) дифференциальный	
15. Транзистор типа $p-n-p$			
16. Транзистор типа $n-p-n$			
17. Транзистор полевой с каналом $n$ -типа			
18. Транзистор полевой с каналом $p$ -типа		22. Фотодиод	
19. Транзистор полевой с изолированным затвором: а) обогащенного типа с каналом $p$ -типа		23. Фототиристор диодный	
		б) обогащенного типа с $n$ -каналом	
в) обедненного типа с $p$ -каналом		25. Светодиод	
		26. Оптрон диодный	

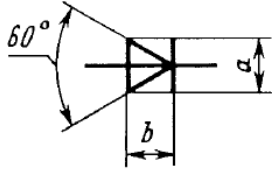

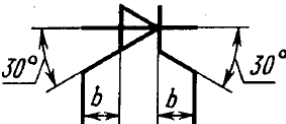
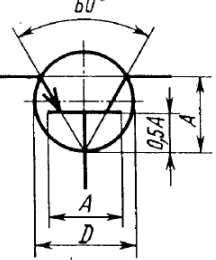
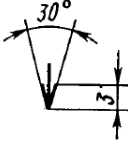


Прибор	Обозначение	Прибор	Обозначение
27. Оптрон тиристорный		29. Прибор опто-электронный с фототранзистором: а) с выводом от базы  б) без вывода от базы	
28. Оптрон резисторный			

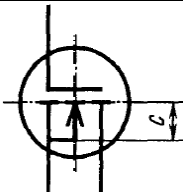
*Размеры УГО полупроводниковых приборов*

1. Все геометрические элементы УГО выполняются линиями той же толщины, что и линии электрической связи.
2. Размеры УГО п/п приборов приведены в табл. П2.2.

Таблица П2.2

Прибор	Обозначение	Размеры, мм															
1. Диод		<table border="1"> <tr><td>a</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>b</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>c</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>d</td><td>1,5</td><td>2</td></tr> <tr><td>R</td><td>5</td><td>6</td></tr> </table>	a	5	6	b	4	5	c	5	6	d	1,5	2	R	5	6
a	5	6															
b	4	5															
c	5	6															
d	1,5	2															
R	5	6															
2. Тиристор диодный		То же															
3. Тиристоры триодный и тетродный		""															
4. Транзистор		<table border="1"> <tr><td>D</td><td>12</td><td>14</td></tr> <tr><td>A*</td><td>9</td><td>11</td></tr> <tr><td>a</td><td>2,5</td><td>3,5</td></tr> <tr><td>b</td><td>3</td><td>4</td></tr> </table> <p>*A = 3/4 D</p>	D	12	14	A*	9	11	a	2,5	3,5	b	3	4			
D	12	14															
A*	9	11															
a	2,5	3,5															
b	3	4															
5. Затвор для полевых транзисторов		...															

Окончание табл. П2.2

Прибор	Обозначение	Размеры, мм						
6. Полевой транзистор с изолированным затвором обедненного типа с <i>p</i> -каналом		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>D</math></td> <td style="padding: 5px;">12</td> <td style="padding: 5px;">14</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>C</math></td> <td style="padding: 5px;">4</td> <td style="padding: 5px;">5</td> </tr> </table>	$D$	12	14	$C$	4	5
$D$	12	14						
$C$	4	5						
7. Полевой транзистор с внутренним соединением истока и подложки (обогащенный тип; <i>n</i> -канал)		То же						

### *Представление результатов в виде графиков*

Если изучается зависимость одной величины от другой, то результаты могут быть представлены в виде графика.

Основное достоинство графиков – их наглядность. Посмотрев на график, можно сразу, одним взглядом, оценить полученную зависимость, получить о ней качественное представление и отметить наличие различных особенностей: максимумов, минимумов, точек перегиба, областей наибольшей и наименьшей скорости изменения, периодичности и т.п. График позволяет также легко судить о соответствии экспериментальных данных той или иной теоретической зависимости и облегчает обработку измерений.

При вычерчивании графика руководствуются следующими правилами.

Выбор бумаги. График удобнее строить на миллиметровой бумаге или на бумаге со специальными координатными сетками. При выборе миллиметровой бумаги полезно обратить внимание на ее цвет: наименее утомителен для глаз желтый, более утомителен красный, очень неудобен синий. Старайтесь избегать миллиметровки, где выделены половины сантиметров.

Выбор координатных осей. Общепринято по оси абсцисс откладывать ту величину, изменения которой являются причиной изменения другой (т.е. по оси абсцисс – аргумент, по оси ординат – функцию). Не нарушайте этого правила без серьезных оснований.

Выбор масштабов. Масштаб графика определяется погрешностью измерения величин, отложенных по осям: погрешность должна представляться в выбранном масштабе отрезком достаточной длины, иначе график не отражает всех деталей эксперимента и не может быть использован для графической обработки данных без потери точности.

Шкала должна легко читаться, поэтому одна клетка масштабной сетки должна соответствовать удобному числу – 1; 2; 5; 10... (но не 3; 7; 1; 13; ...) единиц изображаемой на графике величины.

Исключение из этого правила допускается в следующем случае. Иногда бывает удобно откладывать на графике не сами значения интересующей нас величины, а пропорциональные им числа. Так, например, можно откладывать показания гальванометра, а не соответствующие им значения тока. (Такой прием используют, когда необходимо построить график до того, как определен переводной множитель, а также в тех случаях, когда хотят уменьшить число вычислений). В этих случаях по обычным правилам выбирается масштаб для той величины, которая откладывается непосредственно (в нашем примере – для показаний гальванометра). Затем определяют переводной множитель и наносят второй, а также целочисленный масштаб для интересующей нас величины (силы тока). Естественно, что деления второго масштаба уже не будут содержать целое число миллиметров.

Масштабы по обеим осям выбираются независимо друг от друга. Однако следует помнить, что график получается более наглядным, если основная часть кривой имеет наклон, не слишком отличающийся от  $45^\circ$ . В этом случае наиболее удобно анализировать форму кривой.

Если при выборе масштабов для обеих осей на основе величин погрешностей график получается слишком растянутым в каком-либо направлении, то это означает, что измерения соответствующей величины проведены с излишне высокой точностью. При таких условиях разумно несколько увеличить масштаб по оси, для которой точность измерений меньше, а затем выбрать масштаб для второй оси так, чтобы график имел удобную форму, уже не обращая внимания на величину погрешности.

Нанесение шкал по осям. Масштаб наносится на осях графика в виде равноотстоящих «круглых» чисел, например: 6; 8; 10; ... или 4,74; 4,76; 4,78; ... (чтобы не загромождать график, можно опускать целую часть числа: 4,74; ,76; ,78; ...). Не следует расставлять эти числа слишком часто – достаточно нанести их через 2 или даже через 5 см. Дополнительно указывать масштаб, как это делается на географических картах, не следует. На оси обязательно указываются обозначения и единицы измерения соответствующей величины. При этом

множитель, определяющий порядок величины, включается обычно в единицы измерения, например  $I$ , мА, или  $I$ ,  $10^{-3}$  А. Иногда применяется запись  $1 \cdot 10^3$ , А, но ее лучше избегать, так как она менее понятна.

Выбор интервала. На графике приводится только та область изменения измеренных величин, которая была исследована на опыте; не следует стремиться к тому, чтобы на графике обязательно поместилось начало координат (точка 0,0). Даже в том случае, когда требуется найти точку пересечения какой-либо прямой на графике с одной из координатных осей, нет необходимости, чтобы эта ось помещалась на графике; точку пересечения легко найти расчетом, пользуясь подобием треугольников. Начало координат помещают на графике только в том случае, когда требуется большое увеличение его размеров.

Следует помнить, однако, что иногда точка (0,0) есть результат измерения, причем часто - наиболее надежный результат.

Нанесение точек на график. Точки следует наносить на график очень тщательно и аккуратно, чтобы график получился возможно более точным. Это важно для дальнейшей графической обработки результатов.

На график наносят все полученные в измерении значения. Если одна точка измерялась несколько раз, можно нанести среднее или показать разброс.

Если на один и тот же график наносятся различные группы данных (результаты измерения разных величин, одной величины, но полученные в разных условиях или разными авторами, и т.п.), то точки, относящиеся к разным группам, должны быть помечены различными символами (кружками, треугольниками, звездочками и т.п.), чтобы их нельзя было спутать.

Выносные линии на графике, как правило, не проводят; научитесь наносить точки на график без их помощи. При рациональном выборе масштаба и правильной разметке шкал это совсем не трудно. Выносная линия может в виде исключения быть нанесена, только если какую-либо точку хотят особо выделить на графике (например положение максимума).

Изображение погрешности. Погрешность измерения изображают на графике с помощью крестиков соответствующих размеров, нанесенных поверх точек. Можно также указать погрешность размером точек. Для этого точки рисуют либо в виде эллипсов с длинной полуосью, равной в масштабе графике величине погрешности, либо в виде прямоугольников таких же размеров. Нет необходимости указывать погрешность для каждой точки, но если погрешность изменяется вдоль кривой, следует показать это на нескольких точках.

Проведение кривой по нанесенным точкам. Кривую на графике проводят плавно, избегая изломов и перегибов. Кривая должна проходить настолько близко ко всем нанесенным точкам, но ни в коем случае не следует стремиться провести ее через каждую точку; точки должны располагаться по обе стороны кривой. Излом на кривой можно рисовать только в том случае, если он не может быть объяснен погрешностью измерений и если при этом на его существование указывает большое число точек; кроме того, нужно быть уверенным в отсутствии систематических ошибок (изломы часто проявляются, например, когда сначала работают на одной шкале прибора, а затем переходят на другую). Помните, что всякая особенность кривой (излом, резкое изменение кривизны и прочее) требует либо специального экспериментального доказательства, либо теоретического объяснения.

Во всех случаях кривая должна быть проведена так, чтобы она не закрывала экспериментальных точек. Помните, что результата эксперимента – это точки, а кривая – это только Ваше толкование результата (и это толкование, вообще говоря, не однозначно). Прямую на графике проводят карандашом по линейке (удобна прозрачная линейка, позволяющая видеть все точки). Кривую проводят по экспериментальным точкам от руки – лекало не должно влиять на принятие ответственного решения о наилучшем ходе кривой или наличии разброса. Для последующей обводки кривой и проведения расчетных кривых, которые должны проходить строго через точки, следует использовать лекало.

Выбор наиболее наглядной зависимости. При построении графика нужно стремиться к тому, чтобы он наиболее четко отражал все особенности представляемой зависимости. Для этого часто бывают удобны функциональные масштабы: по осям откладывают не сами измеряемые величины, а из функции, подобранные в соответствии с решаемой задачей.

Пусть, например, изучается зависимость типа  $y = x$  (например, при проверке градуировки прибора  $y$  – измеряемое значение величины,  $x$  – показание прибора). Для наглядной иллюстрации этой зависимости вполне удобен график в координатах  $x, y$ . Для определения отклонений от градуировочной характеристики полезнее график зависимости  $y-x$  от  $x$  или от  $y$  (в частности, так строят графики поправок к показаниям приборов).

Если измеряемая величина изменяется очень сильно, на несколько порядков, удобно применять логарифмический (по осям откладывают логарифмы измеряемых величин) или полулогарифмический (логарифмы откладывают только по одной оси) масштаб. Надо помнить, однако, что логарифмический масштаб можно применять без потери точности, только если относительная погрешность постоянна для всей кривой.

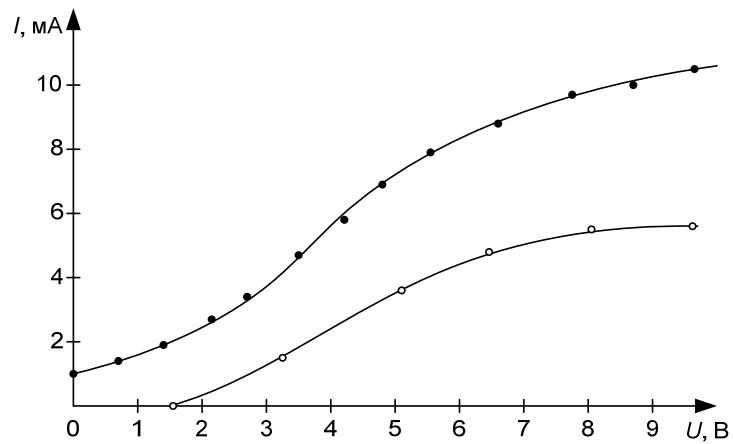
Функциональные масштабы очень полезны также при графической обработке данных.

При использовании функциональных масштабов на оси следует наносить двойную шкалу: одну равномерную для откладываемой по оси функции, а другую – неравномерную для самой исследуемой величины (но и на эту шкалу наносятся, как обычно, круглые числа).

Оформление графиков. Готовый график снабжается заголовком, который должен содержать точное описание того, что показывает график.

Разные группы точек (разные символы) или разные кривые на графике также должны быть объяснены. Эти объяснения приводятся в подписи к графику (внизу листа или на свободном, не занятом кривой месте на самом графике).

Пример построения графика приведен ниже.





## Библиографический список

1. *Быстров, Ю. А.* Электронные приборы и устройства на их основе : справ. кн. / Ю. А. Быстров [и др.]; под ред. Ю. А. Быстрова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : РадиоСофт, 2002. – 651 с. – ISBN 5-93037-08-6.
2. *Гусев, В. П.* Электроника : учеб. пособие для приборостроит. специальностей вузов / В. П. Гусев, Ю. М. Гусев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1991. - 622 с. - ISBN 5-06-000681-6.
3. *Иванов, В. И.* Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справочник / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 446 с. – ISBN 5-283-01473-8.
4. *Федосеева, Е. О.* Основы электроники и микроэлектроники : учебник / Е. О. Федосеева, Г. П. Федосеева. – М. : Искусство, 1990. – 240 с. – ISBN 5-21000243-8.
5. *Замятин, В. Я.* Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры : справочник / В. Я. Замятин, В. В. Кондратьев, В. М. Петухов. – М. : Радио и связь, 1988. – 576 с. – ISBN 5-256-00417-4.
6. *Мавричев, Ю. Г.* Основы электроники: Компоненты электронных схем и устройств : учеб. пособие / Ю. Г. Мавричев, К. В. Татмышевский; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1997. – 104 с. – ISBN 5-89368-028-6.
7. *Карлащук, В. И.* Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение / В. И. Карлащук. – М. : Солон-Р, 2001. – 726 с. – ISBN 5-93455-083-7.

Учебное издание

ТАТМЫШЕВСКИЙ Константин Вадимович  
МАКАРОВА Наталья Юрьевна

ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие

Подписано в печать 22.01.10.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 7,21. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.