

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Клочков Юрий Сергеевич
Должность: Ректор
Дата подписания: 02.10.2026 10:18:14
Уникальный программный идентификатор:
3beb265d5d589e7ff4c954946f3ad99a1e70ac12

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. А. Решетов, В. Ф. Сватов, А. Э. Сидорова

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 6FA44C50384686A8E7BD5E27735179BC
Владелец: Ефремова Вероника Васильевна
Действителен: с 14.06.2022 до 07.09.2023

Тюмень
ТИУ
2021

УДК 621.382(075.8)
ББК 32.85я73
Р 472

Рецензент:

доктор технических наук, заведующий кафедрой кибернетических систем
Тюменского индустриального университета О. Н. Кузяков

Решетов, А. А.

Р 472 Элементная база электронных устройств: учебное пособие /
А. А. Решетов, В. Ф. Сватов, А. Э. Сидорова. – Тюмень: ТИУ,
2021. – 110 с. – Текст: непосредственный.
ISBN 978-5-9961-2707-8

Учебное пособие содержит теоретические сведения о свойствах, физических явлениях в полупроводниковых структурах, конструкции, принципе действия, режимах работы, схемах включения, параметрах и характеристиках основных полупроводниковых приборов современной электронной техники. В приложении даны условные обозначения и информация по графическим обозначениям на принципиальных электрических схемах электронных устройств.

Структура пособия удобна для поиска нужного раздела, каждый из которых снабжен подробными контрольными вопросами. Всё это стимулирует обучающихся на самостоятельное овладение навыками профессиональных и общепрофессиональных компетенций.

Учебное пособие предназначено для обучающихся по направлению подготовки 27.03.04 Управление в технических системах, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 09.03.01 Автоматизированные системы обработки информации и управления, 12.03.04 Биотехнические системы и технологии для самостоятельного, методически грамотного изучения основ дисциплины «Электроника и цифровая схемотехника», «Элементная база электроники».

УДК 621.382(075.8)
ББК 32.85я73

ISBN 978-5-9961-2707-8

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный
университет», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	5
Введение.....	6
Список условных обозначений и сокращений.....	7
1. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ...	8
1.1 Особенности полупроводников и физические явления в них....	8
1.2 Процессы в электронно-дырочном переходе.....	10
1.2.1 ЭДП в состоянии равновесия.....	10
1.2.2 ЭДП в неравновесном состоянии.....	11
1.3 Вольт-амперная характеристика p - n -перехода. Виды пробоев...	12
1.4 Эквивалентная схема p - n -перехода.....	15
1.5 Контрольные вопросы.....	16
2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ.....	17
2.1 Классификация полупроводниковых диодов.....	17
2.2 Выпрямительные диоды.....	18
2.3 Опорные диоды.....	19
2.4 Варикапы.....	22
2.5 Туннельные диоды.....	23
2.6 Обращенные диоды.....	24
2.7 Импульсные диоды.....	25
2.8 Диоды Шоттки.....	26
2.9 Сверхвысокочастотные диоды.....	26
2.10 Контрольные вопросы.....	27
3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ.....	29
3.1 Назначение и структура биполярных транзисторов.....	29
3.2 Режимы работы и схемы включения биполярных транзисторов...	30
3.3 Принцип работы БТ в активном режиме.....	31
3.4 Обобщенная эквивалентная схема биполярного транзистора...	34
3.5 Статические характеристики биполярных транзисторов.....	35
3.5.1 Статические характеристики в схеме с общей базой.....	36
3.5.2 Статические характеристики в схеме с общим эмиттером.....	37
3.6 Биполярный транзистор как активный четырехполюсник.....	38
3.7 Определение h - параметров транзистора по статическим характеристикам.....	40
3.8 Эквивалентные схемы БТ в физических параметрах.....	42
3.9 Частотные свойства биполярных транзисторов.....	44
3.10 Динамический режим работы биполярного транзистора.....	46
3.11 Способы задания рабочего режима работы транзистора.....	48
3.12 Способы термостабилизации рабочего режима работы транзистора.....	50
3.13 Составные биполярные транзисторы.....	51
3.14 Классификация биполярных транзисторов.....	54
3.15 Контрольные вопросы.....	54

4.	ТИРИСТОРЫ.....	56
4.1	Структура и основные виды тиристоров.....	56
4.2	Динисторы.....	56
4.3	Триодные тиристоры.....	58
4.4	Симметричные тиристоры.....	61
4.5	Основные параметры тиристоров.....	62
4.6	Применение тиристоров.....	63
4.7	Контрольные вопросы.....	63
5.	ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ.....	64
5.1	Устройство и основные виды полевых транзисторов.....	64
5.2	Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом.....	64
5.3	Полевые транзисторы с изолированным затвором.....	67
5.3.1	Полевой транзистор с изолированным затвором со встроенным каналом.....	67
5.3.2	Полевой транзистор с индуцированным каналом.....	69
5.4	Схемы включения и основные параметры полевых транзисторов...	71
5.5	Эквивалентные схемы полевых транзисторов.....	72
5.6	Комбинированные транзисторы.....	73
5.7	Контрольные вопросы.....	76
6.	ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ.....	77
6.1	Фотоэлектрические приборы на основе внутреннего фотоэффекта.....	78
6.1.1	Фоторезисторы.....	78
6.1.2	Фотодиоды.....	81
6.1.3	Фототранзисторы.....	86
6.1.4	Фототиристоры.....	88
6.2	Светодиоды.....	89
6.3	Оптроны.....	94
6.3.1	Резисторные оптроны.....	95
6.3.2	Диодные оптроны.....	95
6.3.3	Транзисторные оптроны.....	97
6.3.4	Тиристорные оптроны.....	98
6.4	Контрольные вопросы.....	99
	Библиографический список литературы.....	100
	Приложение А.....	101

ПРЕДИСЛОВИЕ

Содержание учебного пособия составлено в соответствии с учебной программой и тематическим планом по дисциплинам «Электроника и цифровая схемотехника», «Элементная база электроники».

В учебном пособии изложены теоретические сведения о свойствах, физических явлениях в полупроводниковых структурах, конструкции, принципе действия, режимах работы, схемах включения, параметрах и характеристиках основных полупроводниковых приборов современной электронной техники. Материал учебного пособия изложен в такой последовательности и таком объеме, что каждая последующая глава является логическим продолжением предыдущих. Для закрепления изученного материала приведены контрольные вопросы. Все это способствует качественной подготовке и ускоряет процесс изучения дисциплин *«Электроника и цифровая схемотехника»*, *«Элементная база электроники»*.

В приложениях даны условные обозначения и информация по графическим обозначениям полупроводниковых приборов на принципиальных электрических схемах электронных устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Электроника – область науки и техники, изучающая физические явления в полупроводниках и электровакуумных приборах, электрические характеристики и параметры этих приборов, а также свойства устройств и систем с их использованием.

С точки зрения применения электронных приборов и устройств в настоящее время наибольшее развитие и распространение получила техническая электроника: аналоговая и цифровая.

На базе технической электроники разрабатываются и изготавливаются электронные устройства для решения самых различных задач в области получения, обработки, передачи, хранения и использования информации при управлении различными объектами и технологическими процессами. Поэтому знания в области электроники становятся необходимыми все более широкому кругу специалистов.

В курсах «Электроника и цифровая схемотехника», «Элементная база электроники» изучаются все основные полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы, тиристоры, оптоэлектронные приборы и др.), на базе которых строятся указанные узлы телекоммуникационных систем.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ВЗ – валентная зона.
ЗП – зона проводимости.
ЭДП – электронно-дырочный переход.
НЧ – низкие частоты (область низких частот).
СЧ – средние частоты (область средних частот).
СВЧ – сверх высокие частоты.
ВАХ – вольт-амперная характеристика.
БТ – биполярный транзистор.
Э – эмиттер.
Б – база.
К – коллектор.
ОБ – с общей базой.
ОЭ – с общим эмиттером.
ОК – с общим коллектором.
ЭП – эмиттерный переход.
КП – коллекторный переход.
А – анод.
К – катод.
УЭ – управляющий электрод.
SCR – Silicon Controlled Rectifier.
ПТ – полевой транзистор.
МДП – металл-диэлектрик-полупроводник.
МОП – металл-окисел-полупроводник.
И – исток.
С – сток.
З – затвор.
MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Transistor
ОИ – с общим истоком.
ОЗ – с общим затвором.
ОС – с общим стоком.
IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor.
ЭДС – электро-движущая сила.
ФД – фотодиод.
СИД – светоизлучающий диод.
КПД – коэффициент полезного действия.

1. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

1.1 Особенности полупроводников и физические явления в них

По своим электрическим свойствам вещества делятся на диэлектрики, проводники и полупроводники. Полупроводники имеют твердую кристаллическую структуру и по удельной электропроводимости ($10^4 - 10^{-10}$ См/см) занимают промежуточное положение между проводниками ($10^4 - 10^6$ См/см) и диэлектриками (10^{-10} См/см и меньше).

При изготовлении полупроводниковых приборов обычно используют кремний (Si – имеет рабочую температуру до 140°C), германий (Ge – наибольшая рабочая температура 75°C), арсенид галлия (GaAs – работает при температуре до $350-400^\circ\text{C}$). К полупроводникам также относят селен, индий, некоторые окислы, карбиды и сульфиды.

Двухмерное изображение кристаллической решетки четырех валентного кремния приведено на рисунке 1.1. Из рисунка 1.1(а) видно, что каждый атом окружен восемью валентными электронами. Четыре собственных валентных электрона атома вступают в ковалентные связи с четырьмя соседними атомами, образуя кристаллическую структуру.

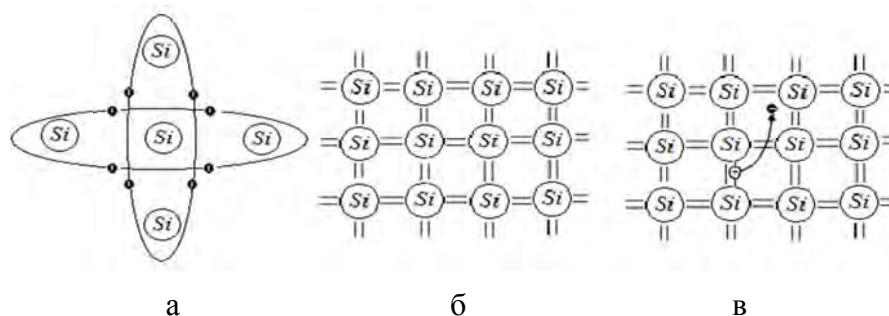


Рисунок 1.1 – Структура полупроводника:

а – ковалентная связь в кремнии;

б, в – двухмерное изображение кристаллической решетки при $T=0^0$ К и при $T > 0^0$ К

На рисунке 1.2 показаны энергетические диаграммы (при температуре 0^0 К) металлических проводников, полупроводников диэлектриков.

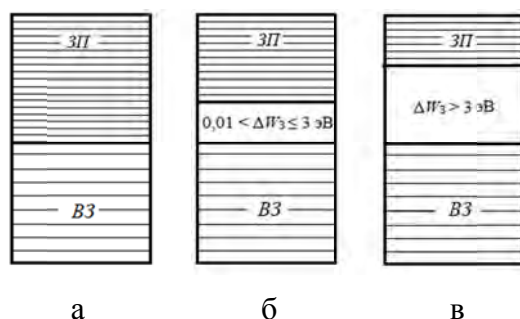


Рисунок 1.2 – Энергетические диаграммы металлических проводников (а), полупроводников (б), диэлектриков (в):

ВЗ – валентная зона; запрещенная зона шириной ΔW_3 ; ЗП – зона проводимости

Энергетические уровни валентных электронов при расщеплении образуют валентную зону. Энергетические уровни свободных электронов образуют зону проводимости. Область значений энергий, которыми не могут обладать электроны в идеальном кристалле, образуют запрещенную зону. Ширина запрещенной зоны ΔW_z , определяет энергию (в электрон-вольтах), которую нужно сообщить электрону, расположенному на верхнем энергетическом уровне валентной зоны, чтобы перевести его на нижний энергетический уровень зоны проводимости.

На рисунке 1.2 (в) показана ширина запрещенной зоны в диэлектриках, которая достигает $\Delta W_z \geq 3\text{эВ}$ и для ее преодоления требуется значительная энергия. Согласно рисунку 1.2 (б) полупроводники имеют более узкую ширину запрещенной зоны ($\Delta W_{\text{Ge}} \approx 0,72\text{эВ}$ – для германия; $\Delta W_{\text{Si}} \approx 1,12\text{эВ}$ – для кремния; $\Delta W_{\text{As}} \approx 1,43\text{эВ}$ – для арсенида галлия), которая может преодолеваться электронами за счет внешних энергетических воздействий. У металлических проводников, как показано на рисунке 1.2 (а), заполненная свободными электронами зона проводимости вплотную прилегает к валентной зоне, вследствие чего электроны в них свободны и могут переходить с уровней под влиянием слабой напряженности электрического поля, приложенного к проводнику.

Особенностью полупроводников является то, что их электропроводность сильно зависит от концентрации и вида примесей.

Примесные полупроводники кроме основных валентных атомов содержат в кристаллической решетке атомы других элементов с валентностью выше или ниже валентности основных. Процесс ввода примесей в полупроводник для изменения его электрофизических свойств называется легированием. В примесных полупроводниках концентрации электронов и дырок могут отличаться на много порядков.

Примеси бывают донорные, акцепторные и нейтральные.

Структура донорного полупроводника кремния с мышьяком в качестве примеси представлена на рисунке 1.3.

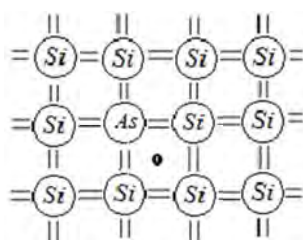


Рисунок 1.3 – Структура полупроводника n – типа

Мышьяк пентавалентен и четыре его валентных электрона вступают в ковалентные связи с четырьмя соседними атомами кремния, а пятый валентный электрон связан только с примесным атомом. Небольшая тепловая энергия вызывает отрыв этого электрона от атома примеси, и примесный электрон

становится свободным. Примеси (мышьяк As, фосфор P, сурьма Sb), вызывающие в полупроводнике увеличение концентрации свободных электронов, называются донорными. Полупроводник с преобладанием электронной проводимости называют полупроводником n-типа.

Для полупроводника n-типа основными носителями являются электроны и неосновными – дырки.

Полупроводник с преобладанием дырочной проводимости называют полупроводником p-типа. Для создания дырочных полупроводников необходимо наличие в них примеси с валентностью меньше валентности основного вещества. Такие примеси (бор B, индий In, алюминий Al) называются акцепторными.

Для полупроводника p-типа дырки являются основными носителями зарядов, а электроны – неосновными.

1.2 Процессы в электронно-дырочном переходе

Все полупроводниковые приборы содержат электрические переходы, образующиеся на стыке разного типа полупроводников или полупроводников и металлов. Наиболее часто в полупроводниковых приборах встречаются электронно-дырочные (ЭДП) или p-n-переходы.

ЭДП называют область на границе раздела двух полупроводниковых слоев с различными типами проводимости (электронной и дырочной). ЭДП возможны, как на основе полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны (гомопереходы), так и на основе полупроводников с разной шириной запрещенной зоны (гетеропереходы).

В полупроводниковых приборах используются несимметричные переходы, при которых концентрации примеси в одной из областей намного больше, чем в другой. При этом область с высокой концентрацией примесей называется эмиттером, а область с низкой концентрацией примесей – базой.

Физические процессы, происходящие в ЭДП, удобнее рассмотреть на примере симметричного p-n-перехода, хотя такой переход не является типичным для современных приборов.

1.2.1 ЭДП в состоянии равновесия

Состояние равновесия в ЭДП возникает при отсутствии внешнего электрического поля.

Процессы в p-n-переходе при отсутствии внешнего электрического поля рассмотрим с помощью рисунка. 1.4 (а).

Для симметричного p-n-перехода концентрация основных носителей в p- и n-областях одинакова. При объединении двух полупроводников с разными типами проводимости возникает диффузионное перемещение электронов из n-области в p-область и дырок в противоположном направлении. Такое движение зарядов создает диффузионный ток электронов - $I_{n \text{ диф}}$ и дырок - $I_{p \text{ диф}}$.

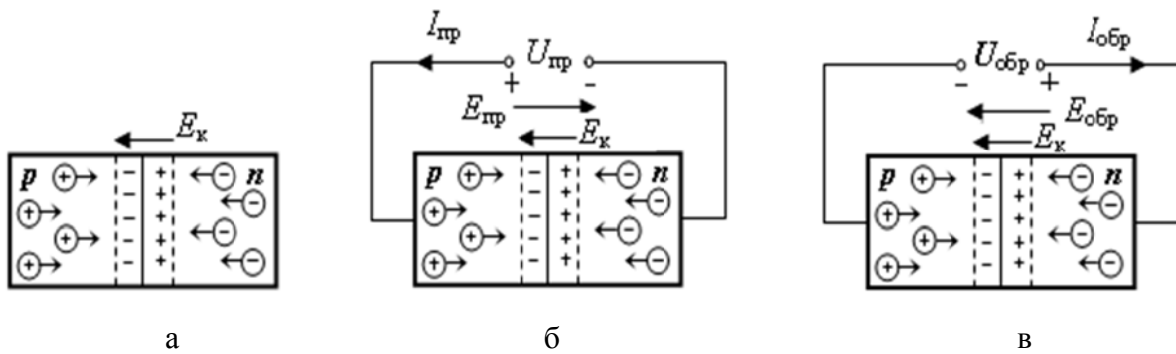


Рисунок 1.4 – Процессы в р-п-переходе

В результате диффузии носителей по обе стороны границы раздела двух полупроводников с различными типами проводимости образуются объемные заряды разных знаков. В приконтактной зоне полупроводника n-типа возникает положительный объемный заряд. Напротив, в зоне полупроводника p-типа, отрицательный объемный заряд. Между этими зарядами возникает внутреннее электрическое поле с напряженностью E_k и контактная разность потенциалов ϕ_k , которую называют потенциальным барьером. Электрическое поле E_k , является тормозящим для основных носителей зарядов и ускоряющим для неосновных носителей зарядов. Вследствие чего диффузия основных носителей через р-п-переход прекращается. На границе раздела полупроводников возникают также электронная - $I_{n\text{ др}}$ и дырочная - $I_{p\text{ др}}$ дрейфовые составляющие тока, тока неосновных носителей.

Таким образом, в установившемся режиме (в состоянии равновесия) через р-п-переход протекают четыре потока зарядов, которые уравнивают друг друга. Результирующий ток через р-п-переход при отсутствии внешнего электрического поля будет равен нулю:

$$I_{n\text{ диф}} + I_{p\text{ диф}} - I_{n\text{ др}} - I_{p\text{ др}} = 0.$$

1.2.2 ЭДП в неравновесном состоянии

Неравновесное состояние – это состояние р-п-перехода при наличии внешнего напряжения.

Рассмотрим поведение р-п-перехода при подключении к нему внешнего напряжения. Возможно прямое или обратное включение р-п-переходов.

При прямом включении р-п-перехода, как показано на рисунке 1.4 (б), к р-области подключают «плюс» источника внешнего напряжения $U_{пр}$, а к n-области – «минус». Внешнее электрическое поле $E_{пр}$ будет направлено навстречу внутреннему E_k , и результирующая напряженность $E_{рез} = E_{пр} - E_k$ уменьшается. Разность потенциалов на переходе составит $\phi_{пр} = \phi_k - U_{пр}$. Потенциальный барьер снижается, сопротивление р-п-перехода уменьшается и растет число носителей, которые могут преодолеть его. В этом случае через р-п-переход течет прямой ток:

$$I_{пр} = I_{диф} - I_{др} \approx I_{диф} > 0,$$

который обусловлен диффузионной составляющей тока и является большим по величине.

При обратном включении р-п-перехода, как показано на рисунке 1.4 (в), к р-п-переходу прикладывается внешнее напряжение $U_{обр}$. Минус источника напряжения прикладывается к р-области, а плюс – к п-области. При таком включении внешнее и внутреннее электрические поля в р-п-переходе направлены в одну сторону. В результате, напряженность результирующего тормозящего поля в р-п-переходе $E_{рез} = E_{обр} + E_k$ возрастет. Высота потенциального барьера $\phi_{обр} = \phi_k + U_{обр}$ и сопротивление р-п-перехода вырастут. Диффузионная составляющая тока $I_{диф}$ уменьшается, дрейфовая $I_{др}$ практически не меняется. Через р-п-переход протекает обратный ток:

$$I_{обр} = I_{диф} - I_{др} \approx -I_{др},$$

который определяется концентрацией неосновных носителей заряда и будет незначительный по величине.

Таким образом, р-п-переход обладает вентиляльным свойством, т.е. при прямом включении проводит ток, а при обратном – током можно пренебречь.

1.3 Вольт-амперная характеристика р-п-перехода. Виды пробоев

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п-перехода отражает зависимость тока I проходящего через переход от величины приложенного к нему напряжения U .

Различают теоретическую и реальную ВАХ р-п-перехода.

Аналитическая зависимость (теоретическая ВАХ) тока через р-п-переход, от величины приложенного напряжения определяется выражением:

$$I = I_0[\exp(U/\phi_T) - 1],$$

где I_0 – обратный ток насыщения идеального р-п-перехода;

$$\phi_T = \frac{kT}{q} \text{ – тепловой потенциал;}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл – заряд электрона;}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Кл – постоянная Больцмана;}$$

$$T \text{ – абсолютная температура, } ^\circ\text{К.}$$

При $T = 293^\circ\text{К} = 13^\circ\text{С}$ значение $\phi_T \approx 0,025 \text{ В}$. Выражение (1.1) принято называть уравнением Эберса-Молла.

Теоретическая и реальная ВАХ р-п-перехода показаны на рисунке 1.5.

ВАХ р-п-перехода не является прямой линией. Она имеет прямую и обратную ветви.

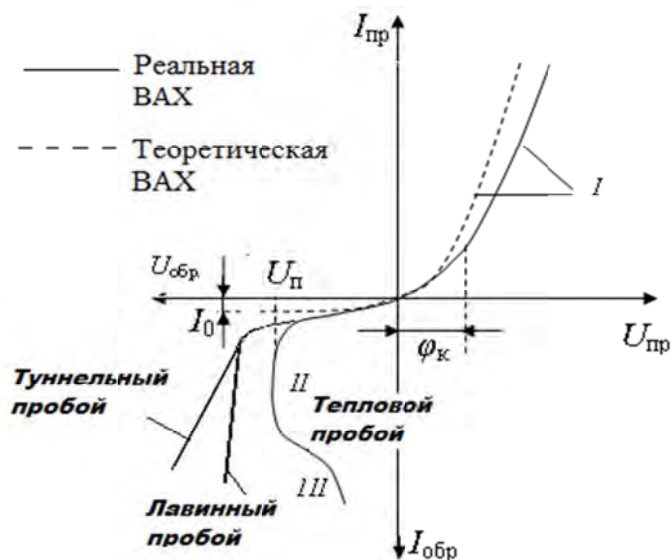


Рисунок 1.5 – Теоретическая и реальная ВАХ p-n-перехода

При прямом напряжении $U_{пр} > 0,1\text{В}$ можно пренебречь единицей ($e^4 \approx 54$), поэтому прямая ветвь ВАХ (ветвь I) описывается выражением:

$$I_{пр} = I_0 \exp \frac{U_{пр}}{\varphi_T} \gg I_0$$

Как только прямое напряжение достигнет величины $U_{пр} = \varphi_k$, запирающие свойства p-n-перехода исчезают и ток резко возрастает. Это характеризует состояние открытого p-n-перехода.

Величина φ_k зависит от материала полупроводника и его температуры. Для германия она составляет (0,4...0,6) В, для кремния – (0,6...0,8) В.

При обратном напряжении $U_{обр} < 0$, экспоненциальный член в уравнении становится малым ($e^{-4} \approx 0,02$) по сравнению с единицей, и обратная ветвь ВАХ описывается выражением $I_{обр} = -I_0$. Малая величина обратного тока ($I_{обр}$) характеризует состояние закрытого p-n-перехода.

На рисунке 1.5 видно, что обратный ток (I_0) идеального p-n-перехода не зависит от обратного напряжения, поэтому он называется током насыщения. Однако этот ток сильно зависит от температуры, поэтому чаще его называют тепловым током p-n-перехода. Поскольку тепловой ток создается неосновными носителями, то его значение также зависит от ширины запрещенной зоны: чем она больше, тем меньше ток. Если сравнить значение I_0 для идеальных кремниевого и германиевого p-n-переходов при одинаковых параметрах структур, то отношение составит 10^6 , что говорит в пользу кремния.

Таким образом, можно сделать вывод, что p-n-переход обладает свойством односторонней проводимости (вентильными свойствами). В прямом включении p-n-перехода его сопротивление значительно меньше, чем в обратном.

Реальная ВАХ р-n-перехода отличается от теоретической. Прямая ветвь ВАХ реального р-n-перехода смещается вправо относительно теоретической. При выводе экспоненциальной зависимости теоретической ВАХ допущены некоторые физические идеализации. Для реальных р-n-переходов нужно учитывать влияние объемного сопротивления базовой области r_b на ток. Также в реальных р-n-переходах при повышении обратного напряжения $U_{обр}$ обратный ток $I_{обр}$ не остается постоянным, равным току насыщения I_0 , а медленно растет. Одной из причин этого роста является рост скорости движения неосновных носителей заряда через переход, толщина которого тоже растет. При $U_{обр} = U_n$ скорость подвижных носителей такова, что их энергии хватает для возникновения в материале ударной ионизации – выбивания дополнительных носителей заряда. Вследствие этого происходит лавинообразный рост обратного тока. Это явление называют электрическим пробоем р-n-перехода, а U_n – напряжением пробоя.

Существует три вида пробоя р-n-перехода: туннельный, лавинный и тепловой.

Туннельный пробой возникает в узких р-n-переходах (порядка 0,01 мкм), если напряженность электрического поля в переходе составляет порядка $7 \cdot 10^5$ В/см, при очень высокой концентрации примесей в р- и n- областях (при 10^{18} см⁻³ и выше). Высокое значение напряженности поля, воздействуя на атомы кристаллической решетки, повышают энергию валентных электронов и приводят их туннельному “просачиванию” сквозь “тонкий” энергетический барьер из валентной зоны р- области в зону проводимости n- области.

Напряжение туннельного пробоя уменьшается с повышением температуры.

Лавинный пробой связан с ударной ионизацией р-n-перехода. Лавинный пробой развивается в широких р-n-переходах, чтобы внутри этого перехода произошло несколько процессов ударной ионизации. Поле р-n-перехода должно иметь большую электрическую напряженность порядка $(8 \dots 10) \cdot 10^4$ В/см, чтобы в области перехода произошло лавинное размножение свободных электронов. Количество носителей, уходящих с переход, оказывается больше носителей, поступивших в переход. Напряжение лавинного пробоя растет с повышением температуры.

Туннельный и лавинный пробои относят к восстанавливаемым (обратимым) электрическим пробоям. Если р-n-переход эффективно охлаждается, то электрический пробой протекает при неизменном напряжении. При снижении $U_{обр}$ запорные свойства р-n-перехода восстанавливаются (ветвь II ВАХ).

При неэффективном отводе тепла, температура структуры будет расти, увеличивается число тепловых генераций, что вызывает возрастание обратного тока и еще большее увеличение мощности, выделяемой в р-n-переходе. Электрический пробой перейдет в тепловой и тогда р-n-переход разрушается. Тепловой пробой необратим (ветвь III ВАХ).

1.4 Эквивалентная схема р-п-перехода

Эквивалентная схема р-п-перехода, представленная на рисунке 1.6, состоит из параллельно включенных сопротивления р-п-перехода R_{Π} (прямого или обратного) и емкости перехода C_{Π} . Последовательно к ним подключено объемное сопротивление r_s областей полупроводника, примыкающих к обеим сторонам обедненного слоя.

Различают сопротивления р-п-переходов для постоянных и переменных токов. Сопротивление р-п-перехода постоянному току в любой точке прямой ветви характеристики определяется законом Ома, как отношение прямого падения напряжения к прямому току: $R_0 = U_{\Pi P} / I_{\Pi P}$.

Сопротивление р-п-перехода переменному току называется дифференциальным и определяется в любой точке прямой ветви характеристики уравнением:

$$R_d = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = I_0 \cdot \frac{q}{kT} \cdot e^{\frac{qU_{\Pi P}}{kT}} = \frac{qI_{\Pi P}}{kT}; \quad R_d \approx \frac{26 \cdot 10^{-3}}{I_{\Pi P}}, [Ом]$$

где ΔU , ΔI – конечные приращения напряжения и тока вблизи рабочей точки.

В зависимости от того, на каком участке ВАХ находится рабочая точка, значение R_0 может быть меньше, равным или больше значения R_d .

Емкость р-п-перехода содержит два слагаемых: диффузионную и барьерную (или зарядную) емкости: $C_{\Pi} = C_{бар} + C_{диф}$.

Барьерная или зарядная емкость соответствует обратно включенному р-п-переходу, который рассматривается как обычный конденсатор. Значение барьерной емкости обычно определяется по формуле емкости плоского конденсатора:

$$C_{бар} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{L_{p-n}},$$

где $\epsilon \epsilon$ – относительная диэлектрическая проницаемость материала;

$\epsilon \epsilon_0$ – электрическая постоянная;

S – площадь р-п-перехода;

L_{p-n} – ширина р-п-перехода.

С ростом обратного напряжения, растет ширина р-п-перехода, а величина барьерной емкости уменьшается.

Зависимости барьерной емкости от величины приложенного обратного напряжения, выражается: $C_{бар} \approx \frac{C_{бар}(0)}{\sqrt{U_{обр} / \phi_k}}$, если $U_{обр} \gg \phi_k$.

График зависимости $C_{\text{бар}} = f(U_{\text{обр}})$ - называется вольт-фарадной характеристикой.

Барьерная емкость не зависит от частоты напряжения, вплоть до значения 10^{10} Гц, и она увеличивается с ростом температуры, за счет уменьшения высоты потенциального барьера.

Диффузионная емкость р-п-перехода проявляет себя при прямом включении и характеризуется изменением величины заряда, накапливаемого в обедненном слое за счет инжекции, при изменении прямого напряжения.

Расчеты показывают, что диффузионная емкость зависит от величины прямого тока $I_{\text{пр}}$ и времени жизни неравновесных носителей τ :

$$C_{\text{диф}} = \frac{\Delta Q_{\text{инж}}}{\Delta I_{\text{пр}}} = \frac{q}{kT} \cdot \tau \cdot I_{\text{пр}}.$$

Для снижения диффузионной емкости р- и п- области легируют нейтральными примесями (золотом, алюминием и т.д.), что снижает время жизни неравновесных носителей и накопление зарядов.

1.5 Контрольные вопросы

1. Чем отличаются полупроводники от диэлектриков и проводников с позиции зонной теории?
2. Как можно изменить проводимость полупроводников?
3. Чем отличается полупроводник р-типа от полупроводника п-типа?
4. Что такое р-п-переход?
5. Объясните причины возникновения потенциального барьера р-п-перехода.
6. Как зависит высота потенциального барьера р-п-перехода от величины и знака приложенного напряжения и от температуры?
7. Перечислите основные свойства р-п-перехода.
8. Чем отличается реальная ВАХ р-п-перехода от теоретической?
9. Дайте характеристику основным видам пробоя р-п-перехода.
10. Какие виды пробоя являются восстанавливаемыми?
11. Нарисуйте эквивалентную схему р-п-перехода и дайте характеристику составляющим схемы.

2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

2.1 Классификация полупроводниковых диодов

Полупроводниковый диод – это прибор с одним или несколькими электронно-дырочными переходами и двумя внешними выводами. Большинство диодов имеют один электрический переход и только диносторы имеют три перехода.

Диоды классифицируются по следующим признакам:

- 1) По роду исходного материала:
 - германиевые;
 - кремниевые;
 - арсенидо-галлиевые.
- 2) По технологии изготовления и формы перехода:
 - точечные;
 - плоскостные;
 - сплавные;
 - диффузионные;
 - планарные;
 - меза-диоды.
- 3) По диапазону рабочих частот:
 - низкочастотные (НЧ);
 - высокочастотные (ВЧ);
 - сверхвысокочастотные (СВЧ).
- 4) по назначению:
 - выпрямительные;
 - опорные;
 - варикапы;
 - импульсные;
 - туннельные;
 - обращенные;
 - фотодиоды;
 - светодиоды.

Для точечных и микросплавных диодов ширина перехода больше его периметра, а для плоскостных – наоборот. Точечные диоды имеют небольшие прямые токи, малую емкость р-п-перехода, поэтому применяются, как детекторные, импульсные и СВЧ диоды. В плоскостных диодах ЭДП изготавливают методом сплавления в исходный материал (германия Ge, кремния Si и др.) другого материала (индия In, фосфора P, сурьмы Sb и др.) или диффузии.

Современным методом создания полупроводниковых приборов из кремния является планарная технология, основу которой составляет метод фотолитографии.

2.2 Выпрямительные диоды

Выпрямительные диоды служат для преобразования переменного тока в пульсирующий ток одного направления (постоянный) и используются в источниках вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры.

По функциональному назначению полупроводниковые диоды подразделяются на выпрямительные и специальные. Выпрямительные диоды используют вентильные свойства р-п-перехода (односторонняя проводимость) и применяют в выпрямителях переменного тока. Специальные типы диодов (стабилитроны, варикапы, туннельные и др.) используют иные свойства р-п-перехода, как: явление пробоя, барьерной емкости, отрицательного дифференциального сопротивления и др.

Структура и схемное обозначение диода, приведены на рисунке 2.1.

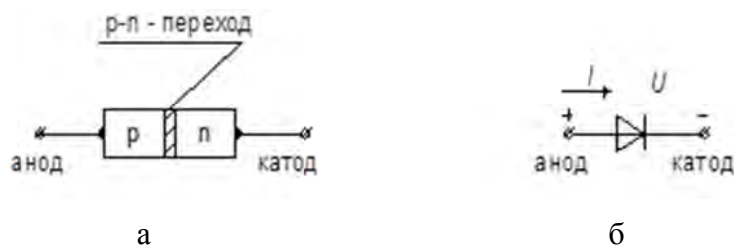


Рисунок 2.1 – Структура диода (а) и его схемное обозначение (б)

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

- $I_{\text{ПР max}}$ – максимальный прямой ток, который может протекать через диод при допустимом его нагреве;
- $U_{\text{ПР}}$ – прямое напряжение диода при заданном значении прямого тока ($U_{\text{ПР}} \approx 0,3 \dots 0,7 \text{ В}$ – для Ge; $U_{\text{ПР}} \approx 0,8 \dots 1,7 \text{ В}$ – для Si.);
- $U_{\text{ОБР max}}$ – максимальное значение обратного напряжения (обычно составляющее 80% пробивного напряжения диода);
- $I_{\text{ОБР max}}$ – обратный ток при максимальном значении обратного напряжения на диоде;
- P_{max} – максимально допустимая мощность рассеивания на диоде;
- $R_0 = U/I$ – статическое сопротивление (сопротивление постоянному току);
- $R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ – дифференциальное сопротивление (сопротивление переменному току);
- Δf – диапазон частот, в пределах которого выпрямленный ток не уменьшается ниже заданного.

В зависимости от значения прямого тока выпрямительные диоды подразделяются на три группы:

- маломощные $I_{\text{ПР}} \leq 0,3 \text{ А}$;
- среднемощные $0,3 < I_{\text{ПР}} \leq 10 \text{ А}$;
- мощные $I_{\text{ПР}} > 10 \text{ А}$.

ВАХ низкочастотного германиевого (Ge) и кремниевого (Si) диодов приведены на рисунке 2.2.

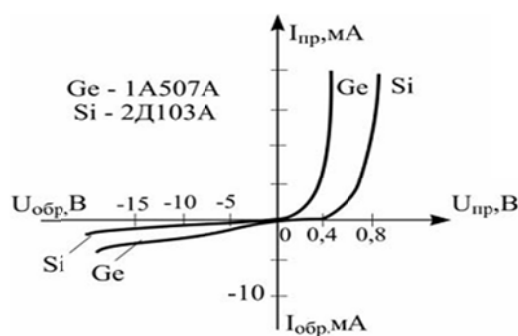


Рисунок 2.2 – ВАХ выпрямительных диодов

ВАХ выпрямительного кремниевого диода соответствует характеристике реального p-n-перехода.

Сравнительная характеристика основных параметров германиевого и кремниевого диодов приведена в таблице 1.

Таблица 2.1

Материал	$U_{пр}, В$	$U_{обр\ max}, В$, не более	$f_{max},$ кГц	$\Delta T, ^\circ C$	$I_{обр\ Si} / I_{обр\ Ge}$	Тип пробоя
Si	0,6...0,8	1000...1500	100	-60...+150	10^{-2}	Лавинный
Ge	0,3...0,4	100...400	50	-60...+80	1	Тепловой

Выпрямительные диоды применяются в схемах выпрямления переменного тока в качестве электронного (диодного) ключа, управляемого приложенным напряжением.

2.3 Опорные диоды

Опорный диод – это прибор, предназначенный для стабилизации напряжения на параллельно присоединенной к нему нагрузке в случае изменения этой нагрузки или значения напряжения питания.

Опорные диоды подразделяются на стабилитроны и стабисторы.

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, на вольт-амперной характеристике которого имеется участок со слабой зависимостью напряжения от протекающего тока.

В стабилитроне используется свойство электрического пробоя p-n-перехода при включении диода в обратном направлении.

Низковольтные стабилитроны выполняют на основе сильно легированного кремния. Ширина p-n-перехода в этом случае получается очень маленькой, а напряженность электрического поля потенциального барьера – очень большой, что создает условия для возникновения туннельного пробоя.

При большой ширине р-n-перехода пробой носит лавинный характер. При напряжении стабилизации от 3 до 6 В в р-n-переходах наблюдается практически туннельный пробой. В диапазоне от 6 до 8 В имеют место процессы как туннельного, так и лавинного пробоя, а в пределах 8...200 В – только лавинного.

Конструкции стабилитронов очень незначительно, а в некоторых случаях практически не отличаются от конструкций выпрямительных диодов. На рисунке 2.3 приведена ВАХ стабилитрона и его условное обозначение на принципиальных схемах.

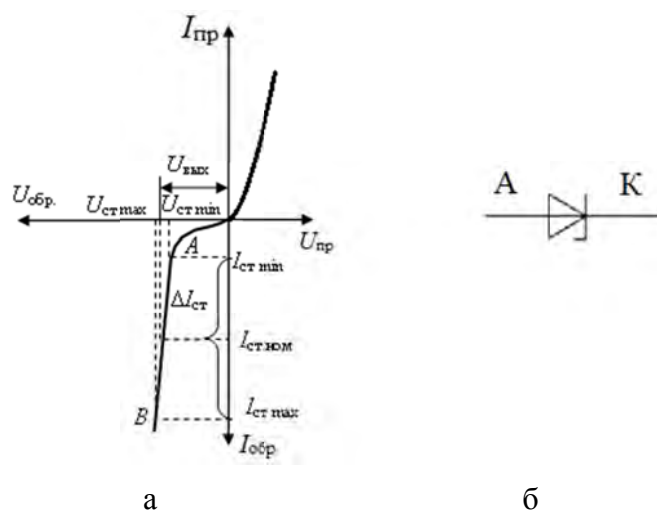


Рисунок 2.3 – ВАХ стабилитрона (а) и его обозначение (б)

Рабочим участком стабилитрона является обратная ветвь ВАХ. На ней точками А и В показаны границы рабочего участка. Как видно из рисунка 2.4 (а), при повышении обратного напряжения происходит резкий рост обратного тока. Для конкретного определения напряжения стабилизации $U_{ст}$, следует задаться необходимой величиной рабочего тока $I_{ст}$. На участке пробоя стабилитрона малому приращению напряжения $\Delta U = U_{ст max} - U_{ст min}$ соответствует большое изменение тока $\Delta I = I_{ст max} - I_{ст min}$. Чем меньше величина изменения напряжения ΔU , тем выше качество стабилизации. Это свойство и позволяет использовать стабилитрон в качестве стабилизатора напряжения, в источниках опорного напряжения, в качестве ограничителей напряжения и др. Если обратный ток стабилитрона не превышает значение $I_{ст max}$, то электрический пробой не переходит в тепловой и диод не пробивается.

Стабилитроны характеризуются следующими параметрами:

- напряжением стабилизации $U_{ст}$ – значением напряжения на стабилитроне при протекании номинального тока стабилизации $I_{ст ном}$;
- допустимым отклонением напряжения стабилизации от номинального значения, определяемого при номинальном токе стабилизации и выражается абсолютным или относительным значением $[(\Delta U_{ст ном} / U_{ст}) \cdot 100\%]$;
- максимально допустимой мощностью рассеяния P_{max} , при которой обеспечивается заданная надежность;

- минимально допустимым током стабилизации $I_{ст.мин}$, при токах, меньших $I_{ст.мин}$, пробой становится неустойчивым и не обеспечивается заданная надежность работы;

- максимально допустимым током стабилизации $I_{ст.макс}$, при котором обеспечивается заданная надежность; величина этого тока определяется максимально допустимой мощностью рассеяния $P_{макс}$;

- дифференциальным сопротивлением стабилитрона $r_{ст} = \frac{dU_{ст}}{dI_{ст}}$, то есть отношением приращения напряжения стабилизации к приращению тока;

- статическое сопротивление стабилитрона в рабочей точке $R_{ст} = \frac{U_{ст}}{I_{ст}}$.

- температурным коэффициентом напряжения стабилизации (ТКН) $\alpha_{ст}$, который определяется отношением относительного изменения напряжения стабилизации ($\Delta U_{ст} / U_{ст}$) к абсолютному изменению температуры окружающей среды ($\Delta T_{сред}$) на 1 °С:

$$\alpha_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T_{сред}}.$$

Значения этого параметра у разных стабилитронов различны.

Зависимость ТКН от напряжения стабилизации стабилитронов показана на рисунке 2.4.

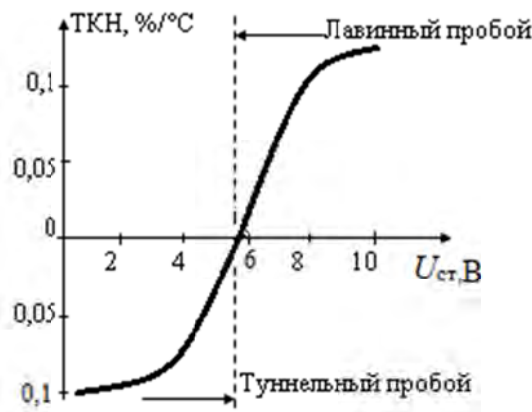


Рисунок 2.4 – Зависимость ТКН от напряжения стабилизации

При напряжениях стабилизации $U_{ст} < 6$ В в р-п-переходах наблюдается туннельный пробой, а при $U_{ст} > 6$ В – лавинный. Стабилитроны с $U_{ст} \approx 6$ В имеют минимальные изменения напряжения стабилизации и называются прецизионными (высокоточными).

Для стабилизации небольших напряжений (< 1 В) используют прямую ветвь ВАХ, предназначенные для этого диоды называются стабисторами.

2.4 Варикапы

Варикапы – это специально сконструированные полупроводниковые диоды, барьерная емкость запертого р-п-перехода которых зависит от величины приложенного к диоду обратного напряжения.

Варикап это есть электрически управляемая емкость. Основной характеристикой варикапа является вольт-фарадная характеристика - $C_{бар} = f(U_{обр})$, отображающая зависимость барьерной емкости диода от обратного напряжения, которое называют напряжением смещения.

Эта зависимость определяется видом р-п-перехода и аналитически описывается выражением:

$$C_{бар} = \frac{C(0)}{(1 + U_{обр} / \varphi_k)^n},$$

где $n=1/2$ – для резкого р-п-перехода; $n=1/3$ – для плавного р-п-перехода; $n=1$ – для специального р-п-перехода; $C(0)$ – емкость при $U=0$.

Диоды с электрически управляемой емкостью для умножения частоты называются умножительными диодами (варакторами), а предназначенные для параметрического усиления – параметрическими.

Вольт-фарадная характеристика и эквивалентная схема варикапа приведены на рисунке 2.5.

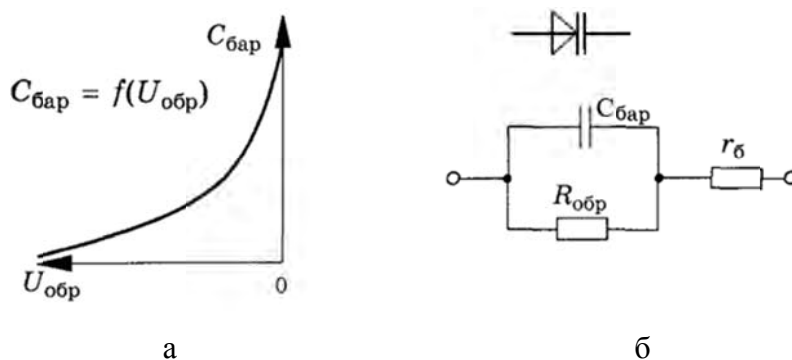


Рисунок 2.5 – Вольт-фарадная характеристика (а) и эквивалентная схема варикапа (б)

Основными параметрами варикапов являются:

- максимальная емкость C_{max} при минимальном напряжении смещения;
- минимальная C_{min} при максимальном напряжении смещения;
- номинальная емкость $C_{ном}$ при номинальном напряжении смещения;
- коэффициент перекрытия по емкости $K_c = C_{max} / C_{min}$;
- добротность варикапа Q определяемая отношением реактивного сопротивления к активному на заданной частоте при номинальном напряжении;
- допустимое обратное напряжение U_{max} ;

- температурный коэффициент емкости (ТКЕ) α – относительное изменение ёмкости варикапа, приходящееся на один градус изменения температуры окружающей среды: $\alpha = \frac{\Delta C}{C \cdot \Delta T}$.

Варикапы в основном применяются на высоких и сверхвысоких частотах, для автоматической подстройки частоты, в малошумящих параметрических усилителях, в схемах умножения частоты, в приемниках с электронной перестройкой колебательного контура и др.

2.5 Туннельные диоды

Туннельный диод – это полупроводниковый диод, изготовленный на основе вырожденного полупроводника, т.е. полупроводника с высокой концентрацией примесей.

Из-за высокой концентрации примесей ширина обедненного слоя р-п-перехода туннельных диодов очень мала (0,01 мкм...0,02 мкм) по сравнению с обычными диодами (0,1 мкм). Электроны, имеющие энергии меньше, чем высота энергетического барьера, туннелируют сквозь этот «тонкий» барьер без изменения своей энергии. Поэтому, уже при небольших $U_{пр}$ (около 0,1...0,2 В) появляется ток (единицы мА), который при увеличении напряжения вначале возрастает и достигает максимального значения, а затем уменьшается. При дальнейшем увеличении $U_{пр}$ прямой ток увеличивается. В результате получаем по виду N – образную ВАХ, на прямой ветви которой имеется падающий участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

ВАХ туннельного диода и схема генератора на туннельном диоде приведены на рисунке 2.6.

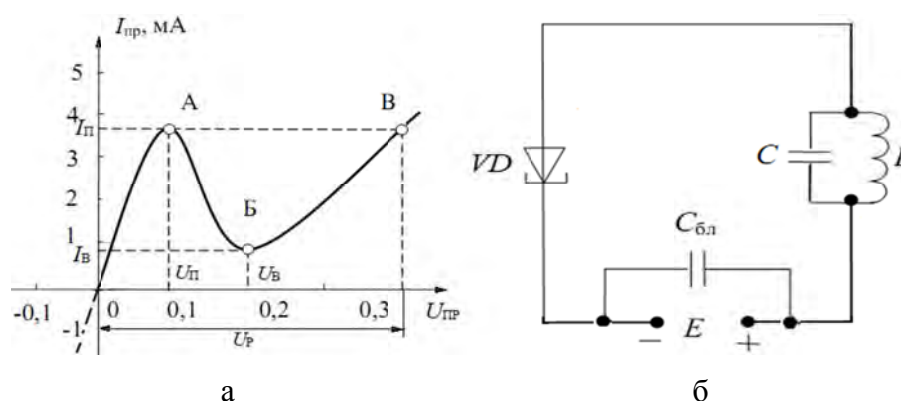


Рисунок 2.6 – ВАХ туннельного диода (а) и схема генератора на туннельном диоде (б)

При обратном включении туннельного диода величина тока значительно превышает обратный ток обычных полупроводниковых диодов. Это явление можно считать туннельным пробоем.

Туннельные диоды работают при малых напряжениях (десятые доли вольта) и относительно небольших токах (единицы миллиампер) на частотах до 10^{11} Гц.

Основные параметры диодов:

- пиковый ток I_{Π} (доли миллиампер до сотен миллиампер);
- ток впадины $I_{\text{В}}$;
- отношение пикового тока к току впадины $I_{\Pi} / I_{\text{В}}$ (для арсенид-галлиевых диодов отношение > 10 , а для германиевых $\approx 3 \dots 6$);
- напряжение пика U_{Π} , т.е. прямое напряжение, соответствующее I_{Π} (для арсенид-галлиевых диодов $U_{\Pi} \approx 100 \dots 150$ мВ, для германиевых $U_{\Pi} \approx 40 \dots 60$ мВ);
- напряжение впадины $U_{\text{В}}$, т.е. прямое напряжение, соответствующее $I_{\text{В}}$ (для арсенид-галлиевых диодов $U_{\text{В}} \approx 400 \dots 500$ мВ, для германиевых $U_{\text{В}} \approx 250 \dots 350$ мВ);
- напряжение раствора $U_{\text{Р}}$, т.е. напряжение, соответствующее пиковому току на второй восходящей ветви ВАХ.

К достоинствам туннельных диодов относят высокие рабочие частоты (вплоть до СВЧ), низкий уровень шумов, высокая радиационная стойкость, температурная устойчивость, большая плотность тока.

К недостаткам туннельных диодов следует отнести малую отдаваемую мощность из-за низких рабочих напряжений и сильную электрическую связь между входом и выходом, что затрудняет их применение.

Применяются туннельные диоды в качестве сверхскоростных переключателей, а также в схемах маломощных усилителей, преобразователей и генераторов электрических колебаний.

2.6 Обращенные диоды

Полупроводниковый диод, изготовленный из материала с концентрацией примесей в р- и n- областях меньших, чем в туннельных диодах, но больших, чем в обычных, имеет своеобразную ВАХ, показанную на рисунке 2.7. Эта характеристика является обращенной по отношению к характеристике обычных диодов, откуда и пошло название диодов – обращенные. Такой диод является разновидностью туннельных диодов, т.к. обратная ветвь ВАХ обращенного диода такая же, как у туннельного.

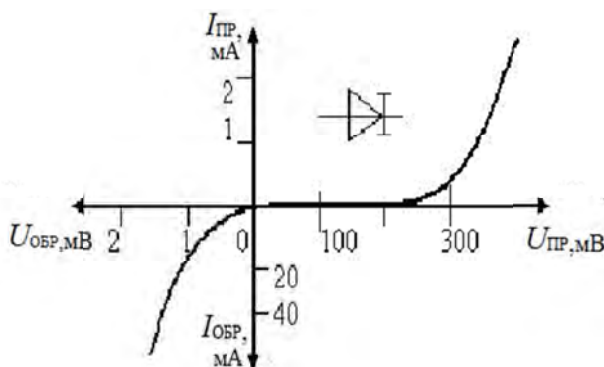


Рисунок 2.7 – ВАХ обращенного диода

Прямой ток структуры возникает только при повышенных по сравнению с туннельными диодами напряжениях за счет инжекции носителей. При малых прямых напряжениях (десятых долей вольта) прямые токи в обращенных диодах намного меньше обратных.

Обращенные диоды, как и туннельные диоды, целесообразно использовать в быстродействующих переключающих схемах (время переключения менее 1 нс) или в схемах СВЧ детекторов для выпрямления малых переменных сигналов, составляющих несколько десятых долей вольта. Включаются диоды в обратном направлении. Обращенные диоды мало чувствительны к воздействиям проникающей радиации.

2.7 Импульсные диоды

Импульсные диоды – это полупроводниковые диоды, имеющие малую длительность переходных процессов и используемые в цепях с быстрым переключением тока и напряжения.

Импульсные диоды, как правило, имеют меза-структуру, и представлены на рисунке 2.8.

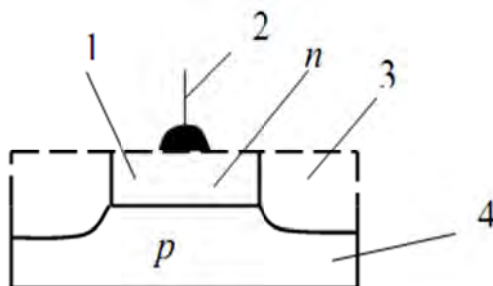


Рисунок 2.8 – Устройство меза-диода:

- 1 - слой с электропроводностью n-типа, полученный диффузией;
- 2 - вывод от n- области; 3 - участок, удаленный травлением;
- 4 - основная пластинка полупроводника p-типа

Особенностью работы импульсных диодов является быстрое протекание процессов накопления и рассасывания носителей при больших уровнях мощности переключающего сигнала.

Статические параметры у импульсных диодов такие же, как и у низкочастотных.

Основными параметрами являются:

- время восстановления обратного сопротивления $\tau_{\text{вост}}$;
- максимальное прямое импульсное напряжение $U_{\text{ПР max}}$;
- максимальный прямой импульсный ток $I_{\text{ПР max}}$;
- максимальный обратный импульсный ток $I_{\text{ОБР max}}$.

Еще большим быстродействием обладают диоды Шоттки.

2.8 Диоды Шоттки

Диоды Шоттки – это полупроводниковые приборы, на основе структуры металл-полупроводник. Условное обозначения диода Шоттки на электрических принципиальных схемах показано на рисунке 2.9.

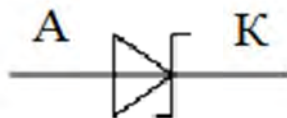


Рисунок 2.9 – Условное обозначения диода Шоттки

Такой электрический переход обладает рядом особенных свойств (отличных от свойств полупроводникового р-п-перехода). К ним относятся пониженное падение напряжения при прямом включении, работа только на основных носителях (отсутствуют обратные токи), а их быстродействие определяется только барьерной емкостью. В диодах Шоттки предельная частота значительно выше, чем у диодов на р-п-переходах. Это достигается как за счет технологии изготовления диодов, так и выбором оптимальной конструкции. Диоды Шоттки изготавливаются обычно на основе кремния или арсенида-галлия, реже – на основе германия. Выбор металла для контакта с полупроводником определяет многие параметры диода. В первую очередь важна величина контактной разности потенциалов, образующаяся на границе контакта. Чаще всего используются металлы серебро Ag, золото Au, платина Pt, палладий Pd, вольфрам W, которые наносятся на полупроводник.

Высокочастотные импульсные диоды Шоттки имеют площадь перехода меньше 20-30 мкм², емкость – не больше 1 пФ, очень малое сопротивление базы. Длительность переключения у них – доли наносекунды, а граничная частота – десятки ГГц.

Мощные диоды Шоттки имеют большую площадь перехода, токи в них достигают десятки ампер, обратные напряжения – 500 В. Благодаря меньшему прямому напряжению (0,3 В вместо 0,7 В) мощные металл-полупроводниковые диоды обеспечивают больший КПД, особенно в низковольтных выпрямителях. Эффективно применение диодов Шоттки на повышенных частотах (тысячи и десятки тысяч герц).

2.9 СВЧ-высокочастотные диоды

В диапазоне СВЧ (> 300 МГц) диоды должны обладать малыми значениями реактивных параметров: собственной емкостью и индуктивностью. В настоящее время р-п-переходы для диодов СВЧ получают по планарной технологии, используя диффузионные методы, а также применяя переходы с меза-структурой. По своему назначению диоды СВЧ подразделяются на детекторные, переключательные, преобразовательные, параметрические и генераторные.

Детекторные диоды предназначены для детектирования сигналов СВЧ. Под детектированием понимают процесс выделения из модулированного напряжения сигнала более низкой частоты, по закону которого была осуществлена модуляция высокочастотного сигнала. В качестве детекторных применяются в основном точечно-контактные диоды и диоды с переходом Шоттки. Главным параметром, определяющим характеристики детектора, является крутизна ВАХ в окрестности рабочей точки. Выходное напряжение детектора должно быть прямо пропорционально мощности сигнала СВЧ (квадрату входного напряжения). Прямая ветвь ВАХ детекторных диодов должна быть квадратичной - $I = f(U^2)$, что дает возможность по величине измеряемого тока определять СВЧ мощность, подаваемую на диод.

Переключательные диоды – предназначены для переключения мощности, проходящей по СВЧ тракту, за счет изменения сопротивления диода при подаче на него прямого или обратного напряжений. При прямом смещении диод обладает малым дифференциальным сопротивлением, а при обратном смещении – значительным. Основное требование к такому диоду – минимальная индуктивность выводов, а также емкость диода. Преобразовательные диоды – могут быть смесительными, умножительными, модуляторными. Для этих целей используется нелинейность вольт-амперной характеристики диода.

Смесительные диоды при подаче сигналов различных частот позволяют получить разностную (промежуточную) частоту.

Умножительные диоды предназначены для получения n -й гармоники основного сигнала. Они характеризуются мощностью какой-либо гармоники при заданном значении мощности основной.

Модуляторные диоды позволяют получить модулированные колебания.

2.10 Контрольные вопросы

1. Какое основное свойство р-п-перехода используется в выпрямительных диодах?
2. Какое аналитическое выражение ВАХ диода?
3. Почему обратный ток диода практически не зависит от обратного напряжения?
4. Назовите и поясните основные параметры выпрямительного диода.
5. Для каких целей применяются стабилитроны и как они включаются в схему?
6. Изобразите ВАХ стабилитрона. Укажите рабочий участок на обратной ветви ВАХ стабилитрона. Какие физические процессы происходят в стабилитроне на этом участке ВАХ?
7. Можно ли использовать для целей стабилизации прямую ветвь стабилитрона?

8. На ВАХ стабилитрона показать электрические параметры и пояснить их физический смысл.

9. Как определяют температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН)?

10. Зависит ли знак ТКН от вида пробоя в стабилитроне?

11. Приведите схему параметрического стабилизатора напряжения и объясните ее работу.

12. Начертите основную характеристику варикапа и поясните ее.

13. Начертите ВАХ туннельного диода поясните главную ее особенность.

14. Какие диоды называются обращенными и почему?

15. Какие параметры импульсных диодов являются основными и что они характеризуют?

16. Какими положительными качествами обладают диоды Шоттки и почему?

3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

3.1 Назначение и структура биполярных транзисторов

Биполярным транзистором (БТ) называется трехэлектродный полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими электронно-дырочными переходами, предназначенный для усиления электрических сигналов. Усилительные свойства БТ обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. В БТ используются одновременно два типа носителей заряда - электроны и дырки (поэтому и название - биполярный).

Конструктивно БТ представляют собой пластину полупроводника, на которой созданы три области с чередующимися типами проводимости. В зависимости от порядка чередования этих областей различают транзисторы прямой проводимости - n - p - n типа, структурная схема и условное обозначение на принципиальных схемах которого показаны на рисунке 3.1, и обратной проводимости - p - n - p типа, структурная схема и условное обозначение на принципиальных схемах которого показаны на рисунке 3.2.

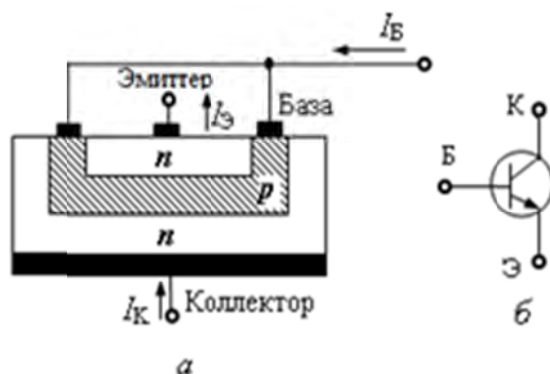


Рисунок 3.1 – Биполярный транзистор n - p - n типа, (а) – структура, (б) – обозначение на схемах

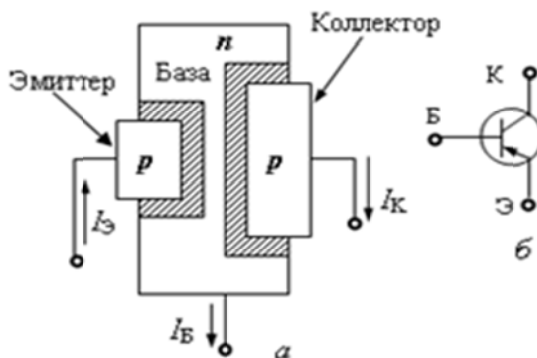


Рисунок 3.2 – Биполярный транзистор p - n - p типа, (а) – структура, (б) – обозначение на схемах

Одну из крайних областей, которую используют в режиме инжекции, называют эмиттером, а р-п-переход, примыкающей к эмиттеру, – эмиттерным. Промежуточная область, в которую инжектируются неосновные носители, называют базой. Вторую крайнюю область – коллектором, а переход – коллекторным. Концентрация примесей в базе всегда значительно меньше, чем в коллекторе и эмиттере.

Важными условиями работы БТ являются:

- очень малая ширина базовой области (единицы, мкм);
- площадь коллекторного перехода всегда больше площади эмиттерного;
- область эмиттера должна обладать более высокой электропроводностью (соответственно и концентрация основных носителей в эмиттере выше, чем в базе), чем база и коллектор.

3.2 Режимы работы и схемы включения биполярных транзисторов

При работе транзистора к его электродам прикладываются напряжения внешних источников питания. В зависимости от полярности напряжений, прикладываемых к электродам, каждый из р-п-переходов транзистора может быть включен в прямом или обратном направлении.

Различают следующие четыре режима работы биполярного транзистора:

- Активный режим – на эмиттерный переход подается прямое напряжение, а на коллекторный – обратное;
- Инверсный режим – к коллекторному переходу подается прямое напряжение, а к эмиттерному – обратное;
- Режим насыщения – оба перехода находятся под прямым напряжением;
- Режим отсечки – к обоим переходам подводятся обратные напряжения.

Активный режим работы биполярного транзистора является основным режимом в усилителях мощности и генераторах электрических колебаний.

Инверсный режим работы биполярного транзистора приводит к значительному уменьшению коэффициента передачи тока эмиттера и поэтому на практике применяется очень редко.

В режиме отсечки оба р-п-перехода включены в обратном направлении. В электродах транзистора протекают минимальные тепловые токи обратно включенных переходов, участок Э – К имеет высокоомное состояние. Режим отсечки реализуется при работе транзистора в ключевых схемах и соответствует его закрытому состоянию.

В режиме насыщения оба р-п-перехода включены в прямом направлении, переходы насыщены подвижными носителями заряда, их сопротивления малы. Участок Э – К имеет высокую проводимость и может считаться короткозамкнутым. Этот режим называется также режимом двойной инжекции. Используется режим насыщения в ключевых схемах и соответствует открытому состоянию транзистора.

Режимы отсечки и насыщения используются в импульсных и цифровых устройствах.

На рисунке 3.3 показаны схемы транзисторов в зависимости от их схемы включения.

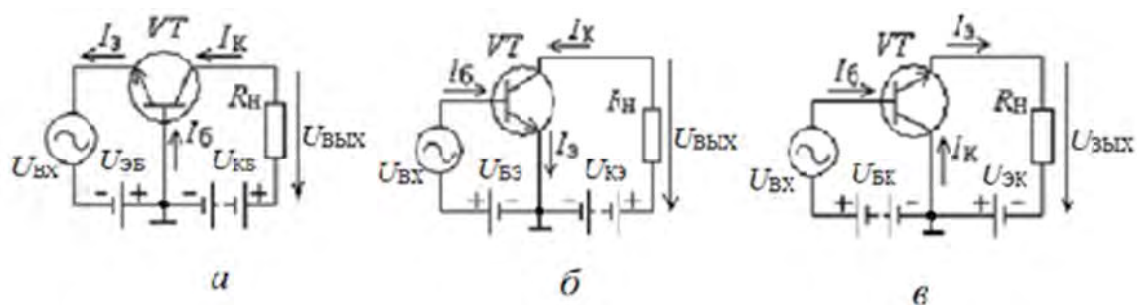


Рисунок 3.3 – Схемы включения биполярного транзистора: с общей базой (а); с общим эмиттером (б); с общим коллектором (в)

В зависимости от того, какой из трех электродов транзистора является общим для входной и выходной цепей, как это показано на рисунке 3.3, различают три схемы включения транзисторов: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

3.3 Принцип работы биполярного транзистора в активном режиме

Рассмотрим физические процессы в биполярном транзисторе типа р-п-р в активном режиме при его включении по схеме с ОБ, приведенном на рисунке 3.4.

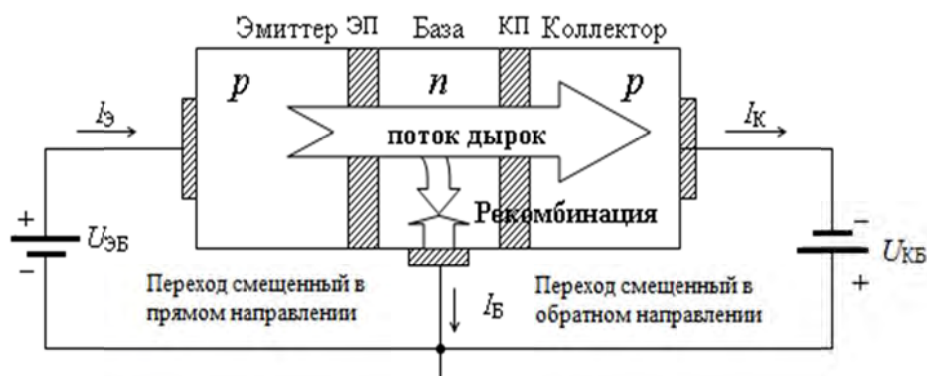


Рисунок 3.4 – Потоки дырок и электронов в БТ типа р-п-р в активном режиме

При подключении к эмиттерному переходу прямого напряжения компенсируется внутреннее поле эмиттерного перехода и уменьшается контактная разность потенциалов. Это приводит к возникновению инжекции дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер. Инжекция основных носителей обуславливает прохождение через эмиттерный переход диффузионных токов. Таким образом, ток эмиттера I_3 будет равен сумме дырочной I_{3p} и электронной I_{3n} составляющих: $I_3 = I_{3p} + I_{3n}$.

Электронная составляющая тока эмиттера $I_{Эн}$ замыкается исключительно во входной цепи через источник напряжения $U_{ЭБ}$, не участвует в образовании коллекторного тока, а значит является бесполезной.

Диффузия дырок в базу сопровождается их рекомбинацией с электронами. На место рекомбинированных электронов в базу из внешней цепи источника $U_{ЭБ}$ поступают другие электроны, создавая ток базы рекомбинации $I_{Брек}$. Дырки, инжектированные эмиттером в базу и достигшие зоны обратно включенного коллекторного перехода, попадают в его ускоряющее поле и перебрасываются (экстрагируются) в область коллектора. Создается управляемая часть тока коллектора – $I_{Кр}$, пропорциональная току эмиттера $I_{Э}$.

Связь между коллекторным и эмиттерным токами выражается в этом случае формулой:

$$I_{Кр} = \alpha I_{Э},$$

где α – интегральный (статический) коэффициент передачи тока эмиттера в цепь коллектора (в схеме с ОБ), который достигает значения 0,95 – 0,9995, но не превышает единицы. Возможность управлять выходным током транзистора изменением входного тока является важным свойством биполярного транзистора, как активного элемента электронных схем.

Кроме управляемой части коллекторного тока $I_{Кр}$, в электроде коллектора протекает неуправляемая часть тока – $I_{КБ0}$, обратный (тепловой) ток обратно включенного коллекторного перехода. Направление обратного тока коллектора $I_{КБ0}$ совпадает с направлением управляемой части коллекторного тока и поэтому: $I_{К} = I_{Кр} + I_{КБ0} = \alpha I_{Э} + I_{КБ0}$.

Согласно первому закону Кирхгофа, между токами электродов биполярного транзистора всегда существует соотношение:

$$I_{Э} = I_{К} + I_{Б},$$

где $I_{Б} = I_{Брек} + I_{Бп} - I_{КБ0}$ – ток в цепи базы.

Поскольку коэффициент передачи тока $\alpha < 1$, то токи в цепях эмиттера и коллектора ($I_{Э} \approx I_{К}$) практически равны, следовательно, в схеме включения транзистора с ОБ не обеспечивается усиление по току.

Однако, т.к. в цепь коллектора можно включать резисторы с большими сопротивлениями, а обратное напряжение, приложенное к коллекторному переходу – $U_{КБ}$, значительно больше напряжения прямо включенного эмиттерного перехода – $U_{ЭБ}$, то усиление в транзисторе по напряжению и по мощности может быть значительным.

Аналогичные процессы происходят и в транзисторе типа n-p-n, приведенном на рисунке 3.5, но в нем меняются ролями электроны и дырки, а также изменяются полярности напряжений и направления протекания токов. Хорошим усилением по току обладают схемы с ОЭ и с ОК (на рисунке 3.3, б,в), где управляющим током становится ток базы.

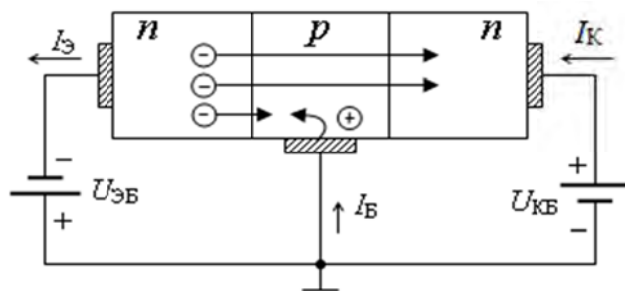


Рисунок 3.5 – Потоки электронов и дырок в БТ типа n-p-n в активном режиме

В схеме включения транзистора с ОЭ общим электродом является эмиттер. Очевидно, что:

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{Б}}; I_{\text{вых}} = I_{\text{К}}; U_{\text{вых}} = U_{\text{КЭ}}; U_{\text{вх}} = U_{\text{БЭ}}.$$

Тогда, уравнение тока коллектора переписывается в следующем виде:

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ0}} = \alpha (I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}) + I_{\text{КБ0}}.$$

Решив уравнение относительно $I_{\text{К}}$, получим:

$$I_{\text{К}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_{\text{Б}} + \frac{1}{1 - \alpha} I_{\text{КБ0}} = \beta \cdot I_{\text{Б}} + I_{\text{КЭ0}},$$

где $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ – коэффициент передачи тока базы в схеме ОЭ;

$(1 + \beta) \cdot I_{\text{КБ0}} = I_{\text{КЭ0}}$ – сквозной ток эмиттера или неуправляемая часть тока коллектора в схеме с ОЭ.

Поскольку, $\alpha \approx 1$ и, следовательно $(1 - \alpha)$ мало, то становится очевидным, что $\beta \gg 1$ велико и обычно находится в пределах от десятков до сотен. Это означает, что в схеме включения транзистора с ОЭ имеется значительное усиление тока. Если известен коэффициент β , то всегда можно определить $\alpha = \beta / (1 + \beta)$.

Таким образом, при включении транзистора по схеме с ОЭ наблюдается усиление по току, по напряжению и по мощности.

Для схемы включения транзистора с ОК выходным током является ток эмиттера. Поэтому:

$$I_{\text{Э}} = \frac{1}{1 - \alpha} I_{\text{Б}} + \frac{1}{1 - \alpha} I_{\text{КБ0}} = \beta \cdot I_{\text{Б}} + (1 + \beta) \cdot I_{\text{КБ0}}.$$

Из формулы следует, что включение транзистора по схеме с ОК обеспечивает усиление по току.

3.4 Обобщенная эквивалентная схема биполярного транзистора

При компьютерном моделировании электронных схем, содержащих транзисторы, широкое применение получили эквивалентные схемы транзистора, отображающие процессы в нем.

Связи между токами и напряжениями в биполярном транзисторе для четырех режимов включения хорошо согласуются с эквивалентной схемой, что приведена на рисунке 3.6, называемую нелинейной моделью Эберса-Молла.

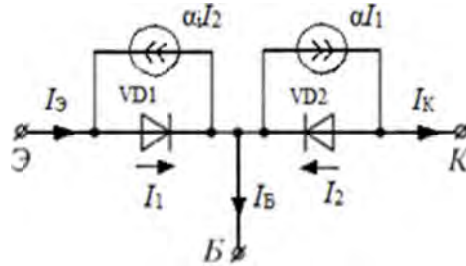


Рисунок 3.6 – Эквивалентная нелинейная модель Эберса-Молла для БТ

Представленная модель характеризует только активную область биполярного транзистора (без соответствующих резисторов в электродах) p-n-p типа.

Эквивалентная схема БТ состоит из двух диодов (эмиттерного и коллекторного), включенных встречно, и двух управляемых источников тока αI_1 и $\alpha_i I_2$, отображающих взаимодействие этих диодов. Каждый переход одновременно инжектирует носители в базу и собирает носители, дошедшие от другого перехода. Поэтому токи электродов $I_Э$ и $I_К$ включают в себя два компонента: ток, протекающий непосредственно через данный диод (инжектируемый, или собственный компонент), и ток, получаемый от другого диода (транзитный или собираемый компонент).

В соответствии с первым законом Кирхгофа для эмиттерного и коллекторного токов можно записать:

$$I_Э = I_1 - \alpha_i I_2;$$

$$I_К = \alpha \cdot I_1 - I_2;$$

Собственные токи диодов можно аппроксимировать выражениями:

$$I_1 = I_{Э0} \cdot [\exp(U_{ЭБ}/\varphi_T) - 1];$$

$$I_2 = I_{К0} \cdot [\exp(U_{КБ}/\varphi_T) - 1].$$

Здесь $I_{Э0} = I_{ЭБ0} / (1 - \alpha \cdot \alpha_i)$ и $I_{К0} = I_{КБ0} / (1 - \alpha \cdot \alpha_i)$ – соответственно тепловые токи эмиттерного и коллекторного переходов, протекающие при коротком замыкании на выходе ($U_{КБ}=0$) или входе ($U_{ЭБ}=0$) соответственно, где $I_{ЭБ0}$ и $I_{КБ0}$ – обратные токи эмиттерного и коллекторного переходов, измеряемые соответственно при обрыве коллектора ($I_К=0$) или эмиттера ($I_Э=0$).

Параметр α (коэффициент передачи тока эмиттера в коллектор в схеме ОБ) и источник тока $\alpha \cdot I_1$ отображают передачу тока эмиттера в коллектор при нормальном включении БТ. Аналогично, параметр α_i (коэффициент передачи тока коллектора в эмиттер при инверсном включении БТ в схеме ОБ) и источник тока $\alpha_i I_2$ – передачу тока коллектора (при инверсном режиме) в эмиттер. Зависимость тока эмиттера от тока коллектора в инверсном режиме определяется формулой: $I_{\text{Э}} = \alpha_i I_{\text{К}} + I_{\text{ЭБ0}}$, где $\alpha_i = \Delta I_{\text{Э}} / \Delta I_{\text{К}}$ – инверсный коэффициент передачи тока. Инверсный коэффициент передачи тока α_i меньше прямого ($\alpha_i < \alpha$), поскольку, площадь эмиттерного перехода меньше площади коллекторного перехода. Для БТ действителен принцип взаимности, выражаемый формулой:

$$\alpha_i I_{\text{КБ0}} = \alpha I_{\text{ЭБ0}}.$$

Из которого следует, что БТ представляет собой обратимый прибор, т.е. коллектор и эмиттер в нем можно поменять местами, сохранив при этом работоспособность прибора. Подставив в формулы для $I_{\text{Э}}$ и $I_{\text{К}}$ собственные токи диодов, получим формулы для полных токов электродов транзистора (формулы Эверса-Молла):

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Э0}} \cdot [\exp(U_{\text{ЭБ}}/\varphi_{\text{T}}) - 1] - \alpha_i I_{\text{К0}} \cdot [\exp(U_{\text{КБ}}/\varphi_{\text{T}}) - 1];$$

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э0}} \cdot [\exp(U_{\text{ЭБ}}/\varphi_{\text{T}}) - 1] - I_{\text{К0}} \cdot [\exp(U_{\text{КБ}}/\varphi_{\text{T}}) - 1];$$

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}.$$

На основании формул Эверса-Молла (математической модели) можно определить токи электродов в биполярном транзисторе для любого его режима работы. Рассмотренная выше физическая модель биполярного транзистора – модель Эверса-Молла, по своей сути нелинейная и обычно применяется для анализа работы транзисторных схем при больших изменениях напряжения и тока.

3.5 Статические характеристики биполярных транзисторов

Статические характеристики транзисторов показывают функциональные связи между постоянными токами и напряжениями электродов транзисторов. Для каждой схемы включения в активном режиме работы транзистора существуют свои семейства статических характеристик.

Основными статистическими характеристиками биполярного транзистора являются:

- входные характеристики – $I_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, отражают зависимость входного тока транзистора от входного напряжения при $U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$;
- выходные характеристики – $I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}})$, отражают зависимость выходного тока транзистора от выходного напряжения при $I_{\text{ВХ}} = \text{const}$.

3.5.1 Статические характеристики в схеме с общей базой

При включении БТ по схеме с ОБ, схема приведена на рисунке 3.7, управляющее (входное) напряжение прикладывается к участку эмиттер-база, а выходное напряжение снимается с участка коллектор-база. Входным током является ток эмиттера, а выходным – ток коллектора. Для схемы включения с ОБ можно записать: $I_{\text{вх}} = I_{\text{э}}$; $U_{\text{вх}} = U_{\text{эб}}$; $I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}$; $U_{\text{вых}} = U_{\text{кб}}$.

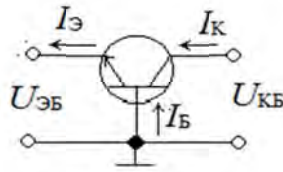


Рисунок 3.7 – Включение БТ по схеме ОБ

Входные характеристики транзистора в схеме с ОБ приведены на рисунке 3.8, (а) и выражаются зависимостью $I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}})$, при $U_{\text{кб}} = \text{const}$.

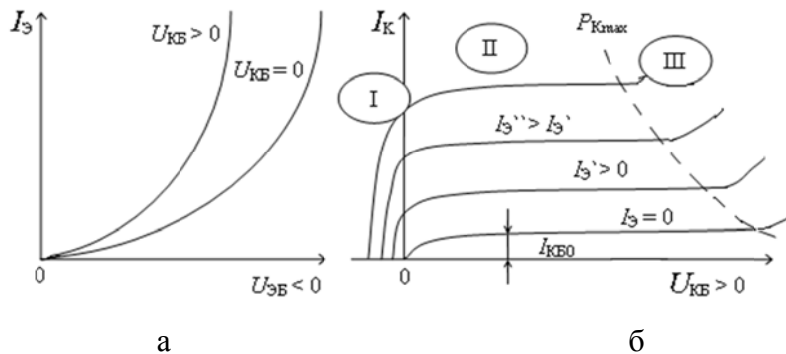


Рисунок 3.8 – ВАХ транзистора, включенного по схеме с ОБ: входные (а); выходные (б)

В активном режиме работы транзистора с увеличением прямого напряжения $U_{\text{эб}}$ снижается потенциальный барьер в эмиттерном переходе, увеличивается инжекция носителей $I_{\text{эн}}$ и $I_{\text{эр}}$ через переход, поэтому ток эмиттера растет. При $U_{\text{кб}} = 0$ входная характеристика идентична прямой ветви ВАХ p-n-перехода. При подаче положительного коллекторного напряжения $U_{\text{кб}} > 0$ увеличивается ширина коллекторного перехода, следовательно, уменьшается ширина базы, вследствие чего увеличивается $I_{\text{э}}$ и характеристика смещается влево.

Выходные характеристики транзистора в схеме с ОБ приведены на рисунке 3.8, (б) и выражаются зависимостью $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}})$, при $I_{\text{э}} = \text{const}$.

Область характеристик транзистора при $U_{\text{кб}} > 0$ соответствует активному режиму, где $I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{кб0}}$. Так как $\alpha \approx 1$, а $I_{\text{кб0}} \approx 0$, то $I_{\text{к}} \approx I_{\text{э}}$.

В активном режиме $I_{\text{к}}$ практически не зависит от $U_{\text{кб}}$, поскольку коллекторный переход смещен в обратном направлении и пропускает только неосновные носители, число которых в базе зависит от тока эмиттера.

При $I_Э = 0$ характеристика проходит через начало координат (без тока эмиттера при $U_{КБ} = 0$ не может быть и коллекторного тока). Если теперь увеличивать обратное напряжение на коллекторе, то в его цепи появится $I_{КБ0}$.

Идеальные выходные (коллекторные) характеристики должны быть параллельны оси коллекторных напряжений. Зависимость же между токами $I_К$ и $I_Э$ почти линейная. Поэтому выходные характеристики при одинаковом изменении тока $\Delta I_Э$ смещаются на одинаковое расстояние.

При изменении знака напряжения $U_{КБ}$ уже при небольших его значениях ток коллектора резко уменьшается.

Выходные характеристики имеют три характерные области: I – сильная зависимость $I_К$ от $U_{КБ}$, где оба перехода транзистора открыты и наблюдается режим насыщения тока; II – слабая зависимость $I_К$ от $U_{КБ}$, где возможен активный (усилительный) режим работы транзистора; III – при больших напряжениях $U_{КБ}$ значение $I_К$ резко возрастает и наступает пробой коллекторного перехода. На семействе выходных характеристик БТ изображена кривая (прерывистая) максимально допустимой мощности рассеяния коллектором $P_{Кmax}$. Она ограничивает значение $I_К$ и $U_{КБ}$ областью разрешенных режимов работы транзистора, которые лежат ниже кривой $P_{Кmax}$.

3.5.2 Статические характеристики в схеме с общим эмиттером

Для схемы включения транзистора с ОЭ, приведенной на рисунке 3.9, можно записать: $I_{ВХ} = I_Б$; $U_{ВХ} = U_{БЭ}$; $I_{ВЫХ} = I_К$; $U_{ВЫХ} = U_{КЭ}$.

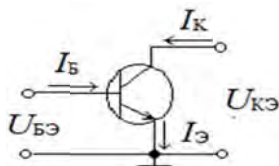


Рисунок 3.9 – Включение БТ по схеме ОЭ

Входные и выходные ВАХ транзистора n-р-п типа, включенного по схеме с ОЭ, показаны на рисунке 3.10.

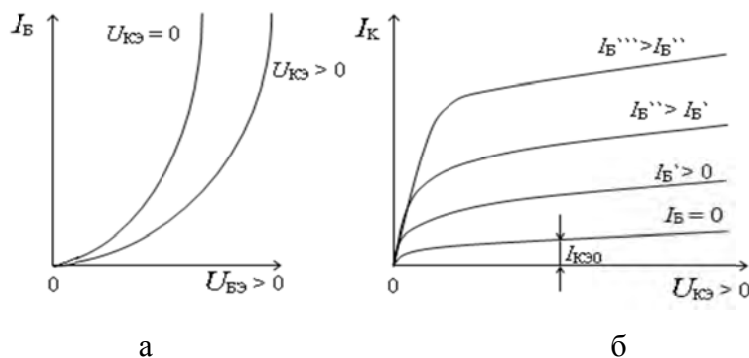


Рисунок 3.10 – ВАХ транзистора, включенного по схеме с ОЭ: входные (а); выходные (б)

Входные характеристики транзистора в схеме с ОЭ, показанные на рисунке 3.10 (а), представляют собой зависимость тока базы I_B от напряжения $U_{БЭ}$ при постоянном напряжении $U_{КЭ}$, т.е. $I_B = f(U_{БЭ})$, при $U_{КЭ} = \text{const}$.

При $U_{КЭ} = 0$ и $U_{БЭ} > 0$ оба перехода смещены в прямом направлении, транзистор работает в режиме насыщения и электроны инжектируются в базу, как из эмиттера, так и из коллектора. Поэтому при заданном напряжении $U_{БЭ}$ ток базы, определяемый инжекцией дырок из базы в коллектор и эмиттер, а также рекомбинацией электронов в базе, имеет наибольшее значение. При увеличении $U_{КЭ}$ транзистор переходит в активный режим работы и ток базы I_B уменьшается т.к. прекращается инжекция дырок из базы в коллектор. Дальнейшее повышение $U_{КЭ}$ уменьшает толщину базы, а, следовательно и входной ток I_B .

Выходные характеристики транзистора в схеме с ОЭ, показанные на рисунке 3.10 (б) представляют собой зависимость коллекторного тока I_K от напряжения $U_{КЭ}$ при постоянном токе базы I_B , т.е. $I_K = f(U_{КЭ})$, при $I_B = \text{const}$.

Выходные характеристики транзистора в схеме с ОЭ имеют заметный угол наклона. На этом участке ток коллектора зависит только от тока базы:

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta) I_{КБ0} = \beta I_B + I_{КЭ0}.$$

В схеме с ОЭ при разомкнутой входной цепи ($I_B = 0$) через транзистор протекает сквозной ток эмиттера $I_{КЭ0}$ в $(1 + \beta)$ раз больше обратного тока коллектора $I_{КБ0}$. Это объясняется прямым включением эмиттерного перехода за счет коллекторного напряжения.

Небольшой рост тока коллектора I_K при увеличении напряжения $U_{КЭ}$ объясняется уменьшением толщины базы.

Поскольку в схеме с ОК $I_Э \approx I_K$, то для анализа и расчета схемы, можно использовать семейство статических характеристик схемы с ОЭ.

3.6 Биполярный транзистор как активный четырехполюсник

При малых изменениях уровней входных сигналов, которые не изменяют состояние переходов транзистора, установленные соответствующим постоянным напряжением, транзистор можно рассматривать активным линейным четырехполюсником.

Активным четырехполюсником называют цепь, состоящую из пассивных элементов (R, C, L) и эквивалентных генераторов ЭДС или токов, имеющую две пары выводов. Одну из них считают входной, другую – выходной. Входной паре выводов соответствует ток I_1 , напряжение U_1 . Выходной паре выводов соответствует ток I_2 , напряжение U_2 . БТ, представленный в виде четырехполюсника показан на рисунке 3.11.

Связь между входными (U_1, I_1) и выходными (U_2, I_2) токами и напряжениями четырехполюсника можно описывать с помощью различных систем параметров – Y, Z, H , в зависимости от того, какие величины принять за независимые.

На практике, для описания свойств биполярного транзистора, как четырехполюсника, наиболее удобна система h – параметров и соответствующая им система уравнений:

$$U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2;$$

$$I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2,$$

Аргументами здесь являются входной ток I_1 и выходное напряжение U_2 .

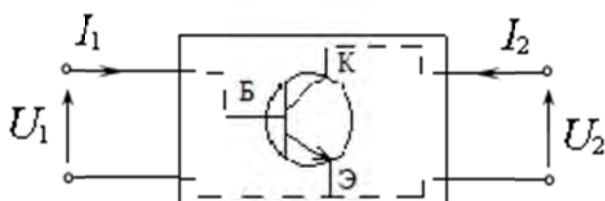


Рисунок 3.11 – Представление транзистора в виде активного четырехполюсника

Коэффициенты в этих уравнениях, которые называют h – параметрами, имеют определенный физический смысл:

- $h_{11} = \frac{U_1}{I_1}$ при $U_2 = 0$ – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе;

- $h_{12} = \frac{U_1}{U_2}$ при $I_1 = 0$ – коэффициент внутренней обратной связи по напряжению при холостом ходе на входе;

- $h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$ при $U_2 = 0$ – коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе;

- $h_{22} = \frac{I_2}{U_2}$ при $I_1 = 0$ – выходная проводимость при холостом ходе на входе.

Система уравнений и эквивалентная схема транзистора в системе h – параметров, представленная на рисунке 3.12, могут быть конкретизированы в зависимости от схемы включения транзистора.

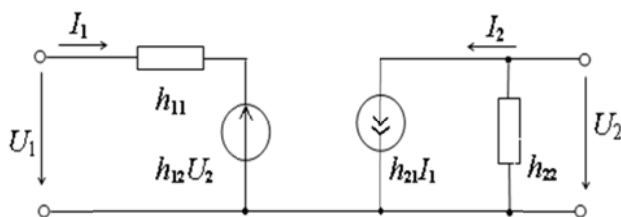


Рисунок 3.12 – Эквивалентная схема транзистора с h – параметрами

Достоинством системы h – параметров является простота их измерения на низких частотах, поэтому в справочниках низкочастотные параметры транзисторов приводятся в системе h – параметров.

3.7 Определение h – параметров транзистора по статическим характеристикам

Величина h – параметров зависит от схемы включения транзистора и их определяют графоаналитическим методом по входным и выходным характеристикам. Рассмотрим порядок определения h – параметров при включении транзистора по схеме с ОЭ. Для схемы с ОЭ, зависимые переменные $\Delta U_{БЭ}$ и ΔI_K можно выразить через независимые, следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\Delta U_{БЭ} &= h_{11Э} \Delta I_B + h_{12Э} \Delta U_{КЭ}, \\ \Delta I_K &= h_{21Э} \Delta I_B + h_{22Э} \Delta U_{КЭ}\end{aligned}$$

Здесь малые амплитуды переменных токов и напряжений заменены их конечными приращениями. На основе приведенных уравнений можно построить эквивалентную схему транзистора в системе h – параметров при включении с ОЭ.

Для определения h – параметров транзистора графоаналитическим методом, воспользуемся семейством входных и выходных характеристик транзистора для схемы с ОЭ, представленных на рисунке 3.13. В семействе должно быть, не менее двух характеристик.

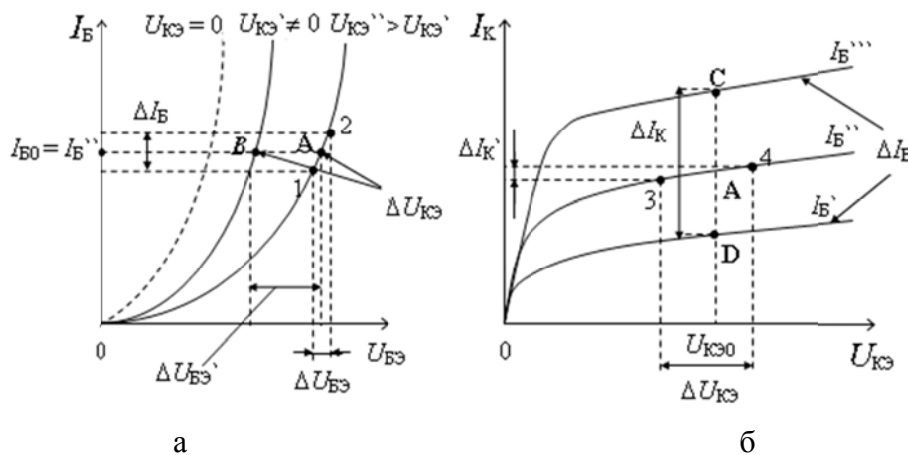


Рисунок 3.13 – Определение h – параметров для схемы с ОЭ: по входным характеристикам (а); по выходным характеристикам (б)

Параметры рассчитываются по величинам конечных приращений (обычно 20% от значения заданного режима по постоянному току) токов и напряжений вблизи рабочей точки транзистора.

Параметры входной цепи h_{11} и h_{12} определяют по входным характеристикам транзистора, показано на рисунке 3.13 (а). За рабочую точку (точку покоя) транзистора с ОЭ выбираем точку А. Задаем приращение тока

базы ΔI_B симметрично относительно точки А при постоянном напряжении коллектора $U_{КЭ}$ (точки 1 и 2). Находим получающееся при этом приращение напряжения $\Delta U_{БЭ}$. Тогда входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ:

$$h_{11Э} \approx \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \Big|_{U_{КЭ} = \text{const.}}$$

Затем, при постоянном токе базы в рабочей точке I_B , задают приращение напряжения коллектора $\Delta U_{КЭ} = \Delta U_{КЭ}'' - \Delta U_{КЭ}'$ (точки А и В) и определяют получающееся приращение напряжения базы $\Delta U_{БЭ}'$. Тогда коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12Э} \approx \frac{\Delta U_{БЭ}'}{\Delta U_{КЭ}} \Big|_{I_B = \text{const.}}$$

Параметры h_{22} и h_{21} определяем по выходным характеристикам для той же рабочей точки А, показано на рисунке 3.13 (б). Для этого, в точке А, при постоянном токе базы I_B , задают приращение коллекторного напряжения $\Delta U_{КЭ}$ (точки 3 и 4) и находят получающееся приращение тока коллектора $\Delta I_K'$. Тогда выходная проводимость транзистора:

$$h_{22Э} \approx \frac{\Delta I_K'}{\Delta U_{КЭ}} \Big|_{I_B = \text{const.}}$$

Далее, при постоянном напряжении коллектора, задают приращение тока базы ΔI_B (точки С и D) и определяют получающееся при этом приращение тока коллектора ΔI_K . Тогда дифференциальный коэффициент передачи тока базы: $h_{21Э} \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \Big|_{U_{КЭ} = \text{const.}}$

Аналогично определяются параметры по соответствующим характеристикам для схемы с ОБ. Они имеют обозначения $h_{11Б}$, $h_{12Б}$, $h_{21Б}$, $h_{22Б}$.

Типовые значения h – параметров для схем с ОЭ и ОБ приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Параметр	Схема с ОЭ	Схема с ОБ
Входное сопротивление - h_{11}	Сотни Ом – единицы кОм	Единицы – десятки Ом
Коэффициент обратной связи по напряжению - h_{12}	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
Коэффициент передачи тока - h_{21}	Десятки – сотни	0,95 – 0,998
Выходная проводимость - h_{22}	Единицы – десятки кОм	Сотни кОм – единицы МОм

Следует заметить, что h – параметры транзистора в различных схемах включения однозначно связаны между собой и в случае необходимости всегда можно перейти от одной системы параметров в другую с помощью формул перехода – соотношений между параметрами в трех схемах включения (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Схема с ОЭ	Схема с ОК	Схема с ОБ
$h_{11Э} \approx \frac{h_{11Б}}{1 - h_{21Б}}$	$h_{11К} \approx h_{11Э}$	$h_{11Б} \approx \frac{h_{11Э}}{1 + h_{21Э}}$
$h_{12Э} \approx \frac{h_{11Б}h_{22Б}}{1 - h_{21Б}} - h_{12Б}$	$h_{12К} \approx 1$	$h_{12Б} \approx \frac{h_{11Э}h_{22Э}}{1 + h_{21Э}} - h_{12Э}$
$h_{21Э} \approx \frac{h_{21Б}}{1 + h_{21Б}}$	$h_{21К} \approx h_{21Э} + 1$	$h_{21Б} \approx \frac{h_{21Э}}{1 + h_{21Э}}$
$h_{21Э} \approx \frac{h_{22Б}}{1 - h_{21Б}}$	$h_{22К} \approx h_{22Э}$	$h_{22Б} \approx \frac{h_{22Э}}{1 + h_{21Э}}$

3.8 Эквивалентные схемы биполярного транзистора в физических параметрах

При анализе работы схем нашли распространение дифференциальные (физические, собственные) параметры транзистора ($r_{Э}$, $r_{Б}$, $r_{К}$), характеризующие особенности самого транзистора и не зависящие от схемы включения. Используя эти параметры, можно составить малосигнальную физическую эквивалентную схему транзистора для переменных токов и напряжений.

Малым сигналом считается сигнал такого уровня, который не изменяет состояния переходов транзистора, установленные соответствующим постоянным напряжением. В этом случае р-п-переходы можно заменить сопротивлениями.

При переходе от одной схемы включения транзистора к другой, численные величины его физических параметров не изменяются, а меняется лишь их местоположение в эквивалентных схемах.

Из физических эквивалентных схем малосигнального транзистора наиболее часто встречается Т-образная. Такая схема легко получается из обобщенной эквивалентной схемы транзистора (модель Эберса-Молла, показана на рисунке 3.6) заменой эмиттерного и коллекторного диодов их физическими сопротивлениями $r_{Э}$ и $r_{К}$, а усилительные свойства отражают включением источника тока.

Физические Т-образные эквивалентные схемы малосигнального транзистора, работающего в активном режиме для схем включения ОБ и ОЭ, приведены на рисунке 3.14. Эквивалентные генераторы тока $\alpha I_{Э}$ и $\beta I_{Б}$ в цепи коллектора отражают усилительные свойства транзистора. Динамические свойства транзистора на высоких частотах учтены включением емкости $C_{К}$.

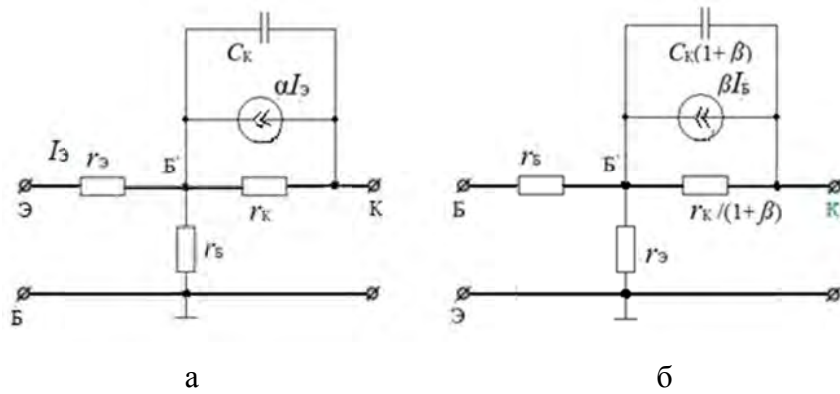


Рисунок 3.14 – Т-образные эквивалентные схемы транзистора в схеме ОБ (а) и ОЭ (б)

Условная полярность генератора тока ($\alpha I_{\text{Э}}$ и $\beta I_{\text{Б}}$) на эквивалентных схемах определяется принятым положительным направлением тока. При направлении тока эмиттера $I_{\text{Э}}$ от точки Б' к точке Э (реально в n-p-n транзисторе) положительное направление тока генератора должно быть обращено к точке Б'. При обратном направлении тока $I_{\text{Э}}$ (в p-n-p транзисторе) полярность генератора обратная.

Параметры эквивалентной схемы транзистора определяются:

- $r_{\text{Э}} = \frac{\Delta U_{\text{Э}}}{\Delta I_{\text{Э}}}$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода,

как отношение приращения напряжения на эмиттерном переходе ($\Delta U_{\text{Э}}$) к приращению тока эмиттера ($\Delta I_{\text{Э}}$) при коротком замыкании в цепи коллектора по переменному току ($\Delta U_{\text{К}}=0$).

При $T=300^{\circ}\text{K}$, для активного режима работы транзистора:

$$r_{\text{Э}} = \frac{kT}{qI_{\text{Э}}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{Э}}} \approx \frac{26\text{mV}}{I_{\text{Э}}[\text{mA}]}, [\text{Ом}].$$

Для реальных транзисторов $r_{\text{Э}}$ составляет единицы - десятки Ом.

- $r_{\text{К}} = \frac{\Delta U_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{К}}}$ - дифференциальное сопротивление коллекторного перехода,

как отношение приращения напряжения на коллекторном переходе ($\Delta U_{\text{К}}$) к приращению тока коллектора ($\Delta I_{\text{КЭ}}$) в режиме холостого хода по переменному току в цепи эмиттера ($\Delta I_{\text{Э}}=0$).

В активном режиме работы транзистора коллекторный переход транзистора смещен в обратном направлении, сопротивление перехода велико и $r_{\text{К}}$ составляет сотни кОм.

• $r_{\text{Б}} \approx \beta \cdot r_{\text{Э}}$ – объемное сопротивление области базы. Реальные значения $r_{\text{Б}}$ составляют сотни Ом. В справочниках транзисторов физические параметры не приводятся, поэтому их находят по известным h – параметрам. Расчетные формулы связи физических параметров транзистора с системой h – параметров для схем включения ОБ и ОЭ, приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Схема ОБ	Схема ОЭ
$r_{\text{Э}} = h_{11\text{Б}} - \frac{h_{12\text{Б}}(1 + h_{21\text{Б}})}{h_{22\text{Б}}};$ $r_{\text{К}} = 1/h_{22\text{Б}};$ $r_{\text{Б}} = \frac{h_{12\text{Б}}}{h_{22\text{Б}}};$ $\alpha = h_{21\text{Б}}.$	$r_{\text{Э}} = \frac{r_{\text{К}}}{1 + \beta} \cdot h_{12\text{Э}} = \frac{h_{12\text{Э}}}{h_{22\text{Э}}};$ $r_{\text{К}} = \frac{1}{h_{22\text{Э}} \cdot (1 - \alpha)} = \frac{1 + h_{21\text{Э}}}{h_{22\text{Э}}};$ $r_{\text{Б}} = h_{11\text{Э}} - \frac{h_{12\text{Э}}}{h_{22\text{Э}}}(1 + h_{22\text{Э}});$ $\beta = h_{21\text{Э}}.$

Если известны собственные параметры транзистора, то h – параметры можно определить по формулам, приведенным в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Параметр	ОБ	ОЭ	ОК
h_{11}	$r_{\text{Э}} + (1 - \alpha) r_{\text{Б}}$	$r_{\text{Б}} + (1 + \beta) r_{\text{Э}}$	$R_{\text{Э}} \cdot (1 + \beta)$
h_{12}	$\frac{r_{\text{Б}}}{r_{\text{Б}} + r_{\text{Г}}} \approx \frac{r_{\text{Б}}}{r_{\text{К}}}$	$\frac{r_{\text{Э}}}{r_{\text{К}}^*} \approx \frac{r_{\text{Э}} \cdot (1 + \beta)}{r_{\text{К}}}$	1
h_{21}	α	$\frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta$	$1 + \beta$
h_{22}	$\frac{1}{r_{\text{К}}}$	$\frac{1}{r_{\text{К}}^*} = \frac{1 + \beta}{r_{\text{К}}} = \frac{1}{r_{\text{К}} \cdot (1 - \alpha)}$	$\frac{1 + \beta}{r_{\text{К}}}$

Примечание: $R_{\text{Э}}$ – внешнее сопротивление.

3.9 Частотные свойства биполярных транзисторов

С ростом частоты входного сигнала усилительные свойства транзистора ухудшаются. Это означает, что падает выходная мощность, появляется фазовый сдвиг, т.е. запаздывание колебаний выходного тока по отношению к колебаниям входного тока.

На диапазон рабочих частот транзистора оказывают влияние следующие параметры:

- время диффузионного перемещения неравновесных носителей в области базы от эмиттерного перехода до коллекторного;
- емкости эмиттерного $C_{\text{Э}}$ и коллекторного $C_{\text{К}}$ переходов;
- объемное сопротивление базы $r_{\text{Б}}$, определяемое шириной базы. Чем больше ширина базы, тем больше будет время пролета носителей через базовый слой, что проявится на инерционности транзистора.

С повышением частоты модули коэффициентов передачи по току транзистора снижаются, а их эмпирические зависимости от частоты имеют следующий вид:

$$|\beta| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}}; \quad |\alpha| = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\alpha}\right)^2}},$$

где β_0, α_0 – коэффициенты передачи по току транзистора, при схеме с ОЭ и с ОБ соответственно, на нулевой частоте;

f_α, f_β – граничные частоты, на которых максимальный коэффициент передачи уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Выражения представляют собой АЧХ биполярного транзистора при включении по схеме с ОЭ и с ОБ. Графическое изображение нормированных АЧХ представлено на рисунке 3.15.

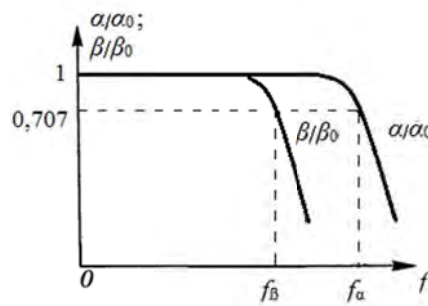


Рисунок 3.15 – Зависимость коэффициентов α и β от частоты

Из анализа АЧХ очевидно, что частотные свойства транзистора в схеме с ОЭ значительно хуже, чем в схеме с ОБ. Так как, граничная частота коэффициента передачи тока базы f_β в $(1 - \alpha_0)$ раз меньше граничной частоты в схеме с ОБ.

Формулы связи между граничными частотами в схемах с ОБ и ОЭ: $f_\beta = f_\alpha \cdot (1 - \alpha_0)$ или $f_\beta = f_\alpha / (1 + \beta_0)$.

В справочниках приводится граничная (предельная) частота коэффициента передачи тока – $f_{гр}$, на которой $\beta=1$. На этой частоте транзистор в схеме с ОЭ перестает усиливать ток.

Можно найти взаимосвязь предельной $f_{гр}$ и граничной f_β частотами, если:

$$|\beta| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} = 1, \text{ а также учесть, что отношение } f_{гр} / f_\beta \gg 1.$$

Можно считать, что $f_{гр} \approx \beta_0 \cdot f_\beta$.

Уменьшение коэффициентов передачи по току с ростом частоты объясняется конечной скоростью диффузии неосновных носителей заряда в области базы. Носители заряда не успевают достичь области базы коллектора, происходит смена направления электрического поля, которое перемещает их обратно к эмиттеру. Таким образом, они колеблются в области базы,

и большое их число успевает рекомбинировать, поэтому ток базы увеличивается, а ток коллектора уменьшается, что приводит к уменьшению коэффициентов передачи по току транзистора.

3.10 Динамический режим работы биполярного транзистора

Динамическим режимом работы транзистора называется такой режим, при котором в коллекторной (или эмиттерной) цепи транзистора стоит нагрузочный резистор, как показано на рисунке 3.16 (а), чтобы ограничить ток коллектора на уровне $I_{K\max} = E_K / R_K$, где E_K – напряжение источника питания. В этом случае потенциал коллектора начинает изменяться одновременно с изменением тока коллектора, характеристики транзистора становятся динамическими. Они показывают связь токов и напряжений на электродах транзистора в зависимости от сопротивления нагрузки т.е. отражают зависимость $I_K = f(U_K)$ при $R_K = \text{const}$.

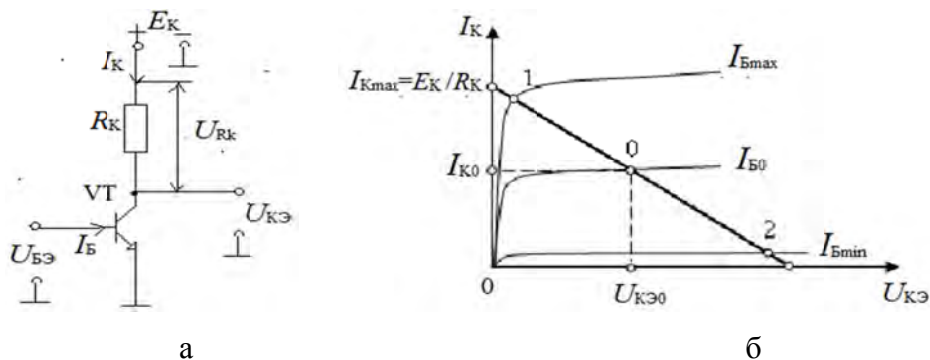


Рисунок 3.16 – Включение транзистора по схеме с ОЭ (а) и его динамические характеристики (б)

Напряжение источника питания E_K в динамическом режиме распределяется между участком коллектор-эмиттер и сопротивлением коллекторной нагрузки R_K . На основании закона Кирхгофа можно записать уравнение динамического режима для выходной цепи транзистора:

$$E_K = U_{КЭ} + I_K R_K.$$

Если считать напряжение переменной величиной $U_{КЭ}$, а ток коллектора I_K – функцией, то получим уравнение нагрузочной прямой или линии нагрузки:

$$I_K = \frac{E_K - U_{КЭ}}{R_K}.$$

Положение линии нагрузки зависит только от напряжения E_K и сопротивления R_K . Строят линию нагрузки на семействе выходных характеристик транзистора по двум точкам:

- если $I_K = 0$, то из выражения следует, что $U_{КЭ} = E_K$ и транзистор находится в режиме отсечки (область-2);

- если $U_{КЭ} = 0$, то из выражения следует, что $I_K = E_K / R_K$ и транзистор находится в режиме насыщения (область-1).

В режиме отсечки ток, протекающий по нагрузке очень мал. Почти все напряжение источника питания приложено к закрытому транзистору и транзистор можно представить в виде разомкнутого ключа.

В режиме насыщения оба перехода транзистора смещены в прямом направлении. Ток коллектора достигает максимального значения, а напряжение между коллектором и эмиттером открытого транзистора оказывается очень маленьким. Поэтому в режиме насыщения транзистор можно представить в виде замкнутого ключа.

Область между зоной отсечки и зоной насыщения называется активной областью. В этой области эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном, что соответствует активному режиму работы транзистора (режиму усиления).

Точка пересечения линии нагрузки с выходной характеристикой для заданного тока базы $I_{Б0}$ называется рабочей точкой. Координаты рабочей точки соответственно будут равны: $I_{K0} = \beta \cdot I_{Б0}$; $U_{КЭ0} = E_K - I_{K0} \cdot R_K$. Если задавать ток базы $I_{Б0}$ – ток смещения, то можно смещать положение рабочей точки на линии нагрузки. Постоянные значения токов $I_{Б0}$, I_{K0} и напряжений $U_{БЭ0}$, $U_{КЭ0}$ на электродах транзистора (точка – 0), при отсутствии усиливаемого сигнала на входе схемы, характеризуют режим покоя (по постоянному току) транзистора в схеме.

При работе транзистора в режиме переменного тока ($U_{ВХ} \neq 0$), входной ток базы I_B содержит постоянную составляющую, обеспечивающую ток покоя, и переменную составляющую, т.е. – $I_B(t) = I_{Б0} + I_{Бm} \cdot \sin(\omega t)$, то ток коллектора запишется: $I_K(t) = I_{K0} + I_{Km} \cdot \sin(\omega t) = \beta \cdot [I_{Б0} + I_{Бm} \cdot \sin(\omega t)]$.

Соответственно, выходное напряжение:

$$U_K(t) = U_{K0} - U_{Km} \cdot \sin(\omega t), \text{ где } U_{K0} = U_{КЭ0}, \text{ а } U_{Km} = I_{Km} \cdot R_K.$$

Положение рабочей точки на входной и выходной характеристике, а также эюры токов и напряжений в режиме переменного тока на входе и выходе транзистора показаны на рисунке 3.17.

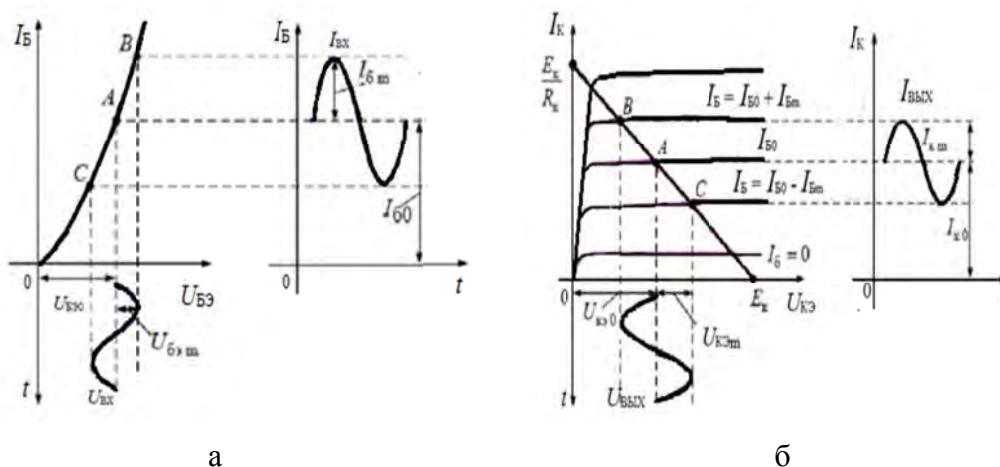


Рисунок 3.17 – Динамические характеристики транзистора в режиме переменного тока

Для того, чтобы нелинейные искажения усиленного сигнала были минимальными, смещение нужно выбирать таким, чтобы начальная рабочая точка (при $U_{ВХ}=0$) располагалась в середине линейного участка входной характеристики (точка А на рисунке 3.17, (а)). Тогда при изменении входного сигнала напряжение $U_{БЭ}$ будет изменяться на величину $U_{БЭм}$ от начального $U_{БЭ0}$, вызывая изменения базового тока на величину $I_{Бм}$ от начального значения $I_{Б0}$.

Коллекторный ток также будет изменяться относительно начального коллекторного тока $I_{К0}$ (рисунок 3.17, (б)), соответствующего базовому току $I_{Б0}$, в сторону увеличения и в сторону уменьшения на величину переменной составляющей $I_{Км}$. Выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ при этом также будет изменяться от начального значения $U_{КЭ0}$ в большую и меньшую сторону на величину своей амплитуды переменной составляющей $U_{КЭм}$.

Отметим, что в рассматриваемой схеме увеличению входного сигнала соответствует увеличение базового тока, а, следовательно, и коллекторного тока, а выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ при этом уменьшается. Из чего следует, что в этой схеме входное и выходное изменяются в противофазе.

3.11 Способы задания рабочего режима работы транзистора

В подавляющем большинстве случаев транзистор усиливает сигналы переменного тока, т.е. на вход транзистора подается чаще всего знакопеременный сигнал. Но поскольку эмиттерный р–n-переход обладает вентильными свойствами, то через него пройдет только одна полуволна входного сигнала, а другая полуволна будет им срезана и, следовательно, усиливаться не будет. Для того чтобы усилить весь сигнал, во входную цепь транзистора вводят так называемое смещение. Знакопеременный входной сигнал накладывается на постоянное напряжение смещения таким образом, что результирующее входное напряжение остается однополярным, как показано на рисунке 3.18, (а) и может быть усилено транзистором. Поэтому принципиальная схема усилительного каскада в этом случае выглядит так, как представлено на рисунке 3.18, (б).

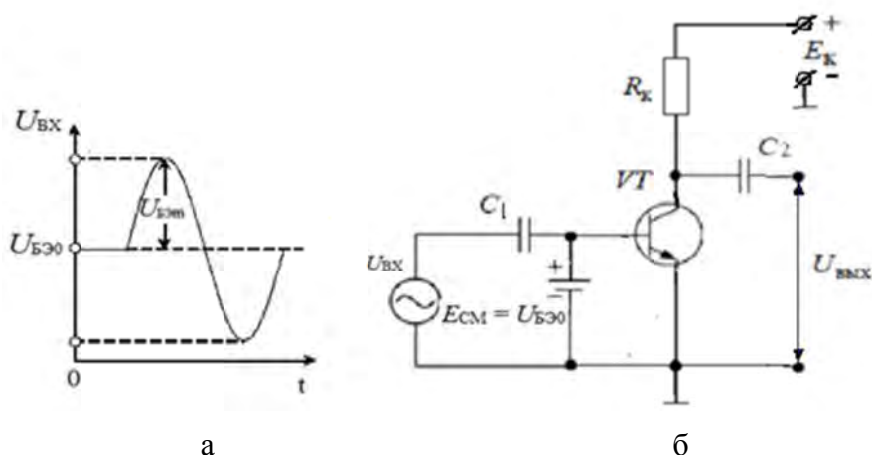


Рисунок 3.18 – Смещение входного сигнала (а) источником смещения в цепи базы (б)

Источник напряжения смещения $E_{CM}=U_{БЭ0}$ создает во входной цепи транзистора постоянный по величине ток смещения – $I_{Б0}$. Для того чтобы исключить влияние источника смещения на источник входного сигнала в цепь вводится разделительный конденсатор C_1 , который пропускает переменный входной сигнал, но создает развязку по постоянной составляющей. Для такой же цели служит выходной разделительный конденсатор C_2 , который пропускает переменную составляющую выходного напряжения и не пропускает его постоянную составляющую.

Смещение может вводиться не только от отдельного источника смещения E_{CM} . Для цели смещения можно использовать имеющийся источник коллекторного питания E_K . Известны два основных способа задания рабочей точки независимо от схемы включения:

- схема с фиксированным током базы;
- схема с фиксированным напряжением.

В схеме с фиксированным током базы между базой транзистора и источником питания E_K включается балластное сопротивление R_B , как показано на рисунке 3.19, а). Резистор R_B во много раз больше сопротивления участка база – эмиттер по постоянному току и задает ток смещения (покоя) базы $I_{Б0}$. С учетом того, что $E_K \gg U_{БЭ}$, получаем:

$$I_{Б0} = \frac{E_K - U_{БЭ}}{R_B} \approx \frac{E_K}{R_B}; I_{К0} = \beta I_{Б0} + (1 + \beta) I_{КБ0}.$$

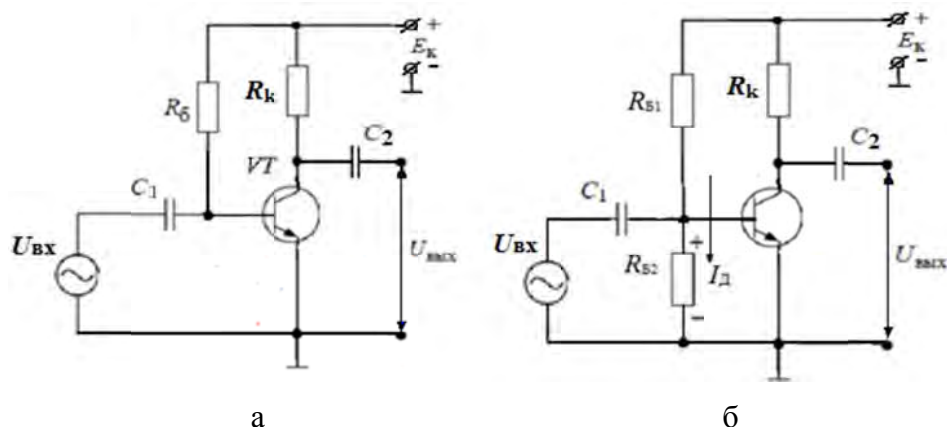


Рисунок 3.19 – Схемы задания смещения входного сигнала от источника коллекторного питания: фиксированным током базы (а); фиксированным напряжением (б)

Схема является температурно-нестабильной, т.к. $\beta, I_{КБ0}, U_{БЭ}$ зависят от температуры.

В схеме с фиксированным напряжением, как на рисунке 3.19, (б), цепь смещения базы включает делитель напряжения $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$. Ток делителя I_D , протекающий через эту цепь, должен быть много больше тока покоя базы $I_{Б0}$:

$$I_D = \frac{E_K}{R_{Б1} + R_{Б2}} \approx (5...10) \cdot I_{Б0}.$$

Параллельное включение $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$, шунтирующее вход транзистора на частоте сигнала, должно быть много больше входного сопротивления транзистора $r_{ВХ}$:

$$R_B = R_{Б1} \parallel R_{Б2} \approx (5 \dots 10) \cdot r_{ВХ};$$

$$r_{ВХ} = r_b + (1 + \beta) \cdot r_{\epsilon};$$

$$r_{\epsilon} = \frac{[26 мВ]}{I_{Б0} + I_{К0}},$$

где r_b – сопротивление базы транзистора.

При этих условиях, напряжение смещения $U_{БЭ0} = I_D \cdot R_{Б2}$ получается постоянным и не зависит от изменения температуры, старения и замены транзистора.

3.12 Способы термостабилизации рабочего режима работы транзистора

Рабочая точка, координаты которой на статических характеристиках транзистора соответствуют напряжениям и токам в электродах, определяет режим его работы. Изменение температуры окружающей среды приводит к изменениям напряжений E_K , $U_{БЭ0}$ и токов покоя $I_{Б0}$, $I_{К0}$, что, в конечном счете, выводит транзистор из заданного режима работы. Поэтому, термостабилизация рабочей точки является одной из важных задач проектирования транзисторных схем. Существует несколько практических схем термостабилизации рабочей точки транзистора:

- коллекторная термостабилизация;
- эмиттерная термостабилизация.

В схеме коллекторной термостабилизации, показанной на рисунке 3.20, (а), за счет отрицательной обратной связи по напряжению часть напряжения выходной цепи транзистора через резистор R_B в противофазе с входным сигналом, при его наличии, подается во входную цепь.

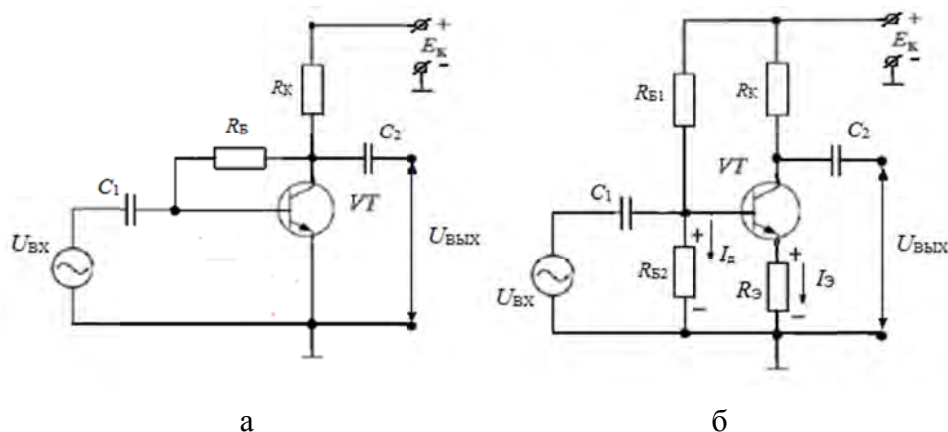


Рисунок 3.20 – Схемы коллекторной (а) и эмиттерной (б) термостабилизации

С увеличением температуры возрастает тепловой ток I_{KB0} . Следовательно, возрастает ток покоя коллектора $I_{K0} = \beta \cdot I_{B0} + (1+\beta) I_{KB0}$. За счет отрицательной обратной связи ток покоя базы:

$$I_{B0} = \frac{E_K - R_K(I_{B0} + I_{K0})}{R_B},$$

уменьшится, т.к. уменьшается числитель приведенного соотношения. Это приводит к уменьшению I_{K0} до первоначальной величины и, следовательно, к термостабилизации рабочей точки.

В схеме эмиттерной термостабилизации, показанной на рисунке 3.20 (б), дополнительно с делителем напряжения на R_{B1} и R_{B2} , в цепь эмиттера включают резистор отрицательной обратной связи по току R_E . За счет тока эмиттера $I_{E0} = I_{B0} + I_{K0}$ на резисторе будет выделяться падение напряжения U_E , которое зависит от тока покоя коллектора I_{K0} : $U_E = I_{E0} R_E = (I_{B0} + I_{K0}) \cdot R_E$.

Увеличение температуры вызывает рост тока коллектора I_{K0} и напряжения U_E , которое в совокупности с постоянным напряжением $U_{RB2} = I_D \cdot R_{B2}$ уменьшает смещение базы: $U_{BE0} = U_{RB2} - U_E$. В результате, ток базы покоя I_{B0} уменьшается и ток коллектора $I_{K0} = \beta I_{B0} + I_{KE0}$ принимает первоначальное значение. Изменение напряжения U_E происходит в фазе с температурным изменением тока коллектора, создавая противофазное изменение напряжения смещения U_{BE0} .

3.13 Составные биполярные транзисторы

Во многих аналоговых интегральных микросхемах применяются комбинации из нескольких (обычно двух) транзисторов, соединенных между собой так, что их можно рассматривать как единое целое – составной транзистор. Составные транзисторы обладают высоким коэффициентом передачи тока и другими свойствами, которые трудно или невозможно получить в единичных транзисторах. Известно несколько схем составного транзистора.

1. Схема Дарлингтона. Она характеризуется тем, что входные цепи всех входящих в нее транзисторов соединены последовательно, а выходные цепи – параллельно, как показано на рисунке 3.21. Транзисторы VT1 и VT2, входящие в состав составного транзистора, можно представить в виде одного транзистора с выводами эмиттера (Э), базы (Б) и коллектора (К). С целью повышения результирующего коэффициента передачи, получения большого входного и меньшего выходного сопротивлений коллекторы двух транзисторов подключаются непосредственно к источнику питания, эмиттер первого транзистора соединяется с базой второго.

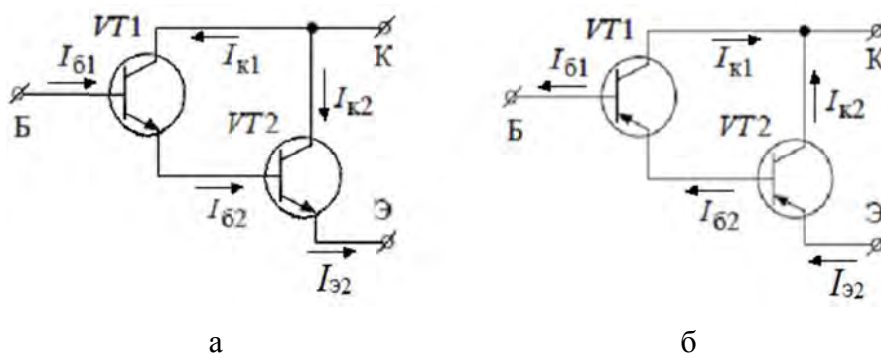


Рисунок 3.21 – Схемы составных биполярных транзисторов: n-p-n – типа (а); p-n-p – типа (б)

Коллекторный ток составного транзистора равен сумме коллекторных токов, входящих в него транзисторов:

$$I_K = I_{K1} + I_{K2} = \beta_1 \cdot I_{B1} + \beta_2 \cdot I_{B2},$$

где β_1, β_2 – коэффициенты усиления по току транзисторов VT1 и VT2 соответственно.

Из рисунка 3.21 очевидно, что $I_{B2} = I_{K1} + I_{B1}$, а $I_{B1} = I_B$. Если подставить выражение I_{B2} в уравнение для тока I_K и поделить на I_B , получим результирующий коэффициент усиления составного транзистора:

$$\beta_{\Sigma} = \frac{I_K}{I_B} = \frac{\beta_1 \cdot I_B + \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_B}{I_B} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_2 \approx \beta_1 \cdot \beta_2.$$

Поскольку β_1 и β_2 имеют значения десятки, сотни, то результирующий коэффициент усиления β_{Σ} может составлять несколько тысяч.

Входное сопротивление составного транзистора:

$$R_{BX} = R_{BX1} + R_{BX2}(1 + \beta_1),$$

где R_{BX1} и R_{BX2} – входные сопротивления транзисторов VT1 и VT2.

Выходное сопротивление составного транзистора:

$$R_{ВЫХ} = \frac{R_{ВЫХ1} \cdot R_{ВЫХ2}}{R_{ВЫХ1} + R_{ВЫХ2}},$$

где $R_{ВЫХ1}$ и $R_{ВЫХ2}$ – выходные сопротивления транзисторов VT1 и VT2, соответственно.

Однако транзисторы в паре работают в разных условиях: ток эмиттера I_{E2} превышает ток I_{E1} в β_2 раз. Очевидно, что мощность транзистора VT2 должна быть больше мощности транзистора VT1.

Следует отметить, что в схему составного транзистора Дарлингтона может быть включено и большее количество отдельных транзисторов.

2. Составной транзистор на комплементарных транзисторах – транзисторах противоположных типов электропроводности р-п-р и п-р-п, представленных на рисунке 3.22.

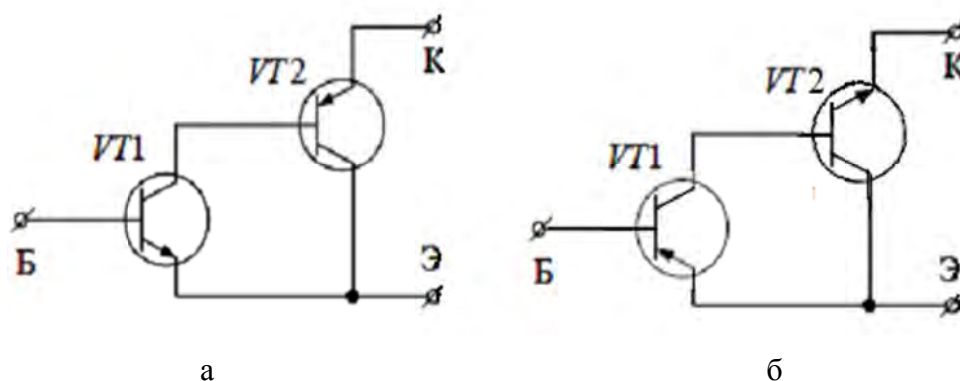


Рисунок 3.22 – Схема составного транзистора на комплементарных транзисторах: n-p-n – типа (а); p-n-p – типа (б)

Результирующий коэффициент усиления $\beta_{\Sigma} \approx \beta_1 \cdot \beta_2$, что практически соответствует паре Дарлингтона.

Всегда биполярные транзисторы p-n-p – типа уступали транзисторам n-p-n – типа по коэффициенту усиления β . Однако составной транзистор p-n-p – типа имеет очевидное преимущество – его β превышает β n-p-n – транзистора, что включен в схему. Быстродействие составного транзистора не превышает быстродействие БТ p-n-p – типа в составе составного, т.е. хуже, чем БТ n-p-n – типа.

3. Каскадная схема составного транзистора.

Каскадная схема составного транзистора приведена на рисунке 3.23. В этой схеме два однотипных транзистора включены в коллекторную цепь последовательно и через них течет общий ток.

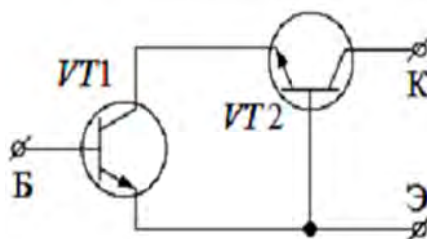


Рисунок 3.23 – Каскадная схема составного транзистора

Для схемы характерно, что транзистор VT1 включен по схеме с общим эмиттером, а транзистор VT2 – по схеме с общей базой. Т.к. в схеме ОБ коэффициент передачи тока транзистора $\alpha \approx 1$, то усиления по току в составном транзисторе, как в схеме Дарлингтона, нет. Однако преимущество составного транзистора в том, что в схеме нет непосредственной связи между точками

выхода (К) и входа (Б), тогда как в обычном БТ эти точки соединены через емкость C_K и сопротивление r_K коллекторного перехода, что ограничивает его частотные свойства, а при наличии индуктивности нагрузки может вызвать самовозбуждение усилителя на БТ.

3.14 Классификация биполярных транзисторов

Выпускаемые промышленностью биполярные транзисторы классифицируют обычно по двум параметрам: по мощности и частотным свойствам.

По мощности они подразделяются на:

- маломощные ($P_{\text{ВЫХ}} \leq 0,3 \text{ Вт}$);
- средней мощности ($0,3 \text{ Вт} < P_{\text{ВЫХ}} \leq 1,5 \text{ Вт}$);
- и мощные ($P_{\text{ВЫХ}} > 1,5 \text{ Вт}$).

По частотным свойствам подразделяются на:

- низкочастотные ($f_\alpha \leq 0,3 \text{ МГц}$);
- средней частоты ($0,3 \text{ МГц} < f_\alpha \leq 3 \text{ МГц}$);
- высокой частоты ($3 \text{ МГц} < f_\alpha \leq 30 \text{ МГц}$);
- сверхвысокой частоты ($f_\alpha > 30 \text{ МГц}$).

3.15 Контрольные вопросы

1. Поясните назначение, структуру и типы БТ.
2. Объясните физические процессы, происходящие в БТ. Какие составляющие токов протекают в электродах транзистора.
3. Почему транзистор данного типа называют биполярным? Запишите формулы взаимосвязи между токами в электродах БТ и покажите направления этих токов.
4. Поясните смысл коэффициентов α , β . Приведите связь между ними.
5. Дайте характеристику режимам работы БТ: активного, инверсного, отсечки, насыщения.
6. Дайте характеристику схемам включения БТ. Почему схема с ОЭ нашла наибольшее применение?
7. Изобразите семейство входных и выходных статических ВАХ транзистора в схеме с ОБ?
8. Изобразите семейство выходных статических ВАХ транзистора по схеме с ОЭ. Покажите на графиках зоны, соответствующие различным режимам работы БТ: активного, отсечки, насыщения.
9. Объясните, почему при увеличении напряжения коллектора входной ток возрастает в схеме включения с ОБ и уменьшается в схеме с ОЭ?
10. Приведите физические эквивалентные схемы БТ для включения с ОБ и с ОЭ. Что они учитывают?
11. Охарактеризуйте систему h – параметров БТ. Какой физический смысл они имеют? Являются ли они одинаковыми для схем включения с ОБ и ОЭ.

12. Воспользовавшись входными и выходными характеристиками транзистора, покажите методику определения h – параметров.

13. От чего зависят частотные свойства транзистор? Как выглядят АЧХ биполярного транзистора при включении по схеме с ОЭ и с ОБ.

14. С какой целью в схемах, где используются транзисторы, в цепь коллектора включают резистор R_K . Поясните уравнение нагрузочной прямой.

15. Что такое рабочая точка на нагрузочной прямой? Что означают ее промежуточные положения?

16. Охарактеризуйте схемы задания рабочего режима БТ.

17. Поясните, какими способами обеспечивается термостабилизация режима работы БТ?

18. Приведите схему коллекторной термостабилизации и смысл ее работы?

19. Как осуществляется эмиттерная термостабилизация и смысл ее работы?

20. Что включает понятие составного транзистора. Какие схемы составного транзистора вам известны?

21. Приведите схему Дарлингтона и дайте ей характеристику?

22. Приведите схему составного транзистора на комплементарных транзисторах и дайте ей характеристику?

23. Дайте классификацию биполярных транзисторов по частотным свойствам и по мощности.

4. ТИРИСТОРЫ

4.1 Структура и основные виды тиристоров

Тиристор - это полупроводниковый прибор с тремя (и более) взаимодействующими р-п-переходами, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и который используется для переключения.

Тиристор имеет два устойчивых состояния (закрыт и открыт) и может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот.

Различают диодные (неуправляемые) и триодные (управляемые) тиристоры. Тиристор с двумя выводами называют диодным тиристором или динистором.

Тиристор, имеющий два основных вывода и один управляющий вывод, называется триодным тиристором (тринистором).

Тиристор, имеющий симметричную относительно начала координат вольт-амперную характеристику, называется симметричным тиристором (симистором).

4.2 Динисторы

Динистор представляет собой двухполюсную четырехслойную $p_1-n_1-p_2-n_2$ – структуру, представленную на рисунке 4.1.

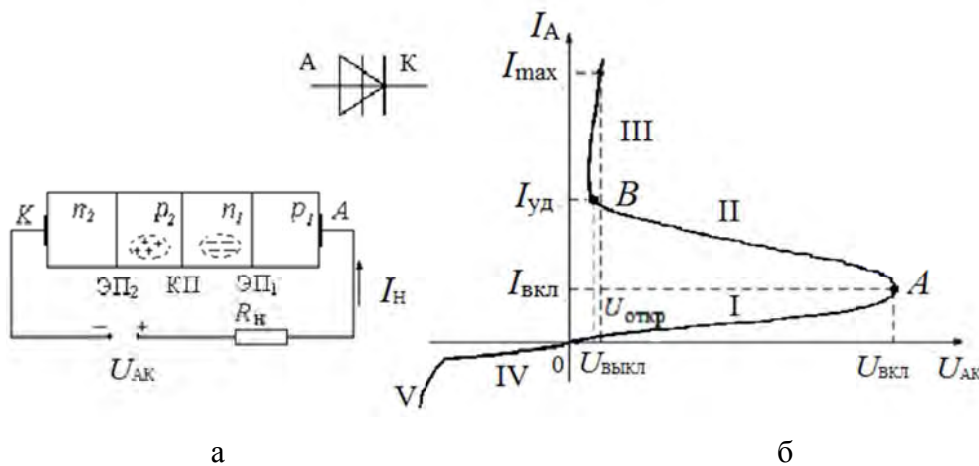


Рисунок 4.1 – Структура (а) и ВАХ (б) динистора

Крайние выпрямительные переходы (p_1-n_1 и p_2-n_2) называют эмиттерными переходами (ЭП). Слои p_1 , p_2 , прилегающие к ЭП являются эмиттерными. Средний p_2-n_1 -переход называют коллекторным (КП). Металлический контакт, прилегающий к крайней p_1 -области, называют анодом (А), а контакт, прилегающий к крайней p_2 -области, – катодом (К). Внутренние p_2 и p_1 -области структуры называют базами.

Рассмотрим процессы, которые протекают в динисторе при подаче на него прямого напряжения, когда к аноду p_1 подключить "+" U_{AK} – плюс внешнего напряжения, а к катоду n_2 "-" – минус. В этом случае эмиттерные переходы ЭП_{1,2} смещаются в прямом направлении, а КП – в обратном и на нем падает почти все напряжение внешнего источника U_{AK} . Тиристор закрыт, ток в цепи очень мал и определяется обратным током КП.

Динистор можно представить в виде двухтранзисторной структуры как показано на рисунке 4.2.

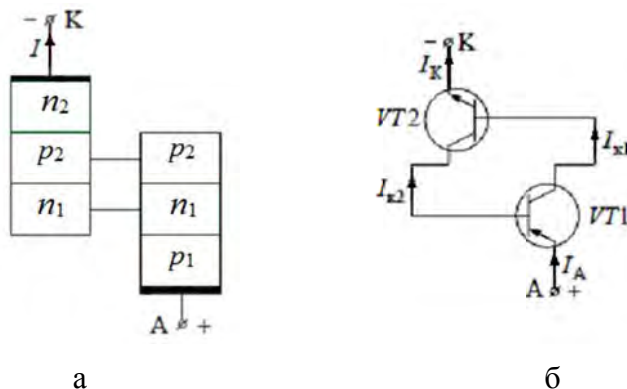


Рисунок 4.2 – Структура (а) и схема (б) двухтранзисторного эквивалента динистора

Так как ЭП_{1,2} открыты, то дырки инжектируются из области p_1 в область n_1 , а электроны – из области n_2 в область p_2 , где носители становятся неосновными. Часть носителей, избежав рекомбинации, достигают обратносмещенного КП и перебрасывается его полем: дырки – в базу p_2 , а электроны – в базу n_1 . Через коллекторные переходы обоих транзисторов протекают токи:

$$I_{K1} = \alpha_1 I_{Э1} \text{ и } I_{K2} = \alpha_2 I_{Э2},$$

где $I_{Э1}$, $I_{Э2}$ – токи через ЭП1 и ЭП2;

α_1 , α_2 – коэффициенты передачи тока соответствующих транзисторов, определяемые здесь как отношение тока неосновных носителей в базе у границ КП к полному току через ЭП.

Общий ток через коллекторные переходы, включенные параллельно, равен сумме токов I_{K1} и I_{K2} . В эту сумму следует добавить тепловые токи и токи утечки, как некоторого суммарного тока I_{K0} . В результате получим:

$$I_A = I_{Э1} = I_{Э2} = I_K = \alpha_1 I_{Э1} + \alpha_2 I_{Э2} + I_{K0} = I_A (\alpha_1 + \alpha_2) + I_{K0}.$$

После преобразования последнего выражения найдем ток, протекающий через четырехслойную структуру при прямом смещении:

$$I_A = \frac{I_{K0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{I_{K0}}{1 - \alpha},$$

где α – суммарный коэффициент передачи обоих транзисторов.

Появление дырок в базе p_2 приводит к образованию "+" объемного заряда, а появление электронов в базе n_1 – "-" объемного заряда. Электрическим полем объемных зарядов уменьшается высота потенциального барьера КП, что вызывает увеличение встречной инжекции носителей. В структуре развивается лавинообразный процесс увеличения тока. Все это приводит к уменьшению сопротивления КП и падению напряжения на тиристоре. Тиристор переходит из закрытого состояния в открытое (низкоомное).

Описанные процессы определяют ВАХ динистора, показанную на рисунке 4.1, б. На прямой ветви ВАХ можно выделить две устойчивые зоны: область I (непроводящее состояние прибора) с малыми значениями тока при больших значениях напряжения U_{AK} и область включения III (открытое состояние прибора) с большими значениями тока при малых значениях напряжения U_{AK} . Точки **A** и **B** называют, соответственно, точками включения и удержания динистора, а соответствующие им токи называют током включения ($I_{вкл}$) и током удержания ($I_{уд}$). Между точками **A** и **B** лежит область II (лавинного пробоя), в которой динистор обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Для выключения динистора необходимо уменьшить прямой ток до значения, не превышающего значение тока удержания (точка **B**), или подать на динистор напряжение обратной полярности. После смены полярности внешнего напряжения, ЭП_{1,2} смещаются в обратном направлении, а КП остается прямосмещенным. Все обратное напряжение распределяется между ЭП_{1,2}. В этом случае не возникает условий для открытия динистора и через него протекает небольшой обратный ток. На обратной ветви ВАХ динистора можно выделить две области: IV – область обратного смещения и V – область пробоя структуры.

Таким образом, управление током динистора возможно либо за счет изменения значения и полярности напряжения внешнего источника при неизменном сопротивлении нагрузки ($R_n = \text{const}$), либо за счет изменения сопротивления нагрузки при неизменном напряжении внешнего источника ($U_{AK} = \text{const}$).

4.3 Триодные тиристоры

Триодный тиристор (далее будем его называть просто тиристор) – это четырехслойная $p_1-n_1-p_2-n_2$ – структура, в которой одна из базовых областей управляющая, структурная схема триодного тиристора представлена на рисунке 4.3.

На базу необходимо подавать $U_{упр}$ – управляющее напряжение такой полярности, которая бы обеспечила включение соответствующего эмиттерного перехода. В зависимости от того, какая база (p_2 или n_1) сделана управляющей, различают тиристоры с катодным и анодным управлением. В тиристорах с катодным управлением, как на рисунке 4.3, а, источник управляющего напряжения включается между управляющим электродом (p_2) и катодом. Если источник управляющего напряжения включается

между управляющим электродом (n_1) и анодом, осуществляется схема с анодным управлением. В результате, процессы включения и выключения тиристора осуществляются не за счет приложенного между анодом и катодом напряжения U_{AK} внешнего источника (как в динисторе), а за счет изменения тока $I_{упр}$ – управляющего электрода (УЭ).

УЭ является входным электродом, включенным в электрическую цепь тиристора. Ток управления электрода $I_{упр}$, втекающий в область p_2 – базы, увеличивает заряд ее избыточных основных носителей. Это приводит к увеличению прямого смещения и росту инжекции через p_2 - n_2 - переход, что эквивалентно увеличению коэффициента передачи тока базы n_2 - p_2 - n_1 -транзистора VT2 (рис. 4.2). Поэтому, в числителе уравнения для тока появляется дополнительное слагаемое $\beta_2 I_{упр}$:

$$I_A = \frac{I_{K0} + \beta_2 \cdot I_{упр}}{1 - \alpha}.$$

ВАХ тиристора при различных токах управления приведены на рисунке 4.3, (б).

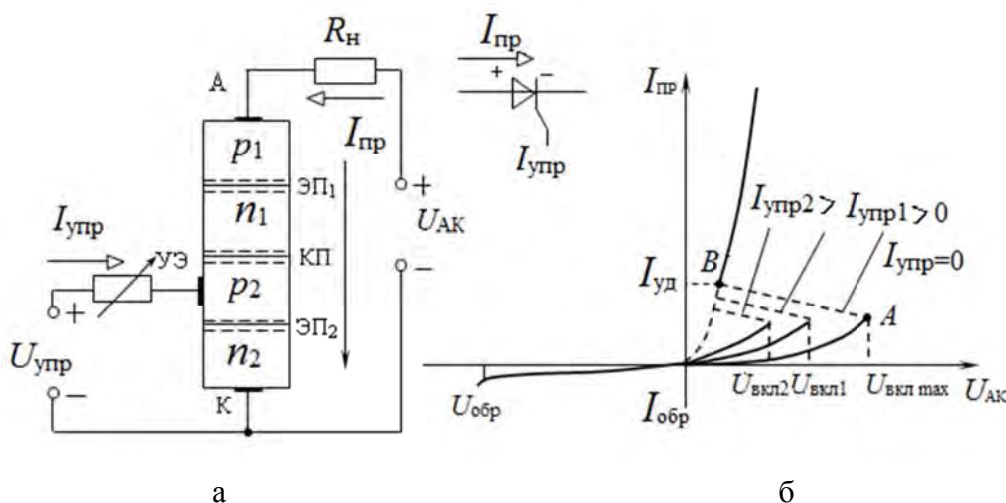


Рисунок 4.3 – Структура (а) и ВАХ (б) тиристора

Как видно из рисунка, с увеличением тока управления $I_{упр}$ переключение тиристора происходит при меньшем значении напряжения включения $U_{вкл.}$. При достаточном значении тока управления $I_{упр} = I_{спр}$, который называют током спрямления, участок закрытого состояния исчезает и вид прямой ветви ВАХ тиристора аналогичен прямой ветви ВАХ диода. При $I_{упр} = 0$, ВАХ тиристора аналогична ВАХ динистора, т.е. тиристор включится, когда прямое напряжение превысит определенное, для данного типа тиристора, значение ($U_{вкл.мах}$). В режиме, управляемом через УЭ, напряжение питания U_{AK} выбирают меньше $U_{вкл.мах}$. Через тринистор и сопротивление нагрузки R_n проходит малый ток. В нужный момент, с подачей импульса тока на УЭ, тринистор переводится скачком в проводящее состояние. Сила тока при этом определяется напряжением питания U_{AK} и сопротивлением нагрузки R_n .

Для того чтобы выключить тиристор, необходимо прервать ток, протекающий в его силовой цепи, на короткий промежуток времени, достаточный для рассасывания неосновных носителей в зонах полупроводника и восстановления управляющих свойств. Чтобы снова включить тиристор, необходимо снова пропустить в его цепи управления ток.

Таким образом, тиристор представляет собой бесконтактный ключ, который может быть только в двух устойчивых состояниях: либо в выключенном, либо во включенном.

При изменении полярности приложенного к тиристору напряжения U_{AK} , эмиттерные p - n -переходы ЭП1 и ЭП2 будут смещены в обратном направлении, тиристор будет закрыт, а обратная ветвь ВАХ тринистора будет такая же, как у диода.

Из рассмотренного выше следует, что тиристор представляет собой частично управляемый вентиль, который можно перевести в проводящее состояние при наличии одновременно двух факторов:

- положительный потенциал анода относительно катода;
- подача управляющего сигнала в виде тока управления в цепи управляющего электрода.

Если хотя бы один из этих факторов отсутствует, то тиристор будет оставаться в закрытом состоянии.

Частичная управляемость тиристора заключается в том, что после включения тиристора, цепь управления становится ненужной, так как он сам себя поддерживает во включенном состоянии. Выключить обычный тиристор по цепи управления невозможно. Поэтому он называется однооперационным тиристором или в зарубежной терминологии *SCR (Silicon Controlled Rectifier)*. Для запираания однооперационного тиристора необходимо каким-либо способом снизить анодный ток до нуля и удерживать его на нулевом уровне в течение времени рассасывания неосновных носителей, накопившихся в базах транзисторов VT1 и VT2.

Двухоперационные тиристоры открываются и закрываются по управляющему электроду. Условия открытия тиристора: анодное напряжение положительное ($U_{AK} > 0$) и наличие короткого импульса тока, втекающего в управляющий электрод ($I_{упр} > 0$). Закрывается двухоперационный тиристор двумя способами: подачей по управляющему электроду короткого импульса тока, вытекающего из электрода ($I_{упр} < 0$) или подачей анодного напряжения меньшего или равного нулю ($U_{AK} \leq 0$).

При импульсном режиме включения, для четкого и быстрого отпирания тиристора, управляющие импульсы должны иметь крутой фронт (около 1 мкс). Длительность управляющего импульса должна быть больше времени включения тиристора $\tau_{имп} > t_{вкл}$. Время включения, как и в транзисторах, определяется накоплением и рассасыванием зарядов в базах. Из-за более сложной структуры тиристоры существенно уступают по быстродействию биполярным транзисторам.

Рассмотренные динисторы и тринисторы по виду ВАХ – несимметричные, т.е. пропускают рабочий ток только в одном направлении, что ограничивает их область применения. Встречно-параллельное включение двух тиристоров решает эту проблему, т.к. если один из них окажется обратным включенным, то другой будет прямо включенным.

Для электрических цепей переменного тока, разработан симметричный тиристор (симистор, триак), который может быть в проводящем состоянии в обоих направлениях.

4.4 Симметричные тиристоры

Симметричный тиристор, в отличие от тиристора, имеет пятислойную структуру полупроводника с различного вида проводимости $n-p-n-p-n$ - типа, имеющие один или два управляющих электрода.

Структура и ВАХ симистора приведены на рисунке 4.4.

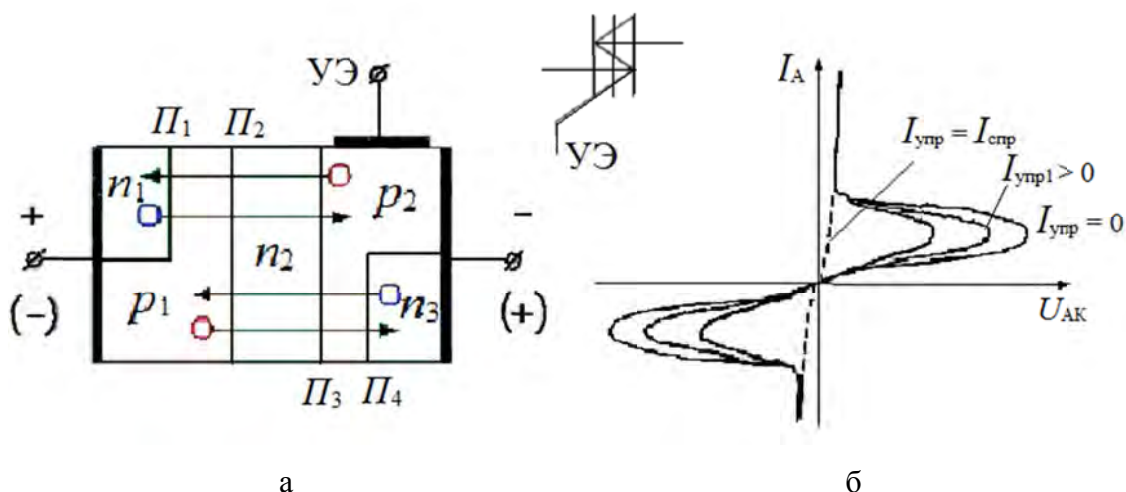


Рисунок 4.4 – Структура (а) и ВАХ (б) симистора

Основой в симисторе является монокристалл полупроводника, в котором созданы пять областей с чередующимся типом проводимости, образующие четыре $p-n$ -перехода. Контакты от крайних областей наполовину шунтируют первый и четвертый $p-n$ -переходы. При полярности внешнего источника напряжения, указанной без скобок, переход П1 окажется включенным в обратном направлении и ток через него будет мал. Весь ток через полупроводниковую структуру при такой полярности источника будет протекать через область p_1 . Четвертый переход П4 будет включен в прямом направлении и через него будет проходить инжекция электронов. Значит, при данной полярности источника рабочая структура симистора представляет собой $p_1-n_2-p_2-n_3$ -структуру, аналогичную структуре обычного тиристора, работа которого уже была рассмотрена ранее.

При смене полярности напряжения на противоположную (указана в скобках) уже будет закрыт переход П4, а переход П1 будет открыт. Структура симистора становится $n_1-p_1-n_2-p_2$, то есть опять аналогична структуре обычного тиристора, но направленного в противоположную сторону.

Таким образом, в схемном отношении симистор можно представить в виде двух встречно-параллельных тиристоров.

Симистор имеет ВАХ, симметричную относительно начала координат, как показано на рисунке 4.4, (б), что и нашло отражение в его названии.

4.5 Основные параметры тиристорov

К основным электрическим параметрам тиристорov относятся:

- $U_{\text{ВКЛ}}$ – напряжение включения, максимальное прямое напряжение, при котором $\frac{dU}{dI} = 0$;

- $I_{\text{ВКЛ}}$ – анодный ток включения, определяемый как максимальный прямой ток в закрытом состоянии, выше которого тиристор переключается в открытое состояние;

- $U_{\text{ВЫКЛ}}$ – анодное напряжение выключения (минимальное напряжение в открытом состоянии);

- $I_{\text{ВЫКЛ}}$ – анодный ток выключения (минимальный ток, при котором тиристор находится в открытом состоянии);

- $U_{\text{ОСТ}}$ – остаточное напряжение, т.е. падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии при максимально допустимом анодном токе;

- $I_{\text{УД}}$ – ток удержания, минимальный прямой ток, проходящий через тиристор при разомкнутой цепи управления, при котором тиристор еще находится в открытом состоянии;

- $I_{\text{А доп}}$ – максимально допустимый анодный ток в открытом состоянии;

- $I_{\text{УПР ВКЛ}}$ – ток включения управляющего электрода;

- $U_{\text{ПРОБ}}$ – напряжение пробоя;

- $U_{\text{ОБР доп}}$ – максимально допустимое обратное напряжение, при котором обеспечивается надежность прибора;

- $\left[\frac{dU_{\text{ВЫХ ЗАКР}}}{dt} \right]_{\text{max}}$ – максимально допустимая скорость нарастания выходного напряжения $p-n-p-n$ -структуру в закрытом состоянии, при которой обеспечивается закрытое состояние тиристора;

- $t_{\text{ВКЛ}}$ – время включения, это время от момента подачи управляющего импульса до момента снижения напряжения тиристора до 10 % от начального значения при работе на активную нагрузку (единицы – десятки микросекунд);

- $t_{\text{ВЫКЛ}}$ – время выключения, называемое также временем восстановления управляющей способности тиристора. Это время от момента, когда прямой ток тиристора становится равным нулю, до момента, когда прибор снова будет способен выдерживать прямое напряжение между анодом и катодом (десятки – сотни микросекунд).

4.6 Применение тиристорov

Силовые тиристоры получили широкое применение в различных областях силовой электроники благодаря своим управляющим свойствам.

В первую очередь это касается устройств преобразовательной техники, таких, как управляемые выпрямители, регуляторы напряжения и др.

4.7 Контрольные вопросы

1. Что такое тиристор и для каких целей их используют?
2. Дайте характеристику физическим процессам, имеющим место в диносторе.
3. Изобразите ВАХ тиристора? Поясните по ВАХ процесс переключения тиристора.
4. Почему при анодном напряжении от 0 до $U_{\text{вкл}}$ тиристор заперт? Какой величины ток протекает через прибор, какова природа этого тока?
5. Объясните состояние p - n – переходов структуры, когда тиристор открыт. Какой величины ток протекает через прибор?
6. Почему при открывании уменьшается напряжение на тиристоре?
7. Каково назначение управляющего электрода у тиристора? В чем отличие схем с анодным и катодным управлением тиристором?
8. Назовите основные параметры тиристора и как их определить по ВАХ?
9. Каким образом можно выключить тиристор?
10. Охарактеризуйте симметричные тринисторы. Как их создают?
11. Каковы достоинства тиристорov?
12. Приведите области применения тиристорov разных видов.

5. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

5.1 Устройство и основные виды полевых транзисторов

Полевыми транзисторами (ПТ) называются полупроводниковые приборы, для управления током которых используется зависимость электрического сопротивления токопроводящего слоя от напряженности поперечного электрического поля.

Слой полупроводника, в котором регулируется поток носителей заряда, называется каналом. Электрическое поле, воздействующее на сопротивление канала, создается с помощью расположенного над каналом металлического электрода, называемого затвором. Электрод, из которого носители вводятся в канал, называется истоком. Электрод, через который носители выводятся из канала, называется стоком.

В зависимости от электропроводности канала (n или p) различают ПТ с каналом n- или p- типа. Затвор в ПТ электрически изолирован от канала, поэтому входной ток затвора I_3 всегда равен нулю, что обеспечивает бесконечно высокое входное сопротивление ПТ.

ПТ, в отличие от биполярных, является униполярными полупроводниковыми приборами, поскольку протекание в них тока обусловлено дрейфом основных носителей заряда одного знака (или электронов, или дырок) через управляемый поперечным электрическим полем канал p- или n- типа. ПТ, как полупроводниковый усилительный прибор, управляется не током (как БТ), а напряжением, отсюда и название – полевой.

Принцип работы ПТ основывается на том, что путем изменения напряженности поперечного электрического поля изменяется проводимость канала, по которому протекает ток выходной цепи. Это позволяет управлять мощностью, которая поступает от источника питания в нагрузку.

Существуют две разновидности ПТ, которые отличаются друг от друга по типу и электрическим характеристикам:

- ПТ с управляющим p-n – переходом;
- ПТ с изолированным затвором (МДП - или МОП-транзисторы, где: М – металл; Д, О – диэлектрик, окисел; П – полупроводник), затвор изолирован от канала слоем диэлектрика.

5.2 Полевой транзистор с управляющим p-n – переходом

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом – это полевой транзистор, управление потоком основных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении.

Рассмотрим структуру и принцип действия полевого транзистора с управляющим p-n-переходом. Структура полевого транзистора представлена на рисунке 5.1.

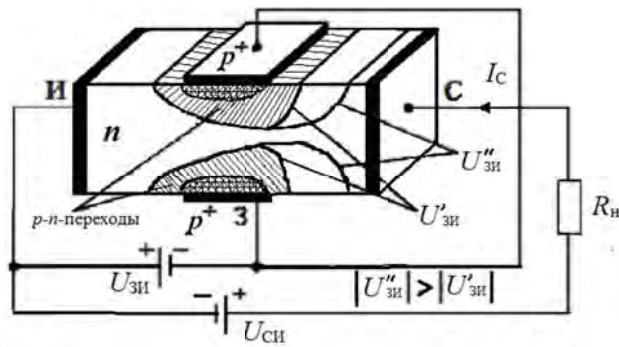


Рисунок 5.1 – Упрощённая структура полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Прибор состоит из пластины кремния электропроводностью n -типа или p -типа, что представляет собой канал ПТ. К торцам пластины присоединены два металлических контакта (электрода). Электрод, с которого начинается движение носителей заряда в канале, – это исток (И), а электрод, принимающий носители из канала, – сток (С). Посередине, с боковых сторон, созданы две области противоположного типа проводимости и тоже с электрическими выводами от этих областей. Вывод от боковых поверхностей противоположного типа проводимости называют – затвором (З). Тогда на границе раздела областей с различным типом проводимости возникнет p - n -переход. Управляющей (входной, либо маломощной) цепью ПТ является цепь затвор – исток с источником питания $U_{зи}$, а управляемой (выходной, или мощной) – цепь сток – исток. В выходную (стоковую) цепь включается нагрузка R_c и источник питания $U_{си}$.

Полярность напряжения $U_{зи}$ подаваемого на затвор должна совпадать со знаком носителей в канале т.е. смещать p - n -переход в обратном направлении. Полярность напряжения подаваемого между стоком и истоком $U_{си}$ должна обеспечить поток носителей в канале от истока к стоку. Под действием напряжения $U_{си}$ между торцевыми поверхностями полупроводника потечет ток стока I_c , ток основных носителей заряда. Образуется так называемый токопроводящий канал. Площадь поперечного сечения этого канала, а, следовательно, и его сопротивление, зависит от ширины p - n -перехода. Изменяя величину напряжения источника $U_{зи}$, меняем обратное напряжение на p - n -переходе, а значит и его ширину.

При $U_{зи} = 0$ ток стока в канале имеет максимальное значение $I_c = I_{c \text{ нач}}$, поскольку сечение канала, а, следовательно, и проводимость, максимальные. Изменяя напряжение на затворе $U_{зи}$ можно изменять сечение канала (расширением или сужением обедненных слоев переходов), а, следовательно, и сопротивление канала и ток протекающий через него. Напряжение между затвором и истоком, при котором ток стока $I_c = 0$, называют напряжением отсечки – $U_{зи \text{ отс}}$. Уравнение, отражающее квадратичную зависимость тока стока от напряжения затвор-исток, имеет вид:

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

Рассмотренные процессы иллюстрирует стоко-затворная характеристика ПТ (характеристика управления) – $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$, представленная на рисунке 5.2, (а).

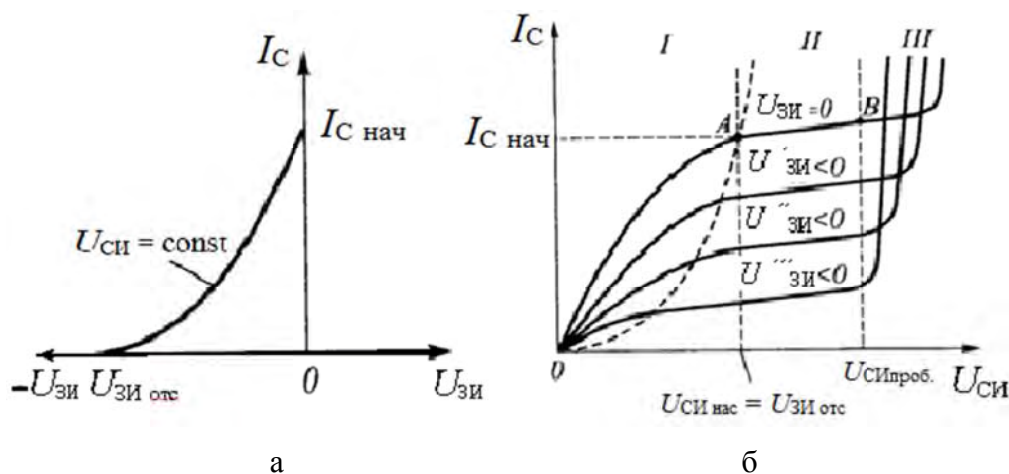


Рисунок 5.2 – Стоко-затворная (а) и стоковые (б) характеристики ПТ с управляющим р-п-переходом для схемы включения с ОИ

На рисунке 5.2, (б) показано семейство стоковых (выходных) характеристик ПТ – $I_C = f(U_{СИ})$, при $U_{ЗИ} = \text{const}$.

Рассмотрим вначале характеристику семейства при $U_{ЗИ} = 0$. При малых значениях $U_{СИ}$ увеличение напряжения приводит к почти линейному увеличению тока стока. По мере роста $U_{СИ}$ характеристика $I_C = f(U_{СИ})$ все сильнее отклоняется от линейной (область I). Нелинейный характер тока стока объясняется тем, что с ростом напряжения $U_{СИ}$ сечение канала уменьшается, причем тем больше, чем ближе к стоку. При этом проводимость канала уменьшается, а рост тока замедляется. Когда напряжение на стоке достигает уровня, так называемого напряжения насыщения $U_{СИнас}$, происходит полное перекрытие канала у стока. Дальнейшее увеличение $U_{СИ}$ приводит к слабому увеличению тока стока (область II), поскольку одновременно увеличивается сопротивление канала, а ток стока достигает значения тока насыщения $I_{Cнач}$. Очевидно, что при $U_{ЗИ} = 0$, $U_{СИнас} = U_{ЗИотс}$. Режим пологого участка ВАХ называют *режимом насыщения*.

При условии $|U_{ЗИ}| < 0$, под действием двух напряжений $U_{ЗИ}$ и $U_{СИ}$ расширяются обедненные слои переходов, увеличивается протяженность перекрытой части канала и режим насыщения наступает раньше. Напряжение насыщения уменьшается и для любого значения напряжения на затворе $U_{ЗИ}$ составляет $U_{СИнас} = U_{ЗИотс} - U_{ЗИ}$. Со смещением напряжения $U_{СИнас}$ уменьшается также ток насыщения $I_{Cнач}$ стока.

При больших напряжениях на стоке наступает пробой структуры (область III). Как видно из рисунка 5.2, б) с уменьшением напряжения $U_{ЗИ}$ пробивное напряжение транзистора $U_{СИпроб}$ уменьшается. При этом всегда выполняется равенство $U_{СИпроб} = U_{СИпроб}(\text{при } U_{ЗИ} = 0) + U_{ЗИ}$.

В рабочем режиме используют пологие участки выходных характеристик ПТ.

Из приведенных на рисунке 5.2 характеристик видно, что полярность управляющего $U_{зи}$ и выходного напряжений ПТ с управляющим p - n -переходом не совпадают.

Стоко-затворная и стоковые характеристики взаимосвязаны. Располагая семейством стоковых характеристик, легко построить стоко-затворную характеристику путем переноса соответствующих точек из одной системы координат в другую.

Условное обозначение ПТ с управляющим p - n -переходом на принципиальных схемах приведено на рисунке 5.3.

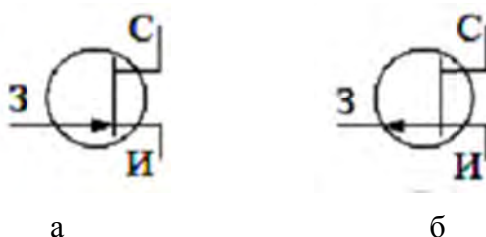


Рисунок 5.3 – Условные обозначения ПТ с управляющим p - n -переходом, имеющего канал n -типа (а) и p -типа (б)

5.3 Полевые транзисторы с изолированным затвором

Полевой транзистор с изолированным затвором – это транзистор, имеющий один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала.

Дальнейшим развитием полевых транзисторов являются транзисторы с изолированным затвором. У них металлический затвор отделен от полупроводникового канала тонким слоем диэлектрика. Поскольку металлический затвор отделен от полупроводника слоем диэлектрика, то входное сопротивление таких транзисторов велико.

Полевые транзисторы с изолированным затвором бывают двух типов:

- со встроенным (собственным) каналом;
- с индуцированным (инверсионным) каналом.

Структура в обоих типах полевых транзисторов с изолированным затвором одинакова: металл – окисел (диэлектрик) – полупроводник, то такие транзисторы еще называют МОП-транзисторами (металл–окисел–полупроводник), или МДП-транзисторами (металл–диэлектрик–полупроводник).

5.3.1 Полевой транзистор с изолированным затвором со встроенным каналом

Структура МОП транзистора с изолированным затвором со встроенным каналом n -типа изображена на рисунке 5.4.

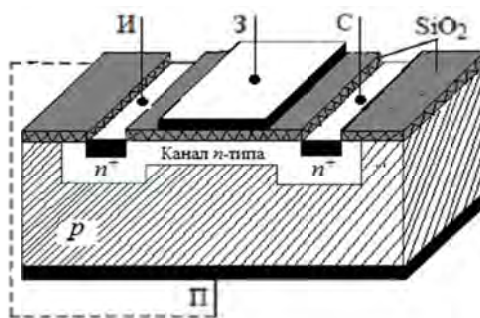


Рисунок 5.4 – Структура МОП-транзистора со встроенным каналом n -типа

МОП-транзистор представляет собой монокристалл полупроводника, обычно кремния, где создана электропроводность какого-либо типа, в рассматриваемом случае p -типа. В нем созданы две области с электропроводностью противоположного типа (в нашем случае n^+ - типа), которые соединены между собой тонким приповерхностным слоем (каналом) этого же типа проводимости. От этих двух зон сформированы электрические выводы, которые называют истоком и стоком. Сток и исток выполнены более легированными, чем канал, они обозначены n^+ . На поверхности канала имеется слой диэлектрика (обычно диоксида кремния SiO_2) толщиной порядка 0,1 мкм, а на нем методом напыления наносится тонкая металлическая пленка, от которой также делается электрический вывод – затвор.

Основа, или подложка, служит исключительно для создания рабочих зон МОП – транзистора и обеспечения прочности прибора. Иногда от основания, называемого подложкой (П), также делается вывод, который накоротко соединяют с истоком.

При наличии напряжения между стоком и истоком $U_{СИ} \neq 0$, ток в цепи стока I_C будет протекать даже при нулевом смещении на затворе $U_{ЗИ}=0$. Из анализа этих характеристик видно, что при отсутствии управляющего напряжения, когда $U_{ЗИ} = 0$, значение выходного тока транзистора I_C отлично от нуля и равно некоторому значению, которое называют начальным током стока - $I_{C \text{ нач}}$. Если к затвору относительно истока и подложки приложить отрицательное напряжение, то дырки с подложки будут втягиваться в канал, а электроны (основные носители в канале n -типа) выталкиваться. Проводимость канала, лишенного части электронов уменьшается, в результате чего ток стока падает. Такой режим работы называется режимом обеднения. При $U_{ЗИ} = U_{ЗИ \text{ отс}}$ встроенный канал исчезает, и ток стока равен нулю, как показано на рисунке 5.5, (а). Положительное смещение на затворе ($U_{ЗИ} > 0$) вызывает приток в канал электронов, их концентрация увеличивается, проводимость канала возрастает и, ток стока увеличивается. Такой режим работы МОП – транзистора называют режимом обогащения. Граница режима насыщения показана на рисунке 5.5, (б) штриховой линией при выходном напряжении $U_{СИнас} = U_{ЗИ} - U_{ЗИпор}$.

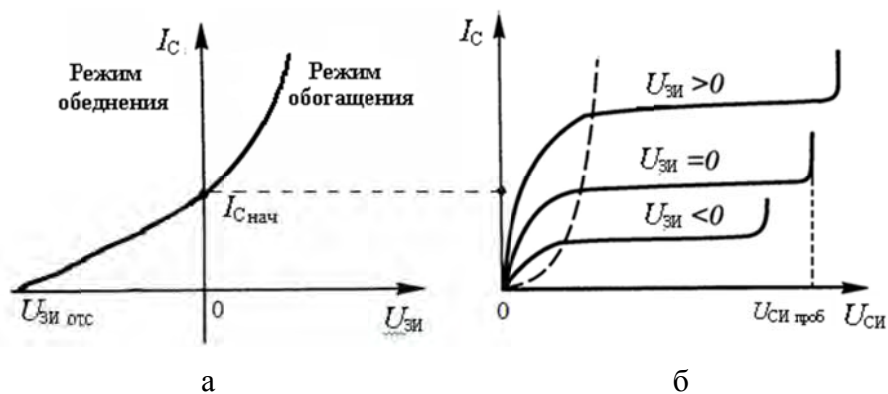


Рисунок 5.5 – Стоко-затворная (а) и семейство стоковых характеристик (б) МОП-транзистора со встроенным каналом n -типа

Таким образом, МДП-транзистор со встроенным каналом по своим свойствам и характеристикам подобен ПТ с управляющим p - n -переходом и отличается лишь тем, что для его закрытия требуется отрицательное смещение в случае канала с проводимостью n -типа и положительное смещение – в случае проводимости p -типа. Условные графические обозначения МОП-транзисторов на принципиальных электрических схемах приведены на рисунке 5.6.

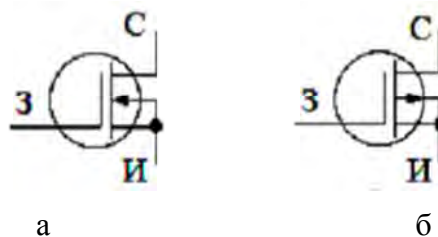


Рисунок 5.6 Условные графические обозначения МОП-транзистора со встроенным каналом n -типа (а) и p -типа (б)

5.3.2 Полевой транзистор с индуцированным каналом

Устройство полевого транзистора с индуцированным каналом показано на рисунке 5.7. От предыдущего транзистора он отличается тем, что у него нет встроенного канала между областями истока и стока.

Пусть напряжение на затворе отсутствует, т.е. $U_{ЗИ} = 0$.

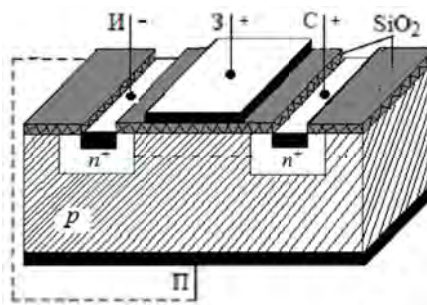


Рисунок 5.7 – Структура полевого транзистора с изолированным затвором с индуцированным каналом n -типа

Если между стоком и истоком подвести напряжение указанной на рисунке 5.7 полярности, то при нулевом потенциале на затворе на пути от истока к стоку окажутся два встречно включенных p - n -перехода. Один из p - n -переходов будет обязательно заперт и выходной ток стока будет ничтожно мал (примерно равен обратному току p - n -перехода).

Если подать на затвор напряжение положительной полярности относительно истока ($U_{зи} > 0$), то под действием возникающего ускоряющего поперечного электрического поля электроны из областей истока и стока, а также из областей кристалла (подложки), будут перемещаться в приповерхностную область по направлению к затвору. Когда напряжение на затворе превысит некоторое пороговое значение, то в приповерхностном слое концентрация электронов повысится настолько, что превысит концентрацию дырок в этой области и здесь произойдет инверсия типа электропроводности, т.е. образуется тонкий канал n -типа и в цепи стока появится ток. Чем больше положительное напряжение на затворе, тем больше проводимость канала и больше ток стока. Такой канал называется индуцированным, т.е. наведенным полем затвора. Поэтому такой транзистор может работать только в режиме обогащения. Напряжение затвора, при котором образуется токопроводящий канал, называется пороговым напряжением $U_{зи\text{ пор}}$.

Если кристалл полупроводника имеет электропроводность n -типа, то области истока и стока должны быть p -типа. Такого же типа проводимости будет индуцироваться и канал, если на затвор подавать отрицательное напряжение относительно истока. В этом случае, получается МДП-транзистор с индуцированным каналом p -типа. Вид статических характеристик транзистора с индуцированным каналом n -типа показан на рисунке 5.8.

Из характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом видно, что, во-первых, полярности входного ($U_{зи}$) и выходного ($U_{си}$) напряжений всегда совпадают и, во-вторых, увеличение $U_{зи}$ ведет к увеличению тока стока I_C .

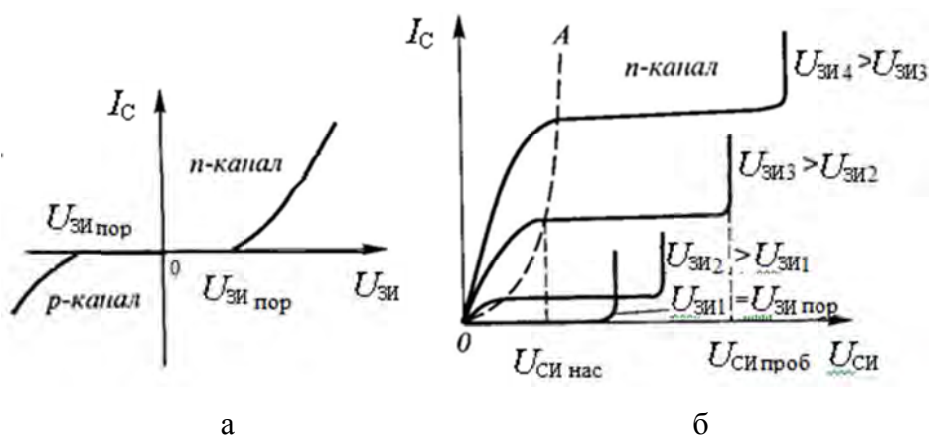


Рисунок. 5.8 – Статические характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа: стоко-затворная (а) и стоковые (б)

Графическое изображение полевых транзисторов с индуцированным каналом на принципиальных электрических схемах показано на рисунке 5.9 (а), (б).

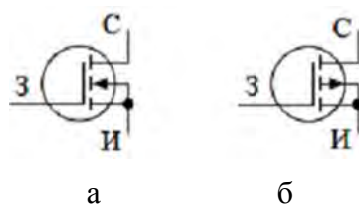


Рисунок 5.9 – Условные графические обозначения МДП-транзистора с индуцированным каналом n-типа (а) и p-типа (б)

В последнее время МДП-транзисторы все чаще обозначают термином, заимствованным из зарубежной литературы, – *MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)*.

5.4 Схемы включения и основные параметры полевых транзисторов

Так же, как и биполярные транзисторы, полевые транзисторы могут иметь три схемы включения, примеры схем включения показаны на рисунке 5.10: с общим истоком (ОИ), с общим затвором (ОЗ) и с общим стоком (ОС). Схема включения определяется тем, какой из трех электродов транзистора является общим и для входной и выходной цепи. Очевидно, что рассмотренный нами пример, приведенный на рисунке 5.1, является схемой с общим истоком, как видно из рисунка 5.10, (а).

Схема с общим затвором, показанная на рисунке. 5.10, (б) аналогична схеме с общей базой у биполярных транзисторов. Она не дает усиления по току, а входное сопротивление здесь маленькое, так как входным током является ток стока, вследствие этого данная схема на практике не используется.

Схема с общим стоком, показана на рисунке 5.10, (в) подобна схеме с общим коллектором на биполярном транзисторе. Для данной схемы коэффициент усиления по напряжению близок к единице. Выходное напряжение по величине и фазе повторяет входное. В этой схеме очень высокое входное сопротивление и малое выходное.

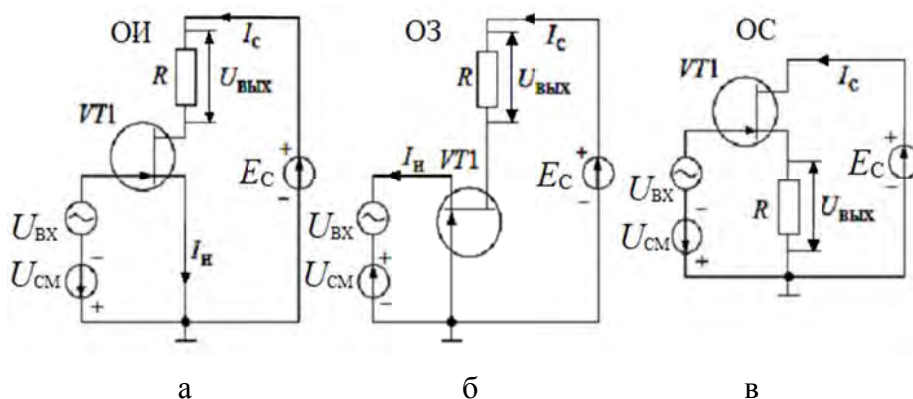


Рисунок 5.10 – Схемы включения полевых транзисторов: ОИ (а); ОЗ (б); ОС (в)

Основными параметрами ПТ являются:

1. Крутизна вольт-амперной характеристики (определяется по стоко-затворной характеристике):

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ} \text{ при } U_{СИ} = \text{const},$$

характеризует усилительные свойства прибора. Числовые значения этого параметра составляют $0,1 \div 500$ мА/В. Крутизна характеристики уменьшается с ростом напряжения $U_{ЗИ}$ согласно выражению:

$$S = S_{\max} \cdot (1 - U_{ЗИ} / U_{ЗИ\text{отс}}), \text{ где } S_{\max} = 2 \cdot I_{C \text{ нач}} / U_{ЗИ \text{отс}}.$$

2. Внутреннее (выходное) сопротивление транзистора:

$$R_i = R_{ВЫХ} = \Delta U_{СИ} / \Delta I_C \text{ при } U_{ЗИ} = \text{const},$$

характеризует наклон выходной характеристики на участке насыщения.

Поскольку на пологих участках выходных характеристик ток стока меняется очень мало, то внутреннее сопротивление имеет значение сотни кОм - единицы МОм.

3. Входное сопротивление транзистора – $R_{ВХ} = \Delta U_{ЗИ} / \Delta I_3$ при $U_{СИ} = \text{const}$.

Поскольку ток затвора I_3 определяется обратным током перехода, то входное сопротивление ПТ очень большое: $10^6 \dots 10^9$ Ом.

4. Коэффициент усиления по напряжению – $\mu = S \cdot R_i = \Delta U_{СИ} / \Delta U_{ЗИ}$ при $I_C = \text{const}$. Типовые значения $\mu = 50 \dots 200$.

5. Начальный ток стока $I_{C \text{ нач}}$ – ток при нулевом напряжении на затворе $U_{ЗИ}$: у транзисторов с управляющим p - n -переходом $I_{C \text{ нач}} = 0,2 \dots 600$ мА; с встроенным каналом $I_{C \text{ нач}} = 0,1 \dots 100$ мА; с индуцированным каналом $I_{C \text{ нач}} = 0,01 \dots 0,5$ мкА.

6. Напряжение отсечки $U_{ЗИ\text{отс}} = 0,2 \dots 10$ В.

7. Пороговое напряжение $U_{ЗИ\text{пор}} = 1 \dots 6$ В.

8. Сопротивление сток-исток в открытом состоянии транзистора $R_{СИ} = 0,06 \dots 300$ Ом.

9. Максимальный ток стока $I_{C\text{max}} = 10 \text{ мА} \dots 50 \text{ А}$.

10. Максимальная частота усиления f_p – частота, на которой коэффициент усиления по мощности K_p равен единице (f_p = десятки ... сотни МГц).

К достоинствам ПТ, кроме высокого входного сопротивления, также относят малый уровень собственных шумов, достаточно высокую термостабильность и радиационную стойкость.

5.5 Эквивалентные схемы полевых транзисторов

Эквивалентные схемы полевых транзисторов приведены на рисунке 5.11. В этих схемах принято, что вывод подложки соединен с истоком.

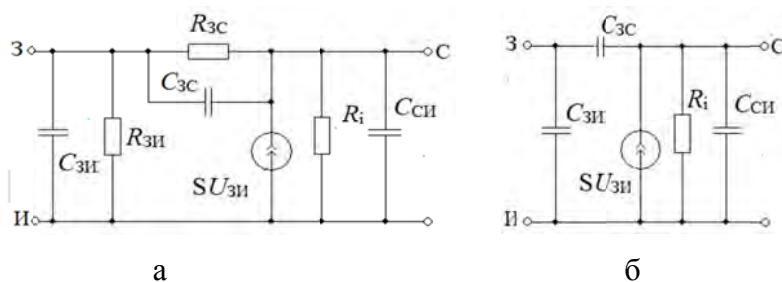


Рисунок 5.11 – Схемы замещения ПТ: с управляющим p - n -переходом (а); с изолированным затвором (б)

Усилительные свойства транзистора, который имеет крутизну S , отображаются идеальным источником тока $S \cdot U_{зи}$. Сопротивление R_i характеризует внутреннее сопротивление транзистора. В транзисторе с управляющим p - n -переходом емкость $C_{си}$ в основном определяется емкостью между электродами сток-исток, а в МДП-транзисторе $C_{си}$ определяется еще и емкостью p - n -перехода между подложкой и областями исток-сток. Поэтому в МДП-транзисторе $C_{си}$ значительно больше, чем в ПТ с управляющим p - n -переходом. Поскольку ПТ работает обратным смещенным p - n -переходом, то емкости $C_{зи}$ и $C_{зс}$ являются барьерными. Ориентировочно для маломощных транзисторов разного типа $C_{зи} = 2 \dots 15$ пФ; $C_{зс} = 0,3 \dots 10$ пФ. Емкость $C_{си}$, как правило, не превышает 1 пФ. Эти эквивалентные схемы ПТ справедливы для частот не превышающих $0,7 f_p$.

5.6 Комбинированные транзисторы

Вред от паразитного биполярного транзистора в составе МДП-транзистора можно обратить в пользу, если к нему добавить еще один дополнительный биполярный транзистор обратного типа проводимости по отношению к паразитному. Такое компромиссное решение, позволило объединить положительные качества биполярного и МДП-транзистора и создать монолитную структуру так называемого *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) транзистора – биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ). Эквивалентная схема *IGBT* транзистора приведена на рисунке 5.12.

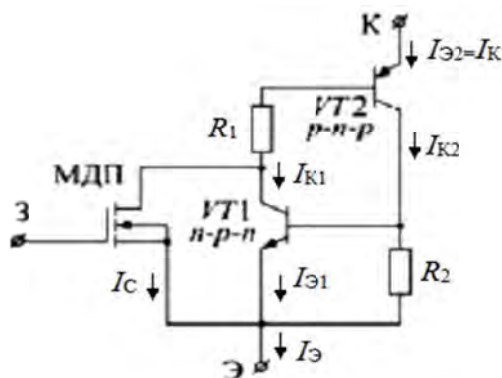


Рисунок 5.12 – Эквивалентная схема *IGBT* транзистора

Комбинированная схема *IGBT* транзистора содержит: МДП-транзистор, паразитный биполярный транзистор VT1, и подключенный к нему, еще один биполярный транзистор VT2. Образовавшаяся структура из транзисторов VT1 и VT2 имеет положительную внутреннюю обратную связь, так как базовый ток транзистора VT1 является частью коллекторного тока транзистора VT2, и наоборот, – базовый ток транзистора VT2 является частью коллекторного тока транзистора VT1. Коэффициенты передачи по току транзисторов VT1 и VT2 равны, соответственно, α_1 и α_2 .

Тогда токи коллектора и эмиттера определяются:

$$I_{K1} = \alpha_1 I_{Э1};$$

$$I_{K2} = \alpha_2 I_{Э2};$$

$$I_{Э} = I_{K1} + I_{K2} + I_C.$$

Ток стока полевого транзистора определяется по выражению:

$$I_C = I_{Э} (1 - \alpha_1 - \alpha_2).$$

С другой стороны, ток стока можно определить через крутизну S стоко-затворной характеристики:

$$I_C = S \cdot U_{зэ}.$$

Ток силовой части всей схемы будет определяться:

$$I_K = I_{Э} = \frac{S \cdot U_{зэ}}{1 - (\alpha_1 - \alpha_2)} = S_{\text{ЭКВ}} \cdot U_{зэ},$$

где $S_{\text{ЭКВ}} = \frac{S}{1 - (\alpha_1 - \alpha_2)}$ - эквивалентная крутизна всей схемы.

Очевидно, что при $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$ эквивалентная крутизна значительно превосходит крутизну S МДП-транзистора, входящего в эту схему. Коэффициентами α_1 и α_2 можно управлять величиной резисторов R_1 и R_2 , которая осуществляется на этапе изготовления этой схемы.

Всю рассмотренную схему можно представить как единый полупроводниковый прибор, имеющий вывод коллектора, эмиттера и затвора, который управляется электрическим полем, как МДП-транзистор, но имеет по сравнению с ним, значительно большую крутизну, и значительно меньшее сопротивление, в открытом состоянии. Кроме того, здесь отсутствует явление вторичного пробоя, характерное для классических биполярных транзисторов.

Условное графическое изображение *IGBT* транзистора представлено на рисунке 5.13.



Рисунок 5.13 – Условное графическое изображение *IGBT* транзистора: отечественное (а) и зарубежное (б)

Конструктивно *IGBT* транзисторы выполняются в виде дискретных элементов, либо в виде силовых модулей, имеющих в своем составе несколько транзисторов *IGBT* выполненных в едином корпусе.

На рисунке 5.14 изображены типовые коллекторные характеристики (выходные) *IGBT* транзистора.

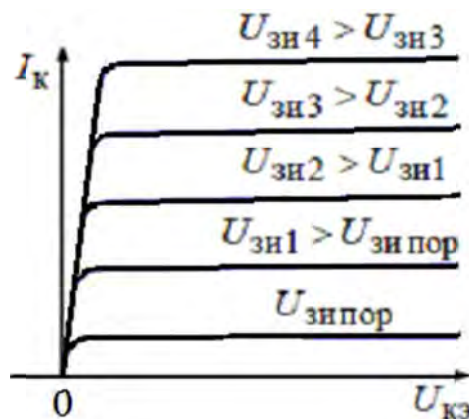


Рисунок 5.14 – Типовые коллекторные характеристики *IGBT* транзистора

Динамические свойства *IGBT* несколько хуже, чем у МДП-транзисторов, но значительно лучше, чем у биполярных транзисторов. Это связано с явлением накопления заряда неосновных носителей в базе биполярного транзистора, и как следствие – со временем рассасывания этих носителей. Процесс запираания *IGBT* представлен на рисунке 5.15. Заряд, накопленный в базе биполярного транзистора, вызывает характерный «хвост» тока при выключении *IGBT* транзистора. Как только имеющийся в составе *IGBT* полевой транзистор прекращает проводить ток, в силовой цепи начинается рекомбинация неосновных носителей, которая является началом «хвоста». Этот «хвост» ведет к увеличению тепловых потерь, а также его необходимо учитывать в мостовых схемах и вводить промежуток между интервалами проводимости двух ключей, установленных в одном плече моста. Для уменьшения «хвоста» необходимо снизить коэффициент усиления биполярного транзистора, но тогда увеличивается напряжение насыщения открытого *IGBT* транзистора, и соответственно – статические потери.

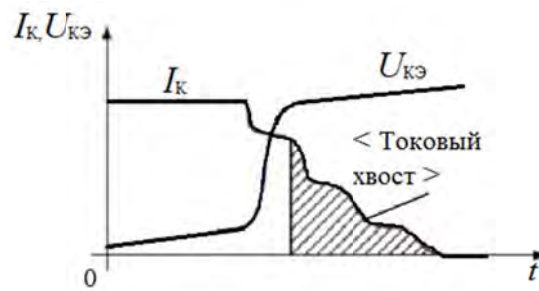


Рисунок 5.15 – Процесс записи *IGBT* транзистора

Тем не менее, несмотря на отмеченные особенности *IGBT* транзисторы на сегодняшний день представляются самыми перспективными элементами для использования в качестве силовых управляемых ключей в диапазоне мощностей от единиц киловатт до единиц мегаватт.

5.7 Контрольные вопросы

1. Объясните название транзисторов "полевые" с точки зрения входного воздействия, управления их состоянием.
2. На какие типы подразделяют полевые транзисторы по технологии производства? Дайте краткую характеристику каждому из них.
3. Назовите электроды полевого транзистора и коротко охарактеризуйте их назначение. Приведите схемное обозначение полевых транзисторов?
4. Изобразите структуру полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом и объясните, что происходит в ней при изменении напряжения на затворе.
5. Поясните конструкцию и характеристики ПТ с изолированным затвором. Дайте пояснения режимам обеднения и обогащения канала.
6. Перечислите и дайте характеристику основным параметрам ПТ. Как их можно определить и по каким характеристикам?
7. Какие эквивалентные схемы ПТ вам известны? Что отображают элементы этих схем?
8. Дайте общую характеристику схемам включения униполярных транзисторов?
9. Какими преимуществами обладают полевые транзисторы от биполярных?
10. Поясните принцип построения силовых транзисторов?
11. Приведите структуру комбинированного *IGBT* транзистора и его характеристики?

6. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Оптоэлектроника – раздел науки и техники, в котором изучаются вопросы генерации, обработки, запоминания и хранения информации на основе совместного использования оптических и электрических явлений.

В современной технике находят широкое применение оптоэлектронные полупроводниковые приборы.

Оптоэлектронный полупроводниковый прибор – это полупроводниковый прибор, излучающий или преобразующий электромагнитное излучение, чувствительный к этому излучению в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра или использующий подобное излучение для внутреннего взаимодействия его элементов.

В оптоэлектронике в качестве носителя информации используются электромагнитные волны оптического диапазона. Длины волн оптического излучения λ лежат в диапазоне от 1 нм до 1 мм. Оптический диапазон волн разбивается на три поддиапазона: ультрафиолетовый ($\lambda = 0,01 \dots 0,38$ мкм), видимый ($\lambda = 0,38 \dots 0,78$ мкм) и инфракрасный ($\lambda = 0,78 \dots 1000$ мкм).

Световой луч в оптоэлектронике выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

В оптических цепях в качестве носителей сигналов выступают электрически нейтральные фотоны, которые в световом потоке не взаимодействуют между собой, не смешиваются и не рассеиваются. Оптические цепи не подвержены влиянию электрических и магнитных полей. В электрических же цепях носителями заряда являются электроны, которые взаимодействуют с внешними электрическими и магнитными полями, что требует экранирования и защиты от них. В электрических цепях трудно осуществить гальваническую развязку по постоянному току и на низких частотах.

Невосприимчивость оптического излучения к различным внешним воздействиям и электронейтральность фотона предопределили применение компонентов оптоэлектроники и электроники в тех областях, где их применение целесообразно.

По принципу действия оптоэлектронные приборы подразделяются на приборы, использующие внешний фотоэффект и внутренний фотоэффект.

Внешний фотоэффект – это явление выбивания электронов с поверхности металла под действием светового излучения. Это явление еще называют фотоэлектронной эмиссией.

Внутренний фотоэффект наблюдается в полупроводниковых материалах при облучении их поверхности лучами света. Суть его заключается в увеличении концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике под действием внешнего света, а следовательно, и его электропроводности.

6.1 Фотоэлектрические приборы на основе внутреннего фотоэффекта

Фотоэлектрическими приборами называют электронные приборы, преобразующие энергию излучения в электрическую энергию. В настоящее время такие приборы чаще всего строятся на использовании внутреннего фотоэффекта в полупроводнике. Он заключается в том, что при поглощении энергии фотона атомом полупроводника может возникнуть пара «электрон – дырка», если этой энергии достаточно для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, т.е. если поглощенная энергия превышает ширину запрещенной зоны.

Образование пар «электрон – дырка» обуславливает собственную электропроводность полупроводника, которая в данном случае является фотопроводимостью, причём собственная электропроводность может оказаться значительно больше проводимости примесной. Фотопроводимость зависит от интенсивности и спектрального состава внешнего светового потока.

Внутренний фотоэффект широко применяется в различных фотоэлектрических приборах: фоторезисторах, фотодиодах, фототранзисторах и фототиристорах.

6.1.1 Фоторезисторы

Фоторезистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого уменьшается при воздействии видимых световых и невидимых инфракрасных лучей.

Уменьшение сопротивления фоторезистора происходит за счет генерации светом пар свободных носителей заряда (электронов и дырок), увеличивающих электропроводность полупроводника (эффект фотопроводимости).

Фоторезисторы выполняются в самых различных конструктивных вариантах, различного назначения, по различным технологиям и с различными параметрами, но в общем виде это – чувствительный к излучению слой полупроводника, прикреплённый к изоляционной подложке, по краям которого смонтированы токоведущие электроды.

В качестве исходного материала фоторезистора чаще всего используется теллуристый кадмий (CdTe), селенистый теллур (TeSe), сернистый висмут (BiS), сернистый кадмий (CdS) и др.

К видимому свету наиболее чувствительны фоторезисторы, токопроводящие элементы которых представляют собой таблетки из селенида кадмия или сернистого кадмия. Тонкие слои сернистого селенистого свинца, нанесенные на стеклянную или ситаловую подложки, более чувствительны к инфракрасному излучению.

Для защиты от атмосферных воздействий верхняя поверхность фотослоя покрыта прозрачным лаком. Вся сборка может быть помещена в защитный корпус, в котором сделано окно для прохождения излучения.

Поперечная конструкция фоторезистора и его условное графическое изображение на принципиальных схемах приведено на рисунке 6.1.

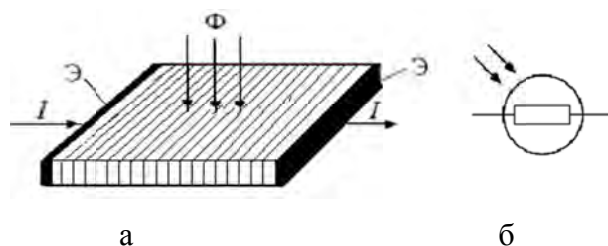


Рисунок 6.1 – Поперечная конструкция фоторезистора (а) и его условное графическое изображение на принципиальных схемах (б)

При облучении фоторезистора возрастает его проводимость, и соответственно возрастает ток. Выходное напряжение, пропорциональное потоку излучения, снимается с сопротивления нагрузки.

Основными характеристиками фоторезистора являются:

1. Вольт-амперные характеристики – $I_{\Phi} = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$.

Это зависимости тока в фоторезисторе от напряжения источника питания U при постоянном потоке излучения Φ . Эти характеристики практически линейны, как показано на рисунке 6.2. При $\Phi = 0$ через фоторезистор протекает маленький темновой ток I_T ; при освещении ток возрастает за счёт увеличения фотопроводимости. В этом случае ток называется световым I_C . Разность между световым и темновым токами составляет фототок I_{Φ} .

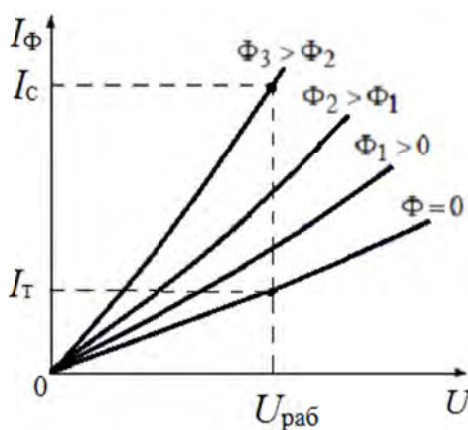


Рисунок 6.2 – ВАХ фоторезистора

2. Световая характеристика – $I_{\Phi} = f(\Phi)$ при $U = \text{const}$.

Это зависимость фототока I_{Φ} от потока излучения Φ при постоянном напряжении источника питания. Существенная нелинейность этих характеристик, как показано на рисунке 6.3, объясняется не только увеличением количества носителей с увеличением потока излучения, но и процесса их рекомбинации.

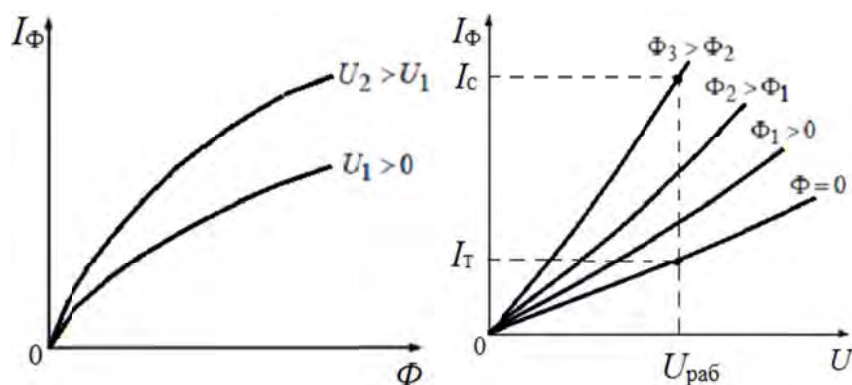


Рисунок 6.3 – Световая характеристика фоторезистора

3. Спектральная характеристика $S^* = f(\lambda)$, где λ – длина волны электромагнитного излучения. Эта характеристика обусловлена материалом и технологией изготовления фотослоя. Типовой вид этой характеристики представлен на рисунке 6.4.

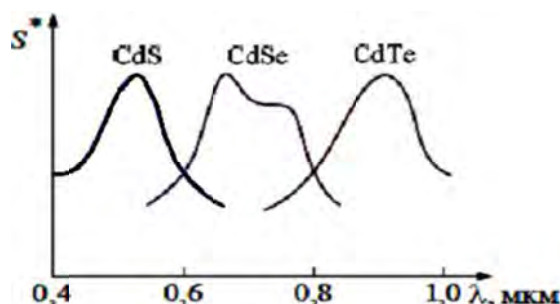


Рисунок 6.4 – Относительные спектральные характеристики фоторезистора

Наиболее распространены фоторезисторы на основе CdS (сульфидно-кадмиевые) и CdSe (селенидо-кадмиевые), спектральные характеристики которых располагаются на красном краю видимой области спектра, как показано на рисунке 6.4. В инфракрасном диапазоне работают фоторезисторы на основе PbS (сульфидно-свинцовые) и PbSe (селенидо-свинцовые), а также изготовленные из Ge, Si, GaAs, InSb и ряд других.

Основными параметрами фоторезисторов являются:

- Чувствительность: $K = I_\Phi / \Phi$, при $U = \text{const}$.
- Номинальное значение фототока: $I_{\Phi\text{ном}}$.
- Темновое сопротивление: $R_{\text{темн}}$.
- Отношение: $R_{\text{темн}} / R_{\Phi\text{ном}}$.
- Рабочее напряжение: $U_{\text{раб}}$.

Значительная зависимость сопротивления фоторезистора от температуры, является их недостатком. Существенным недостатком фоторезисторов также является их инерционность, объясняющуюся большим временем рекомбинации электронов и дырок после прекращения воздействия излучения. Собственные шумы фоторезисторов также довольно значительны.

Несмотря на эти недостатки, фоторезисторы широко применяются в различных схемах автоматики и во многих других устройствах.

6.1.2 Фотодиоды

Фотодиод (ФД) представляет собой полупроводниковый фотоэлектрический прибор, содержащий p - n -переход, управление величиной обратного тока которого осуществляется с помощью света.

В семейство фотодиодов входят приборы с p - n -переходом, с p - i - n -структурой, с контактом металл-полупроводник и с гетеропереходом.

Фотодиоды имеют различную конструкцию, различное назначение и различные параметры, но в большинстве случаев структура фотодиода аналогична обычному полупроводниковому диоду, как показано на рисунке 6.5. Отличие состоит в том, что его корпус снабжен дополнительной линзой, создающей внешний световой поток, направленный, как правило, перпендикулярно плоскости p - n -перехода.

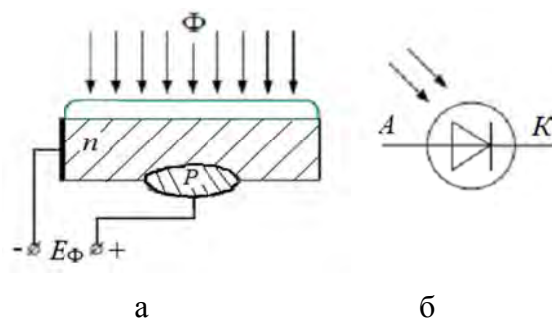


Рисунок 6.5 – Конструкция (а) и условное обозначение фотодиода (б)

Фотодиод можно использовать в двух различных включениях: фотодиодном и фотогенераторном.

Фотогенераторное включение, как показано на рисунке 6.6, предполагает использование фотодиода как источника фото-ЭДС, значение которой пропорционально интенсивности светового потока. В настоящее время фотодиод называют полупроводниковым фотоэлементом.

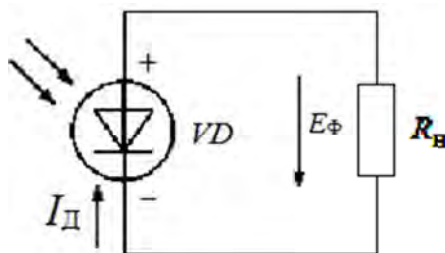


Рисунок 6.6 – Фотогенераторное включение фотодиода

Рассмотрим процесс возникновения фото-ЭДС в фотодиоде. В отсутствие освещения фотодиода концентрация носителей в его обеих областях будет равновесной, а, следовательно, никакой разности потенциалов между областями не будет. Если же осветить полупроводник лучами света, то в результате поглощения энергии фотонов будут образовываться пары «электрон – дырка».

Дырки в области p -типа являются основными носителями, поэтому поле p - n -перехода будет их отталкивать от границы раздела, а вот образовавшиеся свободные электроны, являясь в области p - типа неосновными носителями, будут переброшены полем через границу раздела в область n - типа, где они являются основными. Аналогично, в области n -типа из образовавшихся носителей «электрон – дырка» только дырки, являясь неосновными носителями, будут переброшены через границу раздела в область p -типа, а образовавшиеся свободные электроны только пополнят количество основных носителей в области n -типа, увеличив их концентрацию.

Таким образом, за счёт поглощённой световой энергии в полупроводнике образуются пары носителей; неосновные носители перебрасываются в соседнюю область электрическим полем p - n -перехода, а основные носители остаются в своей области; концентрация носителей возрастает и становится сверхравновесной, т.е. суммарный электрический заряд основных носителей в обеих областях полупроводника уже не уравнивается противоположным зарядом ионов примеси, и следовательно в области p -типа появляется суммарный положительный заряд, а в области n -типа – суммарный отрицательный заряд, которые обусловят возникновение разности потенциалов между областью p - и областью n -типа. Эту разность потенциалов называют фото-ЭДС - $E_{\text{ф}}$. Если теперь создать внешнюю электрическую цепь между областями p - и n -типа, то по ней потечёт электрический ток – фототок под действием возникшей фото-ЭДС.

Основными характеристиками фотодиода являются:

1. Вольт-амперная характеристика – $I_{\text{ф}} = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$. Это зависимость фототока от напряжения на фотодиоде при неизменном световом потоке. ВАХ фотодиода описывается следующим уравнением:

$$U_{\text{н}} = \ln\left(\frac{I_{\text{с}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{т}}} + 1\right) \cdot \frac{kT}{q},$$

где $U_{\text{н}}$ – напряжение между анодом и катодом фотодиода. В режиме фотогенератора это – напряжение на нагрузке;

$I_{\text{с}}$ – световой ток – суммарный поток носителей электрического заряда, образовавшихся вследствие внутреннего фотоэффекта и разделённых полем p - n -перехода;

$I_{\text{н}}$ – ток нагрузки (в случае фотогенераторного включения);

$I_{\text{т}}$ – темновой ток – суммарный поток носителей электрических зарядов, пересекающих границу раздела при отсутствии освещения;

k – постоянная Больцмана;

q – заряд электрона;

T – абсолютная температура.

Вид вольт-амперной характеристики фотодиода показан на рисунке 6.7.

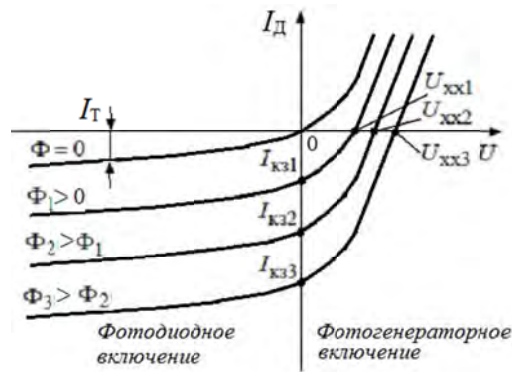


Рисунок 6.7 – Вольт-амперная характеристика фотодиода

При $\Phi=0$ вольт-амперная характеристика фотодиода превращается в вольт-амперную характеристику обычного p - n -перехода.

При наличии освещения $\Phi > 0$ ток нагрузки, как видно из рисунка 6.6, потечёт по внешней цепи от области p к области n , а внутри кристалла – от области n к области p , т.е. в направлении, которое для обыкновенного диода является обратным и откладывается вниз от нуля по оси ординат; напряжение на фотодиоде – (+) на области p , (–) на области n является прямым для обыкновенного диода и поэтому откладывается вправо от нуля на оси абсцисс. Фактически вольт-амперная характеристика фотодиода представляет собой вольт-амперную характеристику обычного p - n -перехода, смещённую вниз и вправо в зависимости от светового потока Φ .

Точки пересечения характеристики с осями координат представляют собой напряжение холостого хода (или фото-ЭДС) на оси абсцисс и ток короткого замыкания на оси ординат.

Участок характеристики за точкой $U_{хх}$ представляет собой режим, когда фотодиод работает с внешним источником ЭДС, включенным встречно по отношению к фотодиоду.

Участок за точкой $I_{кз}$ характеризует работу фотодиода с внешним источником ЭДС, включенным согласно по отношению к фотодиоду. Это и есть фотодиодное включение, которое будет рассматриваться ниже.

2. Световая характеристика фотодиода – $I_C = f(\Phi)$ или $E_\Phi = f(\Phi)$ представлена на рисунке. 6.8.

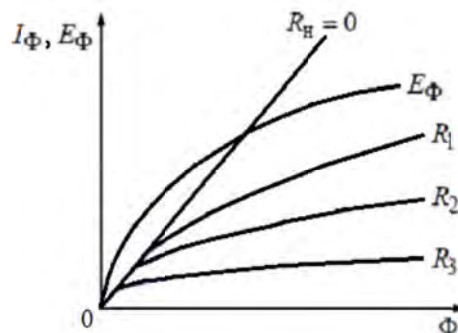


Рисунок 6.8 – Световая характеристика фотодиода

Как следует из выражения для ВАХ фотодиода, напряжение на фотодиоде или, в режиме холостого хода, фото-ЭДС E_Φ изменяется по логарифмическому закону при возрастании светового потока Φ , а световой ток I_C прямо пропорционально зависит от светового потока Φ . Поэтому при увеличении светового потока Φ характеристики смещаются неодинаково по оси абсцисс и по оси ординат. Так по оси ординат, где откладывается световой ток, характеристики, смещаются равномерно при изменении светового потока. По оси абсцисс, где откладывается $U_{XX} = E_\Phi$, эти характеристики смещаются нелинейно, а в соответствии с кривой $E_\Phi = f(\Phi)$.

3. Спектральная характеристика. Это зависимость $S^* = f(\lambda)$, где λ – длина волны электромагнитного излучения. Вид этой характеристики представлен на рисунке 6.9.

Зависимость 1 представляет собой относительную мощность солнечного излучения. Другие две зависимости показывают относительную мощность фотодиодов, выполненных на основе кремния и германия. У германиевого ФД спектральная характеристика расположена в ИК области с максимумом чувствительности при $\lambda = 1,55$ мкм. Спектральная характеристика кремниевого ФД смещена в область видимого поддиапазона волн, а максимум чувствительности лежит в области $\lambda = 0,6 \div 1$ мкм.

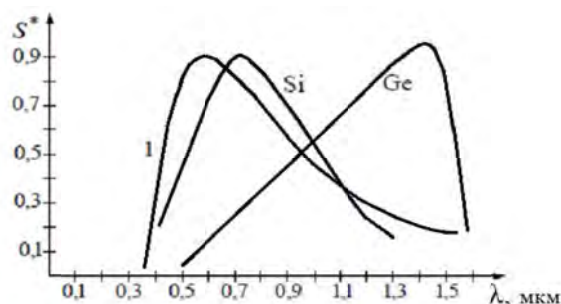


Рисунок 6.9 – Спектральные характеристики фотодиода

Очевидно, что в области видимой части спектра солнечного излучения наибольшую относительную мощность имеет фотодиод на основе кремния. Именно из кремния делают чаще всего фотодиоды, работающие в этой области длин волн.

Фотодиодное включение представлено на рисунке 6.10.

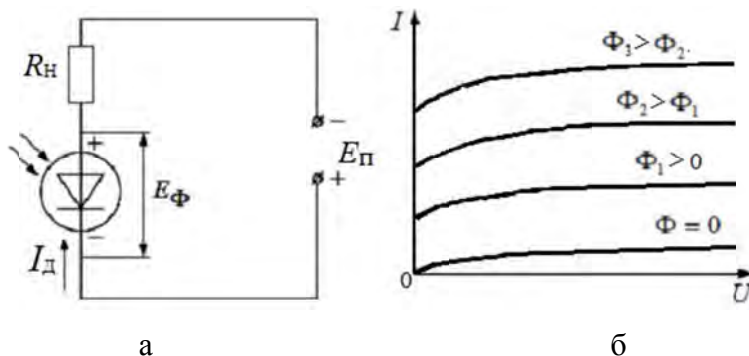


Рисунок 6.10 – Схема (а) и ВАХ (б) фотодиодного включения

В данном случае фотодиод работает с внешним источником E_{Π} , который по отношению к затенённому фотодиоду включен в обратном, запирающем направлении, и следовательно, при отсутствии освещения ток в цепи практически отсутствует. При освещении фотодиода появляется фото-ЭДС E_{Φ} , которая по отношению к источнику E_{Π} включена последовательно и согласно, и в цепи нагрузки появляется ток, пропорциональный световому потоку Φ . Этот режим иллюстрируется отрезками ВАХ фотодиода в третьем квадранте, как показано на рисунке 6.7. Однако в справочной литературе эти характеристики приводятся чаще в первом квадранте, как показано на рисунке 6.10, б) для удобства использования.

Основными параметрами фотодиодов являются:

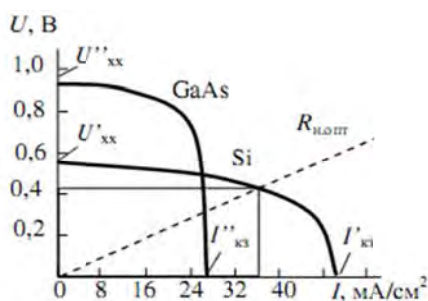
- Чувствительность: $K = I_{\Phi} / \Phi$;
- Рабочее напряжение: $U_{\text{раб}}$;
- Динамическое сопротивление: $R_d = \Delta U / \Delta I$, при $\Phi = \text{const}$.

К недостаткам ФД следует отнести его инерционность. Типичные времена переключения для фотодиодов порядка 10^{-8} с.

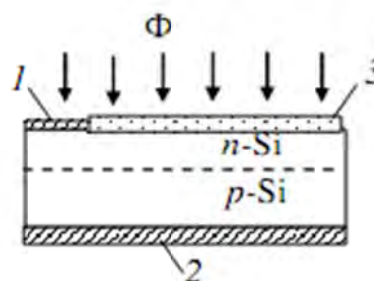
Высокое быстродействие достигается в $p-i-n$ -фотодиоде. В этом диоде сильно легированные p^+ - и n^+ - области разделены слоем полупроводника с собственной проводимостью (i -слой). При обратном смещении обедненная область распространяется на весь i -слой и генерация носителей происходит именно в этом слое. Тем самым исключается время диффузии к обедненной области $t_{\text{дф}}$. Толщина i -слоя существенно больше, чем толщина $p-n$ -перехода в обычных ФД, поэтому значение $C_{\text{бар}}$ мало. Граничная частота $p-i-n$ - фотодиодов может достигать 10 ГГц.

В фотодиодах с барьером Шоттки выпрямляющий контакт образуется между полупроводником и тонкой полупрозрачной пленкой металла, пропускающей большую часть падающего излучения. Эти диоды обладают высокой эффективностью в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Квантовая эффективность может достигать 70%, инерционность этих приборов определяется временем пролета носителей через область объемного заряда ($10^{-10} \div 10^{-11}$ с). Фотодиоды на гетероструктурах позволяют получить квантовую эффективность, близкую к 100%.

На рисунке 6.11, приведены ВАХ солнечных преобразователей с площадью $p-n$ -перехода $S=1\text{см}^2$ при плотности мощности $P_{\text{пл}}=0,2\text{ Вт/см}^2$ и $T=20^\circ\text{C}$.



а



б

Рисунок 6.11 – ВАХ солнечных преобразователей на основе кремния и арсенид галлия (а) и структура преобразователя (б)

Если к p - n -переходу приложить напряжение, близкое к напряжению лавинного пробоя, можно получить усиление фототока лавинным умножением генерированных светом носителей. Лавинные фотодиоды применяются при обнаружении слабых оптических сигналов. В настоящее время важное значение имеют полупроводниковые фотоэлементы, используемые в качестве преобразователей солнечной энергии в электрическую.

В преобразователях с p - n -переходом применяются кремний и арсенид галлия, но предпочтение отдано кремнию.

Преобразователь на основе GaAs имеет большее значение фото-ЭДС (вследствие большей ширины запрещенной зоны), но меньший ток короткого замыкания. При подключении нагрузки ток I_n и напряжение U_n во внешней цепи определяются точкой пересечения ВАХ и линии нагрузки. Площадь прямоугольника $I_n U_n$ пропорциональна мощности, отдаваемой преобразователем в нагрузку. При оптимальном сопротивлении нагрузки ($R_{\text{Нопт}}$) достигается максимальная мощность.

На рисунке 6.11, (б), показана также, структура кремниевого преобразователя:

1 – фронтальный металлический электрод на освещаемой поверхности; 2 – тыльный металлический электрод, полностью покрывающий поверхность кристалла с неосвещаемой стороны; 3 – просветляющее покрытие из монооксида кремния SiO. Чтобы не затенялась освещаемая поверхность, ширина фронтального электрода не должна превышать 1 мм.

Отдельные фотоэлементы соединяются в солнечные батареи.

Кремниевые преобразователи позволяют получать мощность до 100 Вт с квадратного метра площади при удельной мощности 50 Вт/кг. Реальные КПД кремниевых преобразователей 14-18%, арсенид-галлиевых – 11%.

Солнечные батареи являются основными источниками питания космических кораблей, автоматических метеостанций и др. Практическое применение солнечных батарей непрерывно расширяется.

6.1.3 Фототранзисторы

Фототранзистор – это полупроводниковый фотоэлектрический прибор с двумя p - n -переходами. Устройство и принцип действия фототранзистора такие же, как и биполярного транзистора. Отличие же заключается в том, что внешняя часть базы является фоточувствительной поверхностью, а в корпусе имеется окно для пропускания света, как показано на рисунке 6.12.

Принцип действия фототранзистора заключается в следующем. В затемнённом состоянии и отсутствии входного сигнала на базе, транзистор закрыт, и в его коллекторной цепи протекает небольшой обратный ток коллекторного перехода. При освещении базовой области лучами света, там происходит возникновение пар «электрон – дырка». Неосновные носители (в нашем случае дырки) подхватываются полем коллекторного перехода и перебрасываются в

область коллектора, а в базе остаётся нескомпенсированный заряд электронов – основных носителей, который приводит к снижению потенциального барьера эмиттерного перехода и к инжекции дырок из эмиттера в базу.

Это приведёт к увеличению коллекторного тока, как если бы на вход транзистора был бы подан входной сигнал, вызвавший такую же инжекцию носителей.

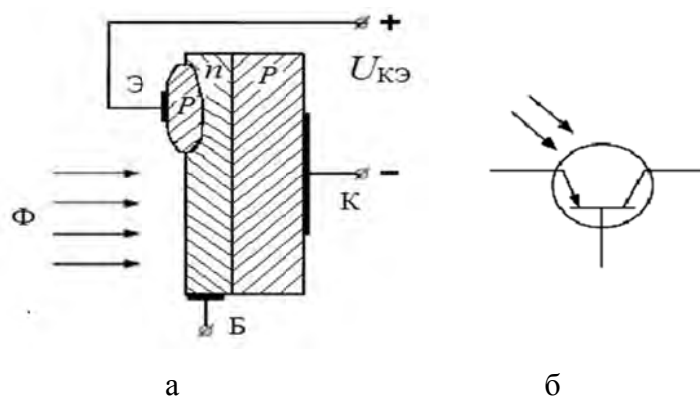


Рисунок 6.12 – Структура (а) и условное обозначение фототранзистора (б)

Коллекторный ток фототранзистора будет определяться:

$$I_K = \beta I_\Phi,$$

где β – коэффициент передачи транзистора по току; I_Φ – фототок, возникший в базовой области под действием светового входного сигнала.

Таким образом, в фототранзисторе осуществляется усиление фототока, следовательно, чувствительность фототранзистора в β раз больше чувствительности фотодиода.

Вольт-амперная характеристика фототранзистора очень напоминает выходные характеристики биполярного транзистора, как видно из рисунка 6.13, с той лишь разницей, что снимаются они при постоянном световом потоке.

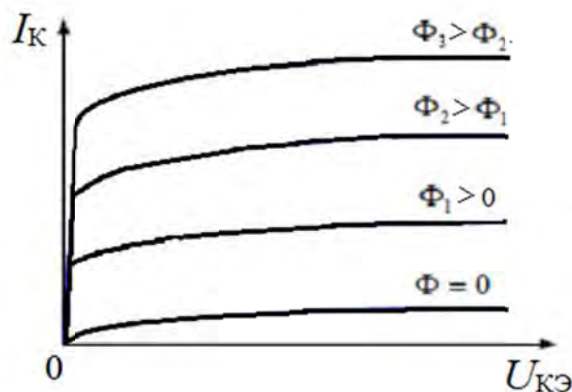


Рисунок 6.13 – Вольт-амперные характеристики фототранзистора

Остальные характеристики фототранзистора идентичны характеристикам фотодиода.

Схемы включения фототранзистора, так же, как и биполярного транзистора, могут быть с общей базой, общим эмиттером, с общим коллектором. В качестве примера на рисунке 6.14 приведена схема включения с общим эмиттером.

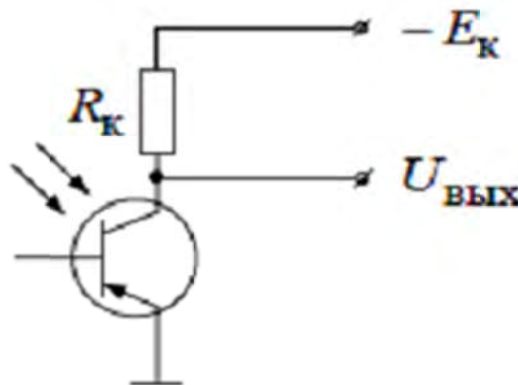


Рисунок 6.14 – Включение фототранзистора по схеме с общим эмиттером

Основными недостатками фототранзистора являются его большая температурная зависимость и плохие частотные свойства.

6.1.4 Фототиристоры

Структура и условное графическое обозначение фототиристора приведено на рисунке 6.15.

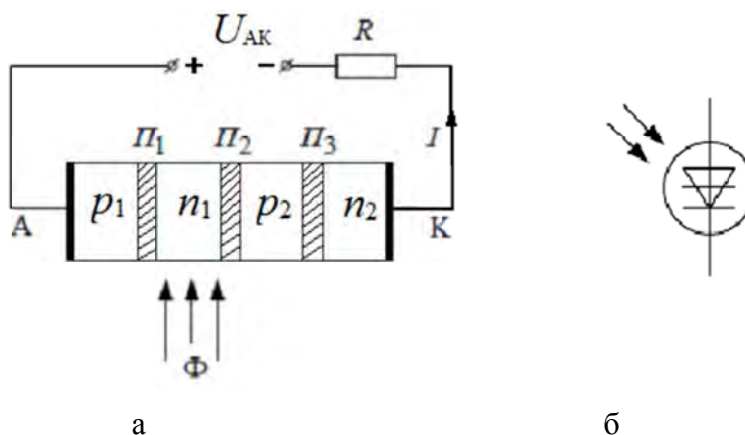


Рисунок 6.15 – Структура (а) и условное обозначение (б) фототиристора

По такому же принципу, как и управление, фототранзистором, можно управлять и тиристором. Такой прибор называется фототиристором.

Вместо управляющего электрода сигнал управления в виде потока лучистой энергии, как показано на рисунке 6.15, (а), подаётся в специальное окно в корпусе прибора, что приводит к тем же явлениям, как если бы был

подан электрический сигнал управления на управляющий электрод. Все остальные характеристики такого тиристора аналогичны характеристикам обычного тиристора с электрическим управлением.

На рисунке 6.16 представлена вольт-амперная характеристика фототиристора.

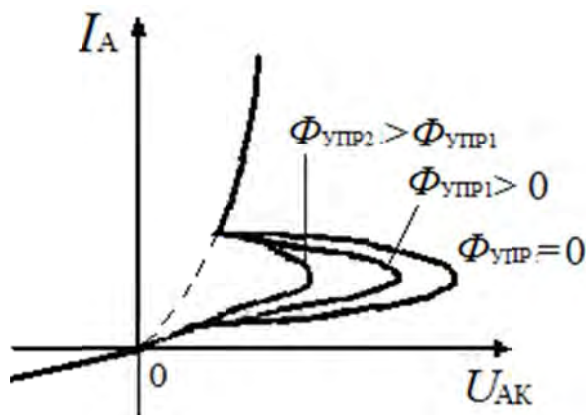


Рисунок 6.16 – Вольт-амперная характеристика фототиристора

Фототиристоры используются для коммутации световым сигналом электрических сигналов большой мощности. Сопротивление фототиристора изменяется от 10^8 Ом (в запертом состоянии) до 10^{-1} Ом в открытом состоянии. Время переключения тиристорov лежит в пределах $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с.

6.2 Светодиоды

Светодиод, или светоизлучающий диод (СИД) – это полупроводниковый диод на основе p - n - или гетероперехода, излучающий кванты света при протекании через него прямого тока.

По характеристике излучения светодиоды разделяют на две группы:

- светодиоды с излучением в видимой части спектра;
- светодиоды с излучением в инфракрасной части диапазона.

Конструктивное оформление светодиодов также различное, однако, чаще всего они выполняются в виде монокристалла полупроводника, в котором создан p - n -переход; кристалл вмонтирован в стеклянный корпус-линзу, свободно пропускающую излучаемый свет, как показано на рисунке 6.17.

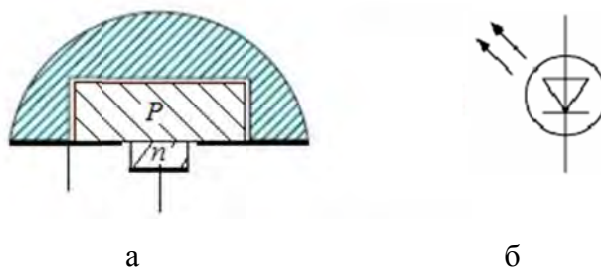


Рисунок 6.17 – Структура (а) и условное изображение светодиода (б)

Для излучения видимого света ширина запрещенной зоны должна быть в пределах $1,8 \text{ эВ} \leq \Delta W_3 \leq 3,2 \text{ эВ}$. Это требование сразу исключает использование германия и кремния в индикаторных светодиодах. В качестве основных полупроводниковых материалов для светодиодов применяются арсенид галлия GaAs, фосфид галлия GaP, нитрид галлия GaN, карбид кремния SiC, трехкомпонентный твердый раствор фосфида и арсенида галлия GaAs, ряд других двойных и многокомпонентных полупроводниковых соединений.

Принцип действия светодиодов основан на самопроизвольной излучательной рекомбинации носителей заряда, инжектируемых через p - n -переход. Рекомбинация сосредоточена в p - n -переходе и в прилегающих к нему слоях полупроводника.

Светодиоды могут иметь несколько p - n -переходов, расположенных на одном монокристалле. В зависимости от их включения или режима работы они излучают в различных областях спектра и имеют управляемый цвет свечения. При этом используются или зависимость интенсивности отдельных частот излучения от тока p - n -перехода, или смешение излучений двух светодиодов, имеющих свечение разного цвета.

Наибольшее распространение получил второй случай. Как видно из рисунка 6.18, на кристалле полупроводника созданы два p - n -перехода.

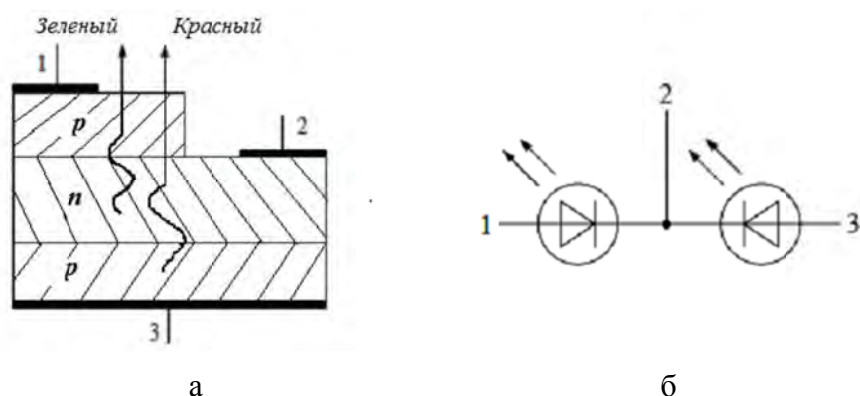


Рисунок 6.18 – Структура двухцветного светодиода (а);
условное обозначение двухцветного светодиода (б)

Примеси подобраны таким образом, что один переход излучает свет красного цвета, а другой – зеленого. При их смешивании получается желтый цвет. В структуре имеется три (1, 2, 3) вывода, что позволяет через каждый p - n -переход пропускать свое значение тока. Изменяя токи переходов, удастся менять цвет излучения от желто-зеленого до красно-желтого оттенка, а также получать чистые красный и зеленый цвета.

Основные характеристики светодиодов:

- яркостная – зависимость яркости от тока $B(I)$;
- спектральная – зависимость яркости, или силы света, или мощности от длины волны $B(\lambda)$, $\Phi(\lambda)$, $P_\Phi(\lambda)$;
- вольт-амперная $I(U)$.

Примеры вольт-амперных характеристик светодиодов приведены на рисунке 6.19. Различия прямых ветвей ВАХ связаны с различной шириной запрещенной зоны полупроводниковых материалов.

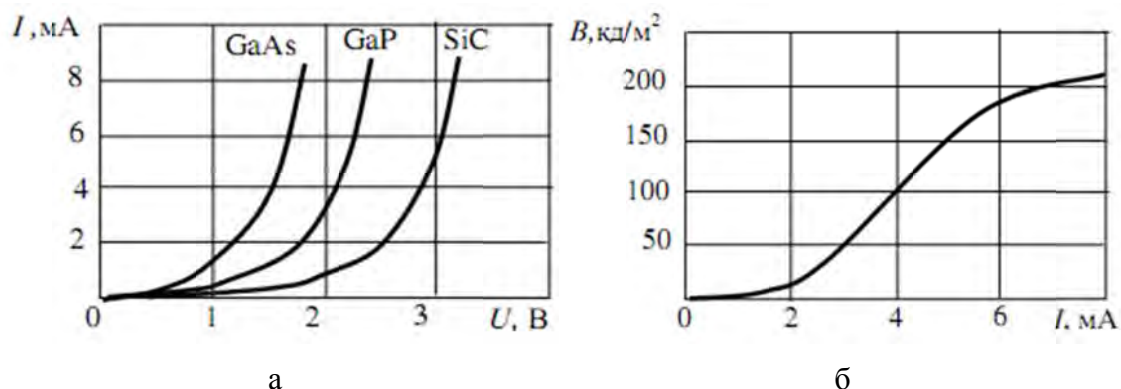


Рисунок 6.19 – Вольт-амперная (а) и яркостная (б) характеристики светодиода

Начальный участок яркостной характеристики нелинеен, как видно из рисунка 6.19, (б). При малых напряжениях и соответственно при малых токах на светодиоде излучение не возникает. Рабочее напряжение должно превышать пороговое значение, которое определяется энергией излучаемого фотона: $U_{\text{пор}} = h\nu/q$, где h – постоянная Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); ν – частота электромагнитного колебания. Яркость излучения светодиодов достигает значений в несколько сот кд/м².

Примеры спектральных характеристик светодиодов на основе различных материалов приведены на рисунке 6.20.

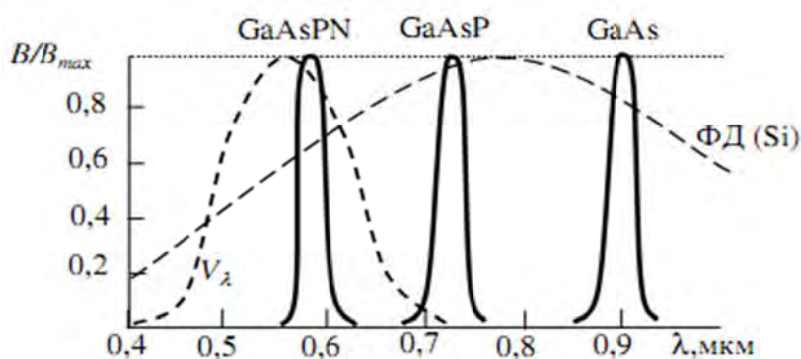


Рисунок 6.20 – Спектральные характеристики светодиодов

Спектральный диапазон светодиода характеризуется шириной спектральной характеристики, определяемой на уровне 0,5 от максимума. На рисунке 6.20 штриховыми линиями показаны также спектральные характеристики чувствительности человеческого глаза V_λ . Спектр излучения арсенид-галлиевого светодиода лежит в инфракрасной области, поэтому он не может применяться в индикаторных устройствах. Однако он широко применяется в оптических линиях связи, в оптронах и т.д.

Инерционность светодиодов характеризуется временами нарастания $t_{\text{нр}}$ и спада $t_{\text{сп}}$ импульса излучения, которые измеряются при подаче прямоугольного импульса тока по уровням 0,9 и 0,1 от максимальной яркости. Эти параметры определяются временем перезаряда емкости диода, и составляют доли микросекунд.

КПД светодиода – отношение мощности излучения к потребляемой мощности – обычно не превышает нескольких процентов.

Комбинируя включение отдельных переходов, можно получить изображение светящейся цифры, буквы или знака. Для этого на базе светодиодов выпускаются знаковосинтезирующие индикаторы, например цифровые, которые могут быть одноразрядными и многоразрядными. В сегментных знаковосинтезирующих индикаторах каждый сегмент выполнен в виде отдельного светодиода. Для высвечивания цифр от нуля до девяти необходимо иметь, по меньшей мере, семь сегментов.

Низкое напряжение питания, малые токи, миниатюрность, долговечность, высокое быстродействие – основные достоинства светодиодных индикаторов отображения информации.

Для получения белого свечения существует четыре способа, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки:

- смешение излучения светодиодов трёх или более цветов. Например, на рисунке 6.21, белый свет получается путем смешивания в определённой пропорции, излучения красного, зелёного и синего светодиодов;

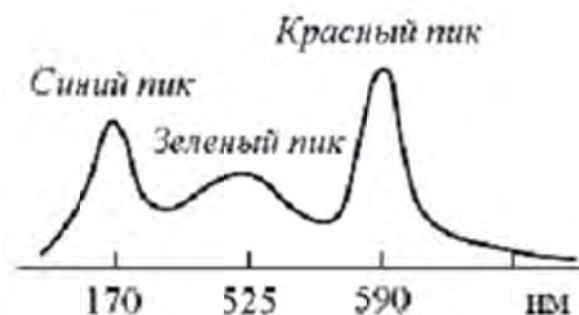


Рисунок 6.21 – Получение белого света путём смешивания излучения красного, синего и зелёного светодиодов

- смешение синего излучения светодиода с излучением жёлто-зелёного люминофора либо зелёного и красного люминофоров. На рисунке 6.22 показано получение белого света при помощи кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора. Состав кристалла подбирается так, чтобы его спектр излучения соответствовал спектрам возбуждения люминофоров. Люминофор наносится таким образом, что часть голубого излучения возбуждает люминофор, а часть проходила без поглощения. Толщина люминофора, форма держателя и пластикового купола подбираются так, чтобы излучение имело белое свечение в нужном телесном угле.

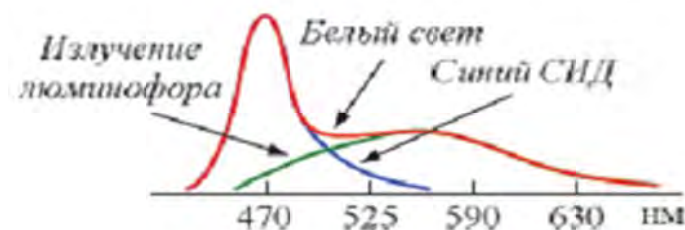


Рисунок 6.22 – Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора

- смешение излучения трёх люминофоров (красного, зелёного и голубого), возбуждаемых ультрафиолетовым светодиодом приведено на рисунке 6.23.

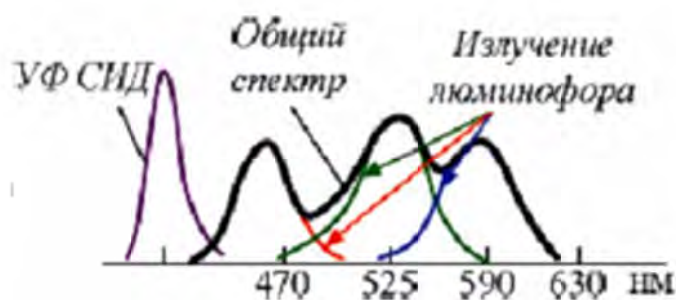


Рисунок 6.23 – Получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора

Данный способ использует технологии и материалы, которые разрабатывались для люминесцентных ламп. Однако этот способ связан с потерями энергии при преобразовании света от диода в люминофорах, а также эффективность источника излучения уменьшается, т.к. разные люминофоры имеют разные спектры возбуждения люминесценции (электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний), не точно соответствующие ультрафиолетовому спектру излучения светодиода.

Первые два способа наиболее простые в настоящее время наиболее экономичны.

Светоотдача (световой поток на единицу потребляемой мощности) белых светодиодов ниже, чем у светодиодов с узким спектром излучения, потому что в них происходит двойное преобразование энергии, часть её теряется в люминофоре. В настоящее время светоотдача лучших белых светодиодов доходит до 65...75 лм/Вт. Светодиоды, кроме высокой светоотдачи, малого энергопотребления и возможности получения любого цвета излучения, имеют и ряд других замечательных свойств. Отсутствие нити накала благодаря нетепловой природе излучения светодиодов обуславливает

длительный срок службы. Производители светодиодов декларируют срок службы до 100000 часов. У ламп накаливания средний срок службы составляет 1000 часов, у люминесцентных, в большинстве случаев, срок службы ограничивается 10...15000 ч. Отсутствие стеклянной колбы у светодиодов определяет очень высокую механическую прочность и надежность. Малое тепловыделение и низкое питающее напряжение гарантируют высокий уровень безопасности, а безинерционность делает светодиоды незаменимыми, когда нужно высокое быстродействие. Сверхминиатюрность и встроенное светораспределение определяют другие, не менее важные, достоинства. Световые приборы на основе светодиодов оказываются компактными и удобными в установке.

6.3 Оптроны

Оптронами называют приборы, в которых конструктивно объединены источник и приемник излучения с определенными видами оптической и электрической связи между ними. Оптрон имеет электрические сигналы, как на входе, так и на выходе, а связь входа и выхода – оптическая.

В оптронах, в качестве универсального источника излучения служит светоизлучающий диод – светодиод. Его применение обусловлено такими важными достоинствами, как:

- высокий КПД преобразования электрической энергии в световую;
- узкий спектр излучения; высокое быстродействие; малое питающее напряжение и ток;
- совместимость с транзисторами и интегральными микросхемами.

В качестве фотоприемников в оптронах могут применяться: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры. На рисунке 6.24 представлены условные графические обозначения таких оптронов.

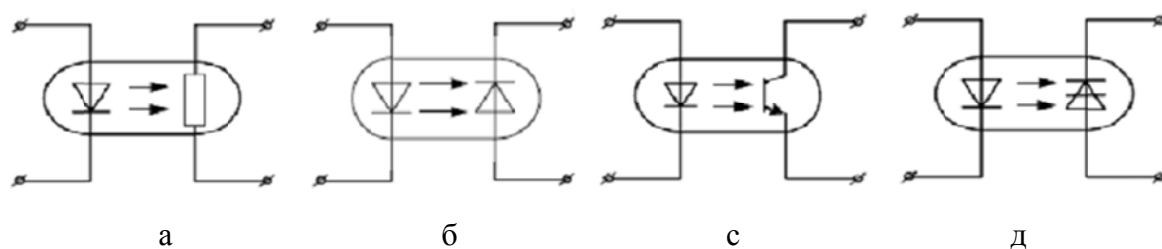


Рисунок 6.24 – Оптоны:
резисторный (а); диодный (б); транзисторный (с); тиристорный (д)

В оптроне светодиод преобразует электрический сигнал в световой, который через оптическую среду передается на фотоприемник, где снова преобразуется в электрический сигнал. Такое двойное преобразование сигнала позволяет устранить электрическую связь между источником сигнала и нагрузкой. Оптрон позволил создать аналог разделительного конденсатора, что является актуальным в интегральной микроэлектронике.

6.3.1 Резисторные оптроны

В резисторном оптроне, схему которого можно увидеть на рисунке 6.24, а) в качестве фотоприемника используется фоторезистор, сопротивление которого уменьшается при воздействии видимых световых и невидимых инфракрасных лучей. Уменьшение сопротивления фоторезистора происходит за счет генерации светом пар свободных носителей заряда (электронов и дырок), увеличивающих электропроводность полупроводника. В качестве излучателей, чаще всего, в оптроне применяются инжекционные или инфракрасные светодиоды. Фоторезистор и излучатель оптрона объединены внутри корпуса оптически прозрачной средой (клеем) с большим сопротивлением изоляции.

Основными характеристиками резисторного оптрона являются:

- Входная вольт-амперная характеристика - $I_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, отражает зависимость входного тока от входного напряжения.

Пример такой характеристике приведен на рисунке 6.25, а.

- Выходные характеристики $I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}})$, при $I_{\text{ВХ}} = \text{const}$. Семейство выходных характеристик приведено на рисунке 6.25, б).

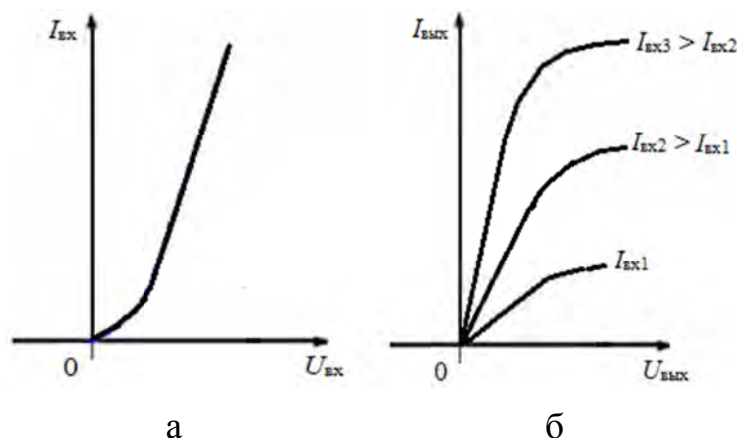


Рисунок 6.25 – Входная (а) и семейство выходных (б) характеристик фоторезисторного оптрона

6.3.2 Диодные оптроны

В диодном оптроне, схема которого представлена на рисунке 6.24, б), в качестве фотоприемника используется фотодиод на основе кремния, а в качестве излучателя – инфракрасный излучающий диод.

Максимум спектральной характеристики излучения диода приходится на длину волны 1 мкм. Излучение с такой длиной волны вызывает генерацию электронно-дырочных пар носителей заряда в полупроводнике. Электроны и дырки экстрагируются электрическим полем контактной разности потенциалов перехода фотодиода и заряжают p – область положительно, а n – область –

отрицательно. На выводах фотодиода появляется фото-ЭДС. Такой режим работы фотодиода, ранее отмечалось, называется фотогенераторным. Для фотогенераторного режима при холостом ходе на выходе оптрона выходной ток равен нулю, т.е. $I_{\text{ВЫХ}} = 0$ и $U_{\text{ВЫХ}} = E_{\Phi}$.

В общем случае выходной ток фотодиода записывается в виде:

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_0 \left(\ell^{\frac{qU_{\text{ВЫХ}}}{kT}} - 1 \right) - I_{\Phi};$$

$$I_{\Phi} = S_{\Sigma} \cdot \Phi,$$

где Φ – световой поток светодиода, образующего входную цепь;

S_{Σ} – интегральная чувствительность фотодиода.

Вольт-амперная характеристика диодного оптрона в фотогенераторном режиме приведена на рисунке 6.26. Параметрами этих характеристик является семейство значений E_{Φ} холостого хода при заданном входном токе оптрона.

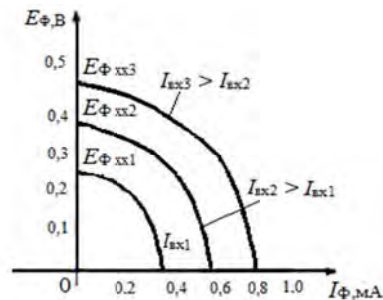


Рисунок 6.26 – ВАХ диодного оптрона в фотогенераторном режиме

Схема включения диодного оптрона в фотодиодном режиме и соответствующие ему семейство выходных характеристик приведены на рисунке 6.27. Обратное включение фотодиода при напряжении E_{Π} более 0,5 В приводит к увеличению обратного тока за счет электронов и дырок, сгенерированных излучением. При отсутствии входного тока характеристика проходит через начало координат и определяется темновым током I_T p - n -перехода (тепловой ток обратно включенного перехода I_0).

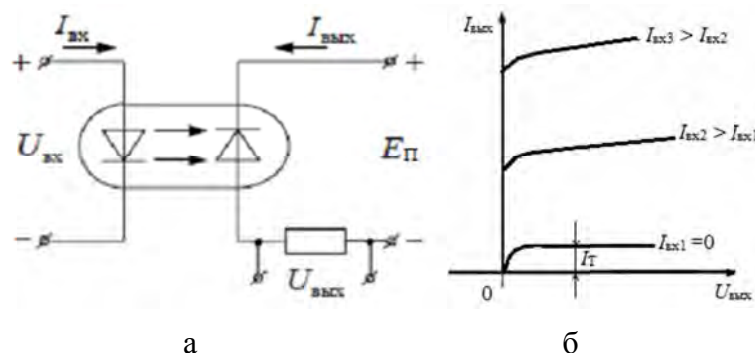


Рисунок 6.27 – Схема включения диодного оптрона (а) и семейство его выходных характеристик (б)

Входной усиливаемый сигнал поступает на светодиод и вызывает его свечение, которое по световому каналу поступает на фотодиод. Фотодиод открывается и в его цепи протекает фототок под действием внешнего источника питания E_{Π} . Значение фототока $I_{\text{вых}}$ на выходе оптрона пропорционально входному току $I_{\text{вх}}$ и практически линейно возрастает с увеличением светового потока излучающего диода.

Диоды излучателя и приемника изготавливаются по планарной технологии. Структуры соединяются между собой оптически прозрачным клеем, слой которого обеспечивает надежную изоляцию входной цепи оптрона от его выходной цепи.

Кроме выходных характеристик, для описания свойств диодных оптронов, применяют передаточные характеристики. Передаточная характеристика в фотодиодном режиме представляет собой зависимость выходного тока от входного тока – $I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$ при $U_{\text{вых}} = \text{const}$ – и практически линейная в широком диапазоне входных токов, как показано на рисунке 6.28.

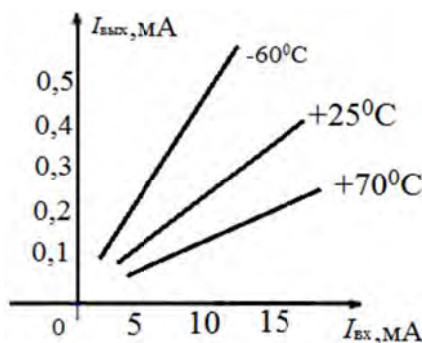


Рисунок 6.28 – Передаточные характеристики диодного оптрона

Передаточная характеристика в фотогенераторном режиме нелинейная, т.к. фото-ЭДС при увеличении входного тока стремится к насыщению. Фото-ЭДС не превышает контактной разности потенциалов p - n -перехода и составляет 0,5...0,8 В.

Диодный оптрон используется в качестве ключа и может коммутировать ток с частотой $10^6 \dots 10^7$ Гц и имеет сопротивление между входной и выходной цепями – $10^{13} \dots 10^{15}$ Ом.

6.3.3 Транзисторные оптроны

Транзисторный оптрон, схема показана на рисунке 6.24, (с), содержит в качестве светоизлучателя инфракрасный арсенид-галлиевый диод, чей максимум спектрального излучения лежит вблизи области наибольшей чувствительности фототранзистора, являющегося приемником. Фототранзистор выполнен на основе кремния со структурой n - p - n , чувствительной к излучению с длиной волны около 1 мкм. Излучающий диод конструктивно расположен так, что большая часть излучения направлена на базовую область фототранзистора. Включается излучающий диод в прямом направлении, а фототранзистору обеспечивается активный режим работы.

Выходные характеристики транзисторного оптрона представлены на рисунке 6.29. Эти характеристики идентичны выходным характеристикам транзистора в схеме с ОЭ, где вместо тока базы входным параметром является ток инжекции излучающего диода, т.е. входной ток оптрона.

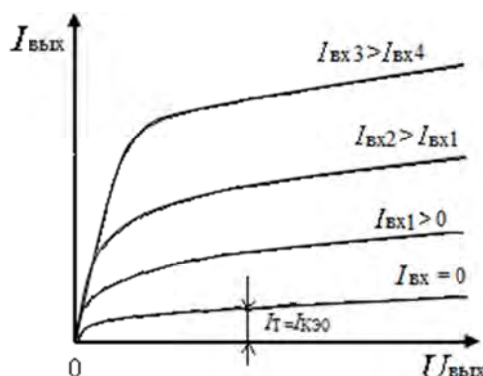


Рисунок 6.29 – Выходные характеристики транзисторного оптрона

При отсутствии входного тока излучение отсутствует и база фототранзистора остается не облученной. В цепи коллектора протекает темновой ток I_T , аналогичный по происхождению сквозному току обычного биполярного транзистора $I_{\text{КЭ0}}$. При облучении в базовой области генерируются электронно-дырочные пары носителей зарядов. Неосновные носители p -базы (электроны) экстрагируются полем обратно включенного коллекторного перехода и создают коллекторный ток. Фототранзистор обладает внутренним усилением.

Транзисторные оптроны, благодаря большей чувствительности фотоприемника, экономичнее диодных. Однако быстродействие их меньше, максимальная частота коммутации обычно не превышает 10^5 Гц. Транзисторные оптроны, как и диодные, имеют малое сопротивление в открытом состоянии, большое в закрытом, и обеспечивают полную гальваническую развязку входных и выходных цепей.

6.3.4 Тиристорные оптроны

В тиристорном оптроне, как показано на рисунке 6.24, д), в качестве фотоприемника используется фототиристор. Свойства фототиристора подобны свойствам обычного тиристора, однако с той лишь особенностью, что включение тиристора осуществляется не с помощью импульса тока управления, а с помощью светового импульса. При облучении в n -базе генерируются пары носителей заряда. Электрическим полем коллекторного перехода носители заряда разделяются между n - и p -областями. Электроны остаются в базе — n -типа, а дырки экстрагируются в p -базу, заряжая n -базу отрицательно, а p -базу — положительно, снижая высоту потенциального барьера эмиттерных переходов. Регенерационное возрастание тока через структуру приводит к отпиранию тиристора.

Выходные характеристики тиристорного оптрона представлены на рисунке 6.30.

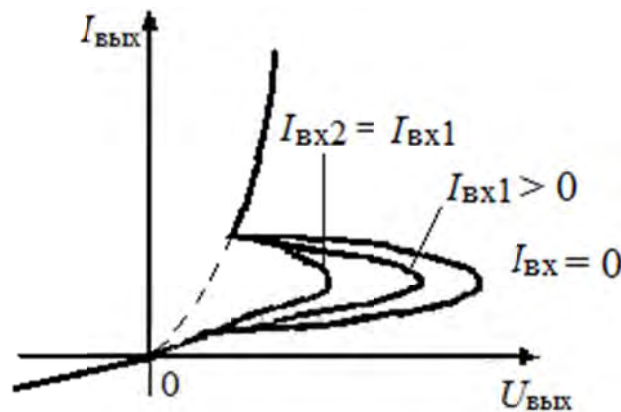


Рисунок 6.30 – Выходные характеристики тиристорного оптрона

6.4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение оптоэлектронным приборам и какие фотоэффекты в них используются?
2. Что такое внешний и внутренний фотоэффект?
3. Перечислите типы оптоэлектронных приборов, использующих внутренний фотоэффект?
4. Что такое фоторезистор? Поясните структуру и какими параметрами характеризуется фоторезистор?
5. Каковы отличия в свойствах фотодиода и фоторезистора?
6. Как в фотоэлементе происходит непосредственное преобразование световой энергии в электрическую? Поясните схемы включения фотодиода?
7. Каковы отличия в принципе действия и свойствах фотодиода и биполярного фототранзистора?
8. Что такое оптрон, поясните их конструкцию? Приведите разновидности оптронов?
9. Приведите выходные характеристики транзисторного и тиристорного оптронов?
10. Приведите основные преимущества оптоэлектронных приборов?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водовозов, А. М. Основы электроники : учебное пособие / Водовозов А. М. - Москва : Инфра-Инженерия, 2016. - 140 с.
2. Власов, В. П. Физические основы электроники : учебное пособие / В. П. Власов, В. Н. Каравашкина. - Москва : Московский технический университет связи и информатики, 2016. - 67 с.
3. Лачин, Вячеслав Иванович. Электроника : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 220200 "Автоматизация и управления" / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. - 6-е изд., перераб. и доп. - Ростов н/Д : Феникс, 2007. - 703 с.
4. Миленина, Светлана Александровна. Электроника и схемотехника : учебник и практикум для академического бакалавриата : Учебник и практикум / С. А. Миленина. - 2-е изд., пер. и доп. - М : Издательство Юрайт, 2018. - 270 с.
5. Опадчий, Юрий Федорович. Аналоговая и цифровая электроника. Полный курс : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Проектирование и технология радиоэлектронных средств" / Ю.Ф. Осадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; под ред. О.П. Глудкина. - М. : Горячая линия - Телеком, 2005. - 768 с. : ил.
6. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учебник / Ф. А. Ткаченко. - Москва : Новое знание, 2011. - 681 с. : ил
7. Ямпурин, Николай Петрович. Электроника : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки "Телекоммуникации" / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. - Москва : Академия, 2011. - 237 с.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Для унификации обозначений и стандартизации параметров полупроводниковых приборов используется система условных обозначений. Эта система классифицирует полупроводниковые приборы по их назначению, основным физическим и электрическим параметрам, конструктивно-технологическим свойствам, виду полупроводниковых материалов. Система условных обозначений отечественных полупроводниковых приборов базируется на государственных и отраслевых стандартах. Первый ГОСТ на систему обозначений полупроводниковых приборов – ГОСТ 10862–64 был введен в 1964 году. Затем по мере возникновения новых классификационных групп приборов был изменен на ГОСТ 10862–72, а затем на отраслевой стандарт ОСТ 11.336.038–77 и ОСТ 11.336.919–81. При этой модификации основные элементы буквенно-цифрового кода системы условных обозначений сохранились. Данная система обозначений логически выстроена и позволяет дополнять себя по мере дальнейшего развития элементной базы.

Основные термины, определения и буквенные обозначения основных и справочных параметров полупроводниковых приборов приведены в ГОСТах:

- 25529–82 – Диоды полупроводниковые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.
- 19095–73 – Транзисторы полевые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.
- 20003–74 – Транзисторы биполярные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.
- 20332–84 – Тиристоры. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.

1. Условные обозначения и классификация отечественных полупроводниковых приборов

Система обозначений полупроводниковых приборов по ГОСТ 11.336.919–81 «Приборы полупроводниковые. Система условных обозначений», которая состоит из 5 элементов. В основу системы обозначения положен буквенно-цифровой код.

Первый элемент. Первый элемент (буква или цифра) обозначает исходный полупроводниковый материал, на базе которого создан полупроводниковый прибор. Для приборов общегражданского применения используются буквы Г, К, А и И, являющиеся начальными буквами в названии полупроводникового материала. Для приборов специального применения (более высокие требования при испытаниях, например выше температура) вместо этих букв используются цифры от 1 до 4. В таблице П.1 приведены обозначения для первого элемента.

Таблица П.1

Обозначения первого элемента

Исходный материал	Условные обозначения
<i>Германий</i>	Г или 1
<i>Кремний</i>	К или 2
<i>Соединения галлия (например арсенид галлия)</i>	А или 3
<i>Соединения индия (например фосфид индия)</i>	И или 4

Второй элемент. Второй элемент – буква, обозначает подкласс полупроводниковых приборов. Обычно буква выбирается из названия прибора, как первая буква названия (таблица П.2).

Таблица П.2

Обозначения второго элемента

Подкласс приборов	Условные обозначения
<i>Диоды выпрямительные, универсальные, импульсные</i>	Д
<i>Транзисторы биполярные</i>	Т
<i>Транзисторы полевые</i>	П
<i>Варикапы</i>	В
<i>Тиристоры диодные</i>	Н
<i>Тиристоры триодные</i>	У
<i>Туннельные диоды</i>	И
<i>Стабилитроны</i>	С
<i>Сверхвысокочастотные диоды</i>	А
<i>Излучающие оптоэлектронные приборы</i>	Л
<i>Оптопары</i>	О

Третий элемент. Третий элемент – цифра, в обозначении полупроводниковых приборов, определяет основные функциональные возможности прибора. У различных подклассов приборов наиболее характерные эксплуатационные параметры различные. Например, для транзисторов – это рабочая частота и рассеиваемая мощность, для выпрямительных диодов – максимальное значение прямого тока, для стабилитронов – напряжение стабилизации и рассеиваемая мощность, для тиристоров – значение тока в открытом состоянии. В таблице П.3 приведены значения цифр в третьем элементе условных обозначений для различного класса полупроводниковых приборов.

Таблица П.3 – Обозначения третьего элемента

Назначение прибора	Условные обозначения
Диоды выпрямительные, с прямым током, А:	
менее 0,3	1
0,3...10	2
Диоды прочие (магнитодиоды, термодиоды и др.)	3
Диоды импульсные с временем восстановления, нс:	
более 500	4
150...500	5
30...150	6
5...30	7
1...5	8
с эффективным временем жизни неосновных носителей заряда менее 1 нс	9
Триодные тиристоры с максимально допустимым средним током в открытом состоянии (или импульсным), А	
<i>незапираемые:</i>	
менее 0,3 (менее 15)	1
0,3...10 (15...100)	2
более 10 (более 100)	7
<i>запираемые:</i>	
менее 0,3 (менее 15)	
0,3...10 (15...100)	
более 10 (более 100)	
<i>симметричные:</i>	
менее 0,3 (менее 15)	5
0,3...10 (15...100)	6
более 10 (более 100)	9
Диоды туннельные и обращенные:	
усилительные	1
генераторные	2
переключательные	3
обращенные	4
Варикапы:	
подстрочные	1
умножительные (варакторы)	2
Стабилитроны, стабисторы и ограничители с напряжением стабилизации, В:	
<i>мощностью менее 0,3 Вт:</i>	
менее 10	1
10...100	2
более 100	3

Назначение прибора	Условные обозначения
<i>мощностью менее 0,3...5 Вт:</i>	
менее 10	4
10...100	5
более 100	6
<i>мощностью менее 5...10 Вт:</i>	
менее 10	7
10...100	8
более 100	9
Транзисторы биполярные:	
<i>маломощные с рассеиваемой мощностью не более 0,3 Вт:</i>	
низкой частоты (граничная частота $f_{зп} < 3 \text{ МГц}$)	1
средней частоты (граничная частота $f_{зп} = 3...30 \text{ МГц}$)	2
высокой и сверхвысокой частот ($f_{зп} > 30 \text{ МГц}$)	3
<i>средней мощности (0,3...1,5) Вт:</i>	
низкой частоты (граничная частота $f_{зп} < 3 \text{ МГц}$)	4
средней частоты (граничная частота $f_{зп} = 3...30 \text{ МГц}$)	5
высокой и сверхвысокой частот ($f_{зп} > 30 \text{ МГц}$)	6
<i>большой мощности (более > 1,5 Вт):</i>	
низкой частоты (граничная частота $f_{зп} < 3 \text{ МГц}$)	7
средней частоты (граничная частота $f_{зп} = 3...30 \text{ МГц}$)	8
высокой и сверхвысокой частот ($f_{зп} > 30 \text{ МГц}$)	9
Транзисторы полевые:	
<i>маломощные с рассеиваемой мощностью не более 0,3 Вт:</i>	
низкой частоты (граничная частота $f_{зп} < 3 \text{ МГц}$)	1
средней частоты (граничная частота $f_{зп} = 3...30 \text{ МГц}$)	2
высокой и сверхвысокой частот ($f_{зп} > 30 \text{ МГц}$)	3
<i>средней мощности (0,3...1,5) Вт:</i>	
низкой частоты (граничная частота $f_{зп} < 3 \text{ МГц}$)	4
средней частоты (граничная частота $f_{зп} = 3...30 \text{ МГц}$)	5
высокой и сверхвысокой частот ($f_{зп} > 30 \text{ МГц}$)	6
<i>большой мощности (более > 1,5 Вт):</i>	
низкой частоты (граничная частота $f_{зп} < 3 \text{ МГц}$)	7
средней частоты (граничная частота $f_{зп} = 3...30 \text{ МГц}$)	8
высокой и сверхвысокой частот ($f_{зп} > 30 \text{ МГц}$)	9

Назначение прибора	Условные обозначения
Источники инфракрасного излучения:	
излучающие диоды	1
излучающие модули	2
Приборы визуального представления информации:	
светоизлучающие диоды	3
знаковые индикаторы	4
знаковое табло	5
шкалы	6
экраны	7
Оптопары:	
резисторные	Р
диодные	Д
тиристорные	У
транзисторные	Т

Четвертый элемент. Четвертый элемент - две либо три цифры, означает порядковый номер технологической разработки и изменяется от 01 до 999.

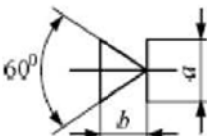
Пятый элемент. Пятый элемент - буква, в буквенно-цифровом коде системы условных обозначений указывает разбраковку по отдельным параметрам приборов, изготовленных в единой технологии. Для обозначения используются заглавные буквы русского алфавита от А до Я, кроме З, О, Ч, Ы, Ш, Щ, Я, схожих по написанию с цифрами.

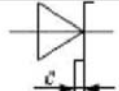
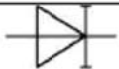
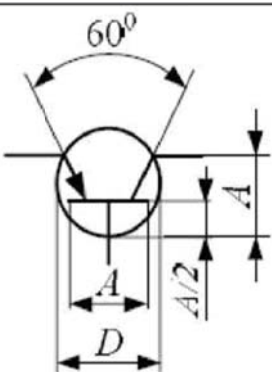
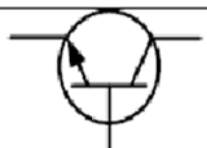
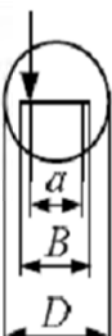
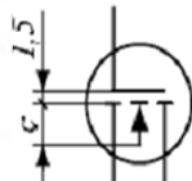
2. Условные графические обозначения полупроводниковых приборов

В технической документации и специальной литературе применяются условные графические обозначения полупроводниковых приборов в соответствии с ГОСТ 2.730-73 «Обозначения условные, графические в схемах. Приборы полупроводниковые». В таблице П.4 приведены графические обозначения основных полупроводниковых приборов.

Таблица П.4

Графические обозначения полупроводниковых приборов

Наименование прибора	Обозначение									
Диод выпрямительный	 <table data-bbox="1027 1823 1249 1957"><tr><td><i>a</i></td><td>5</td><td><i>b</i></td></tr><tr><td><i>b</i></td><td>4</td><td>5</td></tr><tr><td><i>c</i></td><td>1,5</td><td>2</td></tr></table>	<i>a</i>	5	<i>b</i>	<i>b</i>	4	5	<i>c</i>	1,5	2
<i>a</i>	5	<i>b</i>								
<i>b</i>	4	5								
<i>c</i>	1,5	2								

Диод Шоттки													
Стабилитрон													
Стабилитрон двуханодный													
Диод туннельный													
Обращенный диод													
Варикап													
Биполярный транзистор <i>p-n-p</i> -типа	 <table data-bbox="1027 759 1362 960"><tr><td><i>A</i></td><td>9</td><td>11</td></tr><tr><td><i>D</i></td><td>12</td><td>14</td></tr></table>	<i>A</i>	9	11	<i>D</i>	12	14						
<i>A</i>	9	11											
<i>D</i>	12	14											
Биполярный транзистор <i>n-p-n</i> -типа													
Полевой транзистор с управляющим переходом с каналом <i>n</i> -типа	 <table data-bbox="979 1263 1331 1431"><tr><td><i>a</i></td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr><tr><td><i>B</i></td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr><tr><td><i>D</i></td><td>10</td><td>12</td><td>14</td></tr></table>	<i>a</i>	5	6	7	<i>B</i>	7	8	9	<i>D</i>	10	12	14
<i>a</i>	5	6	7										
<i>B</i>	7	8	9										
<i>D</i>	10	12	14										
Полевой транзистор с управляющим переходом с каналом <i>p</i> -типа													
Полевой транзистор с изолированным затвором с индуцированным каналом <i>n</i> -типа	 <table data-bbox="1003 1812 1315 1890"><tr><td><i>c</i></td><td>4</td><td>5</td></tr></table>	<i>c</i>	4	5									
<i>c</i>	4	5											

Триодный тиристор, запираемый в обратном направлении с управлением по аноду	
Триодный тиристор, запираемый в обратном направлении с управлением по катоду	
Триодный симметричный тиристор	
Триодный тиристор, запираемый в обратном направлении, выключаемый с управлением по аноду	
Фототранзистор <i>p-n-p</i> -типа	
Фототиристор	
Оптрон диодный	
Оптрон тиристорный	

Излучающий диод	
Фоторезистор	
Фотодиод	
Оптрон резисторный	
Оптрон транзисторный	

3. Условные буквенные обозначения полупроводниковых приборов в электрических схемах

Элементы, входящие в состав изделия, на электрической принципиальной схеме должны иметь буквенно-цифровые обозначения.

Типы условных буквенно-цифровых обозначений и правила их построения устанавливает ГОСТ 2.710-81.

Позиционное обозначение элемента в общем случае состоит из трех частей, указывающих вид, номер и функцию элемента и записывается без разделительных знаков и пробелов. Вид и номер являются обязательной частью условного буквенно-цифрового обозначения и присваивается всем элементам схемы.

Буквенные коды некоторых полупроводниковых элементов приведены в таблице П.5.

Буквенные коды полупроводниковых приборов

Первая буква кода (обязательная)	Полупроводниковый прибор	Двухбуквенный код
В	Фотоэлемент	BL
D	Схема интегральная аналоговая	DA
	Схема интегральная цифровая	DD
V	Диод, стабилитрон	VD
	Транзистор	VT
	Тиристор	VS

ФЗ № 436-ФЗ

Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 4 ст. 11

Учебное издание

РЕШЕТОВ Александр Александрович

СВАТОВ Виктор Филиппович

СИДОРОВА Анастасия Эдуардовна

**ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

В авторской редакции

Подписано в печать 29.09.2021. Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 6,87.

Тираж 500 экз. Заказ № 2138.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.