

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра автоматизированных систем
управления производством

И. П. Матвеевко

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением высших
учебных заведений Республики Беларусь по образованию в области
сельского хозяйства в качестве учебно-методического комплекса
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по специальности 1-53 01 01 09 «Автоматизация технологических
процессов и производств (сельское хозяйство)»*

Минск
БГАТУ
2009

УДК 621.38 + 004.3] (07)
ББК 32.85я7
М 33

Рецензенты:
канд. техн. наук, доцент *В.А. Новиков*;
канд. техн. наук, доцент *Н.В. Исаеня*

Матвеевко, И.П.
М33 Основы электроники и микропроцессорной техники:
учебно-методический комплекс / И.П. Матвеевко. – Минск:
БГАТУ, 2009. – 324 с.

ISBN 978-985-519-134-7.

Учебно-методический комплекс освещает теоретические вопросы дисциплины «Основы электроники и микропроцессорной техники» и вопросы практического применения различных устройств аналоговой и цифровой техники, а также микропроцессорной техники и устройств связи. Приведенные задания и примеры позволяют в полной мере освоить данную дисциплину. Знание дисциплины облегчает изучение общепрофессиональных и специальных дисциплин, а также практическую работу инженера на производстве.

**УДК 621.38 + 004.3] (07)
ББК 32.85я7**

ISBN 978-985-519-134-7

© БГАТУ, 2009

МОДУЛЬ 0. ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

Изменения в современном обществе требуют новых подходов в подготовке квалифицированных кадров. Развитие экономики привело к тому, что получить образование, которое позволило бы специалисту быть востребованным постоянно, становится нереальным. В этой связи возникла потребность в новых педагогических технологиях, позволяющих сделать образование комбинированным, направленным на повышение качества обучения и приспособленным к изменяющимся условиям жизни. Одной из таких технологий является технология блочно-модульного обучения.

Согласно новой образовательной концепции любой начинающий специалист независимо от специализации и характера работы должен обладать фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками, опытом исследовательской и социально-оценочной деятельности, которые необходимы при решении новых проблем.

Насущной потребностью стало формирование личности, способной самостоятельно исследовать и решать поставленные задачи, что возможно только при смене приоритетов в образовании, т. е. должен быть осуществлен переход от усвоения готовых знаний на самостоятельную познавательную деятельность каждого студента с учетом его особенностей и возможностей.

Самостоятельная работа студентов, на которую делается акцент в блочно-модульной системе обучения, предназначена для освоения ими каждой дисциплины, а также для формирования навыков самостоятельной работы в учебной, научной и профессиональной деятельности, способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решить проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т. д.

Тематический план для специальности 1-53 01 01 09 «Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)»

№ и название модуля	Общее количество часов, отведенных на модуль	В том числе			
		Теоретические занятия (лекции)	Лабораторные работы	Практические работы	УСРС
М-0. Введение. Основные понятия и определения. Этапы развития электроники	2	2	-	-	-
М-1. Элементная база электроники. Полупроводниковые приборы	20	8	8	-	4
М-2. Элементная база электроники. Электровакуумные, электронно-лучевые и оптоэлектронные приборы. Элементы индикации. Интегральные микросхемы	8	4	2	-	2
М-3. Усилительные устройства и генераторы	21	10	6	-	5
М-4. Преобразовательные устройства и устройства электропитания	18	4	6	4	4
М-5. Импульсная и цифровая техника	22	8	6	4	4
М-6. Микропроцессорные средства	14	4	4	2	4
М-7. Технические средства связи	12	6	-	2	4
М-Р. Подведение итогов	2	2	-	-	-
Итого:	119	48	32	12	27

Тематический план для специальности
1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение
сельскохозяйственного производства»

№ и название модуля	Общее количество часов, отведенных на модуль	В том числе			
		Теоретические занятия (лекции)	Лабораторные работы	Практические работы	УСРС
М-0. Введение. Основные понятия и определения. Этапы развития электроники	2	2	-	-	-
М-1. Элементная база электроники	32	14	12	-	6
М-2. Усилительные устройства и генераторы. Преобразовательные устройства и устройства электропитания	34	18	8	-	8
М-3. Импульсная и цифровая техника. Микропроцессорные средства. Технические средства связи	32	16	8	-	8
М-R. Подведение итогов	2	2	-	-	-
Итого:	102	52	28	-	22

В результате изучения модуля студенты должны знать:

- цели, задачи, структуру дисциплины;
- место дисциплины «Основы электроники и микропроцессорной техники» в системе научных знаний;
- требования к организации учебного процесса;
- требования к результатам обучения.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Новые понятия

Микроминиатюризация – направление в конструировании и создании интегральных микросхем, содержащих элементы с субмикронными размерами.

Вакуумная электроника – область электроники, включающая исследования взаимодействия потоков свободных электронов с электрическими и магнитными полями в вакууме, а также методы создания приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется.

Квантовая электроника – область электроники, связанная с разработкой методов и средств усиления и генерации электромагнитных колебаний.

Твердотельная электроника – область электроники, охватывающая исследование электронных процессов в твердых телах и использование этих процессов для преобразования электромагнитной энергии в широком диапазоне частот.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Электроника — самая динамичная отрасль современной экономики. Среднегодовые темпы ее роста составляют более 7 процентов в год. Отрасли промышленности, связанные с электроникой, а также использующие электронные изделия, производят продукцию на сумму 15 триллионов долларов США.

Во второй половине XX столетия развитие полупроводниковой электроники и, прежде всего, микроэлектроники привело к качественному изменению всей мировой экономики. Экономическое благосостояние наиболее развитых стран базируется, главным образом, на наукоемких технологиях, на экономике, построенной на высоких технологиях. Лидирующее место среди них занимают информационные технологии и полупроводниковая электроника.

Электроника – это область науки и техники, связанная с созданием и практическим использованием устройств и приборов, работа которых основана на изменении концентрации и перемещении заряженных частиц (электронов) в вакууме, газе или твердых кристаллических телах.

Часть электроники, связанная с радиотехникой, получила название радиоэлектроники (радиосвязь и телевидение).

Радиоэлектроника относится к числу быстро развивающихся областей науки и техники, отраслей народного хозяйства. Стоимость электронной аппаратуры каждые 5 лет возрастает в 10 раз. Происходит непрерывная замена одних приборов другими, более совершенными. Раньше возможности электронных ламп казались совершенными, но появились полупроводниковые приборы с еще большими возможностями. То, что было недоступно электронным лампам (высокая механическая прочность, малогабаритность, долговечность) стало доступно полупроводниковым приборам.

Электроника находит широкое применение почти во всех областях науки и техники, что обусловлено высокой чувствительностью, быстродействием, универсальностью и небольшими габаритами электронных приборов.

Так, высокая чувствительность электронных устройств обеспечивается с помощью различных усилительных схем. При этом может быть достигнута чувствительность электронных устройств: по току – 10^{-17} А, по напряжению – 10^{-13} В и по мощности – 10^{-24} Вт.

Быстродействие определяется природой электрических колебаний. Оно неуклонно повышается в связи с микроминиатюризацией элементов и устройств в целом.

Универсальность обусловлена возможностью преобразования всех видов энергии (механической, тепловой, световой, лучистой, звуковой, химической) в электрическую энергию, на изменении и преобразовании которой основано действие всех электронных схем.

Электронные устройства широко используются почти во всех областях деятельности человека: в технике связи (радиовещание, телевидение); в измерительной технике; на транспорте (автомобильном, железнодорожном, водном); в медицине и биологии (исследовательская, диагностическая и лечебная аппаратура); в промышленности и сельском хозяйстве.

Область электроники, занимающаяся применением в промышленности и сельском хозяйстве различных электронных устройств, позволяющих осуществлять контроль, регулирование и управление производственными процессами, называется промышленной электроникой.

Промышленная электроника основывается на достижениях радиотехники и радиоэлектроники [1, 2].

В промышленную электронику входят:

1. Информационная электроника, к которой относятся электронные системы и устройства, связанные с измерением, контролем и управлением промышленными объектами и технологическими процессами.

2. Энергетическая электроника (преобразовательная техника), связанная с преобразованием вида электрического тока для целей электропривода, сварки, электрической тяги, электротермии и т. д.

3. Электронная технология, которая представляет собой воздействие на вещество электронными лучами, плазмой.

В основе радиоэлектроники лежит открытие электромагнитного поля, связанное с именами выдающихся ученых: М. Фарадея, открывшего закон электромагнитной индукции (1831 г.), Дж. Максвелла, создавшего теорию электромагнитного поля (1865 г.), Г. Герца, впервые экспериментально получившего электромагнитные волны (1887 г.).

В зависимости от применяемой элементной базы можно выделить четыре основных поколения развития промышленной электроники и электронных устройств:

I поколение (1904 – 1950 гг.) – основную элементную базу электронных устройств составляли электровакуумные приборы.

II поколение (1950 – начало 1960-х годов) – основную элементную базу составляли дискретные полупроводниковые приборы.

III поколение электронных устройств (1960 – 1980 гг.) связано с развитием микроэлектроники. Основой элементной базы электронных устройств стали интегральные микросхемы и микросборки.

IV поколение (с 1980 г. – по настоящее время) характеризуется дальнейшей микроминиатюризацией электронных устройств на основе применения БИС и СБИС (большие и сверхбольшие интегральные схемы).

Критерием научно-технического прогресса считается в настоящее время степень использования в различных областях человеческой деятельности электронной аппаратуры, позволяющей значительно повысить производительность физического и умственного труда, улучшить технико-экономические показатели производства и комплексно решать такие задачи, которые ранее не решались другими средствами.

Элементная база – это модули, представляющие собой предварительно собранные из отдельных деталей схемы неразъемных соединений. Элементную базу делят на три группы элементов:

- активные (транзисторы, электронные лампы);

- преобразующие (электронно-лучевые трубки);
- пассивные (резисторы, катушки индуктивности, емкости).

Основные направления развития электроники:

1. Вакуумная электроника: СВЧ- приборы (магнетроны, клистроны, лампы бегущей и обратной волны); релятивистские приборы (гиротроны, убитроны); рентгеновские трубки; электронно-оптические преобразователи и кинескопы и др.

В настоящее время разрабатываются электровакуумные приборы (ЭВП) нового поколения на базе микроэлектронной технологии, которые обладают всеми преимуществами вакуумных приборов (широкий диапазон рабочих температур, радиационная стойкость и т. д.) и не уступают полупроводниковым приборам по компактности и габаритам.

2. Твердотельная электроника: полупроводниковые и оптоэлектронные приборы, интегральные микросхемы (ИМС) различной степени интеграции, работа в области создания нанoeлектронных приборов.

3. Квантовая электроника: оптические квантовые генераторы (лазеры), квантовые усилители, молекулярные генераторы.

Профессиональная деятельность инженера, в какой бы области он ни работал, немислима без применения современной аппаратуры и, в первую очередь, аппаратуры автоматики и контроля, включающей в свой состав информационно-измерительную и вычислительную электронную аппаратуру. Поэтому современному инженеру необходимы достаточно глубокие знания в области прикладной электроники, микроэлектроники, информационно-измерительной и вычислительной техники.

На рисунке представлена структура курса, которая соответствует его разбиению на модули. В конце изучения каждого модуля проводится контроль знаний с выставлением оценки. Для специальности 1-53 01 01 09 «Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)» курс разбит на 7 основных модулей; для специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства» - на 3 основных модуля.



Рисунок – Структура курса «Основы электроники и микропроцессорной техники»

Вопросы для самоконтроля:

1. Назовите преимущества полупроводниковых приборов.
2. Какими преимуществами обладают электронно-вакуумные приборы?
3. Назовите элементную базу III-го этапа развития электроники.
4. Созданием каких приборов занимается квантовая электроника?

МОДУЛЬ 1 ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

В результате изучения модуля студенты должны:

- **знать** устройство, области применения, условные обозначения и маркировку полупроводниковых приборов;
- **уметь** характеризовать физические принципы действия полупроводниковых приборов;
- **уметь** оценивать характеристики и параметры полупроводниковых приборов.
- **уметь** использовать полученные знания при исследовании простейших электронных схем;
- **уметь** работать самостоятельно.

Изучение модуля должно способствовать формированию у студентов логического мышления.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Новые понятия

Дрейф носителей заряда – движение электронов и дырок под воздействием электрического поля.

Диффузия носителей заряда – движение электронов и дырок при их неравномерной концентрации (наличие градиента концентрации) и при отсутствии внешнего электрического поля.

Донорные примеси – примесные атомы в полупроводнике, способные отдавать электрон в зону проводимости.

Рекомбинация - процесс заполнения незаполненной валентной связи электроном.

Акцепторные примеси – примесные атомы в полупроводнике, способные захватывать электрон из валентной зоны, что эквивалентно появлению в ней дырки.

Инжекция электронов – введение (вбрасывание) избыточных электронов в полупроводник под воздействием электрического поля.

Эмиттерный переход – электронно-дырочный переход ($p-n$ -переход) в транзисторе между эмиттером и базой.

Коллекторный переход – электронно-дырочный переход ($p-n$ -переход) в транзисторе между базой и коллектором.

Выпрямление – процесс преобразования энергии переменного тока (напряжения) в энергию постоянного тока (напряжения).

Понятия для повторения

Катод – один из электродов электровакуумного или полупроводникового приборов, соединенный с отрицательным полюсом источника электрического тока.

Анод – один из электродов электровакуумного или полупроводникового приборов, соединенный с положительным полюсом источника электрического тока.

Внешний фотоэффект – испускание электронов из одной среды в другую под воздействием квантов электромагнитного излучения (фотонов).

Внутренний фотоэффект – увеличение концентрации носителей заряда в полупроводнике под воздействием квантов электромагнитного излучения (фотонов).

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Лекция 1. Полупроводниковые приборы

План лекции:

1. Полупроводниковые материалы.
2. Приборы без $p-n$ -перехода (полупроводниковые резисторы).
3. Образование $p-n$ -перехода.
4. Полупроводниковые диоды.
5. Некоторые дополнительные типы диодов.

Полупроводниковые материалы

К полупроводникам относятся кремний, германий, селен, теллур, большинство оксидов металлов и всё разнообразие руд и минералов, встречающихся в природе. Полупроводники по величине электропроводности занимают промежуточное место между проводниками и изоляторами.

Основными материалами для изготовления полупроводниковых приборов являются кремний (Si) и германий (Ge). Большая механическая прочность и химическая устойчивость этих материалов обеспечивают надёжность работы изготавливаемых полупроводниковых приборов, а также достаточно большой срок их службы.

В соответствии с зонной теорией в твердых телах выделяют валентную зону, зону проводимости и запрещенную зону. Уход электрона из валентной зоны приводит к образованию в ней незаполненного энергетического уровня. Такое вакантное энергетическое

место носит название «дырка» и это равносильно наличию в данном месте положительного заряда. В технической литературе дырки обозначают буквой p , а электроны – буквой n .

Электропроводность, обусловленную движением свободных электронов, называют электронной, а электропроводность, обусловленную движением дырок – дырочной [3, 4]. Явление одновременного существования электронной и дырочной проводимости носит название собственной проводимости кристалла. При неравномерной концентрации электронов и дырок (наличие градиента концентрации) и при отсутствии внешнего поля они перемещаются по законам диффузии, переходя из области больших концентраций в область меньших концентраций. Это движение зарядов и образует диффузионный ток $I_{\text{диф}}$.

Если в полупроводнике с помощью внешнего источника ЭДС создать электрическое поле, то хаотическое движение носителей заряда упорядочится, то есть дырки начнут двигаться в направлениях, совпадающих с направлениями электрического поля, а электроны - в противоположном. Возникнут два встречно направленных потока носителей заряда. Такое движение зарядов называют дрейфом, а созданный их движением ток – дрейфовым током $I_{\text{др}}$.

Примесная проводимость полупроводника

Действие всех полупроводниковых приборов основано на примесной проводимости полупроводников, которая осуществляется путем введения в кристаллическую решётку полупроводника атомов других веществ – примесей. В зависимости от рода введенной примеси в таких полупроводниках преобладает либо электронная электропроводность (n -типа) либо дырочная электропроводность (p -типа) [5,6].

Примесный атом, отдающий электрон, называют донорным. Донорные примеси образуются при введении в кристаллическую решётку Ge (Si) атомов мышьяка или других веществ, которые имеют на внешней электронной оболочке пять валентных электронов. Он замещает один из атомов Ge (Si) в кристаллической решётке, образуя двухвалентные связи с четырьмя атомами.

Пятый валентный электрон атома мышьяка, оказывающийся лишним, может оторваться от этого атома, образуя электрон проводимости.

Акцепторные примеси образуются введением в кристаллическую решётку полупроводника атомов индия, галлия или других трехвалентных элементов. Атом акцептора также занимает место в

кристаллической решётке, но обменивается с соседними четырьмя атомами только тремя электронами.

На образование связи с одним из соседних атомов Ge (Si) у атомов индия не хватает одного электрона, то есть между этими двумя атомами возникает незаполненная валентная связь (или дырка).

Процесс заполнения незаполненной валентной связи электроном называется рекомбинацией. Основными носителями тока в полупроводнике являются дырки или электроны, но в каждом из них есть и носители противоположного знака – неосновные носители тока.

Приборы без $p-n$ -перехода (полупроводниковые резисторы)

Полупроводниковыми резисторами называют полупроводниковые приборы, принцип действия которых основан на свойствах полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры, электромагнитного излучения, приложенного напряжения и других факторов.

1. Терморезистор (термистор) – полупроводниковый прибор, сопротивление которого значительно изменяется при изменении температуры. Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) термистора показана на рисунке 1.1.

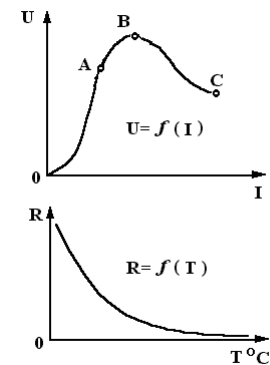


Рисунок 1.1 – ВАХ и температурная характеристика термистора

Параметры терморезистора:

- 1) холодное сопротивление (при $t = 20^\circ\text{C}$);
- 2) температурный коэффициент сопротивления (TKR), %;
- 3) рабочая температура (t°_{max});
- 4) максимальная рассеиваемая мощность P_{max} расс .

Применяют терморезисторы для измерения и регулирования температуры, а также термокомпенсации.

2. Позисторы – полупроводниковые термисторы с положительным температурным коэффициентом (титанат бария с примесями), у которых сопротивление увеличивается при увеличении температуры. Основные характеристики – ВАХ и температурная (рисунок 1.2). Параметры позистора аналогичны параметрам термистора.

Применяют позисторы для автоматического регулирования температуры, термокомпенсации, в схемах ограничителей и стабилизаторов тока, для предохранительных приборов и устройств защиты от перегрева, в качестве бесконтактных переключающих элементов.

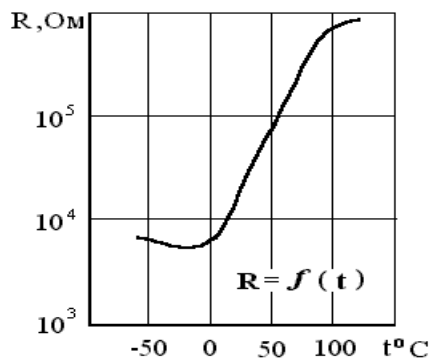


Рисунок 1.2 – Температурная характеристика позистора

Маркировка терморезисторов состоит из трех элементов:

- первый элемент маркировки обозначает назначение (СТ – резисторы термочувствительные, Т и ТШ – резисторы измерительные, ТП – стабилизирующие, ТКП – регулируемые бесконтактные);

- второй элемент обозначает тип полупроводника (1 – кобальт-марганец, 2 – медно-марганцевые, 3 – медно-кобальт-марганцевые, 4 – кобальт-никель-марганец);

- третий элемент обозначает номер конструкции.

Примеры: СТ2–26, СТ4–5, ММТ–6, ТШ–2, ТКП–450.

3. Варисторы – полупроводниковые резисторы (на основе карбида Si), сопротивление которых зависит от приложенного напряжения.

Основная характеристика варистора – это вольт-амперная характеристика (ВАХ) $I = f(U)$ (рисунок 1.3).

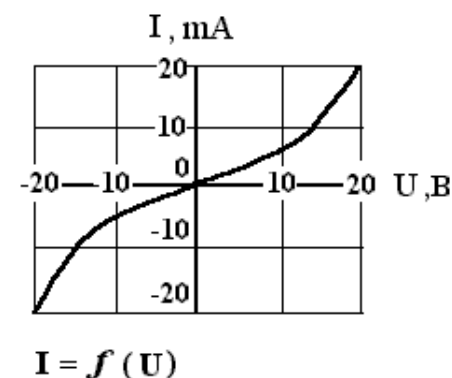


Рисунок 1.3 – ВАХ варистора

Параметры варистора:

- 1) статическое сопротивление при постоянных значениях тока и напряжения $R_{ст} = U/I$;
- 2) динамическое сопротивление переменному току $R_{д} = \Delta U / \Delta I$;
- 3) коэффициент нелинейности $\beta = R_{ст} / R_{д}$;
- 4) максимальная рассеиваемая мощность P_{\max} расс.

Применяют варисторы для регулирования электрических величин, стабилизации токов и напряжений, для защиты элементов от перенапряжений.

Маркировка прибора состоит из 4 элементов:

- первый элемент обозначает назначение (СН - сопротивление нелинейное);
- второй элемент обозначает тип полупроводника;
- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения;
- четвертый элемент обозначает длину токоведущего элемента.

Примеры: СН1–1, СН–3.

4. Тензорезисторы – пластина или стержень из полупроводника с омическими контактами, при деформации которого происходит изменение его удельного сопротивления.

Для характеристики изменения сопротивления при деформации используется коэффициент тензочувствительности m , который представляет собой отношение относительного изменения сопротивления к относительной деформации в данном направлении:

$$m = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}$$

5. Фоторезисторы – полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых изменяется под действием светового потока.

Основой фоторезистора является светочувствительный элемент – прямоугольная или круглая «таблетка», спрессованная из полупроводникового материала, или тонкая пленка на стеклянной подложке с электродами с малым переходным сопротивлением (рисунок 1.4.).

Принцип действия фоторезистора: при увеличении светового потока часть электронов проводимости сталкивается с атомами, ионизирует их и создает дополнительный поток электронов (возникает фототок проводимости).

При отсутствии тока через фоторезистор течет темновой ток:

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_H},$$

где R_T - темновое сопротивление фоторезистора.

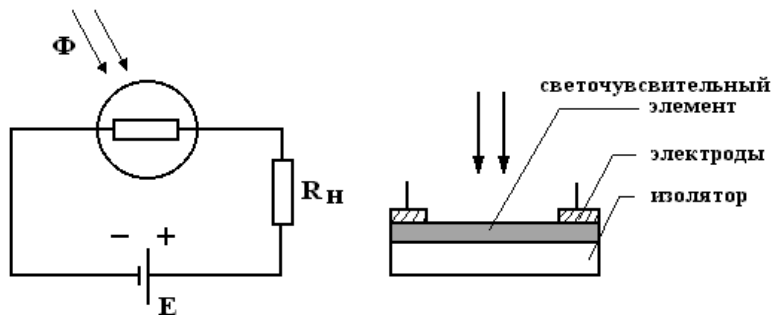


Рисунок 1.4 - Конструкция фоторезистора

При освещении фоторезистора через него протекает световой ток:

$$I_C = \frac{E}{R_C + R_H}$$

Основные характеристики фоторезистора (рисунок 1.5):

1) вольт-амперная характеристика – зависимость фототока (или темнового тока) от приложенного напряжения при постоянном световом потоке:

$$I_\Phi = f(U_\Phi) = \text{const} \text{ (рисунок 1.5, а);}$$

2) световая – зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава (рисунок 1.5, б);

3) спектральная – зависимость чувствительности фоторезистора от длины волны светового излучения (рисунок 1.5, в).

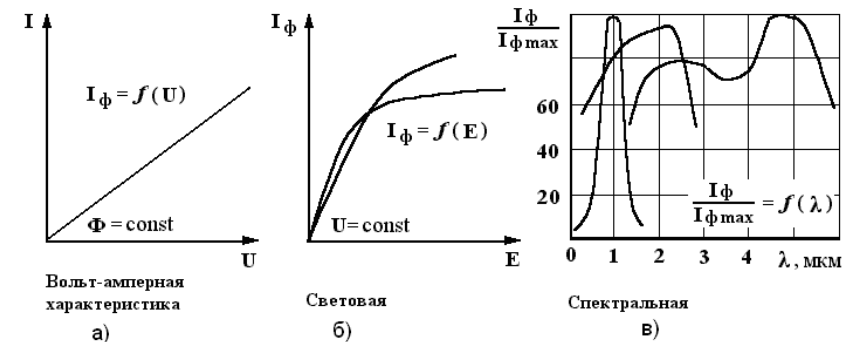


Рисунок 1.5 - Характеристики фоторезистора

Основные параметры фоторезистора:

- 1) темновое сопротивление R_T ;
- 2) темновой и световой токи (I_T, I_C);
- 3) удельная чувствительность $S = \frac{I_\Phi}{\Phi U}$;
- 4) рабочее напряжение;
- 5) максимальная рассеиваемая мощность $P_{\text{max}} \text{ рас.}$

Маркировка фоторезистора состоит из трех элементов:

- первый элемент обозначает назначение (ФС - фотосопротивление);
- второй элемент обозначает тип полупроводника (К – кремний);
- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения.

Примеры: ФСК–1, ФСК–2, ФСА–6.

Применение фоторезисторов: в промышленной электронике, телевидении, фототелеграфии, сигнализации и связи (в диапазоне инфракрасных волн), а также в схемах электронной автоматики.

Образование $p-n$ -перехода

Область на границе двух полупроводников с различными типами проводимости называется электронно-дырочным или $p-n$ -переходом. При соприкосновении двух полупроводников в пограничном слое происходит рекомбинация электронов и дырок. Свободные электроны из зоны полупроводника n -типа занимают свободные уровни в валентной зоне полупроводника p -типа. В результате вблизи границы двух полупроводников образуется запирающий слой, лишенный подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением.

Кроме того, в n -области в приграничном слое образуется положительный объемный заряд, который создан «+» заряженными атомами донорной примеси (т. к. электроны ушли в полупроводник p -типа), а в p -области образуется «-» объемный заряд, который создан «-» заряженными атомами акцепторной примеси (т. к. дырки были заполнены электронами из полупроводника n -типа).

Между образовавшимися объемными зарядами возникает контактная разность потенциалов $U_k = \varphi_n - \varphi_p$. На диаграмме (рисунок 1.6) показано распределение потенциала вдоль оси x , перпендикулярной границе раздела полупроводников, за нулевой потенциал условно принят потенциал граничного слоя.

Возникшая разность потенциалов U_k создает в запирающем слое электрическое поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов из n -области в p -область и дырок из p -области в n -область, т. е. возникает потенциальный барьер.

При движении через $p-n$ -переход неосновных носителей заряда возникает дрейфовый ток $I_{др}$. Движение небольшого количества основных носителей приводит к появлению диффузионного тока $I_{диф}$ (ситуация рассмотрена при отсутствии внешнего напряжения).

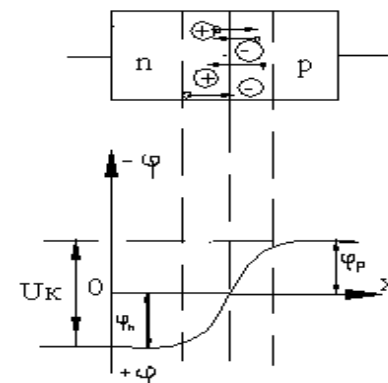


Рисунок 1.6 - Распределение потенциала вдоль оси x , перпендикулярной границе раздела при отсутствии внешнего источника напряжения

Если источник внешнего напряжения подключен «+» полюсом к полупроводнику p -типа и «-» полюсом к полупроводнику n -типа, то такое напряжение, у которого полярность совпадает с полярностью основных носителей, называется прямым (рисунок 1.7).

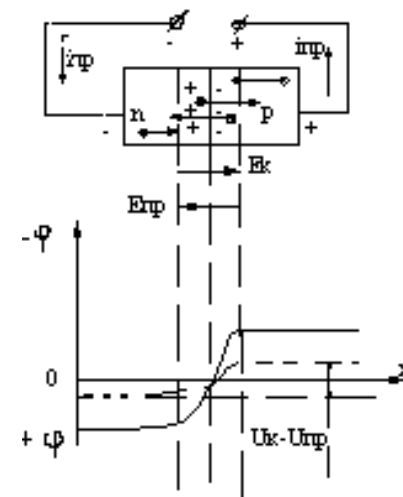


Рисунок 1.7 - Распределение потенциала при прямом включении источника

В этом случае внешнее электрическое поле направлено навстречу полю контактной разности потенциалов. В результате чего высота потенциального барьера понижается, возрастает $I_{\text{диф}}$, который называют прямым током, сопротивление $p-n$ -перехода резко снижается, уменьшается также ширина запирающего слоя. При $d = 0$ потенциальный барьер в $p-n$ -переходе исчезает и сопротивление $p-n$ -перехода определяется только сопротивлением полупроводника.

Пусть источник внешнего напряжения подключен «+» полюсом к n -области, а «-» полюсом к p -области. Такое включение называется обратным. Поле, создаваемое обратным напряжением $U_{\text{обр}}$, складывается с полем контактной разности потенциалов. Высота потенциального барьера увеличивается (рисунок 1.8), а также расширяется толщина запирающего слоя, так как с увеличением $U_{\text{обр}}$ основные носители заряда будут удаляться от $p-n$ -перехода. При этом сопротивление $p-n$ -перехода увеличивается, а ток через $p-n$ -переход уменьшается.

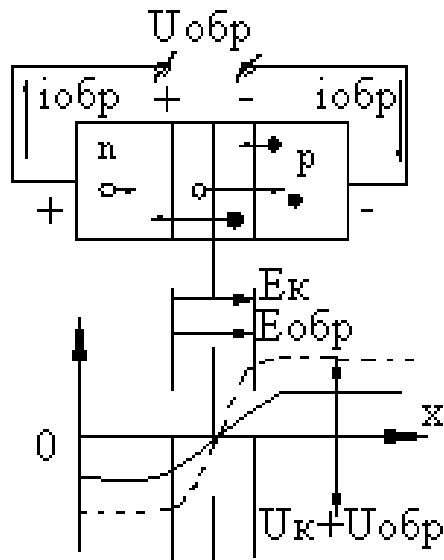


Рисунок 1.8 – Распределение потенциала при обратном включении источника

Такой $p-n$ -переход обладает электрической емкостью, которая зависит от его площади, ширины и диэлектрической проницаемости

запирающего слоя. Такая емкость называется «барьерной». При увеличении $U_{\text{обр}}$ ширина $p-n$ -перехода возрастает, а емкость C уменьшается (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 - Зависимость C от $U_{\text{обр}}$

При этом

$$C_{\text{бар}} = \frac{S\epsilon\epsilon_0}{d}.$$

Полупроводниковые диоды

1. Выпрямительные диоды.

Выпрямление – это процесс преобразования энергии переменного тока (напряжения) в энергию постоянного тока (напряжения). Поскольку полупроводниковые диоды в прямом направлении хорошо проводят ток и плохо проводят его в обратном, то основным назначением таких диодов является выпрямление переменного тока (напряжения). Простейшая схема для выпрямления переменного тока, которая называется однополупериодной, приведена на рисунке 1.10. Генератор вырабатывает синусоидальный сигнал.

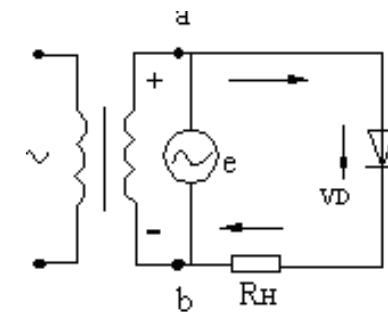


Рисунок 1.10 - Однополупериодная схема выпрямления

Во время одного полупериода, когда потенциал точки a положителен («+»), а точки b отрицателен («-»), через диод проходит прямой ток, создающий на R_H падение напряжения U_R . В течение следующего полупериода, когда потенциал точки b «+», а точки a «-», диод закрыт и тока практически нет. В этом случае получается ток в виде импульсов, длящихся половину периода и разделенных промежутками, которые также равняются половине периода (рисунок 1.11). Этот ток называют выпрямленным током и он создает на R_H выпрямленное напряжение. Полезной частью такого напряжения является его среднее значение U_{cp} .

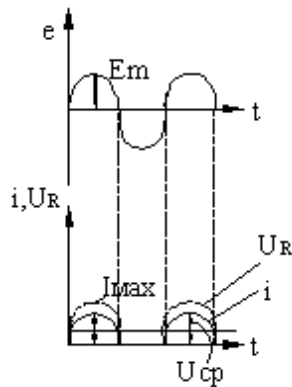


Рисунок 1.11 - Временная диаграмма $U_{вх}$ и U_R

Основные параметры выпрямительных диодов:

- 1) $U_{пр}$ и соответствующий ему $I_{пр}$, который называют выпрямленным током;
- 2) $U_{обр}$ и соответствующий ему $I_{обр}$;
- 3) максимальное допустимое обратное напряжение $U_{обр, max}$ и максимально допустимый прямой выпрямленный ток $I_{пр, ср}$.

2. Стабилитроны.

Стабилитроны – это плоскостные диоды, изготовленные из кремния (Si) с большой концентрацией примеси. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода в области электрического пробоя имеет участок, который может быть использован для стабилизации напряжения. На этом участке обратной ветви ВАХ при изменении тока в широком диапазоне напряжение практически не меняется (рисунок 1.12).

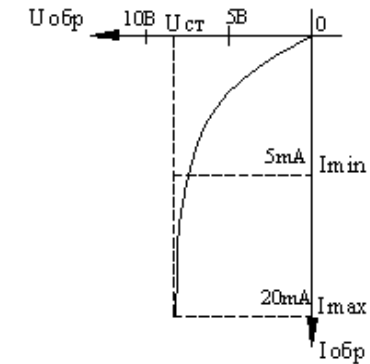


Рисунок 1.12 - ВАХ стабилитрона

Стабилитроны еще называют опорными диодами, т. к. полученное от них стабильное напряжение иногда используется в качестве эталонного (например, в стабилизаторах напряжения). Простейшая схема включения стабилитрона показана на рисунке 1.13.

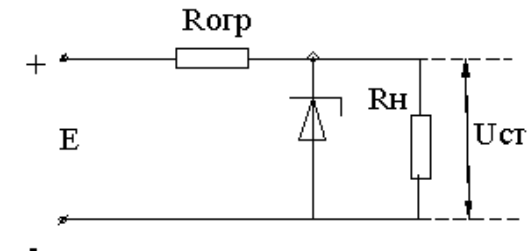


Рисунок 1.13 – Схема включения стабилитрона

Нагрузка R_H включена параллельно стабилитрону. Поэтому в режиме стабилизации, когда напряжение на стабилитроне остается почти постоянным, такое же напряжение будет и на нагрузке.

Если напряжение E будет изменяться, то, соответственно, будет изменяться ток стабилитрона, но напряжение на нем и на нагрузке останется постоянным. Все изменения напряжения источника питания E почти полностью поглощаются ограничительным резистором. То есть стабилизация осуществляется при соблюдении условия $\Delta E \leq (I_{max ст} - I_{min ст}) R_{огр}$.

Основные параметры стабилитрона:

- 1) напряжение стабилизации $U_{ст}$;
- 2) диапазон изменения тока стабилизации ($I_{max}-I_{min}$);
- 3) максимально допустимая мощность P_{max} ;
- 4) дифференциальное сопротивление $R_d=\Delta U/\Delta I$;
- 5) температурный коэффициент напряжения стабилизации

$$TKH=\Delta U_{ст}/(U_{ст}\Delta T);$$

- 6) коэффициент стабилизации

$$K_{cm} = \frac{\Delta E / E}{\Delta U_{cm} / U_{cm}}$$

3. Варикапы.

В этих приборах используется барьерная емкость $p-n$ -перехода, величиной которой можно управлять с помощью напряжения. При подаче обратного напряжения $p-n$ -переход представляет собой конденсатор, диэлектриком которого служит высокоомный запирающий слой с низкой концентрацией носителей заряда, а обкладками – полупроводниковый материал по обе стороны от него, сохраняющий высокую проводимость.

Емкость такого конденсатора, называемая барьерной, определяется обратным напряжением $U_{обр}$ и уменьшается с его ростом, так как запирающий слой расширяется, что равносильно увеличению расстояния между электродами. Основная характеристика варикапа – вольт-фарадная $U_{обр}=f(C)$ (рисунок 1.9).

Основные параметры варикапов:

- 1) емкость C ;
- 2) минимальная емкость;
- 3) коэффициент перекрытия по емкости $R=C_{max}/C_{min}$;
- 4) добротность $Q=X_c/R_{пот.}$, где X_c - реактивное сопротивление варикапа, $R_{пот.}$ - сопротивление потерь;
- 5) температурный коэффициент емкости (ТКЕ).

Применяются варикапы для генерации и усиления электрического сигнала вплоть до СВЧ-диапазона, а также в качестве конденсаторов переменной емкости.

4. Туннельные диоды.

Их работа основана на туннельном эффекте. На прямой ветви ВАХ существует область с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рисунок 1.14).

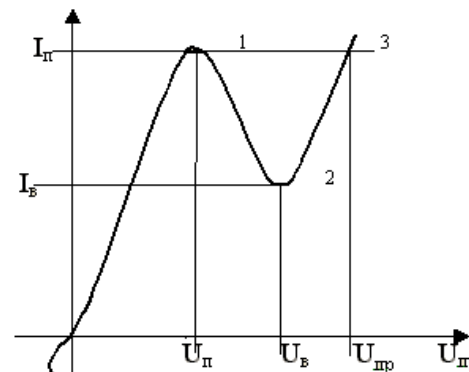


Рисунок 1.14 – ВАХ туннельного диода

В тонких $p-n$ -переходах увеличивается вероятность туннельного прохождения электронов сквозь тонкий потенциальный барьер.

Основные параметры туннельных диодов:

- 1) напряжение и ток пика $U_п, I_п$;
- 2) напряжение и ток впадины $U_в, I_в$;
- 3) отношение токов $I_п/I_в$;
- 4) напряжение $U_{пр}$ - прямое напряжение, большее $U_в$, при котором ток равен пиковому;
- 5) максимальная частота.

Туннельные диоды применяют для усиления и генерирования электрических колебаний в диапазоне СВЧ, в импульсных схемах переключателей, а также запоминающих устройствах.

5. Светодиоды.

Светодиод – полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, преобразующий электрическую энергию в энергию светового излучения. Явление свечения в светодиоде называется инжекционной электролюминесценцией. Основой светодиода является $p-n$ -переход, смещенный внешним источником напряжения в прямом направлении.

При прямом смещении потенциальный барьер $p-n$ -перехода понижается и происходит инжекция электронов в p -область и дырок в n -область. В процессе рекомбинации неосновных носителей в $p-n$ -переходе энергия выделяется в виде фотонов, то есть процесс рекомбинации сопровождается световым излучением.

Основные характеристики светодиодов представлены на рисунке 1.15.

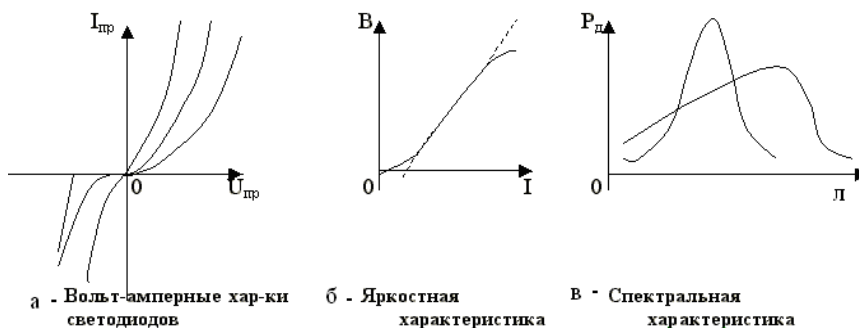


Рисунок 1.15 - Характеристики светодиодов

Основные параметры светодиодов:

- 1) сила света I_v – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении (мКд);
- 2) яркость излучения равна отношению силы света к площади светящейся поверхности (Кд/см^2);
- 3) постоянное прямое напряжение (2...4 В);
- 4) цвет свечения или длина волны, соответствующая максимальному световому потоку;
- 5) максимально допустимый постоянный прямой ток (мА);
- 6) максимально допустимое постоянное обратное напряжение (В);
- 7) быстродействие излучающего диода, определяемое временем переключения $t_{\text{пер}}$;
- 8) диапазон температур окружающей среды ($t^0 = -60...+70^0\text{C}$);
- 9) срок службы (104...106 ч).

Применяются светодиоды в устройствах визуального отображения информации, в фотореле, различных датчиках и при создании оптронов.

6. Фотодиоды.

Конструкция полупроводникового фотодиода представляет собой пластинку полупроводника с областями p - и n -проводимости, которые разделены p - n -переходом. Пластинка заключена в корпус из прозрачной пластмассы или в металлический корпус с окном, пропускающим световой поток. Фотодиоды могут работать в режиме фотогенератора (без внешнего источника питания) и в режиме фотопреобразователя (с внешним источником питания, включенным в обратном направлении).

В режиме фотогенератора (рисунок 1.17, а) при освещении n -области в ней образуется пара – электрон и дырка. Образовавшиеся заряды диффундируют к переходу, поем которого дырки втягиваются в p -область. При разомкнутом ключе в p -области накапливается избыточный «+» заряд, а в n -области – «-» заряд. На электродах фотодиода возникает разность потенциалов, понижающая потенциальный барьер. Это приводит к возникновению прямого тока ($I_{\text{пр}}$) через p - n -переход.

Если электроды замкнуты накоротко, то разность потенциалов на них не возникает и высота потенциального барьера при освещении не изменится. При включении сопротивления нагрузки R_n через неё протекает ток нагрузки $I_n = I_{\text{ф}} - I_{\text{пр}}$.

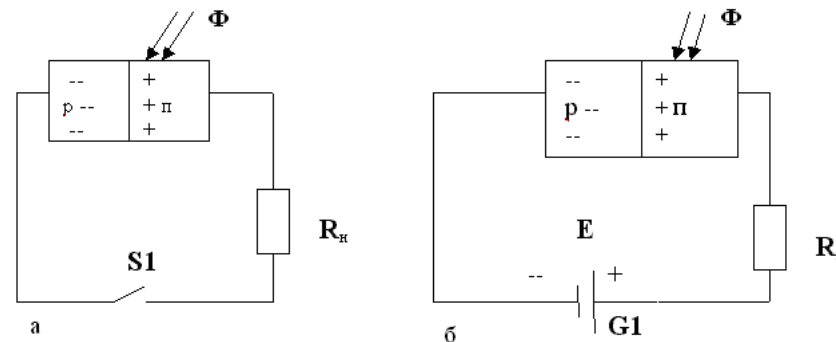


Рисунок 1.17 - Включение фотодиода в режиме фотогенератора (а) и в режиме фотопреобразователя (б)

В режиме фотопреобразователя (рисунок 1.17, б) к диоду прикладывается обратное напряжение. Так как приложенное напряжение значительно больше фотоЭДС, то при освещении p - n -перехода высота потенциального барьера практически не изменяется и все освобожденные светом и разделенные полем p - n -перехода заряды уходят во внешнюю цепь. Прямой ток через p - n -переход, который возникает при работе в режиме фотогенератора и уменьшает ток в нагрузочном сопротивлении, в данном случае равен нулю [7, 12].

При отсутствии света через p - n -переход и R_n протекает обратный ток p - n -перехода $I_{\text{обр}} = I_t$ (где I_t темновой ток). При освещении фотодиода через R_n протекает ток $I_{\text{общ}} = I_{\text{ф}} - I_t$. Поскольку внутреннее сопротивление фотодиода в этом режиме велико, то ток не зависит от R_n .

Некоторые дополнительные типы диодов

1. Диоды Шоттки.

Кроме полупроводниковых переходов существует также переход «металл–полупроводник», который обозначается как $m-p$ и $m-n$, в зависимости от типа полупроводника [8, 9,10].

Прямой ток в них создается основными носителями заряда. Накопление заряда в базе отсутствует, а барьерная емкость мала. За счет этого предельная частота работы составляет 10 ГГц. Диоды Шоттки используют в качестве быстродействующих логарифмических элементов. Диоды Шоттки являются СВЧ- диодами. Они используются в качестве смесительных и детекторных элементов, так как позволяют осуществлять операцию преобразования – переноса спектра СВЧ- сигнала в область более низких частот. Также эти диоды используются в качестве переключающе-регулирующих элементов, позволяющих регулировать мощность сигналов СВЧ в волноводных линиях путем изменения внутреннего сопротивления.

2. Импульсные диоды.

Они предназначены для работы в качестве ключа, который может иметь два состояния: открыт (когда R_d мало), закрыт (когда R_d велико). Время перехода из одного состояния в другое определяется быстродействием аппаратуры с этими диодами. Длительность процесса переключения определяется временем накопления необходимой концентрации неравновесных носителей в близких к $p-n$ -переходу слоях за счет их диффузии через $p-n$ -переход. В результате прямое напряжение на диоде при его отпирании имеет большую величину, чем в установившемся режиме.

3. Диоды Ганна.

В некоторых полупроводниках (например, арсениде галлия $GaAs$) при воздействии очень сильного электрического поля (105...106 В/м) протекающий через них ток становится прерывистым: происходит группирование электронов проводимости в своеобразные группы, которые движутся от катода к аноду со сравнительно небольшой скоростью – до 105 м/с. При этом пока в кристалле движется одна группа, другая группа не возникает. Таким образом, ток протекает импульсами, следующими один за другим с очень высокой частотой (до десятков ГГц).

Диоды Ганна сравнительно маломощные (единицы ватт), вследствие малых размеров активных областей и трудностей отвода от них тепла.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие носители заряда являются основными для полупроводников n -типа и p -типа?
2. Какие типы примесных полупроводников Вы знаете и как они создаются?
3. Чем отличаются термисторы от позисторов?
4. Как образуется $p-n$ -переход?
5. На каком принципе основана работа тензорезистора (фоторезистора)?
6. Из какого материала изготавливаются светодиоды?
7. На каком физическом явлении основана работа стабилитрона?

Лекция 2. Биполярные транзисторы

План лекции:

1. Типы и структура биполярного транзистора.
2. Физические принципы работы транзистора.
3. Схемы включения, характеристики и параметры транзистора.
4. h -параметры биполярного транзистора.
5. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

Типы и структура биполярного транзистора

Транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами, который имеет три или более электрода и служит для усиления и переключения электрических сигналов. По принципу действия транзисторы делятся на биполярные и полевые (униполярные).

По сравнению с электронными лампами транзисторы имеют следующие преимущества:

- 1) отсутствует цепь накала (такие транзисторы практически мгновенно готовы к работе);
- 2) незначительная потребляемая мощность;
- 3) более высокий КПД;
- 4) отсутствие помех типа «микрофонный эффект» при действии ударов и вибрации;
- 5) продолжительный срок службы;
- 6) небольшие габариты и вес.

Для изготовления транзисторов обычно используют германий (Ge) и кремний (Si), которые доводят до высокой степени чистоты.

Биполярный транзистор – это управляемый полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами и тремя выводами, работа которого основана на использовании носителей заряда обоих знаков. Пло-

скостной биполярный транзистор представляет собой пластинку германия (*Ge*), кремния (*Si*) или другого полупроводника, в которой созданы три области с различной электропроводимостью: *n-p-n* или *p-n-p*. В первом случае средняя область имеет дырочную проводимость и две крайние – электронную (рисунок 1.18, а). Во втором случае наоборот (рисунок 1.18, б). Средняя область транзистора называется базой, одна крайняя область эмиттером, а другая – коллектором.

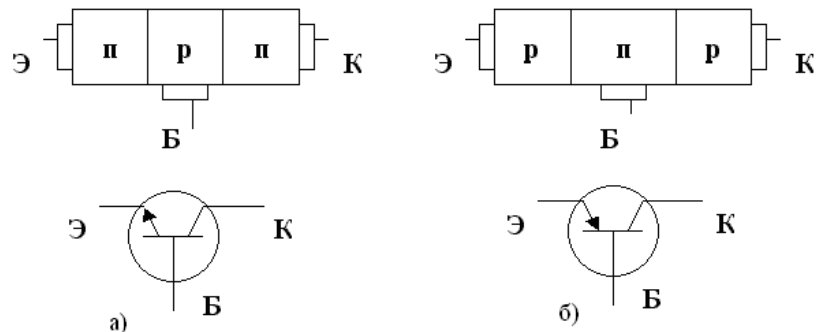


Рисунок 1.18 – Структура транзистора *n-p-n*-типа (а) и *p-n-p*-типа (б)

Таким образом, в транзисторе имеются два *p-n*-перехода: эмиттерный – между эмиттером и базой и коллекторный – между базой и коллектором. Функция эмиттерного перехода – инжектирование носителей заряда в базу (для транзистора *n-p-n* – это электроны, для транзистора *p-n-p* – это дырки); функция коллекторного перехода – сбор носителей заряда, прошедших через базу.

Чтобы носители заряда инжектировались эмиттером и, проходя через базу, полнее собирались коллектором площадь коллекторного перехода делают больше площади эмиттерного перехода. Область базы делают очень тонкой. Кроме того, концентрацию примесей в базе делают значительно меньше, чем в коллекторе и эмиттере.

Физические принципы работы транзистора

При работе транзистора *p-n-p*-типа в цепь между базой и коллектором транзистора подключен источник постоянного напряжения в прямом направлении E (рисунок 1.19). Вследствие этого потенциальный барьер эмиттерного перехода снизится на величину E_3 : $U_{36} = \phi - E_3$. Действие барьера ослабляется и дырки, обладающие большими скоростями, могут переходить через *p-n*-переход в базовую

область, создавая ток эмиттерного перехода i_3 . Этот процесс называется инжекцией дырок.

Инжектированные в базу дырки в результате диффузии направляются к коллектору за счет перепада плотности дырок по длине базы.

За время диффузии часть дырок рекомбинирует с электронами, приходящими в базу через базовый вывод от источника E_3 , и образует базовый ток i_6 . В цепь между базой и коллектором подключено напряжение E_k , смещающее коллекторный переход в запирающем (обратном) направлении и увеличивающее потенциальный барьер коллекторного перехода. Величину напряжения E_k выбирают порядка 5...20 В.

Попавшие в базу из эмиттера и равномерно распределившиеся по объему базы дырки подхватываются полем коллекторного перехода, которое является для них ускоряющим, и втягиваются в коллектор. Этот процесс называется экстракцией дырок (рисунок 1.20). Дырки образуют коллекторный ток i_k . В области контакта коллектора с внешней цепью дырки рекомбинируют с электронами, приходящими из внешней цепи от источника питания E_k . Цепь тока оказывается замкнутой. При этом $i_3 = i_6 + i_k$.

Для увеличения коллекторного тока i_k величину базового тока i_6 стремятся сделать минимальной за счет уменьшения ширины области базы и концентрации примесей.

Отношение коллекторного тока к эмиттерному называется коэффициентом передачи тока транзистора. Оно равняется:

$$\alpha = i_k / i_3 = 0,95...0,99.$$

Таким образом, токи в транзисторе связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} I_k &= \alpha I_3; \\ I_6 &= (1 - \alpha) I_3. \end{aligned}$$

Поскольку сопротивление коллекторной цепи велико (коллекторный переход смещен в обратном направлении), то протекание по ней изменяющегося и значительного по величине тока i_k позволяет получить в усилителе на транзисторе усиление по напряжению и мощности.

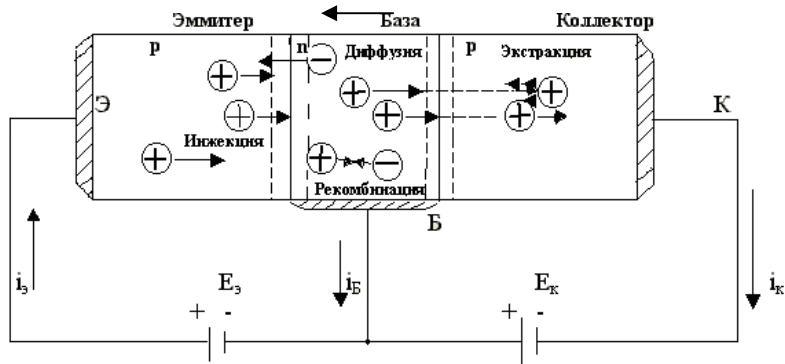


Рисунок 1.19 – Структура транзистора $p-n-p$ -типа

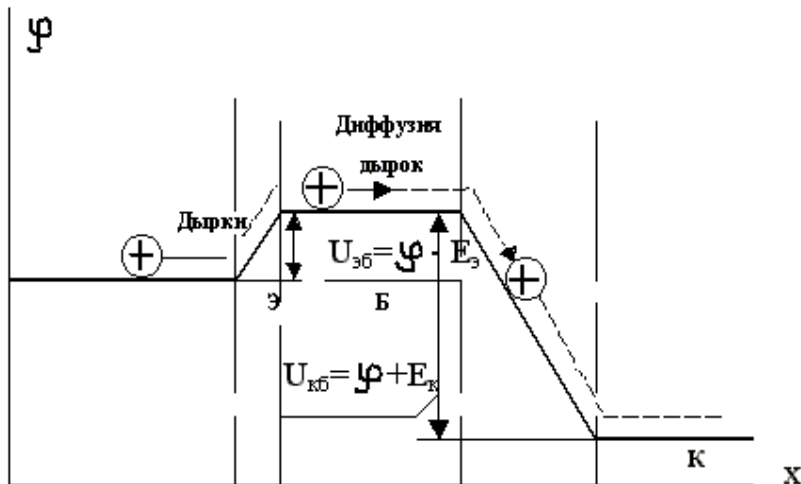


Рисунок 1.20 – Физические процессы в транзисторе $p-n-p$ -типа (распределение потенциалов)

Работа транзистора $n-p-n$ -типа происходит аналогично работе транзистора $p-n-p$ -типа. В этом случае носителями тока являются электроны и полярность внешних источников напряжений меняется на противоположную.

Схемы включения, характеристики и параметры транзистора
 Имеется три схемы включения транзистора: схема с общей базой (ОБ), схема с общим эмиттером (ОЭ) и схема с общим коллектором (ОК). Схемы включения транзистора приведены на рисунке 1.21.

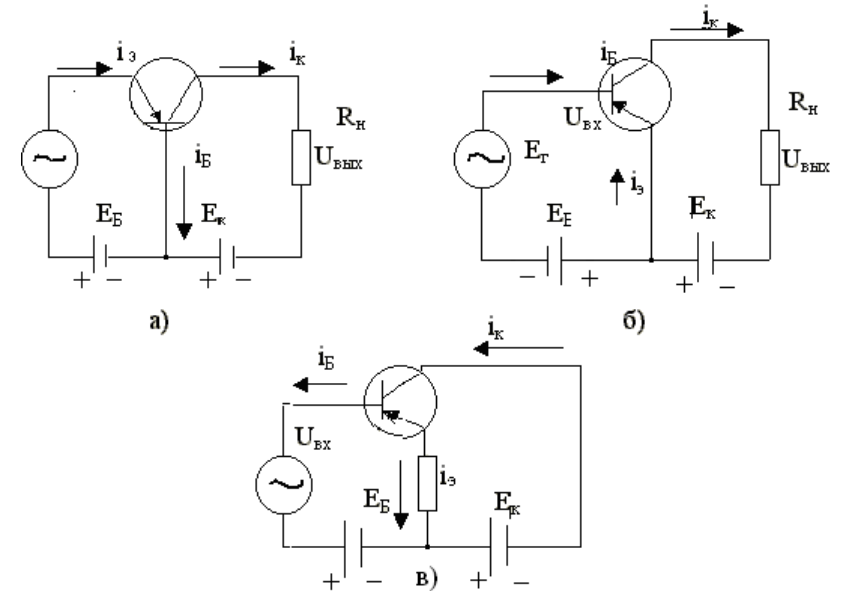


Рисунок 1.21 – Схемы включения транзистора: а) ОБ; б) ОЭ; в) ОК

Схема с общей базой (ОБ).

Входной ток в схеме ОБ является током эмиттера i_3 , а выходной – током коллектора i_K .

Коэффициент усиления (передачи) по переменному току ($\alpha = \Delta I_K / \Delta I_3$) представляет собой отношение приращений токов коллектора и эмиттера и имеет величину меньше единицы. Если сопротивление нагрузки достаточно велико, то амплитуда переменной составляющей напряжения $U_{ВЫХ}$ значительно больше амплитуды напряжения $U_{ВХ}$.

Учитывая, что $i_{ВЫХ} = i_{ВХ}$, следует отметить, что схема не обеспечивает усиления тока, но усиливает напряжение. Входной ток в такой схеме $i_{ВХ} = i_3$ достаточно большой, а входное сопротивление – малое.

Схема с общим эмитером (ОЭ).

В такой схеме включения входным током является ток базы i_b . Коэффициент передачи по току равен:

$$\beta = \Delta I_k / \Delta I_b,$$

где $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ и принимает значения $\beta \gg 1$ ($\beta = 10 \dots 200$).

Так как $i_{\text{вых}} \gg i_{\text{вх}}$ (при достаточно большом сопротивлении R_k , амплитуда переменной составляющей напряжения $U_{\text{вых}}$ значительно больше амплитуды напряжения $U_{\text{вх}}$), то схема обеспечивает усиление и тока, и напряжения. Следует отметить, что входной ток такой схемы достаточно мал, поэтому входное сопротивление больше, чем в схеме с общей базой.

Схема с общим коллектором (ОК).

При такой схеме включения входной цепью является цепь базы, а выходной – цепь эмиттера.

Коэффициент передачи тока в этой схеме равен:

$$\Delta i_3 / \Delta i_b = I_3 / I_b = I_3 / (I_3 - I_k) = 1 / (1 - \alpha) = \beta_3 + 1,$$

то есть его величина больше, чем в схеме с ОЭ: $\beta_k > \beta_3$. В схеме с ОК коллектор является общим для входной и выходной цепей по переменному току.

Напряжение U_b и особенно его переменная составляющая достаточно малы, поэтому амплитуда переменной составляющей напряжения $U_{\text{вх}}$ примерно равна амплитуде переменной составляющей напряжения $U_{\text{вых}}$. В этой связи усилительные каскады с общим коллектором называют эмиттерными повторителями, в которых $i_{\text{вх}} \ll i_{\text{вых}}$. Таким образом, данная схема усиливает ток, но не усиливает напряжение. Она отличается повышенным входным сопротивлением.

На практике наиболее часто используется схема с общим эмитером.

Сравнение трех схем включения приведено в таблице 1.1

Обычно используют два вида вольт-амперных характеристик: входные и выходные.

Для схемы с ОЭ входной характеристикой называют зависимость входного тока или тока базы i_b от напряжения базы – эмиттер $U_{b-э}$.

Выходной характеристикой называют зависимость i_k от $U_{k-э}$ при фиксированных значениях $i_b = \text{const}$.

Для схемы с ОБ, входной характеристикой является зависимость $i_3 = f(U_{3-б})$, а выходной – $i_k = f(U_{k-б})$.

Для схемы с ОК выходной характеристикой является $i_3 = f(U_{3-к})$, а входной – $i_b = f(U_{к-б})$.

Таблица 1.1 - Основные параметры трех схем включения транзистора

Параметры усилительного каскада	Схемы включения транзистора		
	ОБ	ОЭ	ОК
Входное сопротивление	Низкое ($\leq 100 \text{ Ом}$)	Среднее ($\leq 2 \text{ кОм}$)	Высокое ($0,2 \dots 1,0 \text{ МОм}$)
Выходное сопротивление	Высокое ($0,5 \dots 1,0 \text{ МОм}$)	Среднее ($20 \dots 100 \text{ кОм}$)	Низкое ($50 \dots 500 \text{ Ом}$)
Усиление по току	< 1	≤ 200	$10 \dots 200$
Усиление по напряжению	≤ 500	≤ 500	≤ 1
Фазовый сдвиг между $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$	0°	180°	0°

h-параметры биполярного транзистора

Часто транзистор рассматривают как четырехполюсник (рисунок 1.22). В этом случае используются вторичные параметры, которые справедливы только для данного режима транзистора и для малых амплитуд. Поэтому их называют низкочастотными малосигнальными параметрами или h-параметрами.

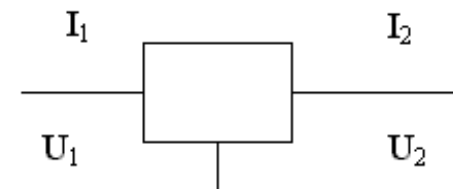


Рисунок 1.22 – Транзистор как четырехполюсник

Связь между входными (U_1, I_1) и выходными (U_2, I_2) напряжениями и токами четырехполюсника выражается системой двух уравнений [11, 12]. Приняв два из входящих в эту систему параметров за независимые переменные, находят два других:

$$\begin{aligned}\Delta U_1 &= h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2, \\ \Delta I_2 &= h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2.\end{aligned}$$

Параметры, входящие в эти уравнения, определяют, используя 2 режима:

1) режим короткого замыкания для тока на выходе, то есть при отсутствии нагрузки в выходной цепи. При этом $U_2 = \text{const}$;

2) режим холостого хода, то есть при разомкнутой для тока цепи, когда во входной цепи имеется только постоянный ток, $I_1 = \text{const}$.

Эти режимы или условия легко осуществить на практике при измерении h -параметров.

В систему h -параметров входят следующие величины:

1. $h_{11} = \Delta U_1 / \Delta I_1$ при $U_2 = \text{const}$ – входное сопротивление транзистора при отсутствии переменного выходного напряжения. При таком условии изменение входного тока ΔI_1 является результатом изменения входного напряжения ΔU_1 .

2. $h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2$ при $I_1 = \text{const}$ – коэффициент обратной связи по напряжению. Он показывает, какая доля выходного напряжения передается на вход транзистора вследствие наличия в нем внутренней обратной связи. Условие $I_1 = \text{const}$ свидетельствует о том, что изменение напряжения на входе ΔU_1 есть результат изменения только выходного напряжения ΔU_2 .

3. $h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1$ при $U_2 = \text{const}$ – коэффициент усиления по току. Этот коэффициент показывает усиление тока транзистора в режиме работы, то есть изменение выходного тока ΔI_2 зависит только от изменения входного тока ΔI_1 .

4. $h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2$ при $I_1 = \text{const}$ – выходная проводимость, представляет внутреннюю проводимость для переменного тока между выходным зажимом транзистора.

Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors) – полностью управляемый полупроводниковый прибор, основой которого является трёхслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком. На рисунке 1.23 приведено условное обозначение биполярного транзистора с изолированным затвором (IGBT) [12].

Данные приборы IGBT являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл-оксид-полупроводник, управляемых электрическим полем (MOSFET-Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor), и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Эквивалентная схема включения двух транзисторов приведена на рисунке 1.24. Прибор введён в силовую цепь выводами биполярного транзистора E (эмиттер) и C (коллектор), а в цепь управления - выводом G (затвор).

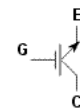


Рисунок 1.23 - Условное обозначение IGBT

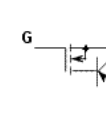


Рисунок 1.24 - Схема соединения транзисторов в единой структуре IGBT

Таким образом, IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включённом состоянии.

Современные IGBT-модули находят широкое применение при создании неуправляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов для питания электродвигателей постоянного и переменного тока средней мощности, преобразователей индукционного нагрева, сварочных аппаратов, источников бесперебойного питания и бытовой техники.

Вопросы для самоконтроля:

1. В чем отличие транзисторов $n-p-n$ -типа от транзисторов $p-n-p$ -типа?
2. Назовите основные параметры биполярного транзистора.
3. В каком случае биполярный транзистор находится в активном режиме?
4. Объясните работу биполярного транзистора $n-p-n$ -типа.
5. Что представляют собой входные и выходные ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ (ОБ, ОК)?
6. Как определить h -параметры биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ (ОБ, ОК)?

Лекция 3. Полевые транзисторы

План лекции:

1. Классификация и условное обозначение полевых транзисторов.
2. Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом.
3. МДП-транзисторы со встроенным каналом.
4. МДП-транзистор с индуцированным (инверсным) каналом.
5. Схемы включения полевых транзисторов и их особенности.

Классификация и условное обозначение полевых транзисторов

Полевым транзистором (ПТ) называют электропреобразовательный прибор, в котором ток канала управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором и истоком. Этот прибор предназначен для усиления электрических колебаний. Полевые транзисторы называют еще униполярными, поскольку их принцип действия основан на использовании носителей заряда только одного знака [3].

Полевые транзисторы подразделяются на n -канальные и p -канальные. Они, в свою очередь, бывают: с управляющим $p-n$ -переходом и с изолированным затвором (МДП-транзисторы или МОП-транзисторы) (рисунок 1.25). Следует отметить, что эти транзисторы также делятся на транзисторы со встроенным и с индуцированным каналами.

Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом

Конструкция.

Конструктивно транзистор с управляющим $p-n$ -переходом, n -канальный представляет собой пластинку полупроводника n -типа с двумя $p-n$ -переходами и тремя выводами (рисунок 1.26). Электрод, от которого начинают движение носители заряда, называется истоком (И), а электрод, к которому они движутся – стоком (С).

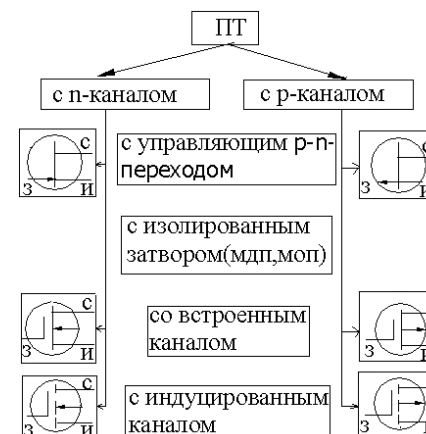


Рисунок 1.25 - Классификация и условное обозначение полевых транзисторов

Оба p -слоя электрически связаны между собой и имеют общий электрод, называемый затвором (З). Между $p-n$ -переходами располагается канал, в данном случае n -типа. Управляющее (или входное) напряжение подается между З и И. При этом $U_{зи}$ является обратным для обоих $p-n$ -переходов. В выходную цепь, в которую входит канал транзистора, подключается напряжение $U_{си}$ “+” полюсом к стоку.

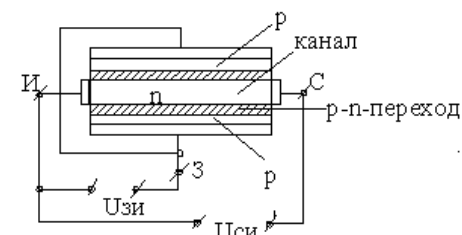


Рисунок 1.26 - Конструкция транзистора с управляющим $p-n$ -переходом

Принцип работы полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом.

При изменении $U_{зи}$ меняется ширина $p-n$ -переходов, которые представляют собой участки полупроводника, обедненные носителями заряда. Поскольку p -слой имеет большую концентрацию при-

меей, чем n -слоем, то изменение ширины переходов происходит, в основном, за счет более высокоомного n -слоя (эффект модуляции ширины базы). Тем самым изменяется сечение токопроводящего канала и его проводимость, то есть выходной ток I_c (рисунок 1.27).

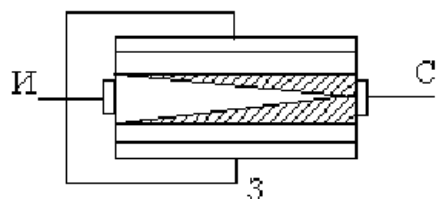


Рисунок 1.27 – К пояснению принципа работы полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Особенностью полевого транзистора является то, что на проводимость канала оказывает влияние как управляющее напряжение $U_{зи}$, так и напряжение $U_{си}$.

При напряжении $U_{си} > 0$ через канал протекает ток I_c , в результате чего создается падение напряжения, возрастающее в направлении стока. Потенциалы точек канала n -типа будут неодинаковы по его длине, возрастая в направлении стока от 0 до значения $U_{си}$. Повышение напряжения $U_{си}$ вызывает дальнейшее увеличение падения напряжения в канале и уменьшение его сечения, то есть проводимости. При некотором значении $U_{си}$ происходит смыкание границ p - n -переходов и сопротивление канала значительно возрастает.

Характеристики полевых транзисторов с p - n -переходом:

1. Стоко-затворные (или передаточные) (рисунок 1.28, б):

$$I_c = f(U_{зи}) / U_{си} = \text{const.}$$

2. Стоковые (или выходные) (рисунок 1.28, а):

$$I_c = f(U_{си}) / U_{зи} = \text{const.}$$

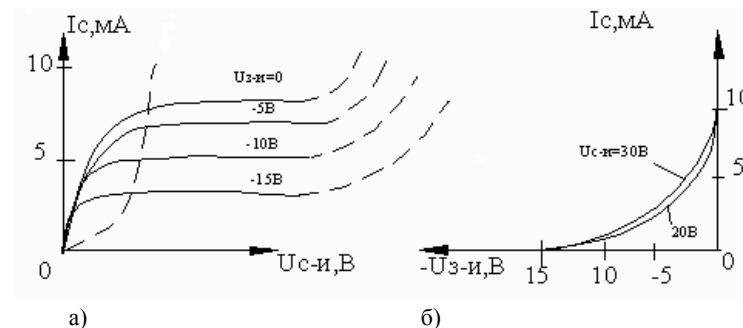


Рисунок 1.28 - Характеристики полевых транзисторов с p - n -переходом: а) стоковые; б) стоко-затворные

В области насыщения (на пологих участках) и происходит работа транзистора.

Явление насыщения транзистора объясняется тем, что при повышении напряжения $U_{си}$ ток I_c должен увеличиваться, но так как одновременно повышается обратное напряжение на p - n -переходе, то запирающий слой расширяется, а канал сужается, т. е. его сопротивление возрастает и ток I_c должен уменьшаться. Таким образом, имеют место два взаимно противоположных воздействия на ток, который в результате этого остается почти постоянным. При подаче большего отрицательного напряжения $U_{зи}$ ток стока I_c уменьшается и характеристика проходит ниже. Дальнейшее повышение напряжения $U_{си}$ приводит к электрическому пробое p - n -перехода и ток I_c начинает резко возрастать.

Параметры полевых транзисторов с p - n -переходом:

1) крутизна $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} | U_{си} = \text{const}$, которая характеризует управление действия затвора;

2) внутреннее (выходное) сопротивление $R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} | U_{зи} = \text{const}$;

3) коэффициент усиления $\mu = -\frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} | I_c = \text{const}$ (или $\mu = SR_i$).

Он выражается отношением таких изменений напряжений, которые компенсируют друг друга по действию на ток I_c . Для такой компенсации напряжения должны иметь разные знаки, что объясняет наличие знака минус;

4) входные сопротивления $R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{зи}}}{\Delta I_3} n p u U_{\text{си}} = \text{const}$;

5) межэлектродные емкости:

- $C_{\text{зи}}$ – входная емкость (это барьерная емкость p - n -перехода);
- $C_{\text{зс}}$ – проходная емкость между $З$ и $С$;
- $C_{\text{си}}$ – выходная емкость.

МДП-транзисторы со встроенным каналом

В отличие от полевых транзисторов с p - n -переходом, в которых затвор имеет непосредственный электрический контакт с областью токопроводящего канала, в МДП-транзисторах затвор изолирован от канала слоем диэлектрика.

Конструкция МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа представляет собой кремневую пластинку с электропроводностью p -типа (рисунок 1.29). В ней созданы две области с повышенной проводимостью n + - типа. Эти области являются стоком и истоком. Между ними имеется тонкий приповерхностный канал с электропроводностью n -типа. Длина канала примерно на 2 порядка меньше его ширины.

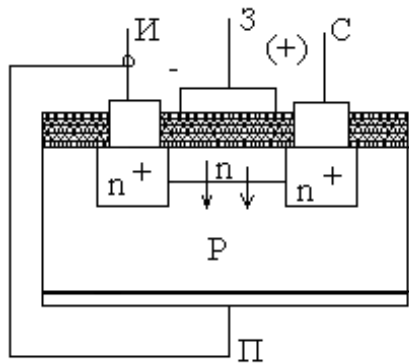


Рисунок 1.29 – Конструкция МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа

Толщина диэлектрического слоя составляет $\approx 0,1 \dots 0,2$ мкм. Над диэлектрическим слоем расположен затвор в виде тонкой металлической пленки. В МДП-транзисторе обычно делают четвертый электрод, которым является подложка (в данном случае пластина p -типа).

Принцип работы МДП-транзистора со встроенным каналом.

Если при $U_{\text{зи}} = 0$ приложить напряжение между стоком и истоком $U_{\text{си}}$, то через канал потечет ток.

При подаче напряжения $U_{\text{зи}} < 0$ в канале создается поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны проводимости выталкиваются из канала в области стока, истока и в кристалл. Канал обедняется электронами, сопротивление его увеличивается, ток I_c уменьшается. Чем больше напряжение на затворе $U_{\text{зи}}$, тем меньше ток I_c . Такой режим транзистора называют режимом обеднения.

Если напряжение $U_{\text{зи}} > 0$, то под действием поля, созданного этим напряжением, из областей стока, истока и кристалла в канал будут приходить электроны, проводимость канала увеличится и ток I_c возрастет [9, 13, 14]. Этот режим называют режимом обогащения.

Все эти физические процессы наглядно выражаются выходной (стоковой) характеристикой (рисунок 1.30, а).

По выходной характеристике можно построить стоко-затворную (переходную) характеристику (рисунок 1.30, б). Как видно из рисунка выходные характеристики подобны таким же характеристикам транзистора с управляющим p - n -переходом.

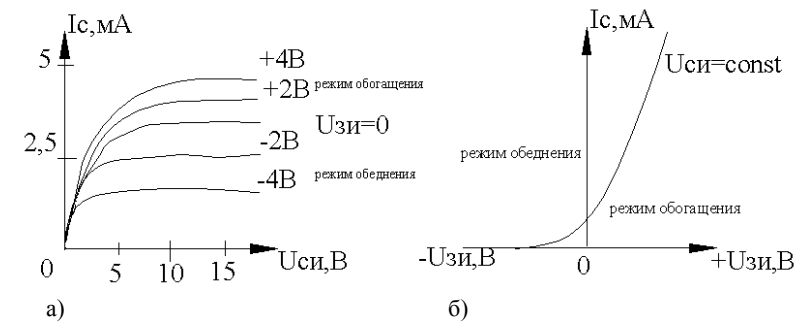


Рисунок 1.30 - Стоковая (а) и стоко-затворная (б) характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа

Параметры МДП-транзисторов аналогичны параметрам полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом. Если кристалл транзистора имеет электропроводность n -типа, то канал должен быть p -типа, а полярность напряжений – обратной.

МДП-транзистор с индуцированным (инверсным) каналом

Конструкция такого транзистора отличается от конструкции транзистора с встроенным каналом тем, что канал проводимости здесь специально не создается, а возникает (индуцируется) только при подаче на затвор напряжения определенной полярности (рисунок 1.31). При отсутствии этого напряжения канал не возникает, между истоком и стоком n -типа имеется только кристалл p -типа и на одном из p - n -переходов получается обратное напряжение.

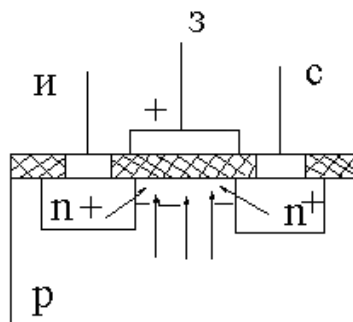


Рисунок 1.31 - Конструкция МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа

Принцип работы.

Когда сопротивление между истоком (И) и стоком (С) велико, то транзистор заперт. Но если подать на затвор положительное напряжение (в данном случае), то под влиянием поля затвора электроны проводимости будут перемещаться из областей стока, истока и кристалла к затвору. Когда напряжение $U_{зи}$ превысит некоторое отпирающее или пороговое напряжение, то в приповерхностном слое концентрация электронов настолько увеличится, что превысит концентрацию дырок, произойдет инверсия типа электропроводности (образуется канал n -типа) и транзистор начнет проводить ток.

Чем больше положительное напряжение $U_{зи}$, тем больше проводимость канала и ток стока. Однако такой транзистор может работать только в режиме обогащения, что показывают выходные (а) и переходная (б) характеристики данного транзистора (рисунок 1.32).

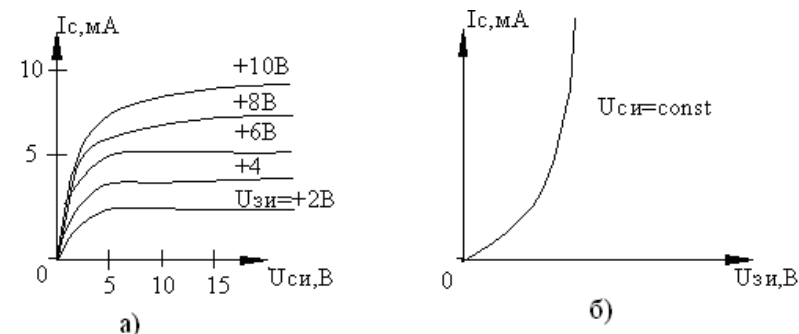


Рисунок 1.32 - Выходные (а) и переходная (б) характеристики

По сравнению с полевыми транзисторами с управляющим p - n -переходом МДП-транзисторы имеют лучшие температурные, шумовые, радиационные свойства. Кроме того, они просты в изготовлении.

Маркировка транзисторов состоит из 5 элементов:

- 1) буквы, определяющие материал, из которого изготовлен транзистор: Г – германий, К – кремний, А – арсенид галлия;
- 2) буквы, обозначающие тип транзистора: П – полевой, Т – биполярный;
- 3) цифра, указывающая диапазон основных параметров;
- 4) номер разработки;
- 5) буква, указывающая на особенность в данной группе (коэффициент передачи тока и др.).

Примеры: КП302А; ГТ308В.

Схемы включения полевых транзисторов и их особенности

Полевые транзисторы также как и биполярные имеют три схемы включения: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и с общим затвором (ОЗ).

Схема с ОИ (рисунок 1.33).

Схема с ОИ аналогична схеме с ОЭ биполярного транзистора. Каскад с ОИ дает значительное усиление по току и по мощности и также переворачивает фазу напряжения при усилении.

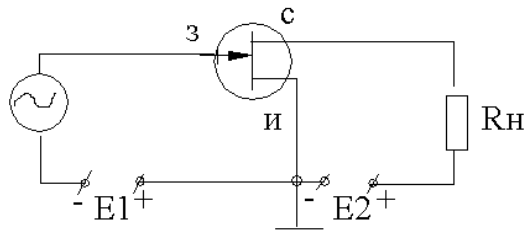


Рисунок 1.33 - Схема с ОИ

Схема с ОЗ (рисунок 1.34).

Схема с ОЗ полевого транзистора аналогична схеме с ОБ биполярного транзистора. Она не дает усиления по току, поэтому усиление по мощности в ней во много раз меньше, чем в схеме с ОИ.

Сопротивление $R_{вх}$ мало, т. к. входным током является ток стока. Фаза напряжения при усилении также не переворачивается.

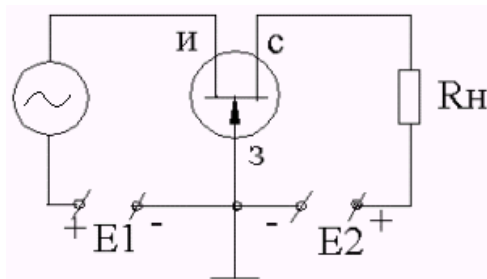


Рисунок 1.34 - Схема с ОЗ

Схема с ОС (рисунок 1.35).

Схема с ОС полевого транзистора подобна схеме с ОК или эмиттерному повторителю биполярного транзистора и может быть названа истоковым повторителем с $K_u \approx 1$. Выходное напряжение по значению и фазе повторяет выходное. Для такого каскада характерны низкое выходное сопротивление и повышенное входное.

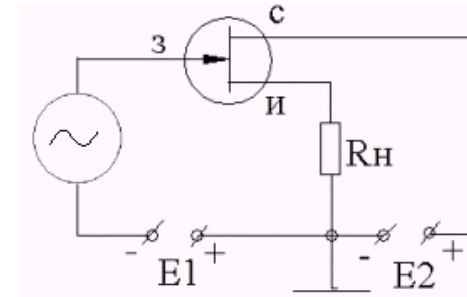


Рисунок 1.35 – Схема с ОС

Преимущества полевых транзисторов перед биполярными.

Полевые транзисторы по сравнению с биполярными являются более температуростабильными. Они обладают высокой стойкостью к действию ионизирующего излучения.

Недостатком ПТ является сравнительно невысокая крутизна, т. е. меньшее быстродействие, чем у БТ.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие типы полевых транзисторов Вы знаете?
2. Назовите основные параметры полевых транзисторов.
3. Сравните вольт-амперные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом и со встроенным каналом.
4. Назовите особенности каждой из схем включения полевых транзисторов.
5. Назовите основные отличия полевых транзисторов от биполярных. Укажите их достоинства и недостатки.

Лекция 4. Тиристоры

План лекции:

1. Диодный тиристор.
2. Триодный тиристор.
3. Симисторы.
4. Переключатели на основе аморфных полупроводников.

Диодный тиристор (динистор)

Тиристор – это четырехслойный полупроводниковый переключающий прибор, обладающий двумя устойчивыми состояниями: низкой проводимости (тиристор закрыт) и высокой проводимости (тиристор открыт).

Диодный тиристор имеет три $p-n$ -перехода, причем два из них (П1 и П3) работают в прямом направлении, а средний (П2) – в обратном направлении. Крайнюю область p -типа называют анодом, а крайнюю область n -типа – катодом. Тиристор можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из двух транзисторов: Т1 ($n-p-n$ -типа) и Т2 ($p-n-p$ -типа), соединенных между собой. Таким образом, получается, что переходы П1 и П3 являются эмиттерными переходами этих транзисторов, а переход П2 в обоих транзисторах работает как коллекторный переход [9, 15]. Область базы Б1 транзистора Т1 одновременно является коллекторной областью К2 транзистора Т2, а база Б2 транзистора Т2 одновременно служит коллекторной областью К1 транзистора Т1 (рисунок 1.36). Соответственно этому коллекторный ток $i_{k1} = i_{\beta 2}$, а коллекторный ток $i_{k2} = i_{\beta 1}$.

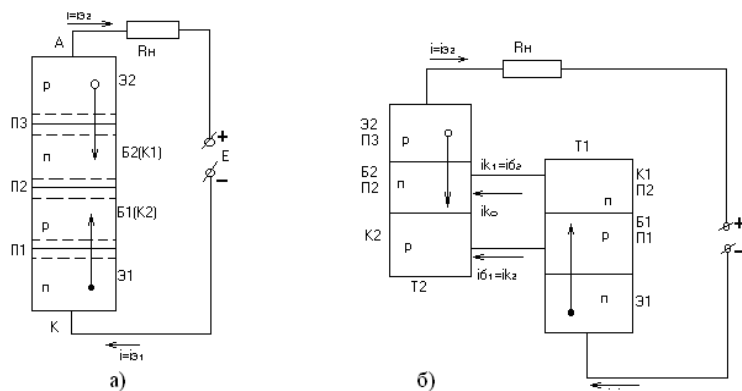


Рисунок 1.36 - Структура (а) и эквивалентная схема (б) диодного тиристора

На рисунке 1.37 представлена ВАХ диодного тиристора

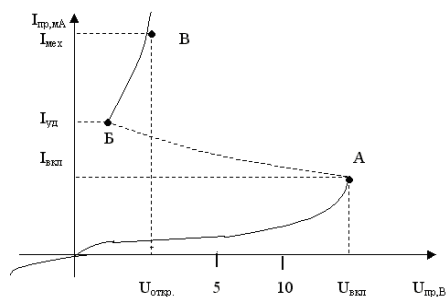


Рисунок 1.37 - ВАХ тиристора

При увеличении напряжения $U_{пр}$, ток невелик и его величина растет медленно, что соответствует участку OA. В этом режиме тиристор можно считать закрытым. На сопротивление коллекторного перехода П2 влияют два взаимно противоположных процесса. С одной стороны, повышение обратного напряжения на этом переходе увеличивает его сопротивление, поскольку основные носители уходят в разные стороны от границы. Но, с другой стороны, повышение прямых напряжений на эмиттерных переходах П1 и П3 усиливает инжекцию носителей заряда, которые переходят к переходу П2, обогащают его и уменьшают его сопротивление. До точки А (рисунок 1.37) влияние обоих процессов уравнивается, а затем даже малое повышение подводимого напряжения создает преобладание второго процесса и сопротивление перехода П2 начинает уменьшаться. В этом случае возникает лавинообразный процесс быстрого отпирания тиристора [4]. Объясняется это следующим образом.

Поскольку увеличивающееся напряжение на переходах П1 и П3 уменьшает сопротивление на переходе П2 и напряжение на нем, то ток резко возрастает (участок AB на рисунке 1.37), за счет чего еще больше возрастают напряжения на П1 и П2. Это, в свою очередь, приводит к еще большему возрастанию тока, уменьшению сопротивления П2 и т. д. В результате такого процесса устанавливается режим, напоминающий режим насыщения транзистора, а именно: большой ток при малом напряжении (участок BC на рисунке 1.37). Ток в этом режиме, когда тиристор открыт, определяется, главным образом, сопротивлением нагрузки R_n , включенным последовательно с тиристором.

Параметры динистора:

1. I_{max} – максимальное значение прямого тока (точка В), при котором на приборе будет небольшое напряжение $U_{откр}$
2. $I_{уд}$ – ток удерживания (точка Б), который возникает при резком уменьшении прямого тока. При этом напряжение резко возрастает, т. е. тиристор переходит «скачком» обратно в закрытое состояние, соответствующее участку OA.
3. $t_{вкл.}$ и $t_{выкл.}$ – время включения и время выключения тиристора.
4. $C_{общ}$ – общая емкость, которая складывается из емкостей всех $p-n$ -переходов.
5. $U_{обр.max}$ – обратное максимальное напряжение.

Триодный тиристор (тринистор)

Если от одной из базовых областей динистора сделать вывод, то получится управляемый переключающий прибор, называемый триодным тиристором. Подавая через этот вывод прямое напряжение на переход, работающий в прямом направлении, можно регулировать значение напряжения включения $U_{вкл.}$ Чем больший ток течет через такой управляющий переход I_y , тем ниже напряжение $U_{вкл.}$ Вольт-амперная характеристика (ВАХ) триодного тиристора для различных токов управляющего электрода (I_{y1}, I_{y2} и т. д.) представлена на рисунке 1.38.

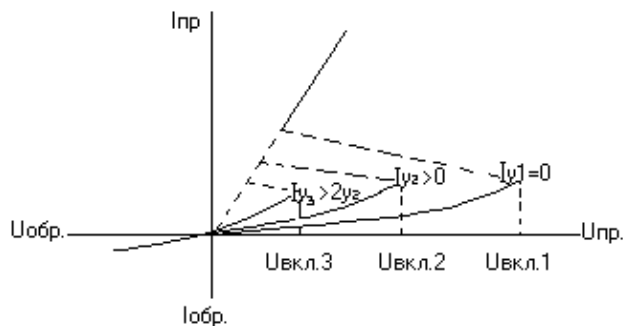


Рисунок 1.38 - ВАХ триодного тиристора

Чем больше ток I_y , тем меньше инжекция носителей зарядов от соответствующего эмиттера к среднему коллекторному переходу П2 и тем меньше требуется напряжение на тиристоре для того, чтобы начался процесс отпирания.

Наиболее высокое значение напряжения $U_{вкл.}$ получается при отсутствии тока I_y , когда триодный тиристор превращается в диодный. И, наоборот, при значительном I_y характеристика триодного тиристора приближается к характеристике прямого тока обычного диода. Простейшая схема включения триодного тиристора показана на рисунке 1.39.

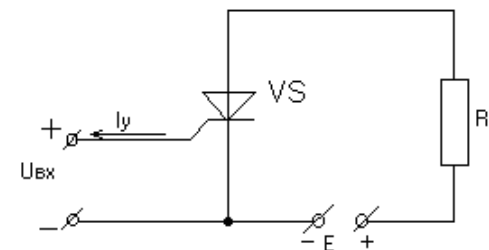


Рисунок 1.39 - Схема включения триодного тиристора

Такой тиристор называют тиристором с управлением по катоду, поскольку управляющим электродом является базовая область, ближайшая к катоду n .

Параметры у тиристорov такие же, как и у динисторов. К этим параметрам лишь добавляются величины, характеризующие управляющую цепь I_y, U_y .

Симисторы

Симметричные тиристоры или симисторы имеют структуру $n-p-n-p-n$ или $p-n-p-n-p$. Они отпираются при любой полярности напряжения и проводят ток в обоих направлениях. Структура симистора представлена на рисунке 1.40.

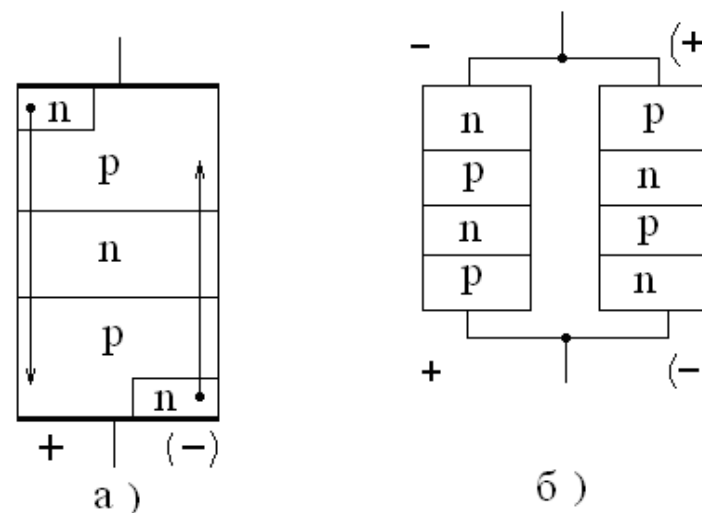


Рисунок 1.40 - Структура (а) и схема замещения (б) симистора

При одной полярности работает левая половина прибора. При обратной полярности работает правая половина прибора. Роль симистора могут выполнять два диодных тиристора, включенных параллельно. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) симистора представлена на рисунке 1.41:

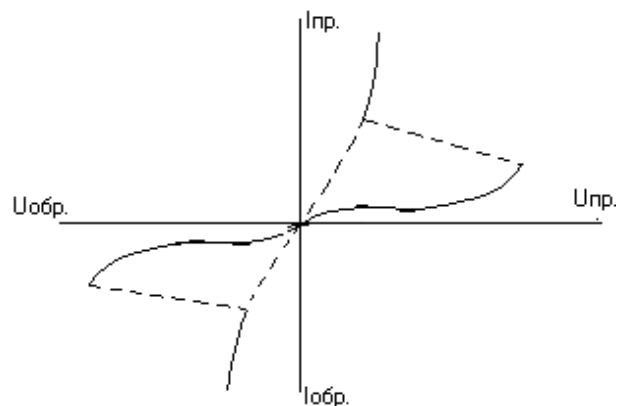


Рисунок 1.41 - ВАХ симистора

Условные графические изображения различных тиристоров представлены на рисунке 1.42.

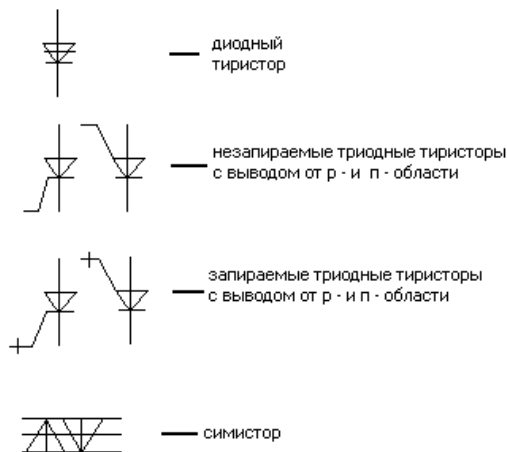


Рисунок 1.42 - Условные графические изображения различных тиристоров

Переключатели на основе аморфных полупроводников

Помимо тиристоров переключающие приборы могут быть выполнены на монокристаллических и аморфных полупроводниках.

К аморфным (стекловидным) полупроводникам относятся оксидные, элементные и халькогенидные. Наиболее часто переключатели выполняют на основе халькогенидных стекол: на полированную пластинку графита осаждают в вакууме тонкий слой (несколько десятков—сотен микрометров) халькогенидного стекла, поверх которого наносится тонкий слой металла. При подключении источника питания (к графитовому и металлическому слоям) через слой полупроводника начинает протекать ток, плавно увеличивающийся по мере увеличения приложенного напряжения. При достижении некоторого напряжения $U_{вкл}$ ток резко возрастает, так как происходит тепловой пробой, при котором выделяющееся в слое полупроводника тепло оказывается достаточным для возбуждения валентных электронов атомов полупроводника и превращения их в электроны проводимости.

При уменьшении тока, проходящего через прибор, до значения $I_{выкл}$ происходит его выключение, поскольку выделяющееся в слое полупроводника тепло оказывается недостаточным для термоионизационных процессов, число электронов проводимости резко уменьшается и проводимость резко падает.

Вопросы для самоконтроля:

1. Назовите типы тиристоров.
2. Чем отличаются принципы работы триодного и диодного тиристоров.
3. В чем заключается принцип работы динистора.
4. Назовите основные параметры тиристоров.
5. Для каких целей применяются тиристоры?
6. Назовите особенности симистора.

Материалы к лабораторным работам

Тема «Исследование полупроводниковых диодов».

Базовые проблемы:

1. Система обозначений, конструкция и принцип работы полупроводниковых диодов.
2. Основные характеристики и определение по ним параметров диодов.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который включает: название

работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

Вариант 1. Описать процессы, происходящие в области $p-n$ -перехода при включении внешнего источника питания в прямом направлении.

Вариант 2. Описать процессы, происходящие в области $p-n$ -перехода при включении внешнего источника питания в обратном направлении.

Вариант 3. Описать процессы, происходящие в области $p-n$ -перехода при отсутствии внешнего источника питания.

Вариант 4. Дать классификацию полупроводниковых диодов, указать на каком физическом явлении основана их работа.

Экспериментальная часть работы включает проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

Тема «Исследование биполярных транзисторов».

Базовые проблемы:

1. Конструкция и принцип работы биполярных транзисторов.
2. Основные характеристики и определение по ним параметров биполярных транзисторов.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

Вариант 1. Описать принцип работы биполярного транзистора $n-p-n$ -типа схемы с ОЭ.

Вариант 2. Описать принцип работы биполярного транзистора $p-n-p$ -типа схемы с ОЭ.

Вариант 3. Описать принцип работы биполярного транзистора $n-p-n$ -типа схемы с ОБ.

Вариант 4. Описать принцип работы биполярного транзистора $p-n-p$ -типа схемы с ОБ.

Вариант 5: Описать принцип работы биполярного транзистора $n-p-n$ -типа схемы с ОК.

Вариант 6: Описать принцип работы биполярного транзистора $p-n-p$ -типа схемы с ОК.

Экспериментальная часть работы включает проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

Тема «Исследование полевого транзистора».

Базовые проблемы:

1. Конструкция и принцип работы различных типов полевых транзисторов.

2. Основные характеристики и определение по ним параметров полевых транзисторов.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

Вариант 1. Нарисовать конструкцию и описать принцип работы полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом (p -канального).

Вариант 2. Нарисовать конструкцию и описать принцип работы МДП-транзистора с встроенным p -каналом.

Вариант 3. Нарисовать конструкцию и описать принцип работы МДП-транзистора с индуцированным p -каналом.

Вариант 4. Нарисовать конструкцию и описать принцип работы МДП-транзистора с встроенным n -каналом.

Экспериментальная часть работы включает проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

Тема «Исследование тиристор».

Базовые проблемы:

1. Конструкция, принцип работы, применение и система обозначений тиристор».

2. Основные характеристики и определение по ним параметров тиристор».

Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

Вариант 1. Нарисовать конструкцию, условное обозначение и описать принцип работы диодного тиристора.

Вариант 2. Нарисовать конструкцию, условное обозначение и описать принцип работы триодного тиристора с управлением по катоду.

Вариант 3. Нарисовать конструкцию, условное обозначение и описать принцип работы триодного тиристора с управлением по аноду.

Вариант 4. Нарисовать конструкцию, условное обозначение и описать принцип работы симистора.

Экспериментальная часть работы включает проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

Тема «Схемы включения биполярных транзисторов».

Базовые проблемы:

1. Сравнительный анализ усилительных каскадов биполярных транзисторов, включенных по схемам с ОЭ, ОК, ОБ.

2. Влияние нагрузочного сопротивления на основные параметры усилителя.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

Вариант 1. Нарисовать схему включения биполярного транзистора с ОЭ, написать h -параметры для этой схемы.

Вариант 2: Нарисовать схему включения биполярного транзистора с ОК, написать h -параметры для этой схемы.

Вариант 3: Нарисовать схему включения биполярного транзистора с ОБ, написать h -параметры для этой схемы.

Экспериментальная часть работы включает проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

Задания для управляемой самостоятельной работы студентов

1. Построить экспериментально снятые зависимости.
2. Рассчитать параметры исследованных приборов.
3. Оформить отчет и уметь отвечать на контрольные вопросы к лабораторной работе.

Рекомендации по выполнению приведены в методических указаниях к лабораторным работам [11].

Форма контроля - представить преподавателю отчет в письменном виде по изученному разделу, ответить на контрольные вопросы к лабораторным работам.

Пример комплексного задания (билета) для контроля результатов обучения по модулю 1

1-й уровень.

1. Как получить полупроводник с электропроводностью n -типа?
2. На каком принципе основана работа фоторезистора?
3. Из какого материала изготавливают светодиоды?
4. Перечислите параметры и характеристики биполярного транзистора.
5. Нарисуйте конструкцию и опишите принцип работы полевого транзистора с управляющим p - n -переходом (p -канального).
6. Нарисуйте конструкцию, условное обозначение и опишите принцип работы диодного тиристора.

2-й уровень.

1. Сравните схемы включения биполярных транзисторов с ОЭ и с ОК.
2. Меняются ли (и как) свойства полевого транзистора с управляющим p - n -переходом в зависимости от типа проводимости канала? Можно ли поменять местами точки подключения истока и стока в электрическую цепь?
3. Сравните диодный и триодный тиристоры по конструкции, принципу работы, параметрам и ВАХ.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Галкин, В.И. Промышленная электроника и микроэлектроника [Текст] / В.И. Галкин. – Минск: Беларусь, 2000. – 350 с.

2. Прянишников, В.А. Электроника [Текст]: курс лекций / В.А. Прянишников. – Санкт-Петербург: Крона-Принт, 2000. – 416 с.

3. Основы электроники, микропроцессорной техники и техники связи [Текст]: конспект лекций / БГАТУ, кафедра автоматизированных систем управления производством; сост. Дудников И.Л., Матвеев И.П. – Минск, 2004. – 122 с.

4. Игумнов, Д.В. Основы полупроводниковой электроники [Текст]: / Д.В. Игумнов, Г.П. Костюнина. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2005. – 392 с.

5. Гальперин, М.В. Электронная техника [Текст] / М.В. Гальперин. – Москва: Форум-ИНФРА-М, 2005. – 352 с.

6. Гусев, В.Г. Электроника [Текст] / В.Г. Гусев, Ю.Н. Гусев. – Москва: Высшая школа, 1991. – 622 с.

7. Миловзоров, О.В. Электроника [Текст]: учебник для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – Москва: Высшая школа, 2005. – 288 с.

8. Бобровников, Л.З. Электроника [Текст]: учебник для вузов / Л.З. Бобровников – СПб.: Питер, 2004 – 560 с.

9. Основы промышленной электроники / под ред. В.С. Герасимова. – Москва: Высшая школа, 1986. – 336 с.

10. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника [Текст] / Ю.С. Забродин. – Москва: Высшая школа, 1982. – 496 с.

11. Элементы электронных устройств: методические указания к лабораторным работам / БГАТУ, кафедра АСУП, сост. И.Л. Дудников. – Минск, 2001. – 72 с.

Дополнительная

12. Ибрагим, К.Ф. Основы электронной техники. Элементы, схемы, системы [Текст] : пер. с англ. / К.Ф. Ибрагим. – Москва: Мир, 2001. – 398 с.

13. Булычев, А.Л. Электронные приборы [Текст] / А.Л. Булычев, П.М. Лямин, Е.С. Тулинов. – Минск: Вышэйшая школа, 1999. – 415 с.

14. Арестов, К.А. Основы электроники и микропроцессорной техники [Текст] / К.А. Арестов. – Москва: Колос, 2001. – 216 с.

15. Лачин, В.И. Электроника [Текст] / В.И. Лачин, Н.С. Савелов. – Ростов н/Д: Феникс, 2000. – 448 с.