

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

_____ Е.И. Луковникова

«_____» декабря 201__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОНИКА

Б1.Б.13

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ

Многоканальные телекоммуникационные системы

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ	3
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	3
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости	3
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам	6
4.3 Лабораторные работы.....	41
4.4 Семинары / практические занятия.....	41
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	41
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	42
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	42
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	42
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	43
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	43
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ семинаров / практических работ	43
9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата	
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	54
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	55
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....	56
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины	62
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе	63

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к экспериментально-исследовательскому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Формирование знаний элементной базы средств связи, применяемой в многоканальных телекоммуникационных системах, телевизионной, радиорелейной, тропосферной, космической и радиолокационной связи. Изучение принципов действия, характеристик, параметров и особенностей устройства важнейших полупроводниковых, электровакуумных и оптоэлектронных приборов, используемых в системах связи.

Задачи дисциплины

Ознакомление обучающихся с современным уровнем развития физических основ полупроводниковой электроники с учетом использования перспективных полупроводниковых материалов; методами, способами и средствами получения, хранения, переработки и передачи информации.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-3	Способность владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации	знать: - физические процессы, лежащие в основе принципов действия полупроводниковых и оптоэлектронных приборов; уметь: - определять дифференциальные параметры электронных приборов по их статическим характеристикам; владеть: - навыками экспериментального определения статических характеристик и параметров различных электронных приборов и их компьютерного исследования по электрическим моделям.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.13 Электроника относится к базовой части.

Дисциплина Электроника базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как: Физика, Химия радиоматериалов, Теория электрических цепей.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Электроника представляет основу для изучения таких дисциплин, как: Электромагнитная совместимость и управление частотным спектром, Схемотехника телекоммуникационных устройств, Сети связи и системы коммутации.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	2	4	108	54	18	18	18	54	-	зачет
Заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Заочная (ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			4
1	2	3	4
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	54	12	54
Лекции (Лк)	18	12	18
Лабораторные работы (ЛР)	18	-	18
Практические занятия (ПЗ)	18	-	18
II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	54	-	54
Подготовка к лабораторным работам	18	-	18
Подготовка к практическим занятиям	18	-	18
Подготовка к зачету	18	-	18
III. Промежуточная аттестация зачет	+	-	+
Общая трудоемкость дисциплины, час.	108	-	108
зач. ед.	3	-	3

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся*
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Введение	3	2	-	-	1
1.1.	Роль электроники в современном мире. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Электронно-дырочный переход и его свойства.	3	2	-	-	1
2.	Полупроводниковые приборы	22,25	2,25	6	-	14
2.1.	Выпрямительные диоды	2,75	0,25	1,5	-	1
2.2.	Импульсные диоды	2,25	0,25	-	-	2
2.3.	Туннельные диоды	2,25	0,25	-	-	2
2.4.	Диоды Шоттки	2,75	0,25	1,5	-	1
2.5.	Стабилитроны	2,75	0,25	1,5	-	1
2.6.	Варикапы	2,25	0,25	-	-	2
2.7.	Светодиоды	2,75	0,25	1,5	-	1
2.8.	Фотодиоды	2,25	0,25	-	-	2
2.9.	Тиристоры	2,25	0,25	-	-	2
3.	Биполярные транзисторы	16	4	6	-	6
3.1.	Структура и типы биполярных транзисторов	3	1	-	-	2
3.2.	Режимы работы биполярных транзисторов	6	1	3	-	2
3.3.	Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.	7	2	3	-	2
4	Полевые транзисторы	10	4	-	-	6
4.1.	Структура и типы полевых транзисторов	4	2	-	-	2
4.2.	Рабочий процесс полевых транзисторов	3	1	-	-	2
4.3.	МДП-транзисторы	3	1	-	-	2
5.	Усилители электрических сигналов	25,75	2,75	-	13	10
5.1.	Симметричный дифференциальный усилитель	2,5	0,5	-	-	2
5.2.	Операционный усилитель	7,75	0,75	-	5	2
5.3.	Компаратор	2,5	0,5	-	-	2
5.4.	Инвертирующий и	10,5	0,5	-	8	2

	неинвертирующий усилители					
5.5.	Таймер	2,5	0,5	-	-	2
6.	Стабилизаторы напряжения	12	1	2		9
6.1	Стабилизаторы постоянного тока	5,5	0,5	2		3
6.2.	Импульсные стабилизаторы	3,25	0,25	-		3
6.3.	Стабилизаторы переменного напряжения	3,25	0,25	-		3
7.	Выпрямители	16	1	4	5	6
7.1.	Однофазный однополупериодный выпрямитель	3,5	0,5	-	-	3
7.2.	Однофазный двухполупериодный выпрямитель	12,5	0,5	4	5	3
8.	Микроэлектроника	3	1	-	-	2
8.1.	Основы микроэлектроники	1,5	0,5	-	-	1
8.2.	Полупроводниковые и гибридные микросхемы	1,5	0,5	-	-	1
	ИТОГО	108	18	18	18	54

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Раздел 1. Введение

Тема 1.1. Роль электроники в современном мире. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Электронно-дырочный переход и его свойства.

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 часа).

Роль электроники в современном мире

Сложно спорить с тем, что от тех вещей, которые нас окружают, зависит наше настроение. Это касается и электроники. Даже обычный монитор компьютера может стать поводом для огорчения или радости. Сегодня с компьютером знакомы все, даже малыши. Одни его используют как один из инструментов для зарабатывания денег, вторые- для игр, третьи держат «руку на пульсе» и тщательно следят за обстановкой в мире. Когда ломается любая его деталь наступает паника: кажется, что упускаешь что-то важное. Есть люди, которые самым настоящим образом впадают в депрессию или апатию. Что может поспособствовать тому, чтобы техника не ломалась? Ее качественное исполнение. Именно поэтому многие люди боятся покупать вещи неизвестных компаний, отдавая предпочтение тем, которые существуют уже несколько десятилетий.

Например, если в магазине вы увидите монитор Samsung или другой, менее известной марки, вы наверняка отдадите предпочтение первому варианту. Эта компания все время на слуху, постоянно пополняет ассортимент выпущенной продукции. Мониторы этой марки отличаются своей эргономичностью, легко меняют наклон, высоту экрана. Вся док-станция у них находится в самой подставке, что обеспечивает возможность использовать расширенные технические возможности устройства.

Еще одно современное устройство, которое есть практически в любой квартире -музыкальный центр Samsung. Как приятно утром просыпаться не под «пение» будильника, а под звуки классической музыки. Многие люди, привыкшие к нему, не понимают, как можно сидеть в тишине. Современные устройства позволяют не просто читать разные форматы аудиодисков, но и видео, прослушивать радио. Аппаратуру можно даже подключить к компьютеру или телевизору. Наличие дополнительных возможностей (караоке, USB-портов) позволяют максимально эффективно ее использовать.

Для работающих людей важно, чтобы вся оргтехника работала исправно. Сегодня, когда особенно популярными стали МФУ samsung, без них уже сложно представить рабочий день любого офисного работника. С помощью multifunctional устройств можно решать сразу несколько задач.

Современная электроника и техника была изобретена для того, чтобы облегчить жизнь обычному человеку. но мы настолько к ней привыкли, что любая даже небольшая поломка приводит к появлению стресса. Компания Samsung функционирует с 1936 года и зарекомендовала себя как надежный производитель разного товара.

Собственная и примесная проводимости полупроводников

Полупроводники — это вещества, удельное сопротивление которых убывает с повышением температуры, наличием примесей, изменением освещенности. По этим свойствам они разительно отличаются от металлов. Обычно к полупроводникам относятся кристаллы, в которых для освобождения электрона требуется энергия не более 1,5—2 эВ. Типичными полупроводниками являются кристаллы германия и кремния, в которых атомы объединены ковалентной связью. Природа этой связи позволяет объяснить указанные выше характерные свойства. При нагревании полупроводников их атомы ионизируются. Освободившиеся электроны не могут быть захвачены соседними атомами, так как все их валентные связи насыщены. Свободные электроны под действием внешнего электрического поля могут перемещаться в кристалле, создавая электронный ток проводимости. Удаление электрона с внешней оболочки одного из атомов в кристаллической решетке приводит к образованию положительного иона. Этот ион может нейтрализоваться, захватив электрон. Далее, в результате переходов электронов от атомов к положительным ионам происходит процесс хаотического перемещения в кристалле места с недостающим электроном — «дырки». Внешне этот процесс хаотического перемещения воспринимается как перемещение положительного заряда. При помещении кристалла в электрическое поле возникает упорядоченное движение «дырок» — дырочный ток проводимости.

В идеальном кристалле ток создается равным количеством электронов и «дырок». Такой тип проводимости называют собственной проводимостью полупроводников. При повышении температуры (или освещенности) собственная проводимость полупроводников увеличивается.

На проводимость полупроводников большое влияние оказывают примеси. Примеси бывают донорные и акцепторные. Донорная примесь — это примесь с большей валентностью. При добавлении донорной примеси в полупроводнике образуются лишние электроны. Проводимость станет электронной, а полупроводник называют полупроводником n-типа. Например, для кремния с валентностью $n = 4$ донорной примесью является мышьяк с валентностью $n = 5$. Каждый атом примеси мышьяка приведет к образованию одного электрона проводимости.

Акцепторная примесь — это примесь с меньшей валентностью. При добавлении такой примеси в полупроводнике образуется лишнее количество «дырок». Проводимость будет «дырочной», а полупроводник называют полупроводником p-типа. Например, для кремния акцепторной примесью является индий с валентностью $n = 3$. Каждый атом индия приведет к образованию лишней «дырки».

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на свойствах p—n-перехода. При приведении в контакт двух полупроводниковых приборов p-типа и n-типа в месте контакта начинается диффузия электронов из n-области в p-область, а «дырок» — наоборот, из p- в n-область. Этот процесс будет не бесконечным во времени, так как образуется запирающий слой, который будет препятствовать дальнейшей диффузии электронов и «дырок».

p—n-Контакт полупроводников, подобно вакуумному диоду, обладает односторонней проводимостью: если к p-области подключить «+» источника тока, а к n-области «-» источника тока, то запирающий слой разрушится и p—n-контакт будет проводить ток, электроны из n-области пойдут в p-область, а «дырки» из p-области

в

n-область

В первом случае ток не равен нулю, во втором — ток равен нулю. Это означает, что если к p-области подключить «-» источника, а к n-области — «+» источника тока, то запирающий слой расширится и тока не

будет. Полупроводниковый диод состоит из контакта двух полупроводников p- и n-типа 

Полупроводниковые диоды имеют: небольшие размеры и массу, длительный срок службы, высокую механическую прочность, высокий коэффициент полезного действия, их недостатком является зависимость сопротивления от температуры.

В радиоэлектронике применяется также еще один полупроводниковый прибор: транзистор, который был изобретен в 1948 г. В основе триода лежит не один, а два p—n-перехода. Основное применение транзистора — это использование его в качестве усилителя слабых сигналов по току и напряжению, а полупроводниковый диод применяется в качестве выпрямителя тока. После открытия транзистора наступил качественно новый этап развития электроники — микроэлектроники, поднявший на качественно иную ступень развитие электронной техники, систем связи, автоматики. Микроэлектроника занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения. Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных компонентов — транзисторов, диодов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе. В результате этого процесса на одном кристалле одновременно создается несколько тысяч транзисторов, конденсаторов, резисторов и диодов, до 3500 элементов. Размеры отдельных элементов микросхемы могут быть 2—5 мкм, погрешность при их нанесении не должна превышать 0,2 мкм. Микропроцессор современной ЭВМ, размещенный на кристалле кремния размером 6х6 мм, содержит несколько десятков или даже сотен тысяч транзисторов.

Однако в технике применяются также полупроводниковые приборы без p—n-перехода. Например, терморезисторы (для измерения температуры), фоторезисторы (в фотореле, аварийных выключателях, в дистанционных управлениях телевизорами и видеомагнитофонами).

Электронно-дырочный переход и его свойства

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области контакта твердых тел. При этом преимущественно используются контакты: полупроводник-полупроводник, металл-полупроводник, металл-диэлектрик-полупроводник. Если переход создается между полупроводниками n-типа и p-типа, то его называют электронно-дырочным или p-n-переходом. Такой переход создается в одном кристалле полупроводника с использованием сложных технологических операций. Возможны различные исполнения p-n-перехода, отличающиеся: резкостью и уровнем изменения концентраций доноров и акцепторов на границе перехода, размером и формой самого перехода, а также наличием каких-либо неоднородностей в переходе. Все эти факторы оказывают существенное влияние на свойства p-n-перехода и используются для придания реальным полупроводниковым приборам тех или иных характеристик.

В общем случае поведение реального p-n-перехода в состоянии покоя и при подключении внешнего напряжения различного уровня и полярности определяется множеством физических процессов, протекающих в полупроводнике. К ним относятся: термогенерация носителей, поверхностные утечки тока, падение напряжения на сопротивлении нейтральных областей полупроводника, возможности теплового и электрического пробоев и т.д. Однако определяющими являются описанные выше процессы генерации, рекомбинации, диффузии и дрейфа носителей зарядов в полупроводнике.

Раздел 2. Полупроводниковые приборы

Тема 2.1. Выпрямительные диоды

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 час)

1. Общие сведения

Диод – это полупроводниковый прибор, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный. Однако, это далеко не полная область применения диодов: они широко используются в цепях управления и коммутации, в схемах умножения напряжения, во всех силовых цепях, где не предъявляется жестких требований к временным и частотным параметрам электрического сигнала.

Конструкция диодов представляет собой одну пластину кристалла полупроводника, в объеме которой созданы две области разной проводимости, поэтому такие диоды называют плоскостными.

Технология изготовления таких диодов заключается в следующем: на поверхность кристалла полупроводника с электропроводностью n-типа расплавляют алюминий, индий или бор, а на поверхность кристалла с электропроводностью p-типа расплавляют фосфор.

Под действием высокой температуры эти вещества крепко сплавляются с кристаллом полупроводника. При этом атомы этих веществ проникают (диффундируют) в толщу кристалла, образуя в нем область с преобладанием электронной или дырочной электропроводностью. Таким образом получается полупроводниковый прибор с двумя областями различного типа электропроводности — а между ними p-n переход. Большинство распространенных плоскостных кремниевых и германиевых диодов изготавливают именно таким способом.

Для защиты от внешних воздействий и обеспечения надежного теплоотвода кристалл с p-n переходом монтируют в корпусе.

Диоды малой мощности изготавливают в пластмассовом корпусе с гибкими внешними выводами, диоды средней мощности – в металлоглазном корпусе с жесткими внешними выводами, а диоды большой мощности – в металлоглазном или металлокерамическом корпусе, т.е. со стеклянным или керамическим изолятором.

Условно-графические обозначения выпрямительных диодов



У диода есть два вывода (электрода) анод и катод. Анод присоединён к p слою, катод к n слою. Когда на анод подаётся плюс, а на катод минус (прямое включение диода) диод пропускает ток. Если на анод подать минус, а на катод плюс (обратное включение диода) тока через диода не будет

2. Классификация диодов.

В зависимости от значения максимально допустимого прямого тока выпрямительные диоды разделяются на диоды малой, средней и большой мощности:

малой мощности рассчитаны для выпрямления прямого тока до 300mA;
средней мощности – от 300mA до 10A;
большой мощности — более 10A.

3. Параметры диодов

Основные параметры диодов - это прямой ток диода ($I_{пр}$) и максимальное обратное напряжение диода ($U_{обр}$). Именно их надо знать, если стоит задача разработать новый выпрямитель для источника питания.

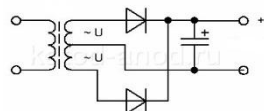
Прямой ток диода можно легко вычислить, если известен общий ток, который будет потреблять нагрузка нового блока питания. Затем, для обеспечения надёжности, необходимо несколько увеличить это значение и получится ток, на который надо подобрать диод для выпрямителя. К примеру, блок питания должен выдерживать ток в 800 мА. Поэтому мы выбираем диод, у которого прямой ток диода равен 1А.

Максимальное обратное напряжение диода - это параметр, который зависит не только от значения переменного напряжения на входе, но и от типа выпрямителя. Для объяснения этого утверждения, рассмотрим следующие рисунки. На них показаны все основные схемы выпрямителей.



Рис. 1

Напряжение на выходе выпрямителя (на конденсаторе) равно действующему напряжению вторичной обмотки трансформатора, умноженному на $\sqrt{2}$. В однополупериодном выпрямителе (рис. 1), когда напряжение на аноде диода имеет положительный потенциал относительно земли, конденсатор фильтра заряжается до напряжения, превышающего действующее напряжение на входе выпрямителя в 1.4 раза. Во время следующего полупериода напряжение на аноде диода отрицательно относительно земли и достигает амплитудное значения, а на катоде - положительно относительно земли и имеет такое же значение. В этот полупериод к диоду приложено обратное напряжение, которое получается благодаря последовательному соединению обмотки трансформатора и заряженного конденсатора фильтра. Т.е. обратное напряжение диода должно быть не меньше двойного амплитудного напряжения вторички трансформатора или в 2.8 раза выше его действующего значения. При расчёте таких выпрямителей надо выбирать диоды с максимальным обратным напряжением в 3 раза превышающим действующее значение переменного напряжения.



4. Кремниевые и германиевые диоды

По типу применяемого материала они делятся на германиевые и кремниевые, но, на сегодняшний день наибольшее применение получили кремниевые выпрямительные диоды ввиду своих физических свойств.

Кремниевые диоды, по сравнению с германиевыми, имеют во много раз меньшие обратные токи при одинаковом напряжении, что позволяет получать диоды с очень высокой величиной допустимого обратного напряжения, которое может достигать 1000 – 1500В, тогда как у германиевых диодов оно находится в пределах 100 – 400В.

Работоспособность кремниевых диодов сохраняется при температурах от -60 до $+(125 - 150)^\circ \text{C}$, а германиевых – лишь от -60 до $+(70 - 85)^\circ \text{C}$. Это связано с тем, что при температурах выше 85°C образование электронно-дырочных пар становится столь значительным, что происходит резкое увеличение обратного тока и эффективность работы выпрямителя падает.

Тема 2.2. Импульсные диоды

Импульсный диод — диод, предназначенный для работы в высокочастотных импульсных схемах.

Обычно представляет собой полупроводниковый диод с р-п-переходом, оптимизированный по собственной ёмкости, времени восстановления обратного сопротивления (рассасывания неосновных носителей).

Для уменьшения собственной ёмкости вынужденно уменьшают площадь р-п-перехода и для снижения времени жизни неосновных носителей применяют сильно легированные полупроводниковые материалы (кремний часто легируют золотом для снижения времени обратного восстановления), поэтому импульсные диоды имеют невысокие предельные импульсные токи (до сотен мА) и небольшие предельные обратные напряжения (до десятков вольт). Также выпускаются импульсные диоды с барьером Шоттки.

Типичная барьерная ёмкость импульсного диода обычно менее 1 пФ и время восстановления обратного сопротивления (время жизни неосновных носителей) обычно не более 4 нс).

Принцип действия импульсного диода не отличается от обычного выпрямительного полупроводникового диода с р-п-переходом, при приложении прямого напряжения диод хорошо проводит электрический ток. При смене полярности диод запирается. Запирание происходит не сразу, сначала происходит резкое увеличение обратного тока, затем, после рассасывания неосновных носителей, восстанавливается высокое сопротивление р-п-перехода и диод запирается.

Применение

Импульсные диоды применяют в сверхбыстродействующих импульсных ключевых схемах, например, в логических схемах.

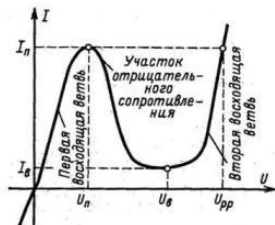
Также их применяют в формирователях субнаносекундных импульсов, например, при формировании строб-импульсов в стробоскопических осциллографах, так называемые диоды с быстрым обратным

восстановлением (импульсные диоды с накоплением заряда). Принцип формирования субнаносекундных импульсов основан на том, что восстановление обратного сопротивления после рассасывания неосновных носителей происходит за очень короткое время, существенно короче, чем длительность фронта смены полярности, таким образом, затянутый фронт укорачивается^[1]

Тема 2.3. Туннельные диоды

Туннельный диод - имеющий вольт-амперную характеристику с отрицательным дифференциальным сопротивлением. При низких напряжениях (доли вольт) за счет туннельного эффекта ток через диод сначала растет, затем падает и при дальнейшем повышении напряжения (единицы вольт) ток снова растет, как и у обычного диода.

Вольт-амперная характеристика туннельного диода



Параметры туннельного диода:

I_p - ток пика,

U_p - напряжение пика,

$I_{вп}$ - ток впадины,

$U_{вп}$ - напряжение пика,

$U_{пр}$ - напряжение раствора - прямое напряжение, большее U_p , при котором ток равен I_p ,

C_d - емкость диода (обычно при напряжении $U_{вп}$) - характеризует частотные свойства диода

Туннельные диоды используют в СВЧ усилителях, генераторах и переключающих устройствах на частотах до неск. гигагерц.

Тема 2.4. Диоды Шоттки

Диод Шоттки — полупроводниковый диод с малым падением напряжения при прямом включении. Назван в честь немецкого физика Вальтера Шоттки. В специальной литературе часто используется более полное название — Диод с барьером Шоттки (ДШБ)

В диодах Шоттки в качестве барьера Шоттки используется переход металл-полупроводник, в отличие от обычных диодов, где используется p-n переход. Переход металл-полупроводник обладает рядом особенных свойств (отличных от свойств полупроводникового p-n перехода). К ним относятся: пониженное падение напряжения при прямом включении, высокий ток утечки, очень маленький заряд обратного восстановления. Последнее объясняется тем, что по сравнению с обычным p-n переходом у таких диодов отсутствует диффузия, связанная с инжекцией неосновных носителей, т.е. они работают только на основных носителях, а их быстрое действие определяется только барьерной емкостью.

Диоды Шоттки изготавливаются обычно на основе кремния (Si) или арсенида галлия (GaAs), реже — на основе германия (Ge). Выбор металла для контакта с полупроводником определяет многие параметры диода Шоттки. В первую очередь — это величина контактной разности потенциалов, образующейся на границе металл-полупроводник. При использовании диода Шоттки в качестве детектора она определяет его чувствительность, а при использовании в смесителях — необходимую мощность гетеродина. Поэтому чаще всего используются металлы Ag, Au, Pt, Pd, W, которые наносятся на полупроводник и дают величину потенциального барьера 0,2...0,9 эВ.

Допустимое обратное напряжение выпускаемых диодов Шоттки ограничено 1200 вольт (CSD05120 и аналоги), на практике большинство диодов Шоттки применяется в низковольтных цепях при обратном напряжении порядка единиц и нескольких десятков вольт.

Свойства диодов Шоттки

Достоинства

Падение напряжения на диоде Шоттки при его прямом включении составляет 0,2—0,4 вольт, в то время, как для обычных, например кремниевых диодов, это значение порядка 0,6—0,7 вольт. Столь малое падение напряжения на диоде, при его прямом включении, присуще только диодам Шоттки с максимальным обратным напряжением порядка десятков вольт, однако при повышении приложенного напряжения, падение напряжения на диоде Шоттки становится сравнимым с кремниевым диодом, что может ограничивать применение диодов Шоттки.

Теоретически диод Шоттки может обладать низкой электрической ёмкостью барьера Шоттки. Отсутствие p-n перехода позволяет повысить рабочую частоту. Это свойство используется в логических интегральных микросхемах, где диодами Шоттки шунтируются переходы база-коллектор транзисторов. В силовой

электронике малое время восстановления позволяет строить выпрямители на частоты в сотни кГц и выше. Например, у диода MBR4015 (15 В, 40 А), предназначенного для выпрямления высокочастотного напряжения, время восстановления равно 10 нВ/мкс.

Благодаря указанным выше достоинствам, выпрямители на диодах Шоттки отличаются от выпрямителей на обычных диодах пониженным уровнем помех, поэтому они предпочтительны в аналоговых вторичных источниках питания.

Недостатки

Даже при кратковременном превышении максимально допустимого значения обратного напряжения диод Шоттки необратимо выходит из строя, в отличие от обычных кремниевых р-п диодов, которые переходят в режим обратимого^[2] пробоя, при условии, что рассеиваемая кристаллом диода мощность не превышает допустимых значений, после падения напряжения диод полностью восстанавливает свои свойства.

Диоды Шоттки характеризуются повышенными (относительно обычных кремниевых р-п диодов) обратными токами, возрастающими с ростом температуры кристалла. Для 30CPQ150 обратный ток при максимальном обратном напряжении изменяется от 0,12 мА при +25 °С до 6,0 мА при +125 °С. У низковольтных диодов в корпусах ТО220 обратный ток может превышать сотни миллиампер (MBR4015 — до 600 мА при +125 °С). Неудовлетворительные условия теплоотвода при работе диода Шоттки с высокими токами приводят к его тепловому пробую.

Тема 2.5. Стабилитроны

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 часа).

Стабилитроном называется полупроводниковый диод, вольт-амперная характеристика которого имеет область резкой зависимости тока от напряжения на обратном участке вольт-амперной характеристики. ВАХ стабилитрона имеет вид, представленный на рисунке 1

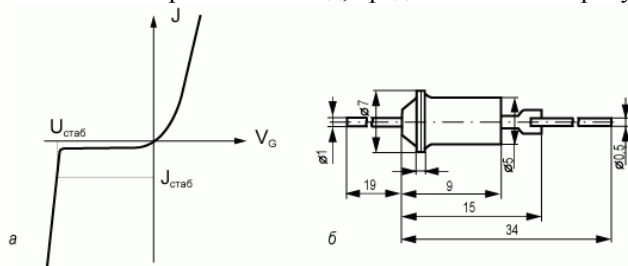


Рис.1 - Вольт-амперная характеристика (а) и конструкция корпуса (б) стабилитрона

При достижении напряжения на стабилитроне, называемого напряжением стабилизации $U_{\text{стаб}}$, ток через стабилитрон резко возрастает. Дифференциальное сопротивление $R_{\text{диф}}$ идеального стабилитрона на этом участке ВАХ стремится к 0, в реальных приборах величина $R_{\text{диф}}$ составляет значение: $R_{\text{диф}} \approx 2 \div 50 \text{ Ом}$.

Основное назначение стабилитрона - стабилизация напряжения на нагрузке, при изменяющемся напряжении во внешней цепи. В связи с этим последовательно со стабилитроном включают нагрузочное сопротивление, демпфирующее изменение внешнего напряжения. Поэтому стабилитрон называют также опорным диодом.

Напряжение стабилизации $U_{\text{стаб}}$ зависит от физического механизма, обуславливающего резкую зависимость тока от напряжения. Различают два физических механизма, ответственных за такую зависимость тока от напряжения, - лавинный и туннельный пробой р-п перехода.

Для стабилитронов с туннельным механизмом пробоя напряжение стабилизации $U_{\text{стаб}}$ невелико и составляет величину менее 5 вольт: $U_{\text{стаб}} < 5 \text{ В}$. Для стабилитронов с лавинным механизмом пробоя напряжение стабилизации обычно имеет большие значения и составляет величину более 8 вольт: $U_{\text{стаб}} > 8 \text{ В}$.

Тема 2.6. Варикапы

В современной электронике появляется всё больше электронных компонентов управляемых напряжением. Это связано с активным развитием цифровой техники. Ранее электронная аппаратура управлялась всевозможными ручками регулировки, кнопками, многопозиционными переключателями, т.е. руками. Цифровая техника избавила нас от этого, а взамен дала возможность управлять и настраивать устройства посредством кнопок и экранного меню. Всё это было бы невозможно без электронных компонентов, управляемых напряжением. К одному из таких электронных компонентов можно отнести варикап.

Варикап - это полупроводниковый диод, который изменяет свою ёмкость пропорционально величине приложенного обратного напряжения от единиц до сотен пикофард. Так изображается варикап на принципиальной схеме.



Как видим, его изображение очень напоминает условное изображение полупроводникового диода. И это не случайно. Дело в том, что р-п переход любого диода обладает так называемой барьерной ёмкостью. Сама по себе барьерная ёмкость перехода для диода нежелательна. Но и этот недостаток смогли использовать. В результате был разработан варикап - некий гибрид диода и переменного конденсатора, ёмкость которого можно менять с помощью напряжения.

Как известно, при подаче обратного напряжения на диод, он закрыт и не пропускает электрический ток. В таком случае р-п переход выполняет роль своеобразного изолятора, толщина которого зависит от величины обратного напряжения ($U_{обр}$). Меняя величину обратного напряжения ($U_{обр}$), мы меняем толщину перехода – этого самого изолятора. А поскольку электрическая ёмкость C зависит от площади обкладок, в данном случае площади р-п перехода, и расстояния между обкладками – толщины перехода, то появляется возможность менять ёмкость р-п перехода с помощью напряжения. Это ещё называют электронной настройкой.

На варикап прикладывают обратное напряжение, что изменяет величину ёмкости барьера р-п перехода.

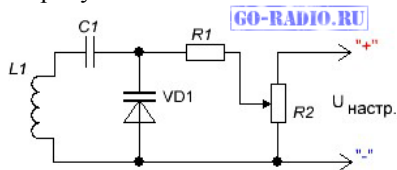
Отметим, что барьерная ёмкость есть у всех полупроводниковых диодов, и она уменьшается по мере увеличения обратного напряжения на диоде. Но вот у варикапов эта ёмкость может меняться в достаточно широких пределах, в 3 – 5 раз и более.

Положительные качества варикапа.

У варикапов очень маленькие потери электрической энергии и малый ТКЕ (температурный коэффициент ёмкости) поэтому их с успехом применяют даже на очень высоких частотах, где ёмкость конденсатора измеряется долями пикофард. Это очень важно, так как если бы ёмкость варикапа была нестабильна из-за утечек (потери электрической энергии) и температуры (ТКЕ), то частота колебательного контура «уходила» и «гуляла», т.е. менялась. А это недопустимо! Познакомьтесь с колебательным контуром, и вы сразу поймёте насколько это важно.

Как работает варикап?

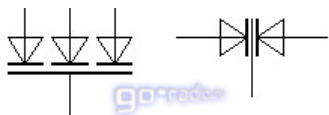
На рисунке показана типовая схема управления варикапом.



R2 - переменный резистор. С помощью винта по рабочей поверхности этого резистора перемещается ползунок, который плавно изменяет сопротивление, а, соответственно, и величину обратного напряжения ($U_{обр}$), подаваемого на варикап. Конденсатор C1 препятствует попаданию на индуктивность L1 постоянного напряжения. Постоянный резистор R1 уменьшает шунтирующее действие резистора R2 на контур, что позволяет сохранить резонансные свойства контура. Как видим, ёмкость варикапа входит в состав колебательного контура. Меняя ёмкость варикапа, мы изменяем параметры колебательного контура и, следовательно, частоту его настройки. Так реализуется электронная настройка.

В современных цветных телевизорах есть такая функция – автонастройка (автопоиск) телеканалов. Нажимаем на кнопку, и весь диапазон сканируется на предмет наличия вещательных программ - телеканалов. Так вот этой функции просто бы не существовало, если бы не было варикапа. В телевизоре управляющей схемой формируется плавно меняющееся напряжение настройки, которое и подаётся на варикап. За счёт этого меняются параметры колебательного контура приёмника (тuner) и он настраивается на тот или иной телеканал. Затем происходит запоминание напряжения настройки на каждый из найденных телеканалов, и мы можем переключаться на любой из них, когда захотим.

Кроме обычных варикапов очень часто используют сдвоенные и строенные варикапы с общим катодом. Вот такой вид они имеют на принципиальных схемах.



Они используются, как правило, в радиоприёмных устройствах, где необходимо одновременно перестраивать входной контур и гетеродин с помощью одного потенциометра. Имеются так же обычные сборки, когда в одном корпусе размещается несколько варикапов электрически не связанные между собой.

Параметры варикапов.

Несмотря на то, что варикап разработан на базе диода, это всё-таки конденсатор и именно параметры, связанные с ёмкостью и являются основными. Вот лишь некоторые из них:

Максимальное обратное постоянное напряжение ($U_{обр. макс.}$). Измеряется в вольтах (В). Это максимальное напряжение, которое можно подавать на варикап. Напомним, что ёмкость варикапа уменьшается при увеличении обратного напряжения на нём.

Номинальная ёмкость варикапа (C_B). Это ёмкость варикапа при фиксированном обратном напряжении. Поскольку варикапы выпускаются на различные значения ёмкости, начиная от долей пикофарады и до сотен пикофарад, то их ёмкость измеряют, подавая определённую величину обратного напряжения на варикап. Оно может быть равным 4 и более вольтам, и, как правило, указывается в справочных данных.

Также может указываться минимальная и максимальная ёмкость варикапа (C_{min} и C_{max}). Это связано с тем, что параметры выпускаемых варикапов могут несколько отличаться. Поэтому в справочных данных указывают минимально- и максимально- возможную ёмкость варикапа при фиксированном обратном напряжении ($U_{обр.}$). Это и есть C_{max} и C_{min} .

У импортных варикапов обычно указывается только одна величина C_d (или C_d) – ёмкость варикапа при обратном напряжении, близком к максимальному. Например, для импортного варикапа ВВ133 ёмкость $C_d = 2,6$ pF (пФ) при обратном напряжении $V_R = 28$ V.

Коэффициент перекрытия по ёмкости (K_c). Этот параметр показывает отношение максимальной ёмкости варикапа к минимальной. Считается так:

$$K_c = \frac{C_{max}}{C_{min}}$$

Например, для отечественного варикапа КВ109А коэффициент перекрытия K_c равен 5,5. Ёмкость при $U_{обр} = 25$ В составляет 2,8 пФ (Это - C_{min}). Так как диапазон обратного напряжения для варикапа КВ109А составляет 3 – 25 вольт, то используя формулу, можно узнать ёмкость этого варикапа при обратном напряжении в 3 вольта. Оно составит 15,4 пФ.(Это - C_{max}).

В документации на импортные варикапы так же указывается коэффициент перекрытия. Он называется capacitance ratio. Формула, по которой считается этот параметр, выглядит так (для варикапа ВВ133).

$$\frac{C_{d(0,5V)}}{C_{d(28V)}}$$

Как видим, берётся ёмкость варикапа при обратном напряжении в 0,5 V и в 28 V. Так как ёмкость варикапа уменьшается при увеличении обратного напряжения на нём, то становится ясно, что эта формула расчёта аналогична той, что применяется для расчёта K_c .

Все остальные параметры можно считать несущественными. В некоторых случаях необходимо обратить внимание на граничную частоту, но это не столь важно, поскольку варикапы уверенно работают во всём радио и телевизионном диапазоне.

Тема 2.7. Светодиоды

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (0,5 часа).

— полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом или контактом металл-полупроводник, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока.

При пропускании электрического тока через p-n переход в прямом направлении, носители заряда — электроны и дырки и — рекомбинируют с излучением фотонов (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой).

Не всякие полупроводниковые материалы эффективно испускают свет при рекомбинации. Во-первых, ширина запрещенной зоны в активной области светодиода должна быть близка к энергии квантов света видимого диапазона. Во-вторых, вероятность излучения при рекомбинации электронно-дырочных пар должна быть высокой, для чего полупроводниковый кристалл должен содержать мало дефектов, из-за которых рекомбинация происходит без излучения.

Лучшие излучатели относятся к прямозонным полупроводникам (то есть таким, в которых разрешены прямые оптические переходы зона-зона), например, [GaAs](#) или [InP](#)) и $A^{III}B^{VI}$ (например, [ZnSe](#) или [CdTe](#)). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от [ультрафиолета \(GaN\)](#) до среднего инфракрасного диапазона ([PbS](#)).

Для получения p-n перехода приконтактные слои полупроводникового кристалла легируют разными примесями: по одну сторону акцепторными, по другую — донорными.



Условно-графическое обозначение светодиода на электрических схемах

Характеристики

Вольт-амперная характеристика светодиодов в прямом направлении нелинейна. Диод начинает проводить ток начиная с некоторого порогового напряжения. Это напряжение позволяет достаточно точно определить материал полупроводника. КПД светодиодов в основном колеблется 30 до 50 %. Потребление энергии в 8 раз меньше, чем у ламп накаливания. Срок службы — в 80 раз дольше (почти 50 тысяч часов).

Чем больший ток проходит через светодиод, тем больше электронов и дырок поступают в зону рекомбинации в единицу времени, и диод светит ярче. Но ток нельзя увеличивать до бесконечности. Из-за внутреннего сопротивления полупроводника и р-п-перехода диод перегревается и выходит из строя.

Недостатком светодиодов является его высокая цена. Пока что цена одного люмена, излученного светодиодом, в 100 раз выше, чем галогенной лампой. Но специалисты утверждают, что в ближайшие 2 — 3 года этот показатель будет снижен в 10 раз.

Квантовый выход — это число излученных квантов света на одну рекомбинировавшую электронно-дырочную пару. Различают внутренний и внешний квантовый выход. Внутренний — в самом р-п-переходе, внешний — для прибора в целом. Внутренний квантовый выход для хороших кристаллов с хорошим теплоотводом достигает почти 100%, рекорд внешнего квантового выхода для красных светодиодов составляет 55%, а для синих — 35%.

Внешний квантовый выход — одна из основных характеристик эффективности светодиода.

Светодиод – низковольтный прибор. Обычный светодиод, применяемый для индикации, потребляет от 2 до 4В постоянного напряжения при токе до 50 мА.

Рекомбинация электронов и дырок (положительно заряженных ионов кристаллической решётки полупроводника) может быть излучательной, при этом в момент встречи электрона и дырки выделяется энергия в виде излучения кванта света – фотона. В случае безизлучательной рекомбинации энергия расходуется на нагрев вещества. В природе существует как минимум 5 видов излучательной рекомбинации носителей зарядов, в том числе так называемая прямозонная рекомбинация.

Ток через светодиод нужно стабилизировать

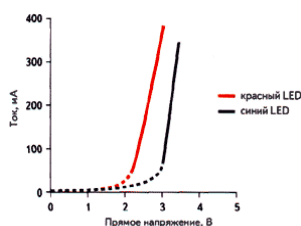


Рис. 1. Вольтамперные характеристики светодиодов

Как видно из рисунка, в рабочих режимах ток экспоненциально зависит от напряжения и незначительные изменения напряжения приводят к большим изменениям тока. Поскольку световой выход прямо пропорционален току, то и яркость светодиода оказывается нестабильной. Поэтому ток необходимо стабилизировать. Кроме того, если ток превысит допустимый предел, то перегрев светодиода может привести к его ускоренному старению.

Светодиоды допускаются запитывать в импульсном режиме, при этом импульсный ток, протекающий через прибор, может быть выше, чем значения постоянного тока (до 150 мА при длительности импульсов 100 мкс и частоте импульсов 1 кГц). Для управления яркостью светодиодов (и цветом, в случае смешения цветов) используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) – метод, очень распространённый в современной электронике. Это позволяет создавать контроллеры с возможностью плавного изменения яркости (диммеры) и цвета (колор-чейнджеры).

Конвертор для светодиода — то же, что балласт для лампы. Он стабилизирует ток, протекающий через светодиод.

Считается, что светодиоды исключительно долговечны. Но это не совсем так. Чем больший ток пропускается через светодиод в процессе его службы, тем выше его температура и тем быстрее наступает старение. Поэтому срок службы у мощных светодиодов короче, чем у маломощных сигнальных, и составляет в настоящее время 20 - 50 тысяч часов. Старение выражается в первую очередь в уменьшении яркости.

Старение светодиода связано не только со снижением его яркости, но и с изменением цвета.

Спектр излучения светодиода близок к монохроматическому, в чем его кардинальное отличие от спектра солнца или лампы накаливания.

Конструкция и изготовление

Светодиод состоит из полупроводникового кристалла на подложке, корпуса с контактными выводами и оптической системы.

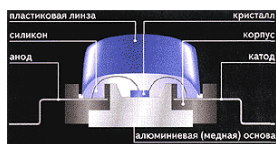


Рис.2. Конструкция мощного светодиода

Технологии изготовления светодиодов и светодиодных модулей существующих на сегодняшний день: что касается выращивания кристаллов, то основная технология — металлоорганическая эпитаксия. Для этого процесса необходимы особо чистые газы. В современных установках предусмотрены автоматизация и контроль состава газов, их отдельные потоки, точная регулировка температуры газов и подложек. Толщины выращиваемых слоев измеряются и контролируются в пределах от десятков ангстрем до нескольких микрон. Разные слои необходимо легировать примесями, донорами или акцепторами, чтобы создать p-n переход с большой концентрацией электронов в n-области и дырок — в p области.

За один процесс, который длится несколько часов, можно вырастить структуры на 6 — 12 подложках диаметром 50 — 75 мм. Очень важно обеспечить и проконтролировать однородность структур на поверхности подложек.

Важным этапом технологии является планарная обработка пленок: их травление, создание контактов к n- и p-слоям, покрытие металлическими пленками для контактных выводов. Пленку, выращенную на одной подложке, можно разрезать на несколько тысяч чипов размерами от 0,24x0,24 до 1x1 мм².

Следующим шагом является создание светодиодов из этих чипов. Необходимо смонтировать кристалл в корпусе, сделать контактные выводы, изготовить оптические покрытия, просветляющие поверхность для вывода излучения или отражающие его. Если это белый светодиод, то нужно равномерно нанести люминофор. Надо обеспечить теплоотвод от кристалла и корпуса, сделать пластиковый купол, фокусирующий излучение в нужный телесный угол. Около половины стоимости светодиода определяется этими этапами высокой технологии.

Необходимость повышения мощности для увеличения светового потока привела к тому, что традиционная форма корпусного светодиода перестала удовлетворять производителей из-за недостаточного теплоотвода. Надо было максимально приблизить чип к теплопроводящей поверхности. В связи с этим на смену традиционной технологии и несколько более совершенной SMD-технологии (surface montage details — поверхностный монтаж деталей) приходит наиболее передовая технология COB (chip on board).

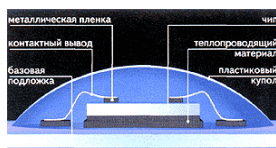


Рис.3. Светодиод, изготовленный по технологии COB

Светодиоды, выполненные по SMD- и COB-технологии, монтируются (приклеиваются) непосредственно на общую подложку, которая может исполнять роль радиатора — в этом случае она делается из металла.

Раньше в светодиодных сборках было очень много светодиодов. Сейчас, по мере увеличения мощности, светодиодов становится меньше, зато оптическая система, направляющая световой поток в нужный телесный угол, играет все большую роль.

Тема 2.8. Фотодиоды

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (0,5 часа).

Фотодиод — приёмник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счёт процессов в p-n-переходе.

Полупроводниковый фотодиод – это полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещенности.

Обычно в качестве фотодиода используют полупроводниковые диоды с p-n переходом, который смещен в обратном направлении внешним источником питания.

При поглощении квантов света в p-n переходе или в прилегающих к нему областях образуются новые носители заряда. Неосновные носители заряда, возникшие в областях, прилегающих к p-n переходу на расстоянии, не превышающей диффузионной длины, диффундируют в p-n переход и проходят через него под действием электрического поля. То есть обратный ток при освещении возрастает. Поглощение квантов непосредственно в p-n переходе приводит к аналогичным результатам. Величина, на которую возрастает обратный ток, называется фототоком.

Характеристики

Свойства фотодиода можно охарактеризовать следующими характеристиками.

- 1) вольтамперная характеристика фотодиода представляет собой зависимость светового тока при неизменном световом потоке и темнового тока $I_{\text{темн}}$ от напряжения.
- 2) световая характеристика фотодиода, то есть зависимость фототока от освещенности, соответствует прямой пропорциональности фототока от освещенности. Это обусловлено тем, что толщина базы фотодиода значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда. То есть практически все неосновные носители заряда, возникшие в базе, принимают участие в образовании фототока.
- 3) спектральная характеристика фотодиода – это зависимость фототока от длины волны падающего света на фотодиод. Она определяется со стороны больших длин волн шириной запрещенной зоны, при малых длинах волн большим показателем поглощения и увеличении влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда с уменьшением длины волны квантов света. То есть коротковолновая граница чувствительности зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Положение максимума в спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от степени роста коэффициента поглощения.
- 4) постоянная времени – это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в e раз (63%) по отношению к установившемуся значению.
- 5) темновое сопротивление – сопротивление фотодиода в отсутствие освещения.

б) интегральная чувствительность

$$K = I_{\phi} / \Phi,$$

где I_{ϕ} – фототок, Φ – освещенность.

7) инерционность.

Существует 3 физических фактора, влияющих на инерционность: 1) время диффузии или дрейфа неравновесных носителей через базу τ ; 2) время пролета через p - n переход τ_i ; 3) время перезарядки барьерной емкости p - n перехода, характеризующееся постоянной времени $RC_{\text{бар}}$.

Классификация

1. p - i - n фотодиод

В p - i - n структуре средняя i -область заключена между двумя областями противоположной проводимости. При достаточно большом напряжении оно пронизывает i -область, и свободные носители, появившиеся за счет фотонов при облучении, ускоряются электрическим полем p - n переходов. Это дает выигрыш в быстродействии и чувствительности. Повышение быстродействия в p - i - n фотодиоде обусловлено тем, что процесс диффузии заменяется дрейфом электрических зарядов в сильном электрическом поле. Уже при $U_{\text{обр}} \approx 0.1$ В p - i - n фотодиод имеет преимущество в быстродействии.

Достоинства:

- 1) есть возможность обеспечения чувствительности в длинноволновой части спектра за счет изменения ширины i -области.
- 2) высокая чувствительность и быстродействие.
- 3) малое рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$.

Недостатком является сложность получения высокой чистоты i -области.

2. *Фотодиод Шоттки (фотодиод с барьером Шоттки)*

Структура металл-полупроводник. При образовании структуры часть электронов перейдет из металла в полупроводник p -типа.

3. *Лавинный фотодиод*

В структуре используется лавинный пробой. Он возникает тогда, когда энергия фотоносителей превышает энергию образования электронно-дырочных пар. Очень чувствительны. Для оценки существует коэффициент лавинного умножения:

$$M = \frac{I_{\text{фот}}}{I_{\text{фот0}}}$$

Для реализации лавинного умножения необходимо выполнить два условия:

- 1) Электрическое поле области пространственного заряда должно быть достаточно большим, чтобы на длине свободного пробега электрон набрал энергию, большую, чем ширина запрещенной зоны: —
- 2) Ширина области пространственного заряда должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега:

$$W \gg \lambda$$

Значение коэффициентов внутреннего усиления составляет $M=10$ - 100 в зависимости от типа фотодиодов.

Чувствительность лавинных фотодиодов может быть на несколько порядков больше, чем у обычных фотодиодов (у германиевых – в 200 – 300 раз, у кремниевых – в 104 – 106 раз).

Лавинные фотодиоды являются быстродействующими фотоэлектрическими приборами, их частотный диапазон может достигать 10 ГГц. Недостатком лавинных фотодиодов является более высокий уровень шумов по сравнению с обычными фотодиодами.

4. *Фотодиод с гетероструктурой*

Гетеропереходом называют слой, возникающий на границе двух полупроводников с разной шириной запрещённой зоны. Один слой p^+ играет роль «приёмного окна». Заряды генерируются в центральной области. За счет подбора полупроводников с различной шириной запрещённой зоны можно перекрыть весь диапазон длин волн. Недостаток — сложность изготовления.

Применение фотодиодов

Особенности фотодиодов, такие, как:

- простота технологии изготовления и структур
- сочетание высокой fotocувствительности и быстродействия
- малое сопротивление базы
- малая инерционность

Определяют области их применения.

Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов – без внешнего источника электрической энергии (режим фотогенератора) либо с внешним источником электрической энергии (режим фотопреобразователя). Фотодиоды, работающие в режиме фотогенератора, часто применяют в качестве источников питания, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую. Они называются солнечными элементами и входят в состав солнечных батарей.

КПД кремниевых солнечных элементов составляет около 20 %, а у пленочных солнечных элементов он может иметь значительно большее значение. Важными техническими параметрами солнечных батарей являются отношения их выходной мощности к массе и площади, занимаемой солнечной батареей. Эти параметры достигают значений 200 Вт/кг и 1 кВт/м², соответственно.

Наиболее характерные области применения фотодиодов: считывание информации, воспроизведение звука с лент. В фотосчитывателях фотодиоды, источники излучения собраны в блоки и образуют оптические каналы, через которые перемещается носитель информации. Максимальная частота устройства при использовании светодиода в качестве источника излучения составляет единицы МГц для фотогальванического режима и десятка МГц для фотодиодного.

Фотодиоды используются в преобразователях линейных и угловых перемещений. На контролирующую поверхность прозрачного диска или ленты наносят в соответствии с требуемым угловым или линейным разрешением рисунок. Скорость вращения (перемещения) можно определить подсчетом числа световых импульсов, которые падают на фотоприемник, проходя через контролируемую поверхность и узкую диафрагму (щель) от светодиода. Информацию о направлении получают при помощи муаровых картин. В этом случае устанавливаются 2—4 фотодиода, каждый из которых принимает световые импульсы, сдвинутые на 90 град, по пространственной фазе относительно соседнего фотоприемника. Амплитуда импульсов обратно пропорциональна плотности муаровой картины.

Кремниевый фотодиод — наиболее подходящий фотоприемник в приборах и информационно-измерительных системах контроля параметров излучателей и индикаторов визуального отображения информации. Так как устройства производят измерение фотометрических параметров, то фотозлектрический преобразователь должен обладать спектральной характеристикой, приближающейся к чувствительности среднего человеческого глаза. Для корректирования спектральной чувствительности фотодиодов в состав преобразователя включают светофильтры.

Фотодиоды применяются в различных системах контроля и управления технологическими процессами. Например, для контроля параметров процесса осаждения и травления пленок в технологии производства интегральных схем.

Кремниевые фотодиоды с p - n и p - i - n структурами являются основными фотоприемниками оптронов.

Светодиоды и фотодиоды часто используются в паре. При этом они помещаются в один корпус таким образом, чтобы светочувствительная площадка фотодиода располагалась напротив излучающей площадки светодиода. Полупроводниковые приборы, использующие пары «светодиод – фотодиод», называются оптронами.

Входные и выходные цепи в таких приборах оказываются электрически никак не связанными, поскольку передача сигнала осуществляется через оптическое излучение.

Фотодиод является составным элементом во многих сложных оптоэлектронных устройствах. И поэтому он находит широкое применение.

- а) оптоэлектронные интегральные микросхемы.
- б) многоэлементные фотоприемники.
- в) оптроны.

Тема 2.9. Тиристоры.

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Тиристор имеет 4-слойную полупроводниковую структуру, состоящую из чередующихся областей с проводимостями p и n типа. На границах раздела областей образуются 3 p - n перехода

(рис.2.3). Вывод от крайней **p**-области является анодом, от крайней **n**-области — катодом. Помимо них у тиристора имеется вывод от средней **p**-области — управляющий электрод.

В зависимости от полярности напряжения между анодом А и катодом К тиристор может находиться в одном из трех устойчивых состояний: закрытом при обратном напряжении ($U_{AK} < 0$), закрытом при прямом напряжении ($U_{AK} > 0$) и открытом (включенном) при прямом напряжении. Первому состоянию соответствует обратная ветвь ВАХ (рис.2.4), которая, в сущности, не отличается от таковой выпрямительного диода. Вид прямой ветви ВАХ зависит от режима управляющего электрода. При отсутствии тока через управляющий электрод и прямом напряжении, не превышающем значения $U_{вкл}$ прямой ток имеет такую же величину, что и обратный, тиристор закрыт (участок ОА). При $U_{AK} = U_{вкл}$ происходит скачкообразное увеличение тока с одновременным снижением напряжения. Рабочая точка переходит на участок ВС. Этот процесс называют включением тиристора. Во включенном состоянии его ВАХ имеет такой же вид, что и прямая ветвь ВАХ диода (ОВС). Включение повышением напряжения на практике не используется. Перевести тиристор во включенное состояние можно при напряжении меньше $U_{вкл}$, если к управляющему электроду приложить напряжение положительной по отношению к катоду полярности. При этом через переход **p₂n₂** возникает ток, инициирующий генерацию основных носителей, что приводит к скачкообразному переходу тиристора в открытое состояние.

Важной особенностью рассматриваемого тиристора является то, что это состояние не изменится, т.е. тиристор останется в открытом состоянии, и после прекращения тока через управляющий электрод, а также и после изменения его направления. Таким образом, для включения тиристора достаточно управляющего воздействия в форме довольно короткого импульса, но его выключение каким-либо воздействием на управляющий электрод оказывается невозможным. Чтобы перевести тиристор в закрытое состояние, необходимо снизить ток до величины, меньшей некоторого значения, называемого током удержания, либо хотя бы кратковременно изменить полярность напряжения U_{AK} на обратную. Такой тиристор, обладающий неполным управлением, принято называть однооперационным.

Разновидностью однооперационных тиристорov являются симметричные тиристоры — симисторы. Свойство симистора можно уяснить, рассмотрев его физическую модель (рис.2.5а), состоящую из двух обычных тиристорov, включенных встречно-параллельно. Нетрудно видеть, что такая цепь способна коммутировать ток любого направления. В симисторе оба тиристора выполнены в объеме одного кристалла полупроводника и имеют общий управляющий электрод. Один из силовых электродов условно называют анодом, другой — катодом. ВАХ симистора симметрична для прямого и обратного напряжений (рис.2.5в).

К числу электрических параметров однооперационных тиристорov относятся предельный прямой ток и прямое падение напряжения, определяемые так же, как и у выпрямительных диодов. Однако вследствие многослойности структуры прямое падение напряжения у тиристорov выше, чем у диодов и составляет 1,5...2 В.

Для нормальной работы тиристора необходимо, чтобы при отсутствии управляющего тока он был закрыт при любой полярности анодного напряжения. Поэтому в паспорте тиристора приводится параметр **максимальное значение повторяющегося прямого и обратного напряжения**, определяющий класс тиристора по допустимому напряжению.

Для расчета управляющего устройства необходимы параметры, определяющие управляющий сигнал: **отпирающий ток управления и отпирающее напряжение управления**.

Помимо перечисленных статических параметров важными для тиристорov являются динамические параметры.

Время включения — это время между моментом подачи управляющего сигнала и моментом, когда анодный ток достигает определенного значения.

Время выключения — интервал между моментом перехода спадающим током через нулевое значение и моментом, когда к тиристорy может быть приложено прямое напряжение без самопроизвольного повторного включения. Это время определяется скоростью процесса рекомбинации носителей и часто называется **временем восстановления**.

Критическая скорость нарастания тока $\left(\frac{di}{dt}\right)$. При повышении допустимой скорости возможен перегрев отдельных участков полупроводниковой структуры и тепловое проплавление **p-n** переходов.

Допустимая скорость нарастания прямого напряжения $\left(\frac{du}{dt}\right)$. При ее повышении возможно самопроизвольное включение тиристора.

Тиристоры с высоким значением динамических параметров (малые значения времени включения и выключения, большие допустимые значения $\frac{di}{dt}$, $\frac{du}{dt}$) называются быстродействующими и используются в преобразователях, работающих при повышенной частоте.

В конце 60-х годов были разработаны двухоперационные или запираемые тиристоры. Такие тиристоры открываются управляющим импульсом положительной полярности и закрываются импульсом отрицательной полярности, т.е. являются полностью управляемыми. Их использование в силовой преобразовательной технике очень перспективно, однако выпуск мощных запираемых тиристоров с требуемыми динамическими параметрами электронной промышленностью пока не освоен.

Раздел 3. Биполярные транзисторы

Тема 3.1. Структура и типы биполярных транзисторов

Биполярный транзистор — трёхэлектродный полупроводниковый прибор, один из типов транзистора. Электроды подключены к трём последовательно расположенным слоям полупроводника с чередующимся типом примесной проводимости. По этому способу чередования различают n-p-n и p-n-p транзисторы (n (negative) — электронный тип примесной проводимости, p (positive) — дырочный).

Работа биполярного транзистора основана на переносе зарядов одновременно двух типов, носителями которых являются электроны и дырки (от слова «би» — «два»). Схематическое устройство транзистора показано на втором рисунке.

Электрод, подключённый к среднему слою называют базой, электроды, подключённые ко внешним слоям, называют коллектором и эмиттером. С точки зрения типов проводимостей эмиттерный и коллекторный слои не различимы. Но практически, при изготовлении транзисторов, для улучшения электрических параметров прибора они существенно различаются степенью легирования примесями. Эмиттерный слой сильно легированный, коллекторный легируется слабо, что обеспечивает повышение допустимого коллекторного напряжения. Величина пробойного обратного напряжения эмиттерного перехода не критична, так как обычно в электронных схемах транзисторы работают с прямосмещенным эмиттерным P-n-переходом, кроме того, сильное легирование эмиттерного слоя обеспечивает лучшую инжекцию неосновных носителей в базовый слой, что увеличивает коэффициент передачи по току в схемах с общей базой. Кроме того, площадь коллекторного P-n-перехода при изготовлении делается существенно больше площади эмиттерного перехода, что обеспечивает лучший сбор неосновных носителей из базового слоя и улучшает коэффициент передачи.

Для повышения быстродействия (частотных параметров) биполярного транзистора толщину базового слоя нужно делать тоньше, так как толщиной базового слоя, в том числе, определяется время "пролета" (диффузии в бездрейфовых приборах) неосновных носителей, но, при снижении толщины базы, снижается предельное коллекторное напряжение, поэтому толщину базового слоя выбирают исходя из разумного компромисса.

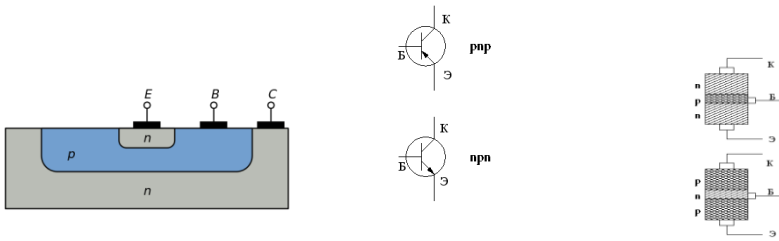
В первых транзисторах в качестве полупроводникового материала использовался металлический германий. В настоящее время их изготавливают в основном из монокристаллического кремния и монокристаллического арсенида галлия.

Типы биполярных транзисторов (БТ).

Биполярный транзистор состоит из трёх различным образом легированных полупроводниковых слоёв: эмиттера Е (Э), базы В (Б) и коллектора С (К). В зависимости от чередования типа проводимости этих слоёв различают n-p-n (эмиттер — n-полупроводник, база — p-полупроводник, коллектор — n-полупроводник) и p-n-p транзисторы. К каждому из слоёв подключены проводящие невыпрямляющие контакты.

Слой базы расположен между эмиттерным и коллекторным слоями и слабо легирован, поэтому имеет большое омическое сопротивление. Общая площадь контакта база-эмиттер выполняется значительно меньше площади контакта коллектор-база (это делается по двум причинам — большая площадь перехода коллектор-база увеличивает вероятность захвата неосновных носителей заряда из базы в коллектор и, так как в рабочем режиме переход коллектор-база обычно включен с обратным смещением, при работе в коллекторном переходе выделяется основная доля тепла, рассеиваемого прибором, повышение площади способствует лучшему отводу тепла от коллекторного перехода), поэтому реальный биполярный транзистор общего применения является несимметричным устройством (технически нецелесообразно менять местами эмиттер и коллектор и получить в результате аналогичный исходному биполярный транзистор — инверсное включение).

В активном усилительном режиме работы транзистор включён так, что его эмиттерный переход смещён в прямом направлении (открыт), а коллекторный переход смещён в обратном направлении (закрит).



Обозначение биполярных транзисторов на схемах Простейшая наглядная схема устройства транзистора

Тема 3.2. Режимы работы биполярного транзистора

Нормальный активный режим

Переход эмиттер-база включен в прямом направлении (открыт), а переход коллектор-база — в обратном (закрит)

$U_{ЭБ} > 0$; $U_{КБ} < 0$ (для транзистора p-n-p типа), для транзистора n-p-n типа условие будет иметь вид $U_{ЭБ} < 0$; $U_{КБ} > 0$.

Инверсный активный режим

Эмиттерный переход имеет обратное включение, а коллекторный переход — прямое.

Режим насыщения

Оба p-n перехода смещены в прямом направлении (оба открыты). Если эмиттерный и коллекторный p-n-переходы подключить к внешним источникам в прямом направлении, транзистор будет находиться в режиме насыщения. Диффузионное электрическое поле эмиттерного и коллекторного переходов будет частично ослабляться электрическим полем, создаваемым внешними источниками $U_{ЭБ}$ и $U_{КБ}$. В результате уменьшится потенциальный барьер, ограничивавший диффузию основных носителей заряда, и начнется проникновение (инжекция) дырок из эмиттера и коллектора в базу, то есть через эмиттер и коллектор транзистора потекут токи, называемые токами насыщения эмиттера ($I_{Э.нас}$) и коллектора ($I_{К.нас}$). Напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($U_{КЭ.нас}$) - это падение напряжения на открытом транзисторе (смысловый аналог $R_{СИ.отк}$ у полевых транзисторов). Аналогично напряжение насыщения база-эмиттер ($U_{БЭ.нас}$) - это падение напряжение между базой и эмиттером на открытом транзисторе.

Режим отсечки

В данном режиме коллекторный p-n переход смещён в обратном направлении, а на эмиттерный переход может быть подано как обратное, так и прямое смещение, не превышающее порогового значения, при котором начинается эмиссия неосновных носителей заряда в область базы из эмиттера (для кремниевых транзисторов приблизительно 0,6—0,7 В). Режим отсечки соответствует условию $U_{ЭБ} < 0,7$ В, или $I_{Б} = 0$.

Барьерный режим

В данном режиме база транзистора по постоянному току соединена накоротко или через небольшой резистор с его коллектором, а в коллекторную или в эмиттерную цепь транзистора включается резистор, задающий ток через транзистор. В таком включении транзистор представляет из себя своеобразный диод, включенный последовательно с токозадающим резистором. Подобные схемы каскадов отличаются малым количеством комплектующих, хорошей развязкой по высокой частоте, большим рабочим диапазоном температур, нечувствительностью к параметрам транзисторов.

Тема 3.3. Схемы включения биполярных транзисторов

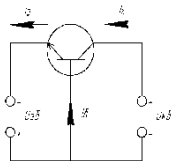
Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 часа).

Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями:

Коэффициент усиления по току $I_{ВЫХ}/I_{ВХ}$.

Входное сопротивление $R_{ВХ} = U_{ВХ}/I_{ВХ}$.

Схема включения с общей базой



Среди всех трех конфигураций обладает наименьшим входным и наибольшим выходным сопротивлением. Имеет коэффициент усиления по току, близкий к единице, и большой коэффициент усиления по напряжению. Фаза сигнала не инвертируется.

Коэффициент усиления по току: $I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{К}}/I_{\text{Э}} = \alpha [\alpha < 1]$.

Входное сопротивление $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} = U_{\text{ЭБ}}/I_{\text{Э}}$.

Входное сопротивление для схемы с общей базой мало и не превышает 100 Ом для маломощных транзисторов, так как входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

Достоинства:

Хорошие температурные и частотные свойства.

Высокое допустимое напряжение

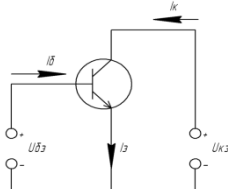
Недостатки схемы с общей базой:

Малое усиление по току, так как $\alpha < 1$

Малое входное сопротивление

Два разных источника напряжения для питания.

Схема включения с общим эмиттером



$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}}$$

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Б}}$$

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ЭБ}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{КЭ}}$$

Коэффициент усиления по току: $I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{К}}/I_{\text{Б}} = I_{\text{К}}/(I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}) = \alpha/(1 - \alpha) = \beta [\beta \gg 1]$.

Входное сопротивление: $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} = U_{\text{ЭБ}}/I_{\text{Б}}$.

Достоинства

Большой коэффициент усиления по току.

Большой коэффициент усиления по напряжению.

Наибольшее усиление мощности.

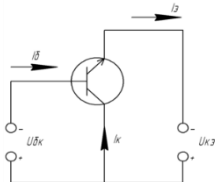
Можно обойтись одним источником питания.

Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

Недостатки

Худшие температурные и частотные свойства по сравнению со схемой с общей базой.

Схема включения с общим коллектором



$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{Э}}$$

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Б}}$$

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{БК}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{КЭ}}$$

Коэффициент усиления по току: $I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Э}}/I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}}/(I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}) = 1/(1 - \alpha) = \beta [\beta \gg 1]$.

Входное сопротивление: $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} = (U_{\text{ЭБ}} + U_{\text{КЭ}})/I_{\text{Б}}$.

Достоинства

Большое входное сопротивление.

Малое выходное сопротивление.

Недостатки

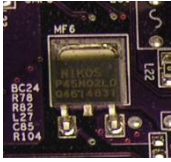
Коэффициент усиления по напряжению меньше 1.

Схему с таким включением называют «эмиттерным повторителем».

Раздел 4. Полевые транзисторы

Тема 4.1. Структура и типы полевых транзисторов

Полевой транзистор — полупроводниковый прибор, через который протекает поток основных носителей зарядов, регулируемый поперечным электрическим полем, которое создается напряжением, приложенным между затвором и стоком или между затвором и истоком.



Структура ПТ

Полупроводниковые материалы, преимущественно применяемые в транзисторах это: **кремний, арсенид галлия и германий**. Также существуют транзисторы на **углеродных нанотрубках, прозрачные** для дисплеев **LCD** и **полимерные** (наиболее перспективные). Три контакта полевых транзисторов называются **исток** (источник носителей тока), **затвор** (управляющий электрод) и **сток** (электрод, куда стекают носители).

2. Типы полевых транзисторов

МДП-структуры специального назначения

В структурах типа металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) диэлектрик под затвором выполняется двухслойным: слой оксида SiO_2 и толстый слой нитрида Si_3N_4 . Между слоями образуются ловушки электронов, которые при подаче на затвор МНОП-структуры положительного напряжения (28...30 В) захватывают туннелирующие через тонкий слой SiO_2 электроны. Образующиеся отрицательно заряженные ионы повышают пороговое напряжение, причём их заряд может храниться до нескольких лет при отсутствии питания, так как слой SiO_2 предотвращает утечку заряда. При подаче на затвор большого отрицательного напряжения (28...30 В), накопленный заряд рассасывается, что существенно уменьшает пороговое напряжение.

МОП-структуры

Структуры типа металл-оксид-полупроводник (МОП) с плавающим затвором и лавинной инжекцией (**ЛИЗМОП**) имеют затвор, выполненный из поликристаллического кремния, изолированный от других частей структуры. Лавинный пробой р-п-перехода подложки и стока или истока, на которые подаётся высокое напряжение, позволяет электронам проникнуть через слой оксида на затвор, вследствие чего на нём появляется отрицательный заряд. Изолирующие свойства диэлектрика позволяют сохранять этот заряд десятки лет. Удаление электрического заряда с затвора осуществляется с помощью ионизирующего ультрафиолетового облучения кварцевыми лампами, при этом фототок позволяет электронам рекомбинировать с дырками.

Структуры запоминающих полевых транзисторов с двойным затвором

В дальнейшем были разработаны структуры запоминающих полевых транзисторов с двойным затвором. Встроенный в диэлектрик затвор используется для хранения заряда, определяющего состояние прибора, а внешний (обычный) затвор, управляемый разнополярными импульсами для ввода или удаления заряда на встроенном (внутреннем) затворе. Так появились ячейки, а затем и микросхемы флэш-памяти, получившие в наши дни большую популярность и составившие заметную конкуренцию жестким дискам в компьютерах.

Условно-графическое обозначение ПТ



Рис. 1 - Условное графическое обозначение полевого транзистора с р-п-переходом и каналом п-типа



Рис. 2 - Условное графическое обозначение полевого транзистора с р-п-переходом и каналом р-типа



Рис. 3 - Условное графическое обозначение полевого транзистора со встроенным р-каналом обедненного типа



Рис. 4 - Условное графическое обозначение полевого транзистора со встроенным п-каналом обогащенного типа



Рис. 5 - Условное графическое обозначение полевого транзистора с индуцированным р-каналом обогащенного типа



Рис. 6 - Условное графическое обозначение полевого транзистора с индуцированным p-каналом обогащенного типа

Тема 4.2. Рабочий процесс ПТ

Рабочий процесс ПТ

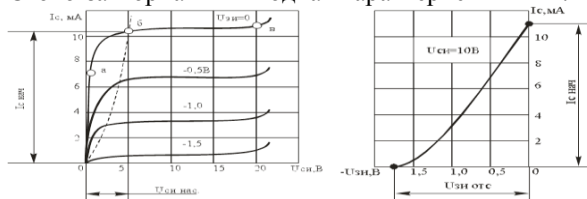
Процесс включения

Процесс включения полевого транзистора может быть разбит на четыре временных интервала. На первом интервале заряжается входная емкость транзистора от 0В до V_{TH} . В течении этого периода большинство затворного тока идет на заряд конденсатора CGS, и небольшой ток течет через конденсатор CGD (напряжение на затворе увеличивается и напряжение на CGD слегка уменьшается). Этот интервал известен как задержка включения, поскольку не изменяется ни ток через транзистор, ни напряжение на нем. Как только напряжение на затворе достигает порогового уровня, транзистор начинает проводить ток. На втором интервале входное напряжение возрастает от V_{TH} до уровня плато Миллера, $V_{GS,Miller}$. Это чисто линейный режим работы транзистора - выходной ток прямо пропорционален входному напряжению. На стороне затвора, как и в первом интервале, ток течет через CGS и CGD, на выходе через транзистор начинает протекать ток, а напряжение на стоке остается неизменным на уровне $V_{DS,off}$. Этот эффект становится понятен, если взглянуть на схему на рис. 3. Транзистор еще не способен пропустить ток, достаточный для снижения напряжения на его стоке до уровня запирающего диода, и через его открытый переход напряжение на стоке зафиксировано на уровне входного напряжения. Третий период начинается, когда напряжение на затворе достигает величины $V_{GS,Miller}$, достаточной для начала прохождения тока через транзистор, и выходной диод закрывается. Соответственно, напряжение на стоке начинает падать, но напряжение на затворе остается постоянным. Этот процесс и образует плато Миллера на диаграмме включения полевого транзистора. Весь ток, на который способен драйвер, идет на перезаряд емкости CGD для обеспечения максимально быстрого изменения напряжения сток-исток. Ток через транзистор теперь остается постоянным и ограничен внешними элементами схемы, в нашем случае величиной IDC. Последний интервал процесса включения полевого транзистора характеризуется максимальным уменьшением сопротивления канала из-за дальнейшего увеличения управляющего напряжения. Напряжение на затворе увеличивается от $V_{GS,Miller}$ до своего максимального значения VRDV, и весь входной ток идет на дальнейший заряд CGS и перезаряд CGD. Выходной ток при этом остается неизменным, а напряжение сток-исток немного уменьшается, поскольку уменьшается сопротивление канала.

Процесс выключения

Процесс выключения полевого транзистора можно разбить на те же самые четыре шага, что и процесс включения, но только в обратном порядке. Перед началом процесса транзистор пропускает через себя весь ток нагрузки, в нашем примере IDC, и напряжение на нем определяется падением от тока нагрузки на сопротивлении открытого канала $R_{DS(on)}$. Первый интервал, известный как задержка выключения, характеризуется разрядом входной емкости транзистора CISS с начального уровня до уровня плато Миллера. Ток драйвера протекает через паразитные конденсаторы CGS и CGD. Ток через транзистор остается неизменным, а напряжение сток-исток слегка увеличивается (из-за увеличения сопротивления открытого канала). Во время второго интервала, относящемуся к плато Миллера на диаграмме, напряжение сток-исток транзистора увеличивается со значения $ID \cdot R_{DS(on)}$ до максимального значения, в нашем случае до уровня выходного напряжения, после чего открывается демпфирующий диод. Весь ток драйвера идет на перезаряд конденсатора CGD, поскольку напряжение на затворе остается постоянным, а напряжение на стоке возрастает. Также, этот ток протекает через конденсатор фильтра на VDRV, и вычитается из тока стока. Общий ток стока равен току нагрузки, в нашем примере IDC на рис. 3. Третий интервал начинается с момента открывания диода и образования альтернативного пути для тока нагрузки. Напряжение на затворе падает от $V_{GS,Miller}$ до V_{TH} , и основной ток драйвера идет на разряд емкости CGS, поскольку CGD оказался практически полностью перезаряженным в течении предыдущего периода. Транзистор находится в линейном режиме, и уменьшение напряжения исток-затвор приводит к уменьшению тока стока, который падает практически до нуля в конце интервала. Напряжение на стоке транзистора остается постоянным, "привязанным" через открытый диод к выходному напряжению. Последний, четвертый, период характеризуется неизменными напряжением и током через транзистор. Входная емкость его (как и в предыдущем периоде в основном образованная конденсатором CGS) продолжает разряжаться до нуля.

Стоко-затворная и выходная характеристики ПТ.



Выходной (стоковой) называется зависимость тока стока от напряжения исток-сток при константном напряжении затвор-исток. На рисунке — график слева. На графике можно четко выделить три зоны. Первая из них — зона резкого возрастания тока стока. Это так называемая «**омическая**» область. Канал «исток-сток» ведет себя как резистор, чье сопротивление управляется напряжением на затворе транзистора. Вторая зона — **область насыщения**. Она имеет почти линейный вид. Здесь происходит перекрытие канала в области стока, которое увеличивается при дальнейшем росте напряжения исток-сток. Соответственно, растет и сопротивление канала, а стоковый ток меняется очень слабо (закон Ома, однако). Именно этот участок характеристики используют в усилительной технике, поскольку здесь наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров, существенных для усиления. К таким параметрам относятся крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления. Значения всех этих непонятных словосочетаний будут раскрыты ниже. Третья зона графика — **область пробоя**, чье название говорит само за себя.

С правой стороны рисунка показан график еще одной важной зависимости — **стоко-затворной характеристики**. Она показывает то, как зависит ток стока от напряжения затвор-исток при постоянном напряжении между истоком и стоком. И именно ее крутизна является одним из основных параметров полевого транзистора.

Тема 4.2. МДП-транзисторы

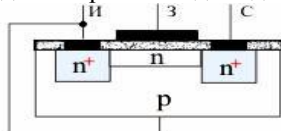
МДП-структуры В структурах типа металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) диэлектрик под затвором выполняется двухслойным: слой оксида SiO_2 и толстый слой нитрида Si_3N_4 . Между слоями образуются ловушки электронов, которые при подаче на затвор МНОП-структуры положительного напряжения (28..30 В) захватывают туннелирующие через тонкий слой SiO_2 электроны. Образующиеся отрицательно заряженные ионы повышают пороговое напряжение, причём их заряд может храниться до нескольких лет при отсутствии питания, так как слой SiO_2 предотвращает утечку заряда. При подаче на затвор большого отрицательного напряжения (28...30 В), накопленный заряд рассасывается, что существенно уменьшает пороговое напряжение.

Структуры типа металл-оксид-полупроводник (МОП) с плавающим затвором и лавинной инжекцией (ЛИЗМОП) имеют затвор, выполненный из поликристаллического кремния, изолированный от других частей структуры. Лавинный пробой р-п-перехода подложки и стока или истока, на которые подаётся высокое напряжение, позволяет электронам проникнуть через слой оксида на затвор, вследствие чего на нём появляется отрицательный заряд. Изолирующие свойства диэлектрика позволяют сохранять этот заряд десятки лет. Удаление электрического заряда с затвора осуществляется с помощью ионизирующего ультрафиолетового облучения кварцевыми лампами, при этом фототок позволяет электронам рекомбинировать с дырками.

В дальнейшем были разработаны структуры запоминающих полевых транзисторов с двойным затвором. Встроенный в диэлектрик затвор используется для хранения заряда, определяющего состояние прибора, а внешний (обычный) затвор, управляемый разнополярными импульсами для ввода или удаления заряда на встроенном (внутреннем) затворе. Так появились ячейки, а затем и микросхемы флэш-памяти, получившие в наши дни большую популярность и составившие заметную конкуренцию жестким дискам в компьютерах.

Особенности полевых транзисторов с изолированным затвором

Такие транзисторы также часто называют МДП (металл-диэлектрик-полупроводник)- или МОП (металл-оксид-полупроводник)-транзисторами (англ. metall-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET). У таких устройств затвор отделен от канала тонким слоем диэлектрика. Физической основой их работы является эффект изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием поперечного электрического поля.

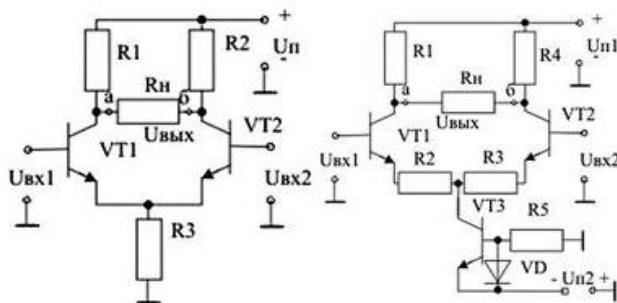


Устройство транзисторов такого вида следующее. Есть подложка из полупроводника с р-проводимостью, в которой сделаны две сильно легированные области с n-проводимостью (исток и сток). Между ними пролегает узкая приповерхностная перемычка, проводимость которой также n-типа. Над ней на поверхности пластины имеется тонкий слой диэлектрика (чаще всего из диоксида кремния — отсюда, кстати, аббревиатура МОП). А уже на этом слое и расположен затвор — тонкая металлическая пленка. Сам кристалл обычно соединен с истоком, хотя бывает, что его подключают и отдельно. Если при нулевом напряжении на затворе подать напряжение исток-сток, то по каналу между ними потечет ток. Почему не через кристалл? Потому что один из р-п переходов будет закрыт. А теперь подадим на затвор отрицательное относительно истока напряжение. Возникшее поперечное электрическое поле «вытолкнет» электроны из канала в подложку. Соответственно, возрастет сопротивление канала и уменьшится текущий через него ток. Такой режим, при котором с возрастанием напряжения на затворе выходной ток падает, называют **режимом обеднения**. Если же мы подадим на затвор напряжение, которое будет способствовать возникновению «помогающего» электронам поля «приходить» в канал из подложки, то транзистор будет работать в **режиме**

обогащения. При этом сопротивление канала будет падать, а ток через него расти. Рассмотренная выше конструкция транзистора с изолированным затвором похожа на конструкцию с управляющим p-n переходом тем, что даже при нулевом токе на затворе при ненулевом напряжении исток-сток между ними существует так называемый **начальный ток стока**. В обоих случаях это происходит из-за того, что канал для этого тока встроен в конструкцию транзистора. Т.е., строго говоря, только что мы рассматривали такой подтип МДП-транзисторов, как **транзисторы с встроенным каналом**.

Раздел 5. Усилители электрических сигналов

Тема 5.1. Симметричный дифференциальный усилитель



Высокая температурная стабильность, большое входное сопротивление ОУ обеспечивается использованием во входной цепи дифференциального усилительного каскада. Рассмотрим подробнее работу такого усилителя.

Дифференциальный усилитель построен по принципу четырехплечего моста. Баланс моста не нарушается при изменении напряжения питания и одинаковом изменении сопротивлений. В дифференциальном усилителе, указанном на рисунке, плечи моста представлены резисторами R1 и R2 и транзисторами VT1 и VT2. Резисторы R1 и R2 должны быть равны по величине, а транзисторы VT1 и VT2 - одного типа и иметь одинаковые параметры и режимы работы. Выходной сигнал снимается с одной из диагоналей (коллекторы транзисторов), а питание подается на вторую диагональ. Усилитель имеет два входа.

Если входные сигналы равны нулю, то токи транзисторов одинаковы, одинаковы и потенциалы коллекторов ($j_a = j_b$), т.е. $U_{\text{вых}} = j_a - j_b = 0$

При повышении температуры или питающего напряжения токи транзисторов возрастут одинаково, потенциалы их коллекторов одинаково уменьшатся: выходное напряжение не изменится ($U_{\text{вых}} = 0$)

$$j_a = U_{кэ1} + UR3 = U_n - UR1;$$

$$j_b = U_{кэ2} + UR3 = U_n - UR2;$$

$$U_{\text{вых}} = j_a - j_b = U_{кэ1} - U_{кэ2}.$$

Из этого следует, что $U_{\text{вых}}$ не зависит от величины сопротивления R3. Для усилителя на VT1 и на VT2 сопротивление R3 создает ООС. Так как $U_{\text{вых}}$ не зависит от R3, то его можно увеличивать, тем самым увеличивая глубину ООС, а увеличение ООС стабилизирует параметры усилителя. Любые одновременные изменения токов транзисторов вызовут увеличение падения напряжения на R3 и, следовательно, уменьшение напряжения $U_{бэ1}$ и $U_{бэ2}$, которые стремятся вернуть коллекторные токи к исходному состоянию. Таким же образом дифференциальный каскад реагирует на синфазные сигналы и помеху, т.е. входные сигналы, которые одновременно (без сдвига фаз) и одинаково ($U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}}$) действуют на оба входа.

При подаче сигнала на первый вход (второй вход соединен с общей шиной) увеличивается ток первого транзистора - это вызовет уменьшение j_a и одновременное увеличение j_b , так как от тока $DI_{к1}$ на R3 создается напряжение закрывающее VT2. При этом выходное напряжение $U_{\text{вых}} = j_a - j_b$ будет отрицательным, т.е. в противофазе с входным. В связи с этим, вход 1 называют инвертирующим. При подаче сигнала на второй вход (первый вход соединен с общей шиной) j_b - уменьшается, j_a - возрастает, выходное напряжение будет в фазе с входным и поэтому второй вход называют неинвертирующим.

Если входные сигналы на каскад подаются в противофазе, например, $U_{\text{вх1}} = +U_{\text{вх}}$, а $U_{\text{вх2}} = -U_{\text{вх}}$, то в этом случае ток $I_{к1}$ возрастает на DI , а $I_{к2}$ уменьшается на DI ; сумма этих токов в R3 останется неизменной. Поэтому обратная связь не уменьшает изменение токов и каждое плечо ведет себя как обычная схема с общим эмиттером. При этом j_a понижается, а j_b - повышается, т.е. данная схема реагирует на разность входных сигналов, почему каскад и называется дифференциальным.

Для выполнения требования симметричности характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ и облегчения процесса выравнивания исходных потенциалов (в режиме покоя) относительно общей шины питания дифференциальных каскадов осуществляют от двух разнополярных напряжений. Так как U_{n2} зафиксировано по величине, то это ограничивает величину R3, из-за трудностей в обеспечении режима работы транзисторов по постоянному току

$$U_{бэ} = U_{н2} - (I_{э1} + I_{э2})R_3.$$

В связи с этим, в качестве R_3 в дифференциальных усилителях чаще всего используют динамическую нагрузку, обладающую малым сопротивлением постоянному току и большим – переменному. Динамическая нагрузка выполнена на VT_3 , R_5 , VD (рисунок 9.3б). Резисторы R_2 и R_3 небольшой величины служат для симметрирования каскада и подбираются в процессе регулировки.

При построении усилителя на транзисторах следует учитывать тот факт что полупроводники на самом деле довольно капризная штука:

во-первых: параметры транзистора очень сильно зависят от внешних факторов (в частности от температуры) и поэтому требуется стабилизация режима их работы за счет введения обратных связей.

во-вторых: у одного и того же типа транзисторов может наблюдаться большой разброс параметров, что опять же требует введение цепей стабилизации.

Но при увеличении ООС в транзисторном каскаде теряется его КПД: увеличивается ток потребления от источника тока и снижается коэффициент усиления.

Кроме этого имеется еще один параметр, который стоит учитывать при создании транзисторного усилителя - это входное сопротивление. "Входным сопротивлением" называют сопротивление, оказываемое для входящего переменного тока.

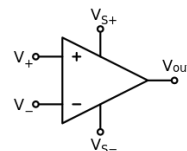
Другими словами - входящий сигнал встречает некую нагрузку, уменьшающую его амплитуду. И чем ниже это сопротивление тем больше потери. Поэтому для сигналов с низкой амплитудой требуется усилитель с большим входным сопротивлением.

Для примера: входное сопротивление каскада, выполненного по схеме ОЭ ниже чем у каскада по схеме ОК. И хотя схема ОК имеет коэффициент усиления ниже чем ОЭ, для слабого входного сигнала она более приемлема.

При всех достоинствах дифференциального каскада у него есть и небольшой минус: для достижения высокого входного сопротивления требуется увеличение эмиттерной нагрузки ($R_э$), но при сильно большом сопротивлении этого резистора на нем ограничивается падение напряжения, и следовательно возникает необходимость в увеличении питания. Поэтому для таких случаев (когда требуется высокое входное сопротивление каскада при неизменном питании) применяется небольшая "техническая хитрость", а именно: в качестве эмиттерной нагрузки используется еще один транзистор с отдельной регулировкой- так называемый "источник тока" или "токовое зеркало".

Тема 5.2. Операционные усилители

Операционный усилитель (ОУ, OpAmp) — усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и, как правило, единственным выходом, имеющий высокий коэффициент усиления. ОУ почти всегда используются в схемах с глубокой отрицательной обратной связью, которая, благодаря высокому коэффициенту усиления ОУ, полностью определяет коэффициент передачи полученной схемы.



В настоящее время ОУ получили широкое применение, как в виде отдельных чипов, так и в виде функциональных блоков в составе более сложных интегральных схем. Такая популярность обусловлена тем, что ОУ является универсальным блоком с характеристиками, близкими к идеальным, на основе которого можно построить множество различных электронных узлов.

На рисунке показано схематичное изображение операционного усилителя. Выводы имеют следующее значение:

V_+ : неинвертирующий вход

V_- : инвертирующий вход

V_{out} : выход

V_{S+} : плюс источника питания (также может обозначаться как V_{DD} , $V_{EE}V_{CC}$, или V_{CC+})

V_{S-} : минус источника питания (также может обозначаться как V_{SS} , , или V_{CC-})

Указанные пять выводов присутствуют в любом ОУ, они необходимы для его функционирования. Однако, существуют операционные усилители, не имеющие неинвертирующего входа. В частности, такие ОУ находят применение в аналоговых вычислительных машинах (АВМ). ОУ, применяемые в АВМ, принято делить на 5 классов, из которых ОУ первого и второго класса имеют только один вход. Операционные усилители первого класса — усилители высокой точности (УВТ) с одним входом. Они предназначены для работы в составе интеграторов, сумматоров, устройств слежения-хранения, электронных коэффициентов. Высокий коэффициент усиления, предельно малые значения смещения нуля, входного тока и дрейфа нуля, высокое быстродействие обеспечивают снижение погрешности, вносимой усилителем, ниже 0,01 %. Операционные усилители второго класса — усилители средней точности (УСТ) также с одним входом, обладающие меньшим коэффициентом усиления и большими значениями смещения и дрейфа нуля. Эти ОУ предназначены для применения в составе электронных устройств установки коэффициентов, инверторов, электронных переключателей, в функциональных преобразователях, множительных устройствах. Помимо

этого, некоторые ОУ могут иметь дополнительные выводы (предназначенные, например, для установки тока покоя, частотной коррекции, балансировки или других функций).

Выводы питания ($VS+$ и $VS-$) могут быть обозначены по-разному. Часто выводы питания не рисуют на схеме, чтобы не загромождать её несущественными деталями, при этом способ подключения этих выводов явно не указывается или считается очевидным (особенно часто это происходит при изображении одного усилителя из микросхемы с четырьмя усилителями с общими выводами питания). При обозначении ОУ на схемах можно менять местами инвертирующий и неинвертирующий входы, если это удобно; выводы питания, как правило, всегда располагают единственным способом (положительный вверху).

Тема 5.2 Компаратор

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Компаратор (compare – сравнивать) – устройство, сравнивающее два напряжения – входное $U_{вх}$ с опорным $U_{оп}$. Опорное напряжение представляет собой неизменное по величине напряжение положительной или отрицательной полярности, входное напряжение изменяется во времени. Простейшая схема компаратора на операционном усилителе приведена на рисунке 6, а. Если $U_{вх} > U_{оп}$ на выходе $U_{вых}$ –нас (рис. 6, б).

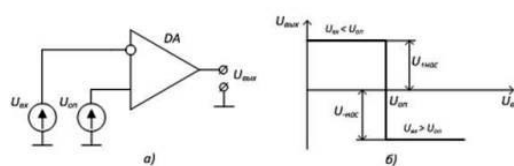


Рисунок 6 – Компаратор на ОУ: а) простейшая схема б) характеристика работы

Компаратор с положительной обратной связью называется триггером Шмитта. Если у компаратора переключение с «1» на «0» и обратно происходит при одном и том же напряжении, то у триггера Шмитта - при разных напряжениях. Опорное напряжение создает цепь ПОС $R1R2$, входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ. На рисунке 7, б, приведена передаточная характеристика триггера Шмитта.

При отрицательном напряжении на инвертирующем входе ОУ $U_{вых} = U_{насл}$. Значит на неинвертирующем входе действует положительное напряжение. При увеличении входного напряжения в момент $U_{вх} > U_{неинв.}$ ($U_{сп}$ – срабатывания) компаратор переключается в состояние $U_{вых} = U_{насл}$. На неинвертирующем входе действует отрицательное напряжение. Соответственно при уменьшении входного напряжения в момент $U_{вх} < U_{неинв.}$ ($U_{сп}$ – срабатывания) компаратор переключается в состояние $U_{вых} = U_{насл}$.

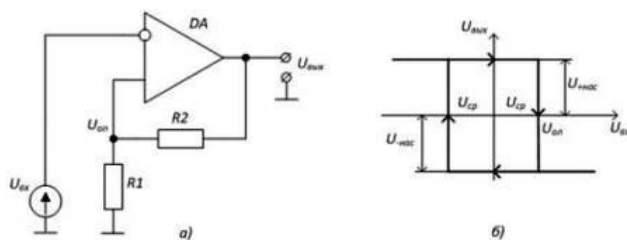


Рисунок 7 – Триггер Шмитта на ОУ: а) простейшая схема б) характеристика работы

Компараторы занимают промежуточное положение между аналоговыми и цифровыми микросхемами и являются простейшими АЦП. По массовости применения в микроэлектронной аппаратуре и номенклатуре компараторы уступают среди аналоговых микросхем только ОУ. Компараторы можно отнести к специализированным ОУ, в которых нормальным является нелинейный режим работы каскадов. Компараторы предназначены для сравнения входного сигнала с опорным. При этом в зависимости от того, больше входной сигнал опорного или меньше (на доли милливольт), на выходе компаратора за минимальное время должно установиться напряжение лог.0 или лог.1. Приемниками выходных сигналов компараторов обычно являются логические схемы. Поэтому выходные напряжения каждого компаратора согласуются с ТТЛ, ТЛЭС или КМОП схемами. Подобно ОУ в компараторе обычно три каскада: входной дифференциальный усилитель, промежуточный усилитель и выходной формирователь ВФ. Основные схемотехнические различия современных компараторов заключены в ВФ. Последний может быть эмиттерным повторителем (K521CA2, K521CA1, K521CA5), с одним входом (K521CA3) или дифференциальным (K597CA1) усилителем, логическим элементом (K597CA2, K521CA4) и т.д. Однако

независимо от конструкции ВФ должен быть усилителем мощности, формирующим на выходе компаратора соответствующие уровни напряжений U_0 или U_1 . Основные отличия схемотехники компараторов от ОУ: 1. Т.к. компараторы не предназначены для работы с обратной связью, то в них отсутствует частотная коррекция. 2. В отличие от ОУ, которые являются линейными элементами, в компараторах может использоваться дозированная положительная обратная связь для повышения быстродействия и в этом случае на выходе компаратора при любом входном напряжении может быть только одно из двух напряжений, соответствующих высокому и низкому уровню. 3. В компараторах применены специальные методы по повышению быстродействия (например, транзисторы Шотки и др.). 4. Выходной каскад спроектирован таким образом, чтобы согласовываться как по уровню, так и по току с цифровыми микросхемами. В лабораторной работе исследуются статические и динамические характеристики интегрального компаратора К554СА3, имеющего следующие параметры: $E_{CM} = 3 \text{ мВ}$ $I_{BX} = 0.1 \text{ мкА}$ $\Delta I_{BX} = 0.01 \text{ мкА}$ $t_{ЗАД.ПЕР} = 200 \text{ нс}$

Схема включения

Если входной сигнал будет изменяться очень медленно, то при достижении уровня входного сигнала опорному, выход компаратора может многократно с большой частотой менять свое состояние под действием незначительных помех (так называемый "дребезг"). Для устранения этого явления в схему компаратора вводят положительную обратную связь (ПОС), которая обеспечивает характеристике компаратора небольшой гистерезис, то есть небольшую разницу между входными напряжениями включения и отключения компаратора. Некоторые типы компараторов уже имеют встроенную, упомянутую выше ПОС. Её можно так же ввести в схему компаратора при необходимости, например, как изображено на рисунке ниже.

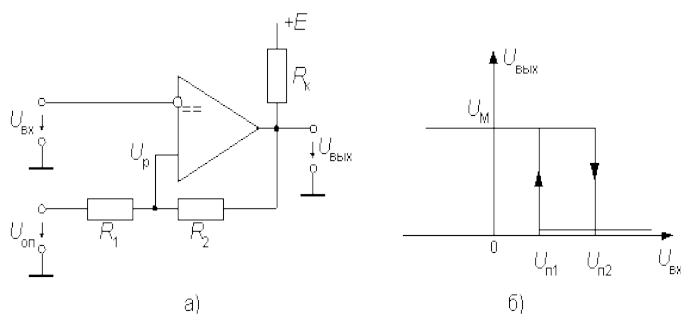


Схема включения в компаратор ПОС (гистерезиса).

На рисунке приведена схема включения компаратора с открытым коллектором на выходе, переходная характеристика которой имеет гистерезис (рис. 3б).

Пороговые напряжения для этой схемы определяются по формулам;

$$U_{п1} = \frac{U_{оп} R_2}{R_1 + R_2} \quad U_{п2} = \frac{ER_1 + U_{оп}(R_2 + R_k)}{R_1 + R_2 + R_k}$$

Хотя гистерезис вносит небольшую задержку в переключении компаратора, но благодаря ему, существенно уменьшается или даже устраняется полностью "дребезг" выходного напряжения. Для выходных сигналов пониженного напряжения (OUTA) и перенапряжения (OUTB) активным уровнем сигнала является низкий, о чем говорит подчеркивание сигналов сверху. Иногда для этих целей используется знак « - » или « / » перед названием сигнала. Эти сигналы можно назвать аварийными. Сигнал POWER GOOD получается на выходе логического элемента И, когда оба сигнала аварии имеют уровень логической единицы. Активным уровнем сигнала POWER GOOD является высокий уровень. Если хотя бы один из аварийных сигналов имеет низкий уровень, то сигнал POWER GOOD исчезнет, - станет тоже низким. Это лишний раз дает возможность убедиться, что логическая схема И для низких уровней является логическим ИЛИ.

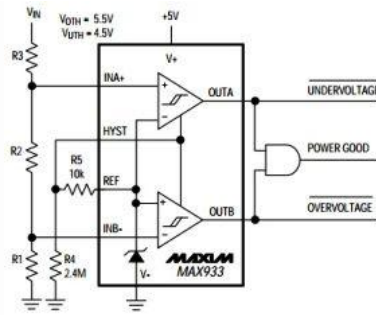


Рисунок Схема компаратора

Принцип работы

Для того, чтобы продемонстрировать, как работает быстродействующий компаратор с гистерезисом, нужно взять схему с двумя выходами. Схема включения, по которой можно понять принцип работы компаратора, показана выше. Используя аналоговый сигнал во + входе, именуемым «неинвертируемым», и выходе, который называется под названием «инвертируемый», устройство использует два аналоговых разнополярных сигнала. При этом если аналоговый вход больше, чем аналоговый выход, то выход будет «1», и это включит открытый коллектор транзистора Q8 на эквивалентной схеме LM339, которую нужно включить. Но, если вход находится на отрицательном уровне, то сигнал будет равняться «0», из-за чего, коллектор будет находиться в закрытом виде

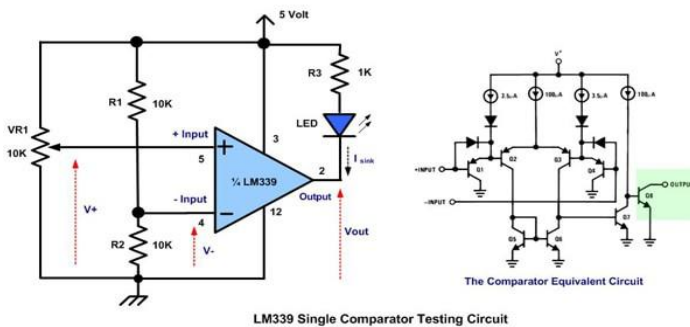
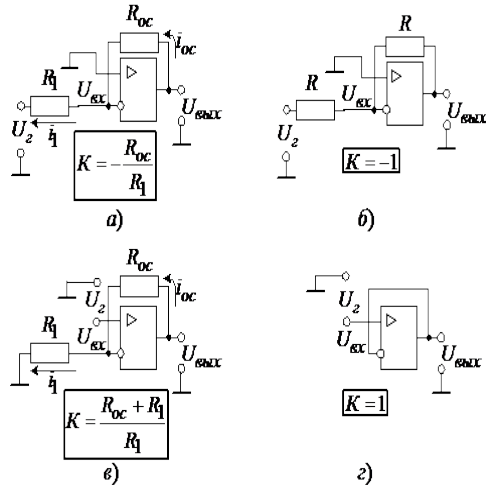


Фото — Схема работы компаратора

Практически всегда двухпороговый или фазовый компаратор (например, на транзисторах, без усилителя) воздействует на входы в логических цепях, соответственно, работает по уровню определенной сети питания. Это своеобразный элемент перехода между аналоговыми и цифровыми сигналами. Такой принцип действия позволяет не уточнять определенность или неопределенность выходов сигналов, т. к. компаратор всегда имеет некий захват петли гистерезиса (независимо от её уровня) или окончательный коэффициент усиления.

Тема 5.4. Инвертирующий и неинвертирующий усилители.



Инвертирующее (а, б) и не инвертирующее (в, г) включения операционных усилителей

В соответствии с обозначениями на рисунке через сопротивление обратной связи R_{OC} протекает ток

$$\bar{i}_{OC} = \frac{u_{вых} - u_{(-)}}{R_{OC}}$$

через R_1 – ток

$$\bar{i}_1 = \frac{u_r - u_{(-)}}{R_1}$$

В случае идеального ОУ, входное сопротивление которого стремится к бесконечности, а следовательно, ток, втекающий в ОУ, равен нулю, можно записать, что $I_{OC} = -i_1$, следовательно:

$$\frac{u_{вых} - u_{(-)}}{R_{OC}} = \frac{u_{(-)} - u_r}{R_1} \quad (3.1)$$

Напряжение на неинвертируемом входе равно нулю, поэтому $u_{(-)} = u_{вх} = 0$ и из (3.1) получаем

$$u_{вых} = -\frac{R_{OC}}{R_1} u_r$$

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя с параллельной обратной связью $K_{УИ} = u_{вых} / u_r$ определяется параметрами только пассивной части схемы:

$$K_{УИ} = -\frac{R_{OC}}{R_1}$$

Выбор $R_{OC} = R_1$, когда $K_{УИ} = -1$ (рис. 3.5, б), придает схеме инвертирующего усилителя свойство инвертирующего повторителя напряжения (инвертора сигнала).

Неинвертирующий усилитель (рис. 3.5, в) содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению, поданную по инвертирующему входу.

Согласно обозначениям на рисунке

$$\bar{i}_{OC} = \frac{u_{вых} - u_{(-)}}{R_{OC}}; \quad \bar{i}_1 = \frac{u_{(-)}}{R_1}$$

Для идеального ОУ, с учетом того, что $i_{OC} = i_1$, можно записать:

$$u_{вых} = \frac{R_{OC} + R_1}{R_1} u_{(-)} \Big|_{u_{вх}=0} = \frac{R_{OC} + R_1}{R_1} u_r$$

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению неинвертирующего усилителя с параллельной обратной связью $K_{УИ} = u_{вых} / u_{вх}$ также как и в инвертирующем усилителе определяется параметрами только пассивной части схемы:

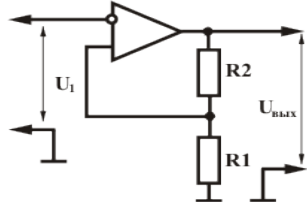
$$K_{УИ} = -\frac{R_{OC}}{R_1} + 1$$

Если замкнуть выход ОУ в его инвертирующим входом (рис. 3.5, г), можно получить повторитель напряжения. (Интегральный повторитель)

Схемы включения

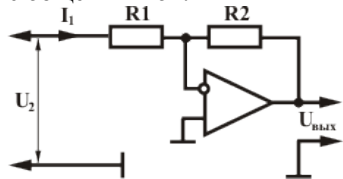
Неинвертирующее включение операционного усилителя — это такое включение, при котором входной сигнал поступает на неинвертирующий вход ОУ, а на инвертирующий вход через делитель на резисторах R_1 и R_2 поступает сигнал с выхода усилителя. В приведенной ниже схеме коэффициент усиления схемы K будет определяться следующим выражением:

$$K = U_{\text{вых}}/U_1 = 1 + R_2/R_1$$



В такой схеме выходной сигнал совпадает по фазе с входным. Коэффициент усиления по напряжению не может быть меньше единицы. В предельном случае, если выход ОУ накоротко соединен с инвертирующим входом без сопротивления R_2 — коэффициент K равен единице. Такие схемы называют неинвертирующими повторителями, или просто повторителями.

Инвертирующее включение ОУ такое включение, при котором неинвертирующий вход ОУ соединяется с общей шиной.



Коэффициент усиления будет определяться соотношением:

$$K = U_{\text{вых}}/U_2 = R_2/R_1$$

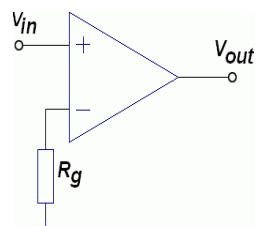
Выходное напряжение усилителя этой схемы находится в противофазе по отношению ко входному. Следует учитывать, что коэффициент усиления входного сигнала по напряжению в таком включении зависит от соотношения сопротивлений резисторов может быть как больше, так и меньше единицы.

Принцип работы

Дифференциальные входы усилителя состоят из двух выводов - V_+ и V_- , идеальный операционный усилитель усиливает только разницу напряжений между двумя этими входами, эта разница называется дифференциальным напряжением на входе. Напряжение на выходе операционного усилителя определяется формулой

$$V_{\text{out}} = A_{\text{OL}} (V_+ - V_-)$$

где V_+ - напряжение на неинвертирующем (прямом) входе, V_- - напряжение на инвертирующем (инверсном) входе, и A_{OL} - коэффициент усиления усилителя с разомкнутой петлей обратной связи (то есть обратная связь от выхода ко входу отсутствует).



Тема 5.5. Таймер

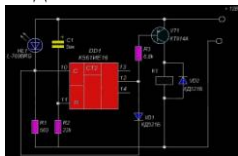
Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Во многих программах требуется следить за временем или выполнять какие-либо периодические действия. Программы MS-DOS для работы с таймером перехватывали аппаратное прерывание таймера, встраивая свой собственный обработчик для прерывания INT 8h. Обычные приложения Windows не могут самостоятельно обрабатывать прерывания таймера, поэтому для работы с ним нужно использовать другие способы. Операционная система Windows позволяет для каждого приложения создать несколько виртуальных таймеров. Все эти таймеры работают по прерываниям одного физического таймера. Так как работа Windows основана на передаче сообщений, логично было бы предположить, что и работа виртуального таймера также основана на передаче сообщений. И в самом деле, приложение может заказать для любого своего окна несколько таймеров, которые будут периодически посылать в функцию окна

сообщение с кодом WM_TIMER. Есть и другой способ, также основанный на передаче сообщений. При использовании этого способа сообщения WM_TIMER посылаются не функции окна, а специальной функции, описанной с ключевым словом `_export`. Эта функция напоминает функцию окна и, так же как и функция окна, вызывается не из приложения, а из Windows. Функции, которые вызываются из Windows, имеют специальный пролог и эпилог и называются функциями обратного вызова (callback function). Функция окна и функция, специально предназначенная для обработки сообщений таймера, являются примерами функций обратного вызова. К сожалению, точность виртуального таймера оставляет желать лучшего. Сообщения таймера проходят через очередь приложения, к тому же другое приложение может блокировать на некоторое время работу вашего приложения. Поэтому сообщения от таймера приходят в общем случае нерегулярно. Кроме того, несмотря на возможность указания интервалов времени в миллисекундах, реальная дискретность таймера определяется периодом прерываний, посылаемых таймером. Этот период (то есть длительность одного такта таймера) можно узнать с помощью функции `GetTimerResolution`: Нерегулярность прихода сообщений таймера не вызывает особых проблем, если речь не идет о работе в режиме реального времени. Системы реального времени, основанные на Windows, должны использовать для устройств ввода/вывода, критичных к скорости реакции системы, специальные драйверы. Строго говоря, операционная система Windows не предназначена для работы в режиме реального времени. Windows ориентирована на работу с человеком, когда небольшие задержки событий во времени не имеют никакого значения.

Схема включения

Конструкция выполнена только на одной микросхеме K561IE16. Так как, для его правильной работы нужен внешний генератор тактовых импульсов, то в нашем случае мы его заменим простым мигающим светодиодом. Как только подадим напряжение питания на схему таймера, емкость C1 начнет заряжаться через резистор R2 поэтому на выводе 11 кратковременно появится логическая единица, сбрасывающая счетчик. Транзистор, подсоединенный к выходу счетчика, откроется и включит реле, которое через свои контакты подключит нагрузку. С мигающего светодиода с частотой 1,4 Гц поступают импульсы на тактовый вход счетчика. С каждым импульсным перепадом идет счет счетчика. Через 256 импульсов или около трех минут, на выводе 12 счетчика появится уровень логической единицы, а транзистор закроется, отключив реле и коммутируемую через его контакты нагрузку. К тому же эта логическая единица проходит на тактовый вход DD, останавливая работу таймера. Время работы таймера можно подобрать путем подключения точки «А» схемы к различным выходам счетчика.



Принцип работы.

Таймеры представляют собой обычные цифровые счетчики, которые подсчитывают импульсы от высокостабильного генератора частоты. К системной шине микропроцессора таймеры подключаются при помощи [параллельных портов](#). Генератор частоты, входящий в состав таймера, определяет минимальный интервал времени, который может определять таймер. Интервалы времени, задаваемые таймером, могут устанавливаться только из дискретного набора допустимых времен. Дискретность установки этих интервалов времени тоже определяется частотой задающего генератора. Разрядность цифрового счетчика, входящего в состав таймера, определяет максимальный интервал времени, который может определять таймер. Обычно используются 16-ти разрядные таймеры, поэтому, для подключения такого таймера к 8-ми разрядному процессору требуется два параллельных порта. Кроме того, таймером нужно управлять. Таймер нужно включать и выключать, часто требуется определять не возникло ли переполнение таймера (факт переполнения легко запомнить в дополнительном триггере, подключенном к выходу переноса счетчика таймера). Этот триггер называется **флагом переполнения** таймера. Триггер (флаг) включения и выключения таймера и флаг переполнения таймера подключают к системной шине микропроцессора через дополнительный порт ввода вывода. Структурная схема таймера, построенного по описанным выше принципам, приведена на рисунке 1.

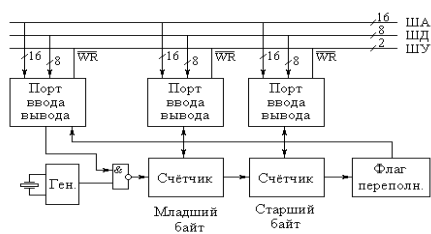


Рисунок 1. Структурная схема таймера.

В зависимости от типа использованного цифрового счетчика таймеры бывают **суммирующие** или **вычитающие**. Если в таймере используется суммирующий счетчик, то таймер

называется суммирующим. Если в таймере используется вычитающий счетчик, то таймер называется вычитающим.

Использование вычитающего счетчика позволяет проще задавать интервалы времени. В этом случае записываемый в таймер код будет соответствовать интервалу времени: $T_{timer} = Kod \times T_{gen}$

В случае использования суммирующего таймера код, записываемый в таймер для задания интервала времени, определяется из другой формулы: $T_{timer} = (Kod_{max} - Kod) \times T_{gen}$

В этой формуле код, который заносится в таймер, представляет собой дополнение кода интервала времени до максимального кода, который можно записать в таймер. Максимальный код таймера определяется по разрядности таймера. В рассмотренном примере разрядность таймера равна 16. Это означает, что максимальный код равен 65535. Достаточно часто суммирующие таймеры используются в режиме **свободнобегущего таймера**. Схема такого таймера приведена на рисунке 2.

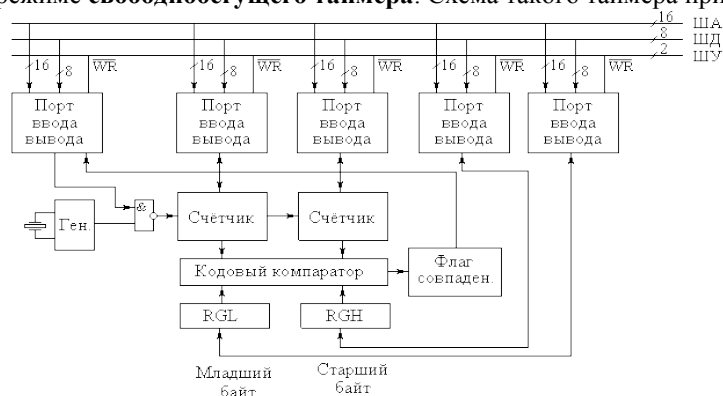


Рисунок 2. Структурная схема свободнобегущего таймера с модулем сравнения.

Свободнобегущие таймеры используются как системные часы, задающие время внутри микропроцессорной системы. Для задания промежутков времени микропроцессор считывает значение текущего системного времени и суммирует с ним код задаваемого промежутка времени. Полученный результат записывается в регистр сравнения таймера. При совпадении значений таймера и регистра сравнения устанавливается флаг совпадения. Значение этого флага можно определить программным опросом или воспользоваться механизмом прерывания работы процессора. Часто с одним свободно бегущим таймером работает несколько модулей сравнения. Кроме модулей сравнения со свободнобегущим таймером работают модули захвата, которые позволяют аппаратно запоминать время какого-либо внешнего события без участия центрального процессора. Структурная схема свободнобегущего таймера с модулем захвата приведена на рисунке 3.

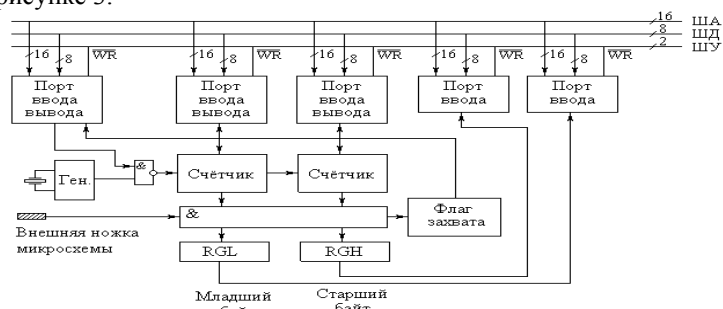


Рисунок 3. Структурная схема свободнобегущего таймера с модулем захвата

Раздел 6. Стабилизаторы напряжения.

Тема 6.1. Стабилизаторы постоянного тока.

Стабилизатор напряжения - электромеханическое или электрическое устройство, имеющее вход и выход по напряжению, предназначенное для поддержания выходного напряжения в узких пределах, при существенном изменении входного напряжения и выходного тока нагрузки.

По типу выходного напряжения стабилизаторы делятся на стабилизаторы постоянного напряжения и переменного напряжения. Как правило, вид напряжения на входе стабилизатора и на его выходе совпадают (постоянное либо переменное), но в некоторых типах стабилизаторов их виды разные.

Линейный стабилизатор.

Линейный стабилизатор представляет собой делитель напряжения, на вход которого подаётся входное (нестабильное) напряжение, а выходное (стабилизированное) напряжение снимается с нижнего плеча делителя. Стабилизация осуществляется путём изменения сопротивления одного из плеч делителя: сопротивление постоянно поддерживается таким, чтобы напряжение на выходе стабилизатора находилось в установленных пределах. При большом отношении величин входного/выходного напряжений линейный стабилизатор имеет низкий КПД, так как большая часть мощности $P_{\text{расc}} = (U_{\text{in}} - U_{\text{out}}) \cdot I_{\text{f}}$ рассеивается в виде тепла на регулирующем элементе. Поэтому регулирующий элемент должен иметь возможность рассеивать достаточную мощность, то есть должен быть установлен на радиатор нужной площади. Преимущество линейного стабилизатора — простота, отсутствие помех и небольшое количество используемых деталей. В зависимости от расположения элемента с изменяемым сопротивлением линейные стабилизаторы делятся на два типа:

Последовательный: регулирующий элемент включен последовательно с нагрузкой.

Параллельный: регулирующий элемент включен параллельно нагрузке.

В зависимости от способа стабилизации:

Параметрический: в таком стабилизаторе используется участок ВАХ прибора, имеющий большую крутизну.

Компенсационный: имеет обратную связь. В нём напряжение на выходе стабилизатора сравнивается с эталонным, из разницы между ними формируется управляющий сигнал для регулирующего элемента.

Тема 6.2. Импульсные стабилизаторы

В импульсном стабилизаторе ток от нестабилизированного внешнего источника подаётся на накопитель (обычно конденсатор или дроссель) короткими импульсами; при этом запасается энергия, которая затем высвобождается в нагрузку в виде электрической энергии, но, в случае дросселя, уже с другим напряжением. Стабилизация осуществляется за счёт управления длительностью импульсов и пауз между ними — широтно-импульсной модуляции. Импульсный стабилизатор, по сравнению с линейным, обладает значительно более высоким КПД. Недостатком импульсного стабилизатора является наличие импульсных помех в выходном напряжении.

В отличие от линейного стабилизатора, импульсный стабилизатор может преобразовывать входное напряжение произвольным образом (зависит от схемы стабилизатора):

Понижающий стабилизатор: выходное стабилизированное напряжение всегда *ниже* входного и имеет ту же полярность.

Повышающий стабилизатор: выходное стабилизированное напряжение всегда *выше* входного и имеет ту же полярность.

Повышающе-понижающий стабилизатор: выходное напряжение стабилизировано, может быть как *выше*, так и *ниже* входного и имеет ту же полярность. Такой стабилизатор применяется в случаях, когда входное напряжение незначительно отличается от требуемого и может изменяться, принимая значение как выше, так и ниже необходимого.

Инвертирующий стабилизатор: выходное стабилизированное напряжение имеет обратную полярность относительно входного, абсолютное значение выходного напряжения может быть любым.

Тема 6.3. Стабилизаторы переменного напряжения.

Стабилизаторы переменного напряжения - это устройства, предназначенные для поддержания постоянного значения напряжения, независимо от его колебания во входной цепи.

В настоящее время основными типами стабилизаторов являются:

- 1) электродинамические
- 2) сервоприводные (механические)
- 3) электронные (ступенчатого типа)
- 4) статические (электронные переключаемые)
- 5) релейные
- 6) компенсационные (электронные плавные)
- 7) комбинированные (гибридные)

Модели производятся как в однофазном (220/230 В), так и трёхфазном (380/400 В) исполнении, мощность их от нескольких сотен ватт до нескольких мегаватт. Трёхфазные модели выпускаются двух модификаций: с независимой регулировкой по каждой фазе или с регулировкой по среднефазному напряжению на входе стабилизатора.

Выпускаемые модели также различаются по допустимому диапазону изменения входного напряжения, который может быть, например, таким: $\pm 15\%$, $\pm 20\%$, $\pm 25\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$, $-25\%/+15\%$, $-35\%/+15\%$ или $-45\%/+15\%$. Чем шире диапазон (особенно в отрицательную сторону), тем больше габариты стабилизатора и выше его стоимость при той же выходной мощности. В настоящее время существуют модели стабилизаторов напряжения с нижним порогом входного напряжения 90 вольт.

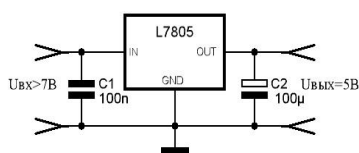
Важной характеристикой стабилизатора напряжения является его быстродействие, то есть чем выше быстродействие, тем быстрее стабилизатор отреагирует на изменения входного напряжения.

Быстродействие это промежуток времени (миллисекунды) за которое стабилизатор способен изменить напряжение на один вольт. У разного типа стабилизаторов разная скорость быстродействия, например у электродинамических быстродействие 8...10 мс/В, статические стабилизаторы обеспечат 2 мс/В, а вот у электронных, компенсационного типа этот параметр 0,75 мс/В.

Ещё одним важным параметром является точность стабилизации выходного напряжения. Согласно ГОСТ 13109-97 предельно допустимое отклонение напряжения питания $\pm 10\%$ от номинального. Точность современных стабилизаторов напряжения колеблется в диапазоне от 0,5% до 8%. Точности в 8% вполне хватает для обеспечения исправной работы подавляющего большинства современной бытовой и промышленной электротехники оборудованных инверторными и импульсными блоками питания. Так как мощность оборудования напрямую зависит от напряжения, то для обеспечения корректной (заявленной производителем) работы с прогнозируемым результатом и расходом электроэнергии необходимо точное напряжения (0,5-1%). Так же более жесткие требования (1%) предъявляются для питания сложного оборудования (медицинское, высокотехнологичное и подобное). Важным потребительским параметром является способность стабилизатора работать на заявленной мощности во всем диапазоне входного напряжения, но далеко не все стабилизаторы соответствуют этому параметру. КПД электродинамических и сервоприводных стабилизаторов более 98%, а электронных (ступенчатых) 96%. Электродинамические стабилизаторы выдерживают десятикратные перегрузки, при покупке такого стабилизатора запас по мощности не требуется

Схема включения стабилизатора напряжения.

В качестве примера рассматривается типовая схема включения стабилизатора в трехвыводном корпусе с фиксированным входным напряжением:

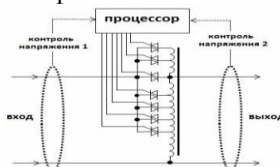


Принцип работы стабилизатора напряжения.

Современный стабилизатор напряжения работает по принципу переключения электронными ключами обмоток автотрансформатора под управлением процессора со специальной программой.

Основная функция процессора - замер напряжения на входе и выходе, анализ обстановки и включение соответствующего симистора.

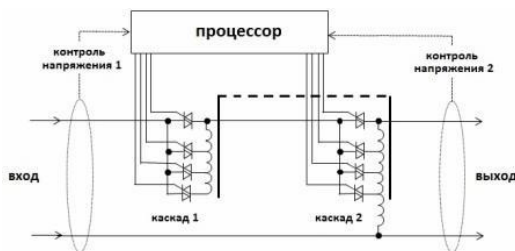
Однако это далеко не все функции процессора. Кроме регулирования напряжения процессор выполняет еще ряд функций, касающихся работы стабилизатора. Самая главная - запуск симисторов.



Для исключения искажений синусоиды, симистор нужно включить ровно в нулевой точке синусоиды напряжения. Для этого процессор делает несколько десятков измерений напряжения и в нужный момент подает на симистор мощный импульс, провоцируя его включение (отпирание).

Но перед тем как сделать это, необходимо проверить, выключился ли предыдущий симистор, иначе возникнет встречный ток (симисторы достаточно сложные в управлении элементы и случаи неотключения могут иметь место по многим причинам, например, при помехах).

Замерив микро токи, процессор анализирует состояние электронных ключей и только после этого выполняет действия.



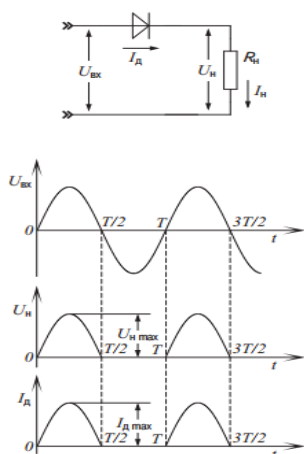
Нужно понимать, что все это процессор делает менее чем за 1 микросекунду, успевая произвести расчеты, пока синусоида напряжения находится в области нулевой точки. Повтор же операций происходит при каждой полупазе.

Высокая скорость, как процессора, так и симисторных ключей, позволила создать мгновенно реагирующий стабилизатор напряжения. Сегодня электронные стабилизаторы обрабатывают скачки за 10 миллисекунд, то есть за одну полупазу напряжения. Это позволяет надежно защитить оборудование от аномалий электросети.

Кроме того скорость процессора дала возможность создать более точные стабилизаторы с использованием двух каскадной системы регулирования. Двухкаскадные стабилизаторы обрабатывают напряжение в два этапа. К примеру, первый каскад может иметь всего 4 ступени. После грубой обработки включается второй каскад, и напряжение доводится до идеального.

Раздел 7. Выпрямители

Тема 7.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель



Однофазный однополупериодный выпрямитель
Временные диаграммы поясняющие его работу

На вход выпрямителя подадим сетевое переменное напряжение, в котором положительные полупериоды выделены красным цветом, а отрицательные – синим. К выходу выпрямителя подключим нагрузку (R_n), а функцию выпрямляющего элемента будет выполнять диод (VD).

При положительных полупериодах напряжения, поступающих на анод диода диодоткрывается. В эти моменты времени через диод, а значит, и через нагрузку (R_n), питающуюся от выпрямителя, течет прямой ток диода $I_{пр}$ (на правом графике волна полупериода показана красным цветом).

При отрицательных полупериодах напряжения, поступающих на анод диода диодзакрывается, и во всей цепи будет протекать незначительный обратный ток диода ($I_{обр}$). Здесь, диод как бы отсекает отрицательную полуволну переменного тока (на правом графике такая полуволна показана синей пунктирной линией).

В итоге получается, что через нагрузку (R_n), подключенную к сети через диод (VD), течет уже не переменный, поскольку этот ток протекает только в положительные полупериоды, а пульсирующий ток – ток одного направления. Это и есть выпрямление переменного тока.

Но таким напряжением можно питать лишь маломощную нагрузку, питающуюся от сети переменного тока и не предъявляющую к питанию особых требований, например, лампу накаливания. Напряжение через лампу будет проходить только во время положительных полувольт (импульсов), поэтому лампа будет слабо мерцать с частотой 50 Гц. Однако, за счет тепловой инертности нить не будет успевать остывать в промежутках между импульсами, и поэтому мерцание будет слабо заметным.

Если же запитать таким напряжением приемник или усилитель мощности, то в громкоговорителе или колонках мы будем слышать гул низкого тона с частотой 50 Гц, называемый фоном переменного тока. Это будет происходить потому, что пульсирующий ток, проходя через нагрузку, создает в ней пульсирующее напряжение, которое и является источником фона.

Этот недостаток можно частично устранить, если параллельно нагрузке подключить фильтрующий электролитический конденсатор (C_f) большой емкости.

Заряжаясь импульсами тока во время положительных полупериодов, конденсатор (C_f) во время отрицательных полупериодов разряжается через нагрузку (R_n). Если конденсатор будет достаточно большой емкости, то за время между импульсами тока он не будет успевать полностью разряжаться, а значит, на нагрузке (R_n) будет непрерывно поддерживаться ток как во время положительных, так и во время

отрицательных полупериодов. Ток, поддерживаемый за счет зарядки конденсатора, показан на правом графике сплошной волнистой красной линией.

Но и таким, несколько сглаженным током тоже нельзя питать приемник или усилитель потому, что они будут «фонить», так как уровень пульсаций (Упульс) пока еще очень ощутим. В выпрямителе, с работой которого мы познакомились, полезно используется энергия только половины волн переменного тока, поэтому на нем теряется больше половины входного напряжения и потому такое выпрямление переменного тока называют однополупериодным, а выпрямители – однополупериодными выпрямителями. Эти недостатки устранены в выпрямителях с использованием диодного моста.

Тема 7.2. Однофазный двухполупериодный выпрямитель.

Однофазный двухполупериодный выпрямитель – это схема, составленная из 4-х диодов и предназначенная для преобразования переменного тока в постоянный. В отличие от однополупериодного выпрямителя, состоящего из одного диода и пропускающего ток только во время положительного полупериода, мостовая схема позволяет пропускать ток в течение каждого полупериода. Диодные мосты изготавливают в виде небольших сборок заключенных в пластмассовый корпус.

Из корпуса сборки выходят четыре вывода напротив которых расположены знаки «+», «—» или «~», указывающие, где у моста вход, а где выход. Но не обязательно диодные мосты можно встретить в виде такой сборки, их также собирают включением четырех диодов прямо на печатной плате, что очень удобно.

Например. Вышел из строя один из диодов моста, если будет стоять сборка, то ее смело выкидываем, а если мост будет собран из четырех диодов прямо на плате — меняем неисправный диод и все готово.

На принципиальных схемах диодный мост обозначают включением четырех диодов в мостовую схему, как показано в левой части нижнего рисунка: здесь, диоды являются как бы плечами выпрямительного моста.

Такое графическое обозначение моста можно встретить еще в старых журналах по радиотехнике. Однако, на сегодняшний день, в основном, диодный мост обозначают в виде ромба, внутри которого расположен значок диода, указывающий только на полярность выходного напряжения.

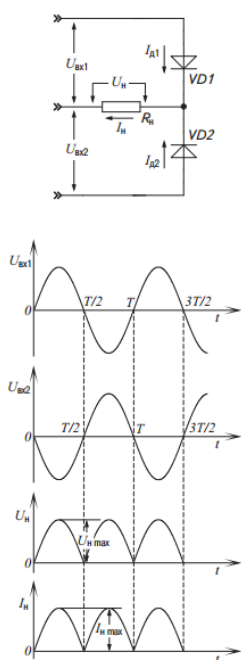
Теперь рассмотрим работу диодного моста на примере низковольтного выпрямителя. В таком выпрямителе, с использованием четырех диодов, во время каждой полуволны работают поочередно два диода противоположных плеч моста, включенных между собой последовательно, но встречно по отношению ко второй паре диодов.

С вторичной обмотки трансформатора переменное напряжение поступает на вход диодного моста. Когда на верхнем выводе вторичной обмотки возникает положительный полупериод напряжения, ток идет через диод VD3, нагрузку Rн, диод VD2 и к нижнему выводу вторичной обмотки. Диоды VD1 и VD4 в этот момент закрыты и через них ток не идет.

В течение другого полупериода переменного напряжения, когда плюс на нижнем выводе вторичной обмотки, ток идет через диод VD4, нагрузку Rн, диод VD1 и к верхнему выводу вторичной обмотки (см. график б). В этот момент диоды VD2 и VD3 закрыты и ток через себя не пропускают.

В результате мы видим, что меняются знаки напряжения на вторичной обмотке трансформатора, а через нагрузку выпрямителя идет ток одного направления (см. график в). В таком выпрямителе полезно используются оба полупериода переменного тока, поэтому подобные выпрямители называют двухполупериодными.

А если такой выпрямитель дополнить фильтрующим электролитическим конденсатором, то им уже смело можно запитывать радиолюбительскую конструкцию.



Однофазный двухполупериодный выпрямитель
Временные диаграммы поясняющие его работу

Раздел 8. Микроэлектроника

Тема 8.1. Основы микроэлектроники

Микроэлектроника - подраздел электроники, связанный с изучением производства электронных компонентов с геометрическими размерами характерных элементов порядка нескольких микрометров и меньше.

Устройства микроэлектроники обычно производят из полупроводников и полупроводниковых соединений, используя фотолитографию и легирование. Большинство компонентов обычной электроники: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы, изоляторы и проводник — также применяются и в микроэлектронике, но уже в виде миниатюрных устройств в интегральном исполнении. Цифровые интегральные микросхемы по большей части состоят из транзисторов. Аналоговые интегральные схемы также содержат резисторы и конденсаторы. Катушки индуктивности используются в схемах, работающих на высоких частотах.

С развитием техники размеры компонентов постоянно уменьшаются. При очень большой степени интеграции компонентов, а следовательно при очень малых размерах каждого компонента, очень важна проблема межэлементного взаимодействия — паразитные явления. Одна из основных задач проектировщика — компенсировать или минимизировать эффект паразитных утечек.

Различают такие направления микроэлектроники, как интегральная и функциональная.

Основные технологические процессы

Технологический процесс (*сокращенно ТП*) — это упорядоченная последовательность взаимосвязанных действий, выполняющихся с момента возникновения исходных данных до получения требуемого результата.

Практически любой технологический процесс можно рассматривать как часть более сложного процесса и совокупность менее сложных (в пределе — элементарных) технологических процессов. Элементарным технологическим процессом или технологической операцией называется наименьшая часть технологического процесса, обладающая всеми его свойствами. То есть это такой ТП, дальнейшая декомпозиция которого приводит к потере признаков, характерных для метода, положенного в основу данной технологии. Как правило, каждая технологическая операция выполняется на одном рабочем месте не более, чем одним сотрудником. Примером технологических операций могут служить ввод данных с помощью сканера штрих-кодов, распечатка отчета, выполнение SQL-запроса к базе данных и т. д.

Технологические процессы состоят из "технологических (рабочих) операций", которые, в свою очередь, складываются из "технологических переходов".

Виды технологических процессов

В зависимости от применения в производственном процессе для решения одной и той же задачи различных приёмов и оборудования различают следующие "виды техпроцессов":

Единичный технологический процесс (ЕТП) — технологический процесс изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства.

Типовой технологический процесс (ТТП) — технологический процесс изготовления группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками.

Групповой технологический процесс (ГТП) — технологический процесс изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

В промышленности и сельском хозяйстве описание технологического процесса выполняется в документах, именуемых операционная карта технологического процесса (при подробном описании) или маршрутная карта (при кратком описании).

Маршрутная карта — описание маршрутов движения по цеху изготавливаемой детали.

Операционная карта — перечень переходов, установок и применяемых инструментов.

Технологическая карта — документ, в котором описан: процесс обработки деталей, материалов, конструкторская документация, технологическая оснастка.

Технологические процессы делят на " типовые " и " перспективные ".

Типовой "техпроцесс" имеет единство содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для группы изделий с общими конструкторскими принципами.

"Перспективный техпроцесс" предполагает опережение (или соответствие) прогрессивному мировому уровню развития технологии производства.

Управление проектированием технологического процесса осуществляется на основе *маршрутных и операционных технологических процессов*".

"Маршрутный технологический процесс" оформляется маршрутной картой, где устанавливается перечень и последовательность технологических операций, тип оборудования, на котором эти операции будут выполняться; применяемая оснастка; укрупненная норма времени без указания переходов и режимов обработки.

"Операционный технологический процесс" детализирует технологию обработки и сборки до переходов и режимов обработки. Здесь оформляются операционные карты технологических процессов.

Этапы технологических процессов.

Технологический процесс обработки данных можно разделить на четыре укрупненных этапа:

"Начальный или первичный". Сбор исходных данных, их регистрация (прием первичных документов, проверка полноты и качества их заполнения и т. д.) По способам осуществления сбора и регистрации данных различают следующие виды ТП:

механизированный — сбор и регистрация информации осуществляется непосредственно человеком с использованием простейших приборов (весы, счетчики, мерная тара, приборы учета времени и т. д.); автоматизированный — использование машиночитаемых документов, регистрирующих автоматов, систем сбора и регистрации, обеспечивающих совмещение операций формирования первичных документов и получения машинных носителей; автоматический — используется в основном при обработке данных в режиме реального времени (информация с датчиков, учитывающих ход производства — выпуск продукции, затраты сырья, простои оборудования — поступает непосредственно в ЭВМ).

"Подготовительный". Прием, контроль, регистрация входной информации и перенос ее на машинный носитель. Различают визуальный и программный контроль, позволяющий отслеживать информацию на полноту ввода, нарушение структуры исходных данных, ошибки кодирования. При обнаружении ошибки производится исправление вводимых данных, корректировка и их повторный ввод.

"Основной". Непосредственно обработка информации. Предварительно могут быть выполнены служебные операции, например, сортировка данных.

"Заключительный". Контроль, выпуск и передача резульатной информации, ее размножение и хранение.

Тема 8.2. Полупроводниковые и гибридные микросхемы.

1. Полупроводниковые микросхемы

Полупроводниковые микросхемы представляют собой функциональные узлы, выполненные на одном кристалле полупроводника различными технологическими приемами обработки полупроводниковых материалов.

Миниатюризация с использованием полупроводниковых микросхем является более сложным процессом, чем миниатюризация с применением пленочных и гибридных микросхем.

Основными полупроводниковыми материалами, используемыми для изготовления твердых микросхем, являются кремний, германий и сапфир. Наибольшее распространение получили микросхемы, выполненные на кристалле кремния, так как его физико-химические свойства лучше, чем германия. Так, например, использование кремния позволяет значительно (почти в 2 раза) расширить интервал рабочих температур \wedge — «-перехода (до 150 °С); обратный ток p — n -перехода у кремния в тысячу раз меньше, чем у германия. Кроме того, на поверхности кремния относительно легко можно получить тонкую окисную пленку, которая служит защитным покрытием при проведении ряда технологических процессов и предохраняет готовую

микросхему от воздействия внешней среды. Кремний лучше обрабатывается, имеет большое объемное удельное электрическое сопротивление (до 10 000 Ом-см) и др.

Кремний получают в виде монокристаллических слитков восьми групп, каждая из которых имеет марки с буквенными обозначениями типа проводимости, например КЭФ — кремний электронной проводимости (я-типа), легированный фосфором; КДБ — кремний дырочной проводимости (*p*-типа), легированный бором. Стержневые монокристаллы полупроводников разрезают алмазной пилой на пластинки (подложки), которые затем шлифуют на специальных станках до толщины 0,2...0,5 мм и полируют алмазной пастой.

На подложке с помощью полупроводниковой технологии (методами диффузии, гальванического осаждения, вакуумного напыления, травления, фотолитографии) получают области с различной проводимостью, эквивалентные либо емкости, либо активным сопротивлениям, либо полупроводниковым приборам различного типа. Изменение концентрации примесей в различных частях монокристаллической пластины позволяет за один технологический цикл получить многослойную структуру, воспроизводящую заданную электрическую схему.

В настоящее время все чаще используются групповые методы изготовления полупроводниковых интегральных микросхем, позволяющие за один технологический цикл получить несколько сотен заготовок микросхем. Наибольшее распространение получил групповой пленарный метод, заключающийся в том, что элементы микросхем (диоды, транзисторы, конденсаторы, резисторы) располагаются в одной плоскости или на одной стороне подложки.

Основными полупроводниковыми материалами, используемыми для изготовления твердых микросхем, являются кремний, германий и сапфир. Наибольшее распространение получили микросхемы, выполненные на кристалле кремния, так как его физико-химические свойства лучше, чем германия. Так, например, использование кремния позволяет значительно (почти в 2 раза) расширить интервал рабочих температур \wedge — «-перехода (до 150 °С); обратный ток *p*—*л*-перехода у кремния в тысячу раз меньше, чем у германия. Кроме того, на поверхности кремния относительно легко можно получить тонкую окисную пленку, которая служит защитным покрытием при проведении ряда технологических процессов и предохраняет готовую микросхему от воздействия внешней среды. Кремний лучше обрабатывается, имеет большое объемное удельное электрическое сопротивление (до 10 000 Ом-см) и др.

Кремний получают в виде монокристаллических слитков восьми групп, каждая из которых имеет марки с буквенными обозначениями типа проводимости, например КЭФ — кремний электронной проводимости (я-типа), легированный фосфором; КДБ — кремний дырочной проводимости (*p*-типа), легированный бором. Стержневые монокристаллы полупроводников разрезают алмазной пилой на пластинки (подложки), которые затем шлифуют на специальных станках до толщины 0,2...0,5 мм и полируют алмазной пастой.

На подложке с помощью полупроводниковой технологии (методами диффузии, гальванического осаждения, вакуумного напыления, травления, фотолитографии) получают области с различной проводимостью, эквивалентные либо емкости, либо активным сопротивлениям, либо полупроводниковым приборам различного типа. Изменение концентрации примесей в различных частях монокристаллической пластины позволяет за один технологический цикл получить многослойную структуру, воспроизводящую заданную электрическую схему.

В настоящее время все чаще используются групповые методы изготовления полупроводниковых интегральных микросхем, позволяющие за один технологический цикл получить несколько сотен заготовок микросхем. Наибольшее распространение получил групповой пленарный метод, заключающийся в том, что элементы микросхем (диоды, транзисторы, конденсаторы, резисторы) располагаются в одной плоскости или на одной стороне подложки.

2. Гибридные микросхемы

Гибридная интегральная схема, гибридная микросхема, микросборка — интегральная схема, в которой наряду с элементами, неразъемно связанными на поверхности или в объеме подложки, используются навесные микроминиатюрные элементы (транзисторы, конденсаторы, полупроводниковые диоды, катушки индуктивности, вакуумные электронные приборы, кварцевые резонаторы и др.). В зависимости от метода изготовления неразъемно связанных элементов различают гибридные пленочную и полупроводниковую интегральные схемы.

Резисторы, контактные площадки и электрические проводники в ГИС изготавливают либо последовательным напылением на подложку различных материалов в вакуумных установках (метод напыления через маски, метод фотолитографии — *ГИС тонкопленочной технологии*), либо нанесением их в виде плёнок (химические способы, метод шёлкографии и др. — *ГИС толстопленочной технологии*).

Величины плёночных резисторов могут быть скорректированы в процессе производства с помощью лазерной подгонки (лазерное воздействие локально испаряет материал резистора, уменьшая его сечение), что необходимо, например, для создания высокоточных ЦАП и АЦП.

Навесные элементы крепят на одной подложке с плёночными элементами, а их выводы присоединяют к соответствующим контактным площадкам пайкой или сваркой. ГИС, как правило, помещают в корпус и герметизируют. Применение ГИС в электронной аппаратуре повышает её надёжность, уменьшает габариты и массу.

Гибридные МС являются дальнейшим развитием идеи микромодулей — компактных законченных функциональных блоков, собранных на миниатюрных бескорпусных элементах очень плотным монтажом. Микромодули же, в свою очередь, продолжают идеи компактронов — комбинированных радиоламп, содержащих в одном баллоне 3 и более лампы. Ещё до Второй Мировой войны существовали компактроны, в которых сразу были выполнены межэлектродные соединения ламп в нужную схему, а также имелись проволочные резисторы и дроссели, это и были первые микромодули и непосредственные предки гибридных МС.

Наиболее массово выпускаются гибридные интегральные микросхемы кварцевых генераторов

4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2, 6.	Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов	6	-
2	3.	Исследование характеристик биполярного транзистора	6	-
3	7.	Трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель	6	-
ИТОГО			18	-

4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование практических занятий</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	5.	Расчет и исследование инвертирующего усилителя на основе ОУ	4	-
2	5.	Расчет и исследование неинвертирующего усилителя на основе ОУ	4	-
3	5.	Расчет и исследование инвертирующего сумматора-вычитателя на ОУ	5	-
4	7.	Выбор вентиля управляемого выпрямителя по заданным выходным параметрам	5	-
ИТОГО			18	-

4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено

**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К
ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенция</i>	Σ <i>комп.</i>	$t_{ср}$ <i>час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
			<i>ОПК- 3</i>				
1		2	3	4	5	6	7
1. Введение		3	+	1	3	Лк	зачет
2. Полупроводниковые приборы		22,25	+	1	22,25	Лк, ЛР	зачет
3. Биполярные транзисторы		16	+	1	16	Лк, ЛР	зачет
4. Полевые транзисторы		10	+	1	10	Лк	зачет
5. Усилители электрических сигналов		25,75	+	1	25,75	Лк, ПЗ	зачет
6. Стабилизаторы напряжения		12	+	1	12	Лк, ЛР	зачет
7. Выпрямители		16	+	1	16	Лк, ЛР, ПЗ	зачет
8. Микроэлектроника		3	+	1	3	Лк	зачет
<i>всего часов</i>		108	108	1	108		

**6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Электроника и микропроцессорная техника. Дипломное проектирование систем автоматизации и управления : учебник для вузов / Под ред. В. И. Лачина. - Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. - 576 с.
2. Современная электроника: учебное пособие / В. А. Анякин, А. В. Ралдугин, Р. Ю. Шаварин. - Братск : БрГУ, 2012. - 451 с. - Б. ц.
3. Вентильные преобразователи. Основы силовой полупроводниковой техники : учеб. пособие / Г. П. Саламатов. - Братск: БрГУ, 2007. - 83 с.

**7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ,
НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>№</i>	<i>Наименование издания</i>	<i>Вид заня- тия</i>	<i>Количество экземпляров в библиотеке, шт.</i>	<i>Обеспечен- ность, (экз./ чел.)</i>
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Электроника и микропроцессорная техника. Дипломное проектирование систем автоматизации и управления : учебник для вузов / Под ред. В. И. Лачина. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. - 576 с.	Лк, ЛР, ПЗ	25	1
Дополнительная литература				
2.	Анякин В.А. Современная электроника: учебное пособие / В. А. Анякин, А. В. Ралдугин, Р. Ю. Шаварин. - Братск: БрГУ, 2012. - 451 с	Лк, ЛР, ПЗ	105	1
3.	Вентильные преобразователи. Основы силовой полупроводниковой техники : учеб. пособие / Г. П. Саламатов. - Братск: БрГУ, 2007. - 83 с. http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Энергетика%20-%20Автоматика/Саламатов%20Г.П.%20Вентильные%20преобразователи.Основы%20%20силовой%20полупроводниковой	Лк, ЛР, ПЗ	113+ЭР	1

	%20%20техники.Учебное%20пособие.2007.pdf			
4.	Вентильные преобразователи: методические указания к лабораторному практикуму / Г. П. Саламатов. - Братск: БрГУ, 2008. - 48 с. http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Энергетика%20-%20Автоматика/Саламатов%20Г.П.%20Вентильные%20преобразователи.2008.pdf	ЛР	102+ЭР	1

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.
2. Электронная библиотека БрГУ
<http://ecat.brstu.ru/catalog>.
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
<http://biblioclub.ru>.
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com>.
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
<http://window.edu.ru>.
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru>.
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)
<https://uisrussia.msu.ru/>.
8. Национальная электронная библиотека НЭБ
<http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/>.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Лабораторная работа № 1 Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов

Цель работы: ознакомиться с принципом работы, основными характеристиками и применением полупроводниковых диодов: выпрямительного диода, стабилитрона, диода Шоттки и светоизлучающего диода.

Порядок выполнения:

1. Экспериментальное исследование выпрямительного диода
 - 1.1. Собрать схему для исследования выпрямительного диода VD1 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X2 и X6. Для измерения выходного тока между гнездами X1 и X10 включить миллиамперметр на пределе измерения 100 мА ($\times 100$), для измерения анодного напряжения между гнездами X3 и X15 включить мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения (рис.*). Включить питание стенда и установить переключатель SA1 в позицию «+».
 - 1.2. Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе сначала для прямой, а затем обратной ветви, установив переключатель SA1 сначала в позицию «+», а затем в позицию «-». Увеличивая входное напряжение с помощью потенциометра RP1 от 0, измерять ток и напряжение на диоде. Результаты измерений занести в табл. 2 и 3. Выключить электропитание. Установить потенциометр RP1 в нулевое положение.
 - 1.3. По полученным значениям построить вольтамперную характеристику выпрямительного диода.
2. Экспериментальное исследование диода Шоттки
 - 2.1. Собрать схему для исследования диода Шоттки VD2 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X3 и X7. Выполнить п.п. 3.1.1., 3.1.2. и 3.1.3. для диода Шоттки. Сравнить вольтамперные характеристики выпрямительного диода и диода Шоттки.

3. Исследование влияния величины напряжения на светоизлучающем диоде на световую эмиссию
3.1. Собрать схему для исследования светодиода VD3 на постоянном токе. Подключить питание модуля диодов переключателем SA1 в позицию « + » и увеличивая положительное входное напряжение от 0 с помощью потенциометра RP1, измерять напряжение на светодиоде и ток светодиода. Установить при этом степень светоизлучения (отсутствует, слабое, среднее, сильное). Результаты занести в табл.6.

4. Экспериментальное исследование стабилизатора

4.1. Собрать схему для исследования стабилизатора VD4 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X5 и X9. Выполнить пункты 3.1.2. для стабилизатора.

Результаты измерений занести в табл. 7.

Выключить электропитание. Установить потенциометр RP1 в нулевое положение

4.2. По полученным значениям построить вольт-амперную характеристику стабилизатора, определить напряжение стабилизации и величину дифференциального сопротивления $r_{\text{диф}}$.

4.3. Собрать схему параметрического стабилизатора напряжения. Включить питание стенда и установить переключатель SA1 в позицию « - ».

4.4. Изменяя величину входного напряжения от 0 с помощью потенциометра RP1 снять зависимость величины выходного напряжения от величины входного напряжения $U_{\text{ст}}=f(U_{\text{вх}})$. Результаты занести в табл.6.

4.5. Определить коэффициент стабилизации $K_{\text{ст}}$ стабилизатора на участке стабилизации:
 $K_{\text{ст}}=(\Delta U_{\text{вх}})/(\Delta U_{\text{ст}})$.

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения об исследуемых полупроводниковых приборах.
4. Электрические схемы проведения экспериментов.
5. Таблицы результатов экспериментов.
6. Вольт-амперные характеристики исследованных полупроводниковых приборов.
7. Выводы о свойствах исследованных полупроводниковых приборов.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 2.2, 2.6, 2.7, 2.9 раздела 2.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3].

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Чем отличаются полупроводники типа p и n?
2. Какими свойствами обладает p-n переход?
3. Объясните вид ВАХ p-n перехода.
4. Поясните вид ВАХ стабилизатора. Какова полярность напряжения в нормальном режиме работы стабилизатора?
5. В чем отличие выпрямительного диода и диода Шоттки?
6. Какими параметрами характеризуется стабилизатор?
7. Как работает параметрический стабилизатор напряжения? Для чего нужен балластный резистор?
8. Как изменится напряжение стабилизатора при повышении температуры?
9. Что такое коэффициент стабилизации? Каков его физический смысл?
10. От чего зависит яркость свечения светодиода?

Лабораторная работа № 2 Исследование характеристик биполярного транзистора

Цель работы: ознакомиться с работой, основными характеристиками и применением биполярного транзистора.

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с лабораторным модулем для исследования транзисторов. Собрать схему для снятия характеристик биполярного транзистора (рисунок). Между гнездами X2 и X6 включить миллиамперметр на пределе измерения 100 мкА и соединить перемычкой гнезда X9 - X11. Между гнездами X1 - X4 включить второй миллиамперметр на пределе измерения 10 мА. Соединить перемычкой гнезда X3 - X7. Между гнездами X2 - X5 и X4- X16 включить мультиметры в режиме измерения постоянного напряжения. Тумблер SA2 установить в нижнее положение.

2. Экспериментальное исследование характеристик биполярного транзистора.

2.1. Снять статическую характеристику прямой передачи по току $I_{\text{к}}=f(I_{\text{б}})$ при $U_{\text{к}}(вх)$ равным заданному значению $E_{\text{к}}$ и $R_{\text{к}}=0$. Для этого дополнительно поставить перемычку между гнездами X1-X3.

Включить «Модуль питания», включить тумблер «Питание» на модуле «Транзисторы». Экспериментальные результаты записать в табл.3. При снятии характеристики следить за постоянством напряжения $U_{кэ}$. $U_{кэ} = U_{п} = 11 \text{ В}$

2.2. Снять характеристику прямой передачи по току при наличии нагрузки. Убрать перемычку между гнездами X1-X3. С помощью переключателя SA1 установить заданное значение резистора R2. С помощью потенциометра RP1 установить ток базы, равный нулю, а с помощью потенциометра RP2 установить заданное значение $E_{кэ}$. В дальнейшем ручку регулятора RP2 не трогать. В области вблизи насыщения точки снимать чаще. Экспериментальные результаты записать в табл.4. Выключить тумблер «Питание». Построить экспериментальные характеристики.

2.3. По построенной в п. 2.2 характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальный ток $I_{б \text{ max}}$ при котором еще обеспечивается линейное усиление.

2.4. Снять выходные статические характеристики транзистора $I_{кэ} = f(U_{кэ})$ при $I_{б} = \text{const}$. Для этого дополнительно установите перемычку X1-X3. Включить питание модуля. Установить потенциометром RP1 $I_{б} = 0$. Изменяя напряжение $U_{кэ}$ с помощью потенциометра RP2 снять выходные характеристики. Экспериментальные данные занести в табл.5. Повторить измерения еще для двух значений тока базы.

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения о биполярных транзисторах.
4. Электрические схемы проведения экспериментов.
5. Таблицы результатов экспериментов.
6. Экспериментальные характеристики исследованного биполярного транзистора.
7. Выводы о свойствах исследованного биполярного транзистора.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 3,2 раздела 3.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Как работает биполярный транзистор?
2. Какие существуют схемы включения биполярного транзистора?
3. Каковы требования к входному и выходному сопротивлениям усилителей в схемах включения с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК)?
4. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к транзистору n-p-n типа при различных схемах включения?
5. Как выглядят входные и выходные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?
6. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить? Как она изменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?
7. Как снять статические выходные характеристики?
8. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим эмиттером и постройте его временные диаграммы.
9. Что такое рабочая точка покоя и как ее выбрать? Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
10. Что такое ключевой режим работы транзистора, каковы его особенности?

Лабораторная работа № 3 Трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель.

Цель работы: изучение схемы и работы выпрямителя; измерение его выходных параметров.

Порядок выполнения:

1. Скоммутировать схему выпрямителя в соответствии с рис. 1.2., предъявить для проверки.

2. Включить резистивную нагрузку, подать напряжение питания и снять осциллограммы $u_{вых}$, $u_{г}$, i_2 , $i_{вых}$, $i_{г}$. Определить пульсность выпрямителя.

3. Измерить U_2 , U_d , $U_{г}$, I_d , $I_{г.ср}$. Результаты измерений оформить согласно таблице 1.

Включить последовательно с R_n дроссель L_n . Снять осциллограммы $i_{вых}$ и i_2 .

Измерить коэффициент пульсаций и определить коэффициент сглаживания.

Сформулировать выводы по работе, где отметить преимущества исследованного выпрямителя и привести объяснения наблюдавшимся расхождениям между теоретическими и опытными значениями выходных параметров.

Форма отчетности:

Результаты измерений и вычислений оформляются в форме отчета. В отчете по лабораторной работе должны содержаться следующие пункты:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткая характеристика выпрямителя.
3. Схема выпрямителя и результаты его испытания: осциллограммы, таблицы результатов, определение коэффициента сглаживания.
4. Выводы.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.4 раздела 5.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3, 4].

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. В каких случаях нет необходимости в силовом трансформаторе и сглаживающем дросселе?
2. Какие параметры вентиля ограничивают мощность выпрямителя? Определите максимальную выходную мощность мостового выпрямителя, в котором использованы диоды Д 25-4.
3. От чего зависит степень сглаживания выходного тока?
4. Выведите приближенное соотношение между действующим значением входного тока и выпрямленным током.

Практическое занятие № 1 Расчет и исследование инвертирующего усилителя на основе ОУ

Цель работы: ознакомление с принципами работы электрических схем на основе операционных усилителей (ОУ).

Задание:

1. Провести расчет схемы при $R_{вх.оу} = 3\text{кОм}$ согласно варианта (см. таблицу 1.1).
2. Выполнить моделирование схемы в среде EWB/MS, дополнив ее необходимым измерительным оборудованием (генератором импульсов, осциллографом, амперметрами, вольтметрами) – см. рис. 1.1

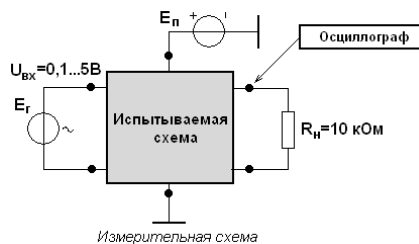


Рис.1.1 – Измерительная схема

3. Сравнить полученные результаты и сделать выводы по работе.

Таблица 1.1

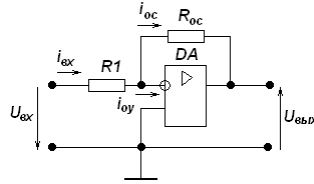
Варианты заданий

Вариант	Параметры			Вариант	Параметры		
	K_y	$K_{y.оу}$	$R_{вх}, \text{кОм}$		K_y	$K_{y.оу}$	$R_{вх}, \text{кОм}$
1	50	2500	1,0	16	150	200	2,0
2	70	2000	2,0	17	200	1500	2,5
3	80	3000	0,5	18	250	2000	1,0
4	90	2500	2,5	19	80	2500	0,5
5	100	2000	1,0	20	70	3000	1,5
6	120	3000	0,5	21	60	1500	0,5
7	130	3500	1,5	22	50	2000	1,0
8	140	2500	2,0	23	100	2500	1,5
9	150	2000	2,5	24	110	3000	2,0
10	160	3000	0,5	25	120	1500	0,5

11	170	2500	1,0	26	130	2000	1,5
12	180	2000	0,5	27	140	2500	1,0
13	190	3000	1,0	28	150	3000	2,0
14	200	2500	1,5	29	160	2000	1,5
15	100	3000	0,5	30	180	2500	1,0

Порядок выполнения:

Дана схема:



Исходные данные: $K_y = 100$, $K_{y.oy} = 2500$, $R_{вх.oy} = 3 \text{ кОм}$, $R_{вх} = 1 \text{ кОм}$.

Требуется: Произвести исследование и расчет инвертирующего усилителя при заданных данных.

Определим сопротивления резисторов R_1 и R_{oc} . Для этого имеем: $-i_{вх} = i_{oy} + i_{oc}$, или

$$\frac{U_{вх} - U_{вх.oy}}{R_1} = \frac{U_{вх.oy} - U_{вых}}{R_{oc}} + \frac{U_{вх.oy}}{R_{вх.oy}}$$

Учитывая, что $U_{вых} = -U_{вх.oy} \cdot K_y$, имеем:
$$K_y = \frac{K_{y.oy} \cdot R_{oc} \cdot R_{вх.oy}}{R_{вх.oy} \cdot R_1 + K_{y.oy} + R_{oc} R_1 + R_{вх.oy}} \quad (1)$$

Полное входное сопротивление $R_{вх}^*$ схемы:

$$R_{вх}^* = R_1 + R_{вх.oy} = \frac{R_{oc} \cdot R_{вх.oy} + R_1 \cdot [R_{вх.oy} + 1 + K_{y.oy} + R_{oc}]}{R_{oc} + R_{вх.oy} + 1 + K_{y.oy}} \quad (2)$$

Откуда

$$R_1 = \frac{R_{oc} \cdot R_{вх.oy} \cdot K_{y.oy} - K_y}{K_y \cdot [R_{oc} + R_{вх.oy} + 1 + K_{y.oy}]} \quad (3)$$

Подставляя величину R_1 (3) в (2) получим:

$$R_{oc} = \frac{R_{вх} \cdot R_{вх.oy} \cdot K_y \cdot (1 + K_{y.oy})}{R_{вх.oy} \cdot K_{y.oy} + K_y - R_{вх} \cdot K_y} \quad (4)$$

Используя полученные выражения (3), (4) и исходные числовые данные, найдем значения R_{oc} и R_1 :

$$R_{oc} = \frac{1 \cdot 3 \cdot 100}{3 \cdot 2500 + 100 - 1 \cdot 100} = 97,44 \text{ кОм}, \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{97,44 \cdot 3 \cdot 2500 - 100}{100 [97,44 + 3 + 1 + 2500]} = 0,923 \text{ кОм}. \quad (6)$$

Принимаем $R_{oc} = 100 \text{ кОм}$, $R_1 = 1,0 \text{ кОм}$ (см. Приложение).

Определим из (1) расчетное значение K_y схемы, имея расчетные данные R_{oc} , R_1 (5), (6):

$$K_y = \frac{2500 \cdot 97,44 \cdot 3}{3 \cdot 0,923 \cdot (1 + 2500) + 97,44 + 0,923 + 3} = 100,007.$$

При значениях $R_{oc} = 100 \text{ кОм}$ и $R_1 = 1,0 \text{ кОм}$ значение K_y составит (1):

$$K_y^* = \frac{2500 \cdot 100 \cdot 3}{3 \cdot 1 \cdot (1 + 2500) + 100 + 1 + 3} = 95, \text{ что вполне приемлемо.}$$

Из (2) определим расчетное значение полного входного сопротивления $R_{вх}^*$ схемы, учитывая значения (5),

(6):

$$R_{вх}^* = \frac{97,44 \cdot 3 + 0,923 [3 + 1 + 2500 + 97,44]}{97,44 + 3 + 1 + 2500} \approx 0,01 \text{ кОм},$$

т.е. $R_{вх}^* = 10 \text{ Ом}$.

Форма отчетности:

Решение задачи по варианту, указанному преподавателем.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.2,5.4 раздела 5.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3]

Контрольные вопросы для самопроверки:

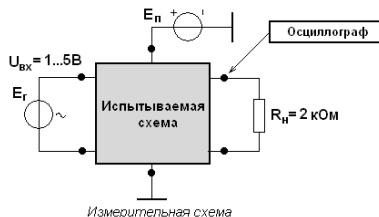
1. Какой операционный усилитель называется идеальным. Перечислите параметры идеального усилителя.
2. Какое влияние оказывает отрицательная обратная связь на работу операционного усилителя.
3. Как изменится коэффициент усиления с введением ООС.
4. Почему необходимо наличие большого сопротивления на входе ОУ.

Практическое занятие № 2 Расчет и исследование неинвертирующего усилителя на основе ОУ

Цель работы: ознакомление с принципами работы электрических схем на основе операционных усилителей (ОУ).

Задание:

1. Провести расчет схемы при $R_{вх.оу} = 3 \text{ кОм}$ согласно варианта (см. таблицу 2.1).
2. Выполнить моделирование схемы в среде EWB/MS, дополнив ее необходимым измерительным оборудованием (генератором импульсов, осциллографом, амперметрами, вольтметрами) – см. рис. 2.1.



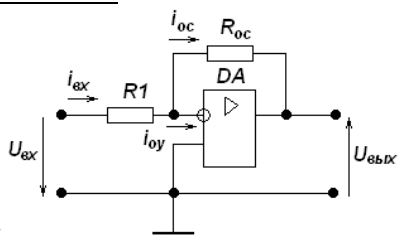
3. Сравнить результаты моделирования и расчета, сделать выводы.

Таблица 2.1

Варианты заданий

Вариант	Параметры			Вариант	Параметры		
	K_y	$K_{y.оу} \times 10^3$	$R_{вх}, \text{кОм}$		K_y	$K_{y.оу} \times 10^3$	$R_{вх}, \text{кОм}$
1	140	2,5	0,5	16	100	1,5	0,5
2	150	2,0	1,5	17	110	2,0	1,0
3	160	3,0	2,0	18	120	2,5	1,5
4	170	2,5	2,5	19	130	3,0	2,0
5	180	2,0	0,5	20	140	1,5	0,5
6	190	3,0	1,0	21	150	2,0	1,5
7	200	3,5	0,5	22	160	2,5	1,0
8	120	2,5	1,0	23	180	3,0	2,0
9	150	2,0	1,5	24	50	1,5	1,5
10	200	3,0	0,5	25	70	2,0	1,0
11	250	2,5	2,0	26	80	2,5	0,5
12	80	3,0	2,5	27	90	3,0	1,0
13	70	2,5	1,0	28	100	2,0	2,0
14	60	3,0	0,5	29	120	2,5	0,5
15	50	2,0	1,5	30	130	1,0	2,5

Порядок выполнения:



Дана схема:

Произвести расчет и исследование неинвертирующего усилителя на ОУ типа К140УД5Б при следующих данных $K_y = 100$, $K_{y.oy} = 2500$, $R_{вх} = 1,0 \text{ кОм}$, $R_{вх.oy} = 3 \text{ кОм}$ Определим значение $R_{вх.ос}$ с цепью ООС по постоянному току из соотношения:

$$R_{вх.ос} = R_{вх.oy} \cdot \frac{K_{y.oy}}{K_y} = \underline{\quad} \cdot \underline{\quad} = \underline{\quad} \text{ кОм}$$

Значение резистора R_1 определяется из выражения:

$$R_1 = \frac{R_{вх} \cdot R_{вх.ос}}{R_{вх.ос} - R_{вх}} = \underline{\quad} = \underline{\quad} \text{ кОм} \cdot \text{Принимаем } R_1^* = \underline{\quad} \text{ кОм}$$

Для обеспечения требуемого усиления K_y схемы значение сопротивления $R_{ос}$ цепи ООС должно быть равным:

$$R_{ос} = \frac{(K_{y.oy} + 1) - K_{y.oy} / K_y}{K_{y.oy} / K_y - 1} \cdot R_1 = \underline{\quad} \cdot \underline{\quad} = \underline{\quad} \text{ кОм}$$

Принимаем $R_{ос}^* = \underline{\quad} \text{ кОм}$ (см. Приложение).

В результате моделирования в системе EWB/MS схемы, изображенной на рис.2.1 были получены осциллограммы входного и выходного напряжения, которые имеют вид, показанный на рис.2.2.

Рассчитаем коэффициент усиления по формуле:

$$K_y^* = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \underline{\quad} = \underline{\quad} \approx K_y$$

Форма отчетности:

Решение задачи по варианту, указанному преподавателем.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.2,5.4 раздела 5.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Какой операционный усилитель называется идеальным. Перечислите параметры идеального усилителя.
2. Какое влияние оказывает отрицательная обратная связь на работу операционного усилителя.
3. Как изменится коэффициент усиления с введением ООС.
4. Почему необходимо наличие большого сопротивления на входе ОУ.

Практическое занятие № 3 Расчет и исследование инвертирующего сумматора-вычитателя на ОУ

Цель работы: ознакомление с принципами работы электрических схем на основе операционных усилителей (ОУ).

Задание:

1. Провести расчет схемы, приняв $R_{ос} = 20 \text{ кОм}$, $R_{н} = 2 \text{ кОм}$, согласно варианта (см. таблицу 3.1).
2. Выполнить моделирование схемы в среде EWB/MS, дополнив ее измерительными приборами (амперметрами, вольтметрами, осциллографом).
3. Сравнить результаты моделирования с расчетными данными и провести их анализ.

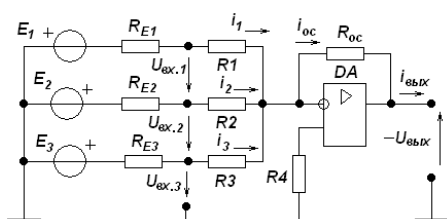
Таблица 3.1

Варианты заданий

Вариант	Параметры схемы								
	$E_1, В$	$E_2, В$	$E_3, В$	$R_{E1}, кОм$	$R_{E2}, кОм$	$R_{E3}, кОм$	$K_{y.1}$	$K_{y.2}$	$K_{y.3}$
1	2	4	-1	0,5	1,0	0,5	2	3	5
2	-3	5	2	1,0	0,5	1,0	3	1	10
3	1	2	3	0,75	0	1,0	5	2	4
4	4	-1	2	1,0	0,75	0	10	3	1
5	-5	4	1	0,5	1,0	1,0	2	2	8
6	1	2	4	0,25	0	1,0	4	1	5
7	2	3	1	1,0	0,5	0,75	5	2	2
8	5	-2	2	0	0,75	1,0	2	4	10
9	-1	1	3	1,0	0,5	0	1	5	6
10	4	-2	1	0	1,0	0,5	3	2	10
11	3	1	2	0,5	0	1,0	2	5	5
12	2	3	-1	1,0	0,5	1,0	5	2	3
13	-1	2	3	0,75	0,25	0	1	4	2
14	2	1	2	0,5	1,0	1,0	5	2	6
15	4	-2	1	1,0	0	0,75	3	2	10
16	5	-1	1	0,25	1,0	0,5	2	4	2
17	-2	3	2	0,5	1,0	0	1	3	4
18	1	2	4	1,0	0,75	0	5	2	5
19	3	1	2	0	0,5	1,0	3	2	4
20	4	1	1	0,5	1,0	0,5	1	4	5
21	1	3	2	0,75	0	1,0	2	3	10
22	2	3	-3	1,0	0,5	0	3	2	6
23	-5	2	1	0,5	1,0	1,0	2	2	8
24	1	2	3	1,0	0,75	0	4	1	5
25	3	1	2	0,75	0	1,0	5	2	4
26	4	1	-1	0	1,0	0,5	1	4	10
27	-1	3	2	0,5	1,0	0	2	5	3
28	5	-2	1	1,0	0,5	1,0	5	2	3
29	2	1	2	1,0	0,5	0,75	4	1	10
30	3	2	-1	0,75	0	1,0	3	2	6

Порядок выполнения:

Дана схема.



Рассчитать и исследовать инвертирующий сумматор-вычитатель с 3-мя входами на идеальном ОУ
 $K_{y.oy} = \infty$, $R_{вх.oy} = \infty$, $R_{вых.oy} = 0$

1. Усиления схемы по первому входу равно:

$$K_{y1} = \frac{R_{oc}}{R_1 + R_{E1}} = \frac{\dots}{\dots} = \dots$$

Для уменьшения влияния токового дрейфа выберем $R_{oc} = 20 кОм$, тогда из (1) можно определить:

$$R_1 = \frac{R_{oc}}{K_{y1}} - R_{E1} = \frac{\dots}{\dots} - \dots = \dots кОм$$

Аналогично рассчитаем значения R_2 и R_3 :

$$R_2 = \frac{R_{oc}}{K_{y2}} - R_{E2} = \frac{\dots}{\dots} - \dots = \dots кОм$$

$$R_3 = \frac{R_{oc}}{K_{y3}} - R_{E3} = \text{---} - \text{---} = \text{---} \text{ кОм}$$

Для снижения токового дрейфа введем резистор R_4 номиналом:

$$R_4 = R_{oc} \parallel (R_1 + R_{E1}) \parallel (R_2 + R_{E2}) \parallel (R_3 + R_{E3});$$

$$\frac{1}{R_4} = \frac{1}{R_{oc}} + \frac{1}{R_1 + R_{E1}} + \frac{1}{R_2 + R_{E2}} + \frac{1}{R_3 + R_{E3}} = \frac{1}{\text{---}} + \frac{1}{\text{---}} + \frac{1}{\text{---}} + \frac{1}{\text{---}} =$$

$$= \text{---} \text{ мСм};$$

$$R_4 = \frac{1}{\text{---}} = \text{---} \text{ кОм}.$$

1. Ток, потребляемый от выходной цели схемы, равен:

$$i_{\text{вых}} = i_{oc} + i_H = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{oc}} + \frac{U_{\text{вых}}}{R_H},$$

где $U_{\text{вых}} = -(K_{y1}E_1 + K_{y2}E_2 + K_{y3}E_3) = -(\text{---} + \text{---} + \text{---}) = \text{---} \text{ В}.$

Следовательно: $i_{\text{вых}} = i_{oc} + i_H = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{oc}} + \frac{U_{\text{вых}}}{R_H} = \text{---} + \text{---} = \text{---} \text{ мА}$ что допустимо для любого типа

операционных усилителей.

2. Значения входных токов i схемы составят:

$$i_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_{E1}} = \text{---} = \text{---} \text{ мА};$$

$$i_2 = \frac{E_2}{R_2 + R_{E2}} = \text{---} = \text{---} \text{ мА};$$

$$i_3 = \frac{E_3}{R_3 + R_{E3}} = \text{---} = \text{---} \text{ мА}$$
 что допустимо.

В результате моделирования исследуемой схемы в среде EWB/MS были получены следующие значения токов и напряжений:

$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	$i_{\text{вых}}, \text{ мА}$	$i_1, \text{ мА}$	$i_2, \text{ мА}$	$i_3, \text{ мА}$

Сравнение результатов показывает незначительные расхождения расчетных значений токов и напряжений с экспериментальными.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ряды номинальных значений РС-элементов

Номинальные значения сопротивления резисторов R и емкости конденсаторов C , выпускаемых отечественной промышленностью и зарубежными фирмами в соответствии с рекомендациями МЭК и СЭВ, стандартизованы и подчинены десятичному интервалу (см. таблицу).

Действительные значения сопротивлений резисторов R и емкостей конденсаторов C вследствие погрешностей изготовления могут отличаться от номинальных, под которыми понимают электрический параметр радиоэлемента, значение которого обозначено на элементе или указано в нормативной документации.

Разница между номинальным и действительным электрическими параметрами выраженная в процентах по отношению к номинальному параметру, называется допускаемым отклонением или *допуском*. Для резисторов (постоянных) допуски устанавливаются равными $\pm 10\%$ (С) и $\pm 5\%$ (И), конденсаторов (постоянных) – $\pm 20\%$ (В), $\pm 10\%$ (С) и $\pm 5\%$ (И) в соответствии с рядами предпочтительных чисел (см. таблицу).

Таблица

Ряды номинальных значений сопротивлений и емкостей

Наименование	Обозначение ряда предпочтительных чисел											
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
1. Сопротивление R	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
2. Емкость C	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
1. Сопротивление R	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1
2. Емкость C	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1
Допуск $\pm 5\%$ (И)	И	И	И	И	И	И	И	И	И	И	И	И
Допуск $\pm 20\%$ (В)	В	–	В	–	В	–	В	–	В	–	В	–

Форма отчетности:

Решение задачи по варианту, указанному преподавателем.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 5.2,5.4 раздела 5.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Какой операционный усилитель называется идеальным. Перечислите параметры идеального усилителя.
2. Какое влияние оказывает ток дрейфа на работу операционного усилителя.
3. Как изменится коэффициент усиления с введением ООС.
4. Почему необходимо наличие большого сопротивления на входе ОУ.

Практическое занятие № 4 Выбор вентиля управляемого выпрямителя по заданным выходным параметрам

Цель работы: изучить схемы управляемых выпрямителей, произвести предварительный выбор тиристорov при проектировании управляемого выпрямителя.

Задание:

По известным величинам, согласно варианта (см. таблицу 4.1), максимального выпрямленного напряжения (U_{d0}), выпрямленного тока (I_{d0}) и коэффициента пульсаций (q_0):

1. Обосновать схему вентильного блока.
2. Вычертить схему выпрямителя с силовым трансформатором и блоком ФИУ.
3. Выбрать тиристоры по допустимому прямому току и повторяющемуся напряжению для наиболее напряженного (полнофазного) режима.
4. Определить габаритную мощность силового трансформатора.
5. Рассчитать напряжение обмоток трансформатора, полагая, что первичные обмотки включены в трехфазную сеть с напряжением 380/220 В.

Таблица 4.1

Варианты заданий

№ варианта	$U_{d0}, В$	$I_{d0}, А$	q_0
1	48	500	0,057
2	800	240	0,014
3	200	150	0,057
4	65	630	0,057
5	100	200	0,014
6	1000	250	0,014
7	1000	320	0,057
8	240	160	0,25
9	80	1400	0,014
10	120	820	0,057
11	2000	560	0,014
12	320	180	0,057
13	660	240	0,25
14	98	300	0,25
15	1600	400	0,014

Таблица 4.2

Выходные параметры выпрямителей

Схема выпрямителя	Кол-во вентиляей	m	q	$\frac{U_d}{U_2}$	$\frac{I_{в.ср}}{I_d}$	$\frac{U_{обр.м}}{U_d}$	$\frac{S_T}{P_d}$
Однофазная нулевая	2	2	0,67	0,9	1/2	3,14	1,34
Однофазная мостовая	4	2	0,67	0,9	1/2	1,57	1,11
Трехфазная нулевая	3	3	0,25	1,17	1/3	2,09	1,34
Трехфазная мостовая	6	6	0,057	1,35	1/3	1,05	1,05

12-пульсная последовательная	12	12	0,014	2,7	1/3	0,525	1,05
12-пульсная параллельная	12	12	0,014	1,35	1/6	1,05	1,05

Рекомендации по выбору тиристоров/

Отечественные электрические вентили имеют систему обозначений, позволяющую производить их ориентировочный выбор, не имея полных паспортных данных.

Первый элемент обозначения – буквенное обозначение типа (В – диод, Т- тиристор).

Второй элемент – трехзначное число (порядковый номер конструкции, конструктивный признак, исполнение).

Третий элемент – допустимое среднее значение тока, А.

Четвертый элемент – класс вентиля по допустимому обратному напряжению, В.

Примеры обозначений:

1) В 171-200-10 - выпрямительный диод с допустимым прямым током 200 А и допустимым обратным напряжением 1000 В.

2) Т 133- 500-8 - тиристор с допустимым прямым током 500 А и допустимым повторяющимся прямым и обратным напряжением 800 В.

При выполнении данной работы второй элемент обозначения можно опускать. Например: «Выбираю тиристоры Т – 500-8».

Шкала номинальных токов вентиля: 10, 20, 40, 50, 100, 250, 400, 500, 800, 1000 А.

Классы вентиля по допустимому напряжению: 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15.

Порядок выполнения:

Задано:

- максимальное выпрямленное напряжение $=300$ В;
- максимальный выпрямленный ток $=2000$ А;
- коэффициент пульсаций $=0,014$.

1. Обоснование выбора схемы вентильного блока.

Заданный коэффициент пульсаций $q_0=0,014$ обеспечивается 12-пульсной схемой выпрямления. Так как при сравнительно низком напряжении довольно велик выпрямленный ток (2000 А), ток $I_{d0} = 2000$ А, то целесообразно использовать схему с параллельным соединением вентильных блоков. Силовой трансформатор должен иметь два комплекта вторичных обмоток: abc - соединенных звездой, и def – соединенных треугольником. Схема соединения первичных обмоток трансформатора – произвольная. Полагаем, что они соединены звездой.

Вентильные блоки VS1...VS6 и VS7...VS12 соединяются параллельно через дроссель L_y , который необходим для ограничения уравнивающего тока с частотой $12f$ (600Гц).

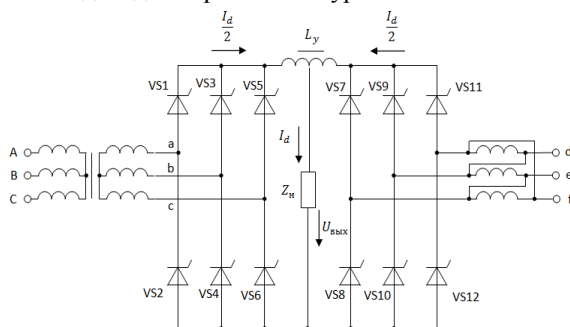


Рис. 4. Схема вентильного блока с силовым трансформатором

2. Значения выходных параметров такого выпрямителя известны:

$$\frac{U_d}{U_2} = 1,35; \quad \frac{I_{ср}}{I_d} = \frac{1}{6}; \quad \frac{U_{обр.м}}{U_d} = 1,05; \quad \frac{S_T}{P_d} = 1,05$$

3. Выбор тиристоров производим по среднему значению прямого тока и амплитуде повторяющегося прямого и обратного напряжения:

$$U_{обр.м} = 1,05 \cdot U_{d0} = 1,05 \cdot 300 = 315 \text{ В}$$

Этим значениям тока и напряжения удовлетворяют тиристоры Т 400 – 4 с максимальным прямым током 400 А и допустимым повторяющимся напряжением 400 В.

4. Вычислим требуемую габаритную мощность трансформатора:

$$S_T = 1,05 \cdot P_d = 1,05 \cdot U_d \cdot I_d = 1,05 \cdot 300 \cdot 2000 = 630000 \text{ В}\cdot\text{А} = 630 \text{ кВА.}$$

5. Поскольку первичные обмотки соединены звездой, каждая из них должна быть рассчитана на фазное напряжение:

$$U_\phi = \frac{U_d}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

Входные напряжения вентиляльных блоков должны быть равными:

$$U_2 = \frac{U_{d0}}{1,35} = \frac{300}{1,35} = 222,2 \text{ В}$$

С учетом возможного снижения напряжения сети на 10 % примем:

$$U_2 = 1,1 \cdot 222,2 = 244 \text{ В}$$

Тогда фазные напряжения вторичных обмоток соединенных звездой (abc) должны быть равны:

$$U_{\phi abc} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{244}{\sqrt{3}} = 141 \text{ В}$$

а обмоток, соединенных треугольником (def)

$$U_{\phi def} = 244 \text{ В}$$

Рассчитанных данных достаточно для проектирования силового трансформатора.

Форма отчетности:

Решение задачи по варианту, указанному преподавателем.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить теоретический материал по теме 7.2 раздела 7.

Основная литература

[1]

Дополнительная литература

[2, 3]

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Приведите примеры использования выпрямителей.
2. Каковы отрицательные последствия использования вентиляльных преобразователей.
3. Каким должен быть порядок поступления управляющих импульсов на тиристоры? Допустима ли их одновременная подача на оба тиристора?

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Microsoft Imagine Premium (*)
2. Kaspersky Endpoint Security для бизнеса - Расширенный Russian Edition. 1000-1499 Node 1 year Educational Renewal License
3. Kaspersky Security для почтовых серверов Russian Edition. 100-149 MailAdress 1 year Educational Renewal License
4. Kaspersky Anti-Spam для Linux Russian Edition. 100-149 MailBox 1 year Educational Renewal License
5. OpenOffice
6. LibreOffice
7. Adobe Reader
8. doPDF
9. 7-Zip
10. Ай-Логос
11. Система дистанционного обучения
12. ПО "Антиплагиат"
13. Программное обеспечение "Визуальная студия тестирования"
14. Консультант Плюс
15. Программное обеспечение для мультимедиа-лингфонного комплекта RINEL-LINGO, позволяющего реализовать функциональные возможности

- мультимедийного компьютерного класса
16. ИСС "Кодекс". Информационно-справочная система
 17. Подготовка исходных данных для расчета статической устойчивости энергосистем (PID v. 1.00)
 18. Исследование режимов работы электрической сети (Vector 6.9 v.1.00)
 19. Лаборатория исследования устойчивости электрических систем (Elmech v.1.00)
 20. Многокритериальная оценка эффективности использования ветроэнергетических установок (Wind-MCA v.1.00)
 21. Navodka 2002 v.1.00
 22. Дистанционная защита (Distance v.1.00)
 23. Исследование переходных процессов при трехфазном коротком замыкании (Graphk3 v.1.00)
 24. MATLAB Academic new Product Concurrent Licenses
 25. Simulink Academic new Product Concurrent Licenses
 26. Simscape Power Systems Academic new Product Concurrent Licenses
 27. RastrWin (студенческая версия)
 28. Программные средства Autodesk
 29. Autocad - Профессиональное ПО для 2D и 3D проектирования
 30. National Instruments:
 31. LabVIEW Professional Development System,
 32. Circuit Design Suite, в который входят Multisim и Ultiboard.

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПОДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР и ПЗ</i>
1	2	3	4
Лк	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей	Плакаты. Демонстрационные образцы: полупроводниковые диоды, транзисторы, резисторы, тиристоры, конденсаторы, интегральные микросхемы	
ЛР	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей	Учебно-лабораторный стенд ЭИСЭС-1-Н-Р Осциллограф С1-60	№№ 1 - 3
ПЗ	Лаборатория измерительной техники и силовых преобразователей		№№ 1 - 4
СР	Читальный зал №1	Оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-3	Способность владеть основными методами, способами средствами получения, хранения, переработки информации	1. Введение	1.1. Роль электроники в современном мире. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Электронно-дырочный переход и его свойства.	Вопросы к зачету №№ 1-2
			2. Полупроводниковые приборы	
		2.2. Импульсные диоды		
		2.3. Туннельные диоды		
		2.4. Диоды Шоттки		
		2.5. Стабилитроны		
		2.6. Варикапы		
		2.7. Светодиоды		
		2.8. Фотодиоды		
		2.9. Тиристоры		
		3. Биполярные транзисторы	3.1. Структура и типы биполярных транзисторов	Вопросы к зачету №№ 12-14
			3.2. Режимы работы биполярных транзисторов	
			3.3. Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.	
		4. Полевые транзисторы	4.1. Структура и типы полевых транзисторов	Вопросы к зачету №№ 15-17
			4.2. Рабочий процесс полевых транзисторов	
			4.3. МДП-транзисторы	
		5. Усилители электрических сигналов	5.1. Симметричный дифференциальный усилитель	Вопросы к зачету №№ 18-21
			5.2. Операционный усилитель	
			5.3. Компаратор	
			5.4. Инвертирующий и неинвертирующий усилители	
		6. Стабилизаторы напряжения	6.1. Стабилизаторы постоянного тока	Вопросы к зачету №№ 22-24
			6.2. Импульсные стабилизаторы	
			6.3. Стабилизаторы переменного напряжения	
7. Выпрямители	7.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель	Вопросы к зачету №№ 25-26		
	7.2. Однофазный двухполупериодный выпрямитель			
8. Микроэлектроника	8.1. Основы микроэлектроники	Вопросы к зачету №№ 27-28		
	8.2. Полупроводниковые и гибридные микросхемы			

2. Вопросы к зачету

№ п/п	Компетенции		ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1	ОПК-3	Способность владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации	1. Собственная и примесная проводимости полупроводников.	1. Введение
			2. Электронно-дырочный переход и его свойства	
			3. Выпрямительные диоды	2. Полупроводниковые приборы
			4. Импульсные диоды	
			5. Туннельные диоды	
			6. Диоды Шоттки	
			7. Стабилитроны	
			8. Варикапы	
			9. Светодиоды	
			10. Фотодиоды	
			11. Тиристоры	
			12. Структура и типы биполярных транзисторов	
			13. Режимы работы биполярных транзисторов	
			14. Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.	4. Полевые транзисторы
			15. Структура и типы полевых транзисторов	
			16. Рабочий процесс полевых транзисторов	
			17. МДП-транзисторы	
			18. Симметричный дифференциальный усилитель	5. Усилители электрических сигналов
			19. Операционный усилитель	
			20. Компаратор	
			21. Инвертирующий и неинвертирующий усилители	6. Стабилизаторы напряжения
			22. Стабилизаторы постоянного тока	
			23. Импульсные стабилизаторы	
			24. Стабилизаторы переменного напряжения	
			25. Однофазный однополупериодный выпрямитель	7. Выпрямители
			26. Однофазный двухполупериодный выпрямитель	
			27. Основы микроэлектроники	8. Микроэлектроника
			28. Полупроводниковые и гибридные микросхемы	

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
Знать (ОПК-3): – физические процессы лежащие в основе принципов действия полупроводниковых и оптоэлектронных приборов; Уметь (ОПК-3):	зачтено	Обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал, дал правильные ответы на дополнительные вопросы
	не зачтено	Обучающийся допустил существенные ошибки при ответе на вопросы, на дополнительные вопросы давал неправильные ответы; все вышеуказанные разделы не усвоены.

<p>– определять дифференциальные параметры электронных приборов по их статическим характеристикам;</p> <p>Владеть (ОПК-3):</p> <p>– навыками экспериментального определения статических характеристик параметров различных электронных приборов и компьютерного исследования электрическим моделям</p>		
---	--	--

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Электроника направлена на формирование знаний элементной базы средств связи, применяемой в многоканальных телекоммуникационных системах, телевизионной, радиорелейной, тропосферной, космической и радиолокационной связи. Изучение принципов действия, характеристик, параметров и особенностей устройства важнейших полупроводниковых, электровакуумных и оптоэлектронных приборов, используемых в системах связи.

Изучение дисциплины Электроника предусматривает:

- лекции,
- лабораторные работы,
- практические занятия,
- самостоятельную работу,
- зачет.

В ходе освоения раздела 1 «Введение» студенты должны уяснить:

- собственную и примесную проводимости полупроводников,
- физические основы электронно-дырочного перехода и его свойства.

В ходе освоения раздела 2 «Полупроводниковые приборы» студенты должны уяснить:

- конструкцию, рабочий процесс, параметры, систему обозначения основных полупроводниковых приборов.

В ходе освоения раздела 3 «Биполярные транзисторы» студенты должны уяснить:

- конструкцию, рабочий процесс, параметры, схемы включения биполярных транзисторов.

В ходе освоения раздела 4 «Полевые транзисторы» студенты должны уяснить:

- конструкцию, рабочий процесс, параметры, схемы включения полевых транзисторов.

В ходе освоения раздела 5 «Усилители электрических сигналов» студенты должны уяснить:

- схемотехнику, принцип работы симметричного дифференциального усилителя, операционного усилителя, компаратора, инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

В ходе освоения раздела 6 «Стабилизаторы напряжения» студенты должны уяснить:

- принципы работы стабилизаторов напряжения различной модификации.

В ходе освоения раздела 7 «Выпрямители» студенты должны уяснить:

- устройство, принцип работы, выходные параметры, временные диаграммы выпрямителей.

В ходе освоения раздела 8 «Микроэлектроника» студенты должны уяснить:

- основы микроэлектроники, принципы создания полупроводниковых и гибридных микросхем.

Необходимо овладеть способностью владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется на первом этапе обратить внимание на основные физические и химические процессы полупроводников

Овладение ключевыми понятиями является основой для успешного усвоения работы всех функциональных устройств созданных на базе полупроводников.

При подготовке к зачету рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам:

1. Собственная и примесная проводимости полупроводников.
2. Электронно-дырочный переход и его свойства
3. Выпрямительные диоды
4. Импульсные диоды
5. Туннельные диоды
6. Диоды Шоттки
7. Стабилитроны
8. Варикапы
9. Светодиоды
10. Фотодиоды
11. Тиристоры
12. Структура и типы биполярных транзисторов
13. Режимы работы биполярных транзисторов
14. Схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.
15. Структура и типы полевых транзисторов
16. Рабочий процесс полевых транзисторов
17. МДП-транзисторы
18. Симметричный дифференциальный усилитель
19. Операционный усилитель
20. Компаратор
21. Инвертирующий и неинвертирующий усилители
22. Стабилизаторы постоянного тока
23. Импульсные стабилизаторы
24. Стабилизаторы переменного напряжения
25. Однофазный однополупериодный выпрямитель
26. Однофазный двухполупериодный выпрямитель
27. Основы микроэлектроники
28. Полупроводниковые и гибридные микросхемы.

В процессе проведения лабораторных работ и практических занятий происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков представления о полупроводниковых диодах, светодиодах, стабилитронах, диодах Шоттки, об усилителях

на основе биполярных транзисторов, о вентильных преобразователях электрической энергии.

Самостоятельную работу необходимо начинать с изучения теоретического материала.

В процессе консультации с преподавателем необходимо выяснить все непонятные, вызывающие сомнения вопросы.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературы.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной форме (в виде лекции-дискуссии, лекции-беседы, лекции с разбором конкретных ситуаций, просмотр и обсуждение видеоматериалов) в сочетании с внеаудиторной работой.

АННОТАЦИЯ рабочей программы дисциплины

Электроника

1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является: формирование знаний элементной базы средств связи, применяемой в многоканальных телекоммуникационных системах, телевизионной, радиорелейной, тропосферной, космической и радиолокационной связи. Изучение принципов действия, характеристик, параметров и особенностей устройства важнейших полупроводниковых, электровакуумных и оптоэлектронных приборов, используемых в системах связи.

Задачей изучения дисциплины является: ознакомление обучающихся с современным уровнем развития физических основ полупроводниковой электроники с учетом использования перспективных полупроводниковых материалов; методами, способами и средствами получения, хранения, переработки и передачи информации.

2. Структура дисциплины

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк - 18 ч; ЛР - 18 ч; ПЗ - 18 ч; СР - 54 ч.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 108 часов, 3 зачетных единицы

2.2 Основные разделы дисциплины:

- 1- Введение
- 2- Полупроводниковые приборы
- 3- Биполярные транзисторы
- 4- Полевые транзисторы
- 5- Усилители электрических сигналов
- 6- Стабилизаторы напряжения
- 7- Выпрямители
- 8 - Микроэлектроника

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК - 3 Способность владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации

4. Вид промежуточной аттестации: зачет

**Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20__-20__ учебный год**

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры № _____ от «__» _____ 20__ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

(Ф.И.О.)

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи от «06» марта 2015 г. № 174

для набора 2015 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «13» июля 2015 г. № 475

для набора 2016 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» июня 2016 г. №429

для набора 2017 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» марта 2017 г. №125

для набора 2018 года и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018 г. №130

Программу составил:

Астапенко Н.А. ст.преподаватель кафедры ЭиЭ

_____ (подпись)

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «__» декабря 2018 г., протокол № _____

Заведующий кафедрой ЭиЭ

_____ Ю.Н.Булатов

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой УТС

_____ И.В.Игнатъев

Директор библиотеки

_____ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией ФЭиА

от «28» декабря 2018 г., протокол № 5

Председатель методической комиссии факультета

_____ А.Д.Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник

учебно-методического управления

_____ Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____