

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электроники

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ.
ПОСОБИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники для специальностей, закрепленных за УМО
по образованию в области информатики и радиоэлектроники
в качестве пособия*

Минск БГУИР 2013

УДК [621.382.2/3+621.385.6](076)

ББК 32.85я73

Э45

Авторы:

А. Я. Бельский, С. В. Дробот, В. А. Мельников, В. Н. Путилин,
В. Б. Рожанский, В. Н. Русакович, М. С. Хандогин

Рецензенты:

кафедра электроники учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №15 от 27 марта 2012 г.);

заведующий кафедрой электротехники и электроники
Белорусского национального технического университета,
кандидат технических наук, доцент Ю. В. Бладыко

Э45 **Электронные приборы.** Пособие для студентов заочной формы
обучения : пособие / А. Я. Бельский [и др.]. – Минск : БГУИР, 2013. –
70 с. : ил.

ISBN 978-985-488-930-6.

Пособие содержит три раздела: «Электронные приборы», «Аналоговые и цифровые устройства», «Сверхвысокочастотные и квантовые приборы», по каждому из которых выполняется контрольная работа. Представлены краткое содержание теоретического материала, который изучается в рамках дисциплины, методические указания и контрольные задания.

Рекомендуется студентам заочной формы обучения радиотехнических специальностей, изучающим дисциплину «Электронные, сверхвысокочастотные и квантовые приборы», и студентам телекоммуникационных специальностей, изучающим дисциплину «Электронные приборы и устройства».

УДК [621.382.2/3+621.385.6](076)
ББК 32.85я73

ISBN 978-985-488-930-6

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Общие требования к выполнению контрольных работ.....	5
1. Электронные приборы.....	6
1.1. Теоретическое содержание раздела.....	6
1.2. Примерный перечень тем практических занятий.....	10
1.3. Примерный перечень тем лабораторных занятий.....	10
1.4. Литература.....	11
1.5. Методические указания по изучению теоретической части раздела.....	12
1.6. Контрольная работа №1.....	20
1.7. Методические указания по выполнению контрольной работы №1.....	23
2. Аналоговые и цифровые устройства.....	32
2.1. Теоретическое содержание раздела.....	32
2.2. Примерный перечень тем практических занятий.....	35
2.3. Примерный перечень тем лабораторных занятий.....	36
2.4. Литература.....	36
2.5. Методические указания по изучению теоретической части раздела.....	37
2.6. Контрольная работа №2.....	44
2.7. Методические указания по выполнению контрольной работы №2.....	45
3. Сверхвысокочастотные и квантовые приборы.....	55
3.1. Теоретическое содержание раздела.....	55
3.2. Примерный перечень тем лабораторных занятий.....	57
3.3. Литература.....	57
3.4. Методические указания по изучению теоретической части раздела.....	58
3.5. Контрольная работа №3.....	61
3.6. Методические указания по выполнению контрольной работы №3.....	65

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электронные приборы» для специальностей информатики и радиоэлектроники обеспечивает базовую подготовку студентов, необходимую для успешного изучения специальных дисциплин и последующего решения производственных и исследовательских задач в соответствии с образовательными стандартами. Целью изучения дисциплины является подготовка студентов к решению задач, связанных с рациональным выбором электронных приборов, их режимов работы и схем включения в различных устройствах, а также с расчетом и проектированием типовых радиоэлектронных схем.

Изучение дисциплины «Электронные приборы» опирается на содержание следующих дисциплин: «Высшая математика» (дифференциальное и интегральное исчисление, дифференциальные уравнения, функции комплексной переменной); «Физика» (электричество, магнетизм, электромагнитные волны, квантовая физика, физика твердого тела), «Теория электрических цепей» (теория линейных и нелинейных электрических цепей).

В результате изучения дисциплины «Электронные приборы» студент должен знать:

- физические основы явлений, принцип действия, устройство, параметры, характеристики электронных, сверхвысокочастотных и квантовых приборов и элементов микроэлектроники и их различных моделей, используемых при анализе и синтезе радиоэлектронных устройств;

- типовые схемотехнические решения аналоговых, импульсных и цифровых устройств различного функционального назначения;

- современное состояние и перспективы развития электронных приборов и радиоэлектронных устройств на их основе.

Студент должен уметь:

- использовать полученные знания для правильного выбора электронного прибора и задания его рабочего режима по постоянному току;

- находить параметры приборов по их характеристикам;

- определять влияние режимов и условий эксплуатации на параметры приборов;

- выполнять расчет типовых радиоэлектронных устройств;

- работать с электронными приборами и аппаратурой, используемой для исследования характеристик и измерения параметров приборов;

- работать с технической литературой, справочниками, стандартами, технической документацией по электронным приборам.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Целью выполнения контрольных работ является закрепление теоретического материала программы «Электронные приборы» и приобретение навыков анализа работы электронных приборов, аналоговых и импульсных электронных схем.

Номера вариантов задач контрольных работ определяются двумя последними цифрами номера зачетной книжки. Каким образом использовать эти цифры указано в условии каждой задачи и в таблицах с вариантами исходных данных.

Контрольная работа выполняется в обычной ученической тетради. Она должна быть аккуратно оформлена, разборчиво написана на одной стороне каждого листа, т. е. на правой странице развернутой тетради. Цвет написанного текста должен быть темный (синий, черный или фиолетовый). Левая страница должна быть оставлена чистой. Эта страница предназначена для внесения студентом исправлений и дополнений по результатам рецензии, что облегчает работу над ошибками самим студентам и рецензенту при повторном рецензировании. Страницы нумеруются. Оставляются поля шириной 3 см. Допускается оформлять контрольную работу с использованием ПЭВМ. В этом случае распечатка выполняется на листах бумаги формата А4 в портретной ориентации с учетом перечисленных выше требований.

На обложке тетради должен быть наклеен и заполнен адресный бланк, а на первой странице тетради – титульный бланк.

Графики и чертежи выполняются на миллиметровой бумаге с соблюдением правил ЕСКД и соответствующих стандартов. В виде исключения допускается выполнять графики и чертежи непосредственно на листах тетради в клеточку, если размер клетки 5 мм и построения выполнены с точностью не меньшей, чем на миллиметровой бумаге. Графики, чертежи и рисунки могут быть выполнены карандашом. Все графики, чертежи, рисунки и таблицы должны быть пронумерованы.

Расчетные формулы должны приводиться в тексте работы в общем виде с объяснением буквенных обозначений. Все числовые значения необходимо подставлять в формулы в единицах СИ (вольт, ампер, ом, секунда и т. д.) либо указывать единицы измерения. Результат расчета по каждой формуле должен приводиться с указанием единицы измерения полученной величины (кроме тех случаев, когда рассчитывается безразмерная величина).

Решение задач должно сопровождаться пояснениями по каждому пункту задания. Пояснения могут быть существенно более краткими, чем в приводимых ниже решениях задач, но достаточно полными для описания выполняемых действий.

В конце работы должна быть перечислена литература, использованная при решении задач. В качестве примера оформления списка литературы можно использовать список литературы из настоящих методических указаний.

Работа должна быть подписана студентом с указанием даты.

1. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

1.1. Теоретическое содержание раздела

1.1.1. Введение

Определение термина «электронные приборы». Классификация электронных приборов по характеру рабочей среды (вакуум, разреженный газ, твердое тело), принципу действия и диапазону рабочих частот. Основные свойства и особенности электронных приборов.

Краткий исторический очерк развития отечественной и зарубежной электронной техники. Роль электронных приборов в радиоэлектронике, телекоммуникационных системах, вычислительных комплексах и других областях науки и техники. Значение курса как одной из базовых дисциплин по специальностям информатики и радиоэлектроники.

1.1.2. Физические основы полупроводниковой электроники

Свойства полупроводников. Основные материалы полупроводниковой электроники (кремний, германий, арсенид галлия, нитрид галлия), их основные электрофизические параметры. Процессы образования свободных носителей заряда.

Концентрация свободных носителей в собственном и примесном полупроводниках, ее зависимость от температуры. Время жизни и диффузионная длина носителей. Уровень Ферми, его зависимость от температуры и концентрации примесей.

Кинетические процессы в полупроводниках. Тепловое движение и его средняя скорость. Дрейфовое движение, подвижность носителей заряда и ее зависимость от температуры и концентрации примесей. Плотность дрейфового тока, удельная проводимость полупроводников и ее зависимость от температуры и концентрации примесей. Движение носителей в сильных электрических полях, зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля. Диффузионное движение носителей, коэффициент диффузии, плотность диффузионного тока. Соотношение Эйнштейна. Появление электрического поля в полупроводнике при неравномерном распределении примесей.

Физические процессы у поверхности полупроводника. Поверхностные энергетические состояния, особенности движения носителей вблизи поверхности, поверхностная рекомбинация. Полупроводник во внешнем электрическом поле, длина экранирования. Обедненный, обогащенный и инверсионный слой.

Контактные явления в полупроводниках. Физические процессы в электронно-дырочном переходе. Образование обедненного слоя, условие равновесия. Уравнение Пуассона. Энергетическая диаграмма, распределение потенциала, напряженности электрического поля и объемного заряда в переходе. Высота потенциального барьера и ширина перехода.

Электронно-дырочный переход при подаче внешнего напряжения. Инжекция и экстракция носителей заряда. Особенности несимметричного перехода.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) идеализированного электронно-дырочного перехода. Распределение неравновесных носителей. Тепловой ток, его зависимость от ширины запрещенной зоны, концентрации примесей и тем-

пературы. Математическая модель и параметры идеализированного р-п-перехода: статическое и дифференциальное сопротивление, барьерная и диффузионная емкости перехода, их зависимость от приложенного напряжения. Пробой р-п-перехода. Виды пробоя.

Контакт металл – полупроводник. Выпрямляющий и невыпрямляющий (омический) контакты.

Гетеропереходы. Энергетические диаграммы. Особенности физических процессов. Особенности ВАХ.

1.1.3. Полупроводниковые диоды

Классификация полупроводниковых диодов по технологии изготовления, мощности, частоте и функциональному применению: выпрямительные, стабилитроны, варикапы, импульсные диоды, диоды с накоплением заряда, диоды Шотки, туннельные и обращенные диоды. Принцип работы, характеристики, параметры, схемы включения. Система обозначения полупроводниковых диодов. Влияние температуры на ВАХ.

1.1.4. Биполярные транзисторы

Устройство биполярного транзистора (БТ). Схемы включения. Основные режимы: активный, отсечки, насыщения, инверсный. Принцип действия транзистора: физические процессы в эмиттерном переходе, базе и коллекторном переходе; распределение неосновных носителей в базе при различных режимах. Эффект модуляции ширины базы. Токи в транзисторе, коэффициенты передачи тока в схемах с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ).

Физические параметры транзистора: коэффициент передачи тока, дифференциальные сопротивления и емкости переходов, объемные сопротивления областей.

Статические характеристики транзистора. Модель идеализированного транзистора (модель Эберса – Молла). Характеристики реального транзистора в схемах с ОБ и ОЭ. Влияние температуры на характеристики транзистора.

Транзистор как линейный четырехполюсник. Понятие малого сигнала. Системы Z-, Y-, H- параметров и схемы замещения транзистора. Связь H-параметров с физическими параметрами транзистора. Определение H-параметров по статическим характеристикам. Зависимость H-параметров от режима работы и температуры. T- и П-образные эквивалентные схемы транзисторов.

Работа транзистора с нагрузкой. Построение нагрузочной прямой. Принцип усиления.

Особенности работы транзистора на высоких частотах. Физические процессы, определяющие частотные параметры транзистора. Предельная и граничная частоты, эквивалентная схема транзистора на высоких частотах. Способы повышения рабочей частоты БТ.

Работа транзистора в импульсном режиме. Физические процессы накопления и рассасывания носителей заряда. Импульсные параметры транзистора.

Разновидности и перспективы развития БТ.

1.1.5. Полевые транзисторы

Полевой транзистор (ПТ) с управляющим р-п-переходом. Устройство, схемы включения. Принцип действия, физические процессы, влияние напряжений электродов на ширину р-п-перехода и форму канала. Статические характеристики, области отсечки, насыщения и пробоя р-п-перехода.

ПТ с барьером Шотки. Устройство, принцип действия. Характеристики и параметры.

ПТ с изолированным затвором. МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналами. Устройство, схемы включения. Режимы обеднения и обогащения в транзисторе со встроенным каналом и его статические характеристики.

ПТ как линейный четырехполюсник. Система Y-параметров полевых транзисторов и их связь с физическими параметрами. Влияние температуры на характеристики и параметры ПТ.

Работа ПТ на высоких частотах и в импульсном режиме. Факторы, определяющие частотные свойства. Предельная частота. Эквивалентная схема на высоких частотах. Области применения ПТ. Сравнение полевых и биполярных транзисторов. Перспективы развития и применения ПТ.

1.1.6. Переключающие приборы

Устройство, принцип действия, ВАХ, области применения, разновидности тиристоров: диодные тиристоры, триодные тиристоры, симметричные тиристоры. Параметры и система обозначения переключающих приборов.

Переходные процессы и импульсные свойства тиристоров.

Биполярный транзистор с изолированным затвором: устройство, принцип действия, характеристики и параметры, использование.

1.1.7. Элементы интегральных микросхем

Общие сведения о микроэлектронике. Классификация компонентов электронной аппаратуры и элементов гибридных микросхем. Пассивные дискретные компоненты электронных устройств (резисторы, конденсаторы, индуктивности). Назначение, физические основы работы, параметры, системы обозначения. Пассивные элементы интегральных микросхем: резисторы, конденсаторы. Биполярные транзисторы в интегральном исполнении, транзисторы с барьером Шотки, многоэмиттерные транзисторы. Диоды полупроводниковых ИМС. Биполярные транзисторы с инжекционным питанием. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС). Применение ПЗС. Параметры элементов ПЗС.

1.1.8. Компоненты оптоэлектроники

Определение оптического диапазона электромагнитных колебаний. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов. Электролюминесценция. Основные типы полупроводниковых излучателей: некогерентные и ко-

герентные полупроводниковые излучатели. Светодиоды, устройство, принцип действия, характеристики, параметры. Основные материалы, применяемые для изготовления светодиодов. Достижения в разработке светодиодов.

Полупроводниковые приемники излучения: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры. Принцип работы, характеристики, параметры.

Устройство оптронов, основные типы оптронов: резисторные, диодные, транзисторные и тиристорные. Классификация, принцип действия, входные и выходные параметры оптронов.

1.1.9. Электронно управляемые лампы

Электронная эмиссия. Виды эмиссии. Катоды электровакуумных приборов, основные типы катодов. Прохождение тока в вакууме, ток переноса, ток смещения, полный ток. Понятие о наведенном токе.

Вакуумный диод. Принцип действия. Понятие об объемном заряде. Режим насыщения и режим ограничения тока объемным зарядом. Идеализированная и реальная анодные характеристики диода. Статические параметры. Основные типы диодов, области применения.

Трехэлектродная лампа. Устройство, роль сетки в триоде. Понятие о действующем напряжении и проницаемости сетки. Токораспределение в триоде. Статические характеристики триода. Статические параметры и определение их по характеристикам. Междуэлектродные емкости. Режим работы триода с нагрузкой, нагрузочные характеристики, параметры режима работы с нагрузкой.

Тетроды и пентоды. Роль сеток. Действующее напряжение. Токораспределение. Статические характеристики и параметры многоэлектродных ламп, междуэлектродные емкости. Эквивалентные схемы электронных ламп на низких и высоких частотах.

Мощные генераторные и модуляторные лампы.

Особенности работы электронных ламп в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ). Влияние инерционных свойств электронного потока на работу электронных ламп. Влияние на параметры ламп диапазона СВЧ междуэлектродных емкостей и индуктивностей выводов. Особенности конструкции электронных ламп диапазона СВЧ. Мощные электронные лампы СВЧ-диапазона. Области применения электронных ламп диапазона СВЧ.

1.1.10. Приборы отображения информации

Классификация приборов для отображения информации.

Типы электронно-лучевых приборов. Устройство и принцип действия электронно-лучевых приборов. Элементы электронной оптики. Системы фокусировки и отклонения в электронно-лучевых трубках. Типы экранов электронно-лучевых трубок. Параметры экранов.

Типы электронно-лучевых трубок: осциллографические, трубки индикаторных устройств, кинескопы, трубки дисплеев, запоминающие трубки.

Полупроводниковые индикаторы.

Жидкокристаллические индикаторы. Основные параметры, характеризующие жидкие кристаллы. Устройство ЖКИ в проходящем и отраженном све-

те. Возможность отображения цвета в ЖКИ. ЖК-мониторы, устройство и их основные параметры.

Вакуумные накаливаемые индикаторы (ВНИ), вакуумные люминесцентные индикаторы (ВЛИ): одноразрядные, многоразрядные, сегментные ВЛИ, электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ). Устройство и принцип действия.

Газоразрядные индикаторы (ГРИ). Основные положения теории тлеющего разряда с холодным катодом. Дискретные газоразрядные индикаторы. Типы и основные параметры ГРИ. Устройство и принцип действия газоразрядных индикаторных панелей.

Современное состояние в области разработки приборов отображения информации.

1.1.11. Шумы электронных приборов

Источники шумов: тепловое движение, дробовой эффект, процессы генерации и рекомбинации, токораспределение, поверхностные явления. Спектральная характеристика шумов. Методы оценки шумовых свойств. Эквивалентные шумовые схемы полупроводниковых приборов и электронных ламп.

1.1.12. Эксплуатационные режимы и надежность электронных приборов

Номинальный и предельно допустимый режимы и их параметры. Механический и климатический режимы и их параметры. Герметизация, термостабилизация и температурная стабилизация. Влияние ионизирующих излучений на работу электронных приборов. Долговечность и экономичность. Надежность полупроводниковых и электровакуумных приборов.

1.2. Примерный перечень тем практических занятий

1. Электропроводность полупроводников (собственных и примесных). Контактная разность потенциалов.

2. Расчет параметров электронно-дырочного перехода.

3. Расчет параметров математической модели полупроводникового диода.

4. Полупроводниковые диоды: выпрямительные, стабилитроны, варакторы, импульсные. Расчет простейших схем.

5. Биполярные транзисторы. Режимы работы, схемы включения, дифференциальные параметры, эквивалентные схемы.

6. Полевые транзисторы. Разновидности, режимы работы: обогащения и обеднения. Статические параметры, эквивалентные схемы.

7. Задание режима по постоянному току в схемах с биполярными и полевыми транзисторами.

8. Работа электронных приборов с нагрузкой.

9. Оптоэлектронные приборы.

1.3. Примерный перечень тем лабораторных занятий

1. Исследование характеристик и параметров полупроводниковых диодов (выпрямительного, стабилитрона, варикапа, туннельного и др.).

2. Исследование характеристик и параметров биполярных транзисторов в схемах с общей базой и общим эмиттером.
3. Исследование малосигнальных, импульсных и частотных параметров биполярных транзисторов и их зависимостей от рабочего режима и температуры.
4. Исследование характеристик и параметров полевых транзисторов.
5. Исследование малосигнальных, импульсных и частотных параметров полевых транзисторов и их зависимости от рабочего режима и температуры.
6. Исследование характеристик и параметров тиристоров.
7. Исследование характеристик и параметров полупроводниковых оптоэлектронных приборов (светодиоды, фотодиоды, фототранзисторы).
8. Исследование оптронов.

1.4. Литература

1. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учеб. для студ. вузов / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. – 682 с.
2. Хандогин, М. С. Электронные приборы : учеб. пособие для студ. вузов / М. С. Хандогин, В. Б. Рожанский, С. В. Дробот. – Минск : БГУИР, 2011. – 310 с.
3. Шишкин, Г. Г. Электроника : учеб. для вузов / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. – М. : Дрофа, 2009. – 703 с.
4. Булычев, А. Л. Электронные приборы / А. Л. Булычев, П. М. Лямин, Е. С. Тулинов. – Минск : Выш. шк., 1999. – 414 с.
5. Аваев, Н. А. Основы микроэлектроники / Н. А. Аваев, Ю. Г. Наумов, В. Т. Фролкин. – М. : Радио и связь, 1991. – 288 с.
6. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – СПб. : Лань, 2003. – 480 с.
7. Дробот, С. В. Электронные приборы и устройства. Практикум : учеб. пособие для студ. вузов по спец. информатики и радиоэлектроники / С. В. Дробот, В. А. Мельников, В. Н. Путилин. – Минск : БГУИР, 2009. – 256 с.
8. Бельский, А. Я. Электронные приборы: цифровые устройства : учеб.-метод. пособие / А. Я. Бельский. – Минск : БГУИР, 2011. – 128 с.
9. Бельский, А. Я. Электронные приборы и устройства : практикум для студ. спец. «Электронные вычислительные средства» всех форм обуч. / А. Я. Бельский. – Минск : БГУИР, 2006. – 48 с.
10. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 2004. – 622 с.
11. Валенко, В. С. Электроника и микросхемотехника / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Минск : Беларусь, 2000. – 325 с.
12. Гуртов, В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие для вузов / В. А. Гуртов. – М. : Техносфера, 2005. – 408 с.
13. Терехов, В. А. Задачник по электронным приборам / В. А. Терехов. – СПб. : Лань, 2003. – 288 с.
14. Электронные приборы и устройства : лаб. практикум. В 2 ч. / А. Я. Бельский [и др.]. – Минск : БГУИР, 2005, 2007. – Ч. 1 – 62 с. ; Ч. 2 – 99 с.

15. Хрулев, А. К. Диоды и их зарубежные аналоги. В 3 т. / А. К. Хрулев, В. П. Черепанов. – М. : РадиоСофт, 1999. – Т. 1 – 640 с. ; Т. 2 – 640 с. ; Т. 3 – 704 с.

16. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы : транзисторы широкого применения: справочник / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, П. М. Лямин. – Минск : Беларусь, 1995. – 383 с.

17. Иванов, В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: справочник / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 448 с.

1.5. Методические указания по изучению теоретической части раздела

1.5.1. Введение. Физические основы полупроводниковых приборов

[1, с. 6–33; 2, с. 6–32; 3, с. 6–71; 4, с. 5–46]

При изучении данного материала необходимо получить четкие представления о процессе электропроводности в чистых (собственных) и примесных полупроводниках, особенностях кристаллической структуры полупроводника, энергетических уровнях электронов в атоме.

Необходимо разобраться в явлениях электропроводности собственных и примесных полупроводников, знать выражения для дрейфовых и диффузионных составляющих тока в полупроводнике, иметь представления о явлении рекомбинации носителей заряда и их времени жизни, уметь вывести уравнение непрерывности для одномерного случая и дать объяснение его физической сущности. Следует уяснить, что электронно-дырочный переход является основой при создании различных полупроводниковых приборов. Необходимо уметь объяснить при помощи энергетических и потенциальных диаграмм явления, происходящие в р-п-переходе в равновесном состоянии и при подаче на него напряжения в прямом и обратном направлениях.

Надо знать контактную разность потенциалов в р-п-переходе, инжекцию и экстракцию носителей через переход, емкостные свойства и виды пробоев р-п-перехода, ВАХ и параметры р-п-перехода: R_0 и $R_{диф}$.

Вопросы для самопроверки

1. Какой полупроводник называется: а) собственным; б) примесным?
2. Примеси какой валентности обеспечивают получение полупроводника: а) п-типа; б) р-типа?
3. Где располагается уровень Ферми в примесных полупроводниках: а) п-типа; б) р-типа?
4. Что такое диффузия носителей в полупроводнике?
5. Что такое дрейф носителей в полупроводнике?
6. Чем определяется электропроводность полупроводника: а) п-типа; б) р-типа?
7. Чем определяется величина дрейфового тока в полупроводнике?
8. Что такое равновесная, неравновесная и избыточная концентрация носителей заряда?

9. Что такое рекомбинация носителей заряда в полупроводнике и от чего она зависит?

10. Что такое время жизни неравновесных носителей заряда?

11. Что такое р-n-переход?

12. Чем объясняется изменение толщины р-n-перехода при включении внешнего источника?

13. Почему с ростом прямого напряжения ток через р-n-переход растет по экспоненциальному закону?

14. Чем отличается реальная ВАХ р-n-перехода от теоретической?

15. Какие виды пробоя имеют место в р-n-переходах?

16. Как зависит напряжение пробоя р-n-перехода от удельного сопротивления полупроводника?

17. Что такое зарядная емкость?

18. Что такое диффузионная емкость?

19. Нарисуйте эквивалентную схему р-n-перехода.

1.5.2. Полупроводниковые диоды

[1, с. 33–66; 2, с. 32–47; 3, с. 71–95; 4, с. 47–78]

В результате изучения материала необходимо ознакомиться с назначением, классификацией и системой обозначений, устройством полупроводниковых диодов. Изучить ВАХ и статические параметры реальных диодов, обратив особое внимание на электрические и эксплуатационные параметры, а также схемы включения диодов.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте классификацию диодов по конструкции, технологии и их применению.

2. Нарисуйте ВАХ германиевого и кремниевого выпрямительных диодов.

3. Назовите параметры выпрямительных диодов.

4. Каковы конструктивные особенности выпрямительных, высокочастотных и сверхвысокочастотных диодов?

5. Укажите параметры импульсных диодов.

6. Какие виды пробоя используются в стабилитронах?

7. Перечислите параметры стабилитрона.

8. От чего зависит напряжение стабилизации стабилитрона?

9. Нарисуйте схему включения стабилитрона. На чем основано его стабилизирующее действие?

10. Приведите основные параметры варикапов.

11. При каком смещении перехода используются варикапы?

12. Что такое добротность варикапов? Чем она определяется? Ее физический смысл.

13. Назовите пути повышения добротности варикапов.

14. В чем заключается явление туннельного эффекта? При каких условиях имеет место туннельный механизм прохождения тока через р-n-переход?

15. Укажите параметры туннельного диода.

16. Что такое обращенный туннельный диод?
17. Приведите примеры туннельных диодов.
18. Какие требования предъявляются к конструкции СВЧ-диодов? Перечислите области применения СВЧ-диодов.

1.5.3. Биполярные транзисторы

[1, с. 66–97; 2, с. 47–88; 3, с. 115–159; 4, с. 79–179]

При изучении данного материала основное внимание следует уделить физическим процессам, протекающим в транзисторе, а также режимам работы.

Необходимо ознакомиться с классификацией транзисторов по различным признакам и знать систему обозначений в соответствии с ГОСТ. Следует знать схемы включения транзисторов. Изучение статических характеристик транзистора при включении с общей базой и с общим эмиттером необходимо начинать, хорошо уяснив принцип работы транзистора, а также причины, вызывающие смещение характеристик при изменении температуры.

Для описания усилительных свойств транзистора в режиме малого сигнала вводят малосигнальные параметры, рассматривая транзистор как четырехполюсник. Особое внимание следует уделить системам гибридных H-параметров, методике определения этих параметров по статическим характеристикам. Важно уметь составить эквивалентные схемы и объяснить частотные свойства транзисторов.

При изучении транзистора в схеме усилителя необходимо овладеть методикой построения нагрузочных характеристик на семействах входных и выходных характеристик, необходимо знать физический смысл параметров режима усиления.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте классификацию транзисторов.
2. Поясните устройство и принцип действия биполярного транзистора.
3. В какой из областей транзистора концентрация примеси выше: в области базы или в области эмиттера?
4. С какой целью площадь коллекторного перехода обычно делают существенно большей по сравнению с площадью эмиттерного перехода?
5. Назовите три основных режима работы транзистора.
6. Что такое коэффициент инжекции (эффективность эмиттера)? Почему он должен быть как можно более близок к единице?
7. Что такое коэффициент переноса? От каких параметров базы зависит его величина?
8. Как связаны между собой коэффициент усиления по току, эффективность эмиттера и коэффициент переноса?
9. Нарисуйте три схемы включения биполярного транзистора. Каковы особенности каждой из этих схем?
10. Нарисуйте семейства входных и выходных характеристик транзистора в схеме с общей базой.

11. Нарисуйте семейства входных и выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером.
12. Определите h -параметры транзистора по статическим характеристикам.
13. Что называется предельной частотой усиления по току?
14. Как зависит коэффициент передачи тока от частоты в схеме с общей базой и в схеме с общим эмиттером?
15. Дайте определение максимальной частоты генерации транзистора. Как она связана с граничной частотой $f_{гр}$?
16. В какой схеме – с общей базой или с общим эмиттером – выше предельная частота коэффициента передачи тока и примерно во сколько раз?
17. Как влияет время рассасывания носителей заряда в базе на частотные свойства транзистора?
18. Чем характеризуется ключевой режим работы транзистора?

1.5.4. Полевые транзисторы

[1, с. 97–120; 2, с. 88–106; 3, с. 178–205; 4, с. 180–213]

В результате изучения данного материала необходимо знать устройство и принцип действия полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом, МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналами, их характеристики и параметры; уметь определять малосигнальные параметры по статическим характеристикам; иметь четкие представления о влиянии режима работы и температуры на характеристики и параметры полевых транзисторов; знать области применения полевых транзисторов.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.
2. Нарисуйте сток-затворную характеристику полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и поясните ее ход.
3. Для чего канал полевого транзистора с управляющим p - n -переходом изготавливают из слаболегированного полупроводника?
4. В чем состоит различие между МДП-транзистором с индуцированным и встроенным каналами?
5. Почему входное дифференциальное сопротивление полевого транзистора с изолированным затвором больше, чем у полевого транзистора с управляющим p - n -переходом?
6. Какие основные отличия стоковых характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом от аналогичных характеристик:
 - а) полевого транзистора с управляющим p - n -переходом;
 - б) МДП-транзистора со встроенным каналом?
7. Назовите дифференциальные параметры полевого транзистора.
8. Что такое режим обеднения и обогащения?
9. Почему уровень шума полевых транзисторов меньше, чем биполярных?

1.5.5. Переключающие приборы

[1, с. 120–129; 2, с. 114–120; 3, с. 159–178, 201–204; 4, с. 214–220]

При изучении данного материала необходимо знать устройство и принцип действия динисторов, тринисторов, симметричных тиристоров, биполярных транзисторов с изолированным затвором, их характеристики и параметры, области применения.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните работу динистора. Нарисуйте ВАХ.
2. Объясните механизм управления процессом переключения в тринисторе.
3. Назовите параметры тиристора.
4. Чем отличается механизм включения тринистора от механизма включения динистора?
5. Опишите устройство и характеристики симметричного тиристора.
6. Приведите систему обозначения и маркировку переключающих приборов.
7. Поясните структуру полевого транзистора с изолированным затвором.

1.5.6. Элементы интегральных микросхем

[1, с. 164–190; 2, с. 106–114; 3, с. 205–228; 4, с. 367–392]

При изучении материала необходимо ознакомиться с принципами построения интегральных микросхем и выявить особенности активных и пассивных элементов.

Для лучшего усвоения материала необходимо ознакомиться с технологическими процессами, используемыми при изготовлении микросхем (фотолитография, диффузия, окисление).

Важным звеном при создании микросхем является изоляция элементов интегральных схем, а также изготовление пассивных элементов интегральных схем – диффузионных резисторов и конденсаторов.

Необходимо также ознакомиться с особенностями биполярных интегральных транзисторов, способами получения диодов из транзисторных структур, структурами полевых транзисторов, а также с приборами с зарядовой связью.

Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризуйте требования, предъявляемые к современным микросхемам.
2. Укажите технологические этапы изготовления интегральной схемы.
3. Назовите способы изоляции элементов полупроводниковой интегральной схемы.
4. Какими методами создаются пленочные элементы интегральных схем?
5. Какие навесные элементы используются в гибридных интегральных схемах?
6. Охарактеризуйте принцип работы приборов с зарядовой связью.
7. Назовите параметры ПЗС.

8. Укажите области применения ПЗС.

1.5.7. Компоненты оптоэлектроники

[1, с. 129–164; 2, с. 163–182, 3, с. 450–521; 4, с. 328–351]

Изучение этого материала необходимо начать с явлений внутреннего и внешнего фотоэффектов, которые лежат в основе работы всех фотоэлектрических приборов. После этого необходимо изучить принцип работы и параметры фоторезисторов, фотоэлементов, фотодиодов, фототранзисторов.

В последнее время широко начали применяться излучающие полупроводниковые приборы, использующие явления инжекционной электролюминесценции, – люминесцентные индикаторы и светодиоды. Сочетание фотоприемников и излучателей позволило создать новые приборы – оптроны. Необходимо знать устройство и принцип действия простейших разновидностей оптронов.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные законы фотоэффекта.
2. На чем основан принцип действия фоторезистора?
3. Назовите параметры фоторезистора.
4. Чем определяется величина темнового тока у фоторезистора?
5. Для чего служит фотоэлемент и в каких областях науки и техники он применяется?
6. Что такое ЭДС холостого хода и короткого замыкания фотоэлемента?
7. Чем отличается фотодиод от фотоэлемента?
8. Укажите основные параметры фотодиода в фотодиодном и вентильном режимах.
9. Объясните устройство и принцип действия фототранзистора.
10. Назовите характеристики фототранзистора, включенного по схеме с общим эмиттером и плавающей базой.
11. Какие преимущества имеют фототранзисторы по сравнению с фотодиодами?
12. Какие полупроводниковые приборы относятся к излучательным?
13. Объясните принцип работы светодиода?
14. Что такое оптрон?
15. Назовите разновидности оптронов, приведите их основные характеристики и параметры.

1.5.8. Электронно-управляемые лампы

[1, с. 457–467; 2, с. 120–134; 3, с. 301–328; 4, с. 224–281]

Необходимо знать устройство электронных ламп, назначение их отдельных элементов, принцип управления анодным током. Обратите внимание на конструкции, основные параметры термокатодов и их типы.

Следует разобраться в механизме влияния пространственного заряда электронов на величину анодного тока диода и на этой основе уяснить сущность режимов пространственного заряда и насыщения.

Из-за наличия между катодом и анодом пространственного (объемного) заряда, созданного электронами, движущимися к аноду, анодный ток не прямо пропорционален анодному напряжению, а подчиняется закону «степени трех вторых». При изучении параметров диодов основное внимание следует уделить физическому смыслу и математической записи формул статических параметров, а также уяснить достоинства и недостатки двухэлектродных ламп по сравнению с полупроводниковыми диодами.

Необходимо изучить принцип электростатического управления током с помощью сетки и понятие действующего потенциала, подробно разобраться в вопросах токораспределения в триодах при положительной сетке, четко представлять связь токораспределения в режимах прямого перехвата и возврата электронов, изучить статические характеристики и параметры триода. В результате изучения необходимо понимать физический смысл, знать соотношения между основными статическими параметрами S , R_i , μ .

В многоэлектродных лампах устраняется основной недостаток триода – большая проходная емкость и малый статический коэффициент усиления. При изучении многосеточных ламп надо иметь в виду, что принцип электростатического управления является общим для ламп с любым количеством сеток.

Важным вопросом при рассмотрении тетродов и пентодов является токораспределение в лампах, оказывающее влияние на их параметры. Следует подробно разобраться в вопросах возникновения динатронного эффекта и способах его устранения.

Дифференциальные параметры тетродов и пентодов определяются по статическим характеристикам (за исключением статического коэффициента μ) по методике, рассмотренной применительно к триоду. Необходимо знать конструктивные особенности и типы мощных генераторных и модуляторных ламп.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроена и работает двухэлектродная лампа?
2. Как распределен потенциал в диоде с плоскопараллельными электродами? Как изменяется это распределение при изменении потенциала анода и напряжения накала катода?
3. Напишите формулу закона «степени трех вторых» и объясните смысл входящих в нее величин. При каких условиях выполняется этот закон в диоде?
4. Дайте определение основных статических параметров диода. Каков их физический смысл?
5. Чем ограничен максимальный анодный ток диода?
6. Какие факторы влияют на работу диода на высоких частотах?
7. Какую роль играет сетка в триоде?
8. Что такое действующий потенциал в триоде и как он определяется?

Напишите формулу закона «степени трех вторых».

9. Нарисуйте анодные, анодно-сеточные, сеточные и сеточно-анодные характеристики. Поясните ход характеристик.

10. Поясните токораспределение в триоде.
11. Что такое режим прямого перехвата и режим возврата?
12. Дайте определение статических параметров триода, поясните их физический смысл.
13. Что такое рабочий режим триода?
14. Что такое режим неискаженного усиления?
15. Как выбирается режим неискаженного усиления усилительного триода с активной нагрузкой в анодной цепи?
16. Какими параметрами характеризуется работа триода в режиме усиления напряжения?
17. Какие требования предъявляются к триодам, предназначенным для усиления напряжения и мощности?
18. Какие междуэлектродные емкости существуют в триоде?
19. Для чего предназначена экранирующая сетка в тетроде?
20. Напишите выражение для действующего потенциала тетрода и формулу закона «степени трех вторых».
21. Как подавляется динатронный эффект в лучевом тетроде?
22. Каковы особенности конструкции лучевого тетрода?
23. Изобразите семейство анодных характеристик лучевого тетрода. Поясните ход характеристик. Возможен ли динатронный эффект в лучевом тетроде?
24. Объясните назначение сеток в пентоде.
25. Напишите выражение закона «степени трех вторых» для пентода.
26. Назовите основные статические параметры пентода, дайте их определение и поясните физический смысл.
27. Что такое пентод с переменной крутизной?
28. Расскажите о двойном управлении анодным током в пентоде. Каков механизм управляющего действия первой и третьей сеток?

1.5.9. Приборы отображения информации

[1, с. 467–506; 2, с. 134–163; 3, с. 328–361, 416–450; 4, с. 282–336]

Изучите принцип действия, конструкции прожекторов ЭЛТ с электростатической фокусировкой и прожектора с магнитной фокусировкой луча.

В результате изучения отклоняющих систем трубок необходимо освоить расчет чувствительности электромагнитной и электростатической систем отклонения луча, изучить достоинства и недостатки каждой из систем, а также экраны, их устройство и параметры.

Необходимо знать электронно-лучевые трубки специального назначения: радиолокационные осциллографические, запоминающие, индикаторные, кинескопы.

Следует усвоить принцип действия, устройство, основные параметры жидкокристаллических (ЖКИ), полупроводниковых, газоразрядных индикаторов.

Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте и поясните устройство трубки с электростатической фокусировкой и электростатическим отклонением луча.
2. Нарисуйте и поясните устройство трубки с электромагнитной фокусировкой и с магнитным отклонением луча.
3. Как устроен прожектор современной осциллографической трубки?
4. Какие преимущества и недостатки имеет система магнитной фокусировки по сравнению с системой электростатической фокусировки?
5. Как отводится электрический заряд с экрана трубки?
6. Назовите основные параметры экранов ЭЛТ.
7. Как устроен кинескоп?
8. Опишите устройство и принцип действия ЖКИ.
9. Объясните устройство и принцип действия полупроводниковых индикаторов.
10. Приведите устройство и принцип действия основных типов газоразрядных индикаторов и панелей.

1.6. Контрольная работа №1

Задача №1

Рассчитать и построить ВАХ идеализированного кремниевого диода в пределах изменения напряжения от -5 до $+0,7$ В при $T = 300$ К и обратном токе насыщения, равном I_0 . Значение теплового потенциала $\phi_T = kT/q$ при $T = 300$ К принять равным $0,026$ В.

Определить дифференциальное $r_{\text{диф}}$ и статическое сопротивление R_0 диода для заданного значения $U_{\text{пр}}$. Величины I_0 , $U_{\text{пр}}$ приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Последняя цифра шифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
I_0 , нА	0,15	0,2	0,25	0,3	0,5	0,8	0,4	0,6	0,7	1,0
Предпоследняя цифра шифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_{\text{пр}}$, В	0,2	0,3	0,45	0,5	0,35	0,55	0,6	0,25	0,4	0,35

Задача №2

Стабилитрон подключен для стабилизации напряжения параллельно резистору нагрузки R_H . Параметры стабилитрона $U_{\text{ст}}$, $I_{\text{ст min}}$, $I_{\text{ст max}}$ и сопротивление нагрузки R_H приведены в табл. 1.2. Определите величину сопротивления ограничительного резистора $R_{\text{огр}}$, если входное напряжение $U_{\text{вх}}$ изме-

няется от $U_{\text{вх min}} = 20 \text{ В}$ до $U_{\text{вх max}} = 30 \text{ В}$. Будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения входного напряжения $U_{\text{вх}}$?

Таблица 1.2

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{\text{ст min}}$, мА	1	1	3	3	5	5	5	5	1	5
$I_{\text{ст max}}$, мА	20	20	25	25	25	25	30	30	20	30
Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_{H} , кОм	1	1	1,5	1,5	2	2	2,5	2,5	3	4
$U_{\text{ст}}$, В	8	9	10	11	12	13	14	8	9	7

Задача №3

Пользуясь справочными данными, приведите семейство входных и выходных характеристик БТ с ОЭ. В качестве независимых переменных используйте входное и выходное напряжение. Тип транзистора выберите согласно табл. 1.3 в соответствии с шифром. Поясните поведение входных и выходных характеристик транзистора.

Таблица 1.3

Последняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип транзистора	КТ 603В	КТ 325А	КТ 301Б	КТ 340А	КТ 342А	КТ 351А	КТ 368А	КТ 3127А	КТ 608А	КТ 646А

По справочнику установите максимально допустимые параметры БТ: постоянный ток коллектора $I_{\text{К max}}$; напряжение коллектор – эмиттер $U_{\text{КЭ max}}$; мощность, рассеиваемую коллектором транзистора $P_{\text{К max}}$. На семейство выходных характеристик нанесите границы области допустимых режимов работы.

Задайтесь положением рабочей точки и, пользуясь характеристиками, рассчитайте для нее значения h -параметров БТ. На основании полученных числовых значений параметров рассчитайте параметры Т-образной эквивалентной схемы транзистора и изобразите ее. Полученные h -параметры для схемы с ОЭ пересчитайте для схем включения с ОБ и ОК.

Задача №4

Рассчитайте модуль $|h_{21э}|$ и фазу $\varphi_{h_{21э}}$ коэффициента передачи по току БТ в схеме с ОЭ на частоте f , максимальную частоту генерирования f_{max} . В качестве ис-

ходных данных используйте заданные в табл. 1.4 значения предельной частоты коэффициента передачи по току в схеме с ОБ $f_{h_{216}}$, статического коэффициента передачи по току в схеме с ОБ α , емкости коллекторного перехода C_K и частоты f .

Таблица 1.4

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{h_{216}}$, МГц	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
f , кГц	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α	0,98	0,975	0,973	0,978	0,95	0,965	0,959	0,983	0,976	0,985
r_b , Ом	200	180	150	140	130	120	110	100	90	80
C_K , пФ	15	13	12	10	8	7	6	5	4	3

Задача №5

Усилительный каскад выполнен на ПТ КП302Б в схеме с ОИ (рис. 1.6).

Рабочая точка ПТ задается напряжением источника питания $U_{ИП} = 10$ В и параметрами приведенными в табл. 1.5.

1. Нарисуйте принципиальную схему усилителя.
2. На семействе статических ВАХ транзистора постройте нагрузочную прямую и определите положение рабочей точки.
3. Для найденной рабочей точки определите сопротивление резистора в цепи истока $R_{И}$ и малосигнальные параметры S , R_i и μ .
4. Графоаналитическим методом определите параметры режима усиления K_U и $P_{ВЫХ}$ при амплитуде входного сигнала $U_{зи м} = 0,25$ В.

Таблица 1.5

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_C , кОм	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,8	0,9
Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{зи0}$, В	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,7	-1,8	-1,9

Задача №6

Фотодиод включен последовательно с источником питания и резистором R . Обратный ток насыщения затемненного фотодиода (темновой ток) равен I_0 .

Фототок диода в фотогальваническом режиме при коротком замыкании перехода составляет I_{Φ_1} при потоке световой энергии Φ_1 ; I_{Φ_2} при потоке световой энергии Φ_2 ; $I_{\Phi_3} = 0$ при потоке световой энергии $\Phi_3 = 0$.

Определите напряжение холостого хода U_{xx} диода для Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 , а также значения Φ_1 и Φ_2 (лм), считая токовую чувствительность при монохроматическом световом потоке равной $S_I = 1,5 \cdot 10^{-2}$ мкА/лм.

Рассчитать и построить семейство ВАХ идеализированного фотодиода для световых потоков Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 в диапазоне напряжений U от U_{xx} до -10 В (при расчетах считать, что фототок не зависит от напряжения на запертом переходе; $T = 300$ К).

Описать принцип работы, характеристики и параметры фотодиода. Значения R , I_0 , I_{Φ_1} , I_{Φ_2} приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Последняя Цифра шифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
I_0 , мкА	2	0,5	1	3	8	7	5	1	7	4
Предпоследняя Цифра шифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
R , кОм	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
I_{Φ_1} , мкА	20	30	40	50	40	30	20	30	40	50
I_{Φ_2} , мкА	100	90	60	120	80	60	50	70	110	130

1.7. Методические указания по выполнению контрольной работы №1

Задача №1

Рассчитать и построить ВАХ идеального диода $I = f(U)$ при комнатной температуре (300 К), если тепловой ток $I_0 = 0,1$ нА.

Расчет ВАХ проведем в соответствии с выражением $I = I_0(e^{qU/kT} - 1)$, в котором величина I_0 представляет тепловой ток р-п-перехода, называемый также током насыщения. Для комнатной температуры тепловой потенциал $\phi_T = kT/q = 0,026$ В. Результаты расчета прямой ветви ($U > 0$) ВАХ представлены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

$U_{пр}$, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$I_{пр}$, А	0	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	1,1

Результаты расчета обратной ветви ($U < 0$) представлены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

$U_{обр}, В$	0	-0,05	-0,1	-0,2	-1	-5
$I_{обр}, мкА$	0	$-8,5 \cdot 10^{-11}$	$-9,8 \cdot 10^{-11}$	$-9,99 \cdot 10^{-11}$	$-1,0 \cdot 10^{-11}$	$-1,0 \cdot 10^{-11}$

График построенной ВАХ диода изображена на рис. 1.1.

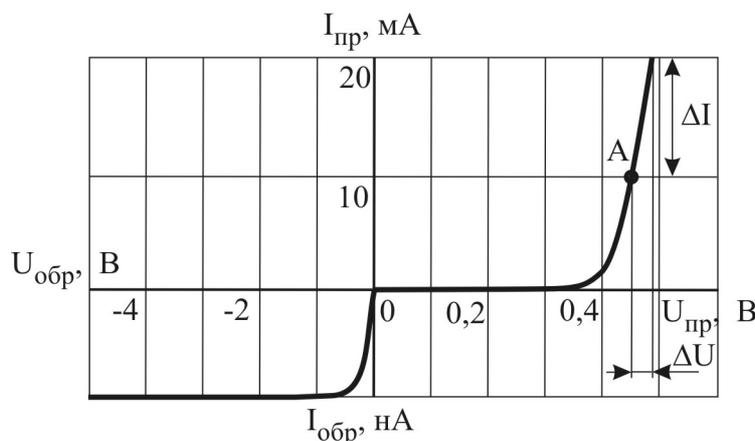


Рис. 1.1

Для определения дифференциального сопротивления диода $R_{диф} = \frac{dU}{dI}$, выбрав на прямой ветви вольт-амперной характеристики рабочую точку А и задав небольшое приращение напряжения ΔU , получают приращение тока ΔI (рис. 1.1). Тогда

$$r_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0,03}{10 \cdot 10^{-3}} = 3 \text{ Ом.}$$

Изменение напряжения ΔU и соответствующее ему изменение тока ΔI можно найти, пользуясь расчетными значениями, сведенными в таблицу.

Аналитическое выражение для дифференциального сопротивления диода (сопротивления переменному току) получим, взяв производную $\frac{dU}{dI}$ из выра-

$$\text{жения для ВАХ диода } I = I_0 (e^{qU/kT} - 1): r_{диф} = \frac{kT}{q} \frac{1}{(I_0 + I)} \approx \frac{kT}{qI}.$$

Статическое сопротивление диода (сопротивление постоянному току) в рабочей точке А определяется как отношение напряжения в рабочей точке к току $R_0 = \frac{U}{I} = \frac{0,45}{10 \cdot 10^{-3}} = 45 \text{ Ом}$. При этом всегда выполняется условие $R_0 > r_{диф}$.

Задача №2

Стабилитрон подключен для стабилизации напряжения к резистору нагрузки R_H , как показано на рис. 1.2.

Известны параметры стабилитрона – $U_{ст}$, $I_{ст \min}$, $I_{ст \max}$ – и сопротивление нагрузки – R_H . Необходимо определить сопротивление ограничительного резистора $R_{огр}$, если напряжение на входе изменяется от $U_{вх \min}$ до $U_{вх \max}$. Будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения входного напряжения?

Выберем средний ток стабилитрона из условия

$$I_{ст} = \frac{I_{ст \max} + I_{ст \min}}{2}.$$

При этом необходимая величина входного напряжения будет равна

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{ст}} + R_{\text{огр}}(I_{\text{Н}} + I_{\text{ст}}).$$

Отсюда можно найти необходимую величину ограничительного резистора:

$$R_{\text{огр}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{Н}} + I_{\text{ст}}}.$$

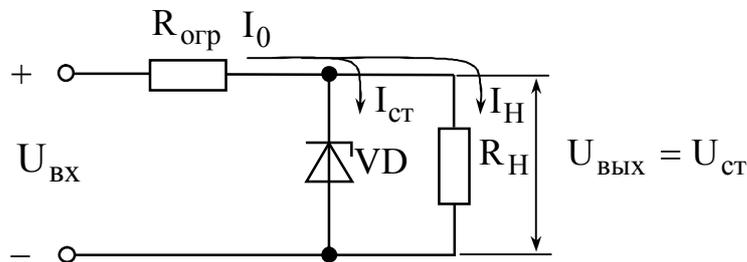


Рис. 1.2

Границы допустимого диапазона изменения входного напряжения определяем, пользуясь выражениями:

$$U_{\text{вх min}} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст min}} + I_{\text{Н}}) \cdot R_{\text{огр}};$$

$$U_{\text{вх max}} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст max}} + I_{\text{Н}}) \cdot R_{\text{огр}},$$

и сравниваем с заданным диапазоном изменения входного напряжения.

Пусть, например, сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}} = 2,2 \text{ кОм}$; $I_{\text{ст min}} = 1 \text{ мА}$;

$I_{\text{ст max}} = 20 \text{ мА}$; $U_{\text{вх min}} = 16 \text{ В}$; $U_{\text{вх max}} = 24 \text{ В}$; $U_{\text{ст}} = 13 \text{ В}$.

По вышеприведенным выражениям находим

$$I_{\text{ст}} = (20 + 1) / 2 = 10,5 \text{ мА}.$$

Необходимая величина входного напряжения

$$U_{\text{вх}} = (24 + 16) / 2 = 20 \text{ В}.$$

Ток нагрузки

$$I_{\text{Н}} = U_{\text{ст}} / R_{\text{Н}} = 13 / 2,2 = 5,9 \text{ мА}.$$

Тогда

$$R_{\text{огр}} = (20 - 13) / (10,5 + 5,9) \approx 0,43 \text{ кОм}.$$

Диапазон изменения входного напряжения определяется следующими границами:

$$U_{\text{вх min}} = 13 + (1 + 5,9) \cdot 0,43 \approx 16 \text{ В};$$

$$U_{\text{вх max}} = 13 + (20 + 5,9) \cdot 0,43 \approx 24,1 \text{ В}.$$

Вывод: стабилизация напряжения осуществляется во всем диапазоне изменения входного напряжения.

Задача №3

Рассмотрим методику определения h-параметров БТ по статическим ВАХ.

Статические ВАХ БТ позволяют определить дифференциальные параметры транзистора. Для описания свойств транзистора по переменному току

чаще всего используется система дифференциальных h-параметров, которая представляется следующими уравнениями:

$$dU_1 = h_{11}dI_1 + h_{12}dU_2;$$

$$dI_2 = h_{21}dI_1 + h_{22}dU_2.$$

Для нахождения h-параметров по статическим характеристикам дифференциалы заменим конечными приращениями и получим выражения, позволяющие определить физический смысл h-параметров:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad \text{– входное сопротивление в режиме короткого замыка-$$

ния (КЗ) на выходе;

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const}} \quad \text{– коэффициент обратной связи по напряжению в ре-$$

жиме холостого хода (ХХ) по входу;

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad \text{– коэффициент передачи по току в режиме КЗ на выходе;}$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const}} \quad \text{– выходная проводимость в режиме ХХ по входу.}$$

Для расчета h-параметров удобно использовать семейства входных и выходных характеристик БТ. Рассмотрим порядок графоаналитического метода расчета h-параметров БТ с ОЭ. Для определения дифференциальных параметров $h_{11э}$ и $h_{12э}$ в заданной рабочей точке А ($U_{БЭ0}$, $I_{Б0}$, $U_{КЭ0}$) на линейном участке семейства входных характеристик необходимо выполнить построения, как показано на рис. 1.3, а. Найденные приращения токов и напряжений позволяют определить искомые параметры:

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{БЭ} = \text{const}} = \left. \frac{U_{БЭ}'' - U_{БЭ}'}{I_{Б}'' - I_{Б}'} \right|_{U_{БЭ} = \text{const}},$$

$$h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б} = \text{const}} = \left. \frac{U_{БЭ}'' - U_{БЭ0}}{U_{КЭ}'' - U_{КЭ0}} \right|_{I_{Б} = \text{const}}.$$

Параметры $h_{21э}$ и $h_{22э}$ определяются по семейству выходных характеристик. В окрестности точки А' ($I_{К0}$, $U_{КЭ0}$, $I_{Б0}$), соответствующей точке А на семействе входных характеристик, выполняют построения как показано на рис. 1.3, б. Найденные приращения токов и напряжений позволяют определить искомые параметры:

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} = \left. \frac{I_{К}'' - I_{К}'}{I_{Б}'' - I_{Б}'} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}},$$

$$h_{22\varepsilon} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{K\varepsilon}} \right|_{I_B = \text{const}} = \left. \frac{I_K^{iv} - I_K'''}{U_{K\varepsilon}'' - U_{K\varepsilon}'} \right|_{I_B = \text{const}}$$

Значения приращений входного $\Delta U_{B\varepsilon}$ и выходного $\Delta U_{K\varepsilon}$ напряжения должны выбираться таким образом, чтобы вспомогательные точки на графиках находились на их линейных участках, как это показано на рис. 1.3.

Аналогично определяются h-параметры для транзистора с ОБ.

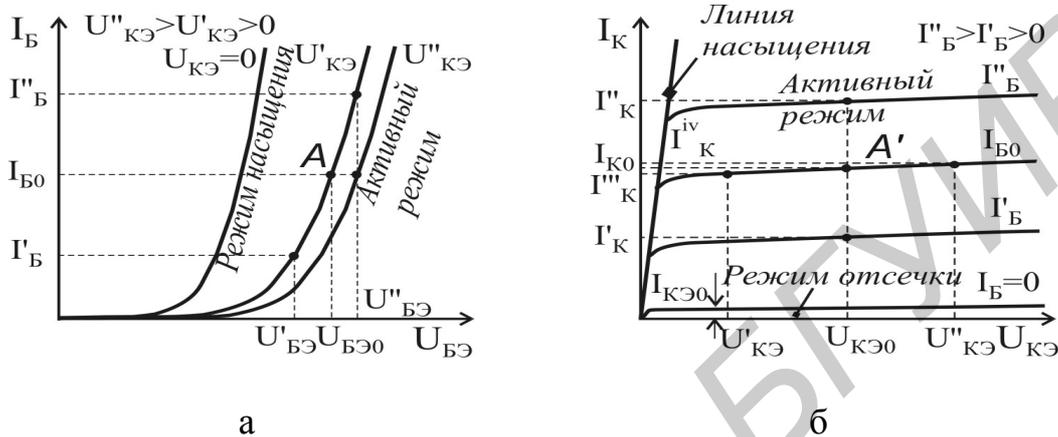


Рис. 1.3

Коэффициент обратной связи по напряжению $h_{12\varepsilon}$ имеет очень малую величину ($10^{-4} \dots 10^{-3}$), поэтому в справочных данных приводят семейство входных ВАХ, состоящее из двух кривых: первая – для $U_{K\varepsilon} = 0$, вторая – для $U_{K\varepsilon} \neq 0$. Обычно для $U_{K\varepsilon} = 5$ или 10 В. Это обусловлено тем, что входные характеристики для $U_{K\varepsilon} > 1$ В практически накладываются друг на друга. Использование приведенных характеристик не позволяет точно рассчитать значение $h_{12\varepsilon}$. Для вычисления величины коэффициента обратной связи по напряжению необходимо рассчитать параметры Т-образной эквивалентной схемы БТ.

Физическая Т-образная эквивалентная схема транзистора со структурой п-р-п, представленная на рис 1.4, достаточно полно отражает свойства реального транзистора на низких частотах и используется при анализе транзисторных схем. Значения параметров эквивалентной схемы БТ могут быть найдены с использованием известных h-параметров:

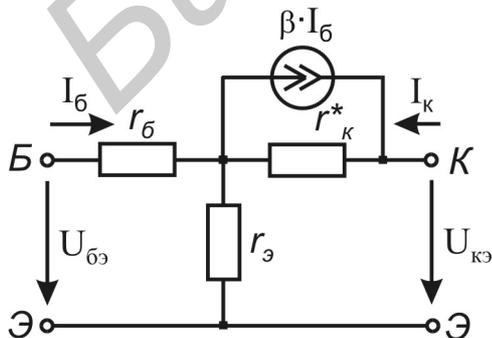


Рис. 1.4

$$r_э = \frac{h_{12\varepsilon}}{h_{22\varepsilon}}, r_к^* = \frac{1}{h_{22\varepsilon}}, \beta = h_{21\varepsilon},$$

$$r_б = h_{11\varepsilon} - (1 + h_{21\varepsilon})r_э.$$

С учетом вышесказанного в первую очередь вычисляется дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода $r_э = \phi_T / I_{\varepsilon 0}$, где $\phi_T = kT/q$ – тепловой потенциал, равный 26 мВ при $T = 300$ К; $I_{\varepsilon 0}$ – ток эмиттера БТ в рабочей

точке (можно считать $I_{Э0} \approx I_{К0}$). Затем определяются $r_{к}^*$, β и находится коэффициент обратной связи по напряжению $h_{12э} = r_{э} \cdot h_{22э}$.

Используя рассчитанные h-параметры для схемы с ОЭ, произвести расчет h-параметров для схем включения с ОБ и ОК. Выражения, связывающие h-параметры для трех схем включения БТ, представлены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Схема с ОБ	Схема с ОЭ	Схема с ОК
$h_{11б}$	$h_{11э} \approx \frac{h_{11б}}{1-\alpha}$	$h_{11к} \approx \frac{h_{11б}}{1-\alpha}$
$h_{12б}$	$h_{12э} \approx \frac{h_{11б}h_{22б}}{1-\alpha} - h_{12б}$	$h_{12к} \approx -1$
$h_{21б}$	$h_{21э} \approx \frac{\alpha}{1-\alpha}$	$h_{21к} \approx -\frac{1}{1-\alpha}$
$h_{22б}$	$h_{22э} \approx \frac{h_{22б}}{1-\alpha}$	$h_{22к} \approx \frac{h_{22б}}{1-\alpha}$

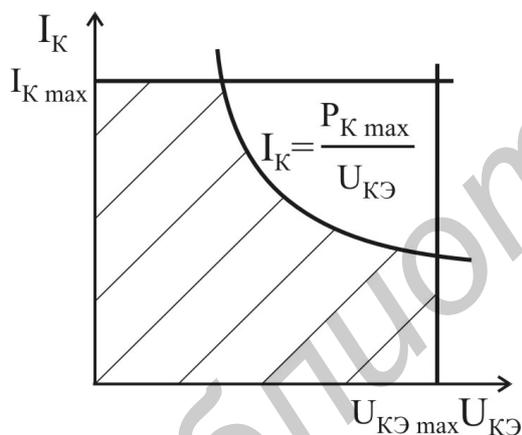


Рис. 1.5

Область допустимых режимов на семействе выходных характеристик БТ, представленная на рис. 1.5 определяется его максимально допустимыми параметрами: 1) постоянным током коллектора $I_{К max}$; 2) постоянным напряжением коллектор – эмиттер $U_{КЭ max}$; 3) постоянной рассеиваемой мощностью коллектора $P_{К max}$, равной произведению $I_K U_{КЭ}$.

Рабочая точка БТ для работы в мало-сигнальном усилителе выбирается обычно в центре области допустимых режимов работы БТ на линейных участках ВАХ, соответствующих активному режиму работы.

Задача №4

На высоких частотах возникает фазовый сдвиг между входным и выходным токами БТ, обусловленный конечным временем пролета носителей от эмиттера к коллектору и наличием емкостей переходов БТ. Это приводит к комплексному характеру коэффициентов передачи по току и их частотной зависимости:

$$\dot{h}_{21б}(f) = |h_{21б}(f)|e^{j\varphi_{h_{21б}}(f)} \quad \text{и} \quad \dot{h}_{21э}(f) = |h_{21э}(f)|e^{j\varphi_{h_{21э}}(f)}.$$

Необходимо уяснить понятие предельной частоты коэффициента передачи по току БТ для схемы включения с ОБ и ОЭ. Частотные зависимости модуля и фазы коэффициентов передачи по току характеризуются выражениями:

$$|h_{216}(f)| = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + (f/f_{h_{216}})^2}}; \quad \varphi_{h_{216}} = \arctg(f/f_{h_{216}});$$

$$|h_{219}(f)| = \frac{\beta}{\sqrt{1 + (f/f_{h_{219}})^2}}; \quad \varphi_{h_{219}} = \arctg(f/f_{h_{219}}),$$

где α , β – статические коэффициенты передачи по току БТ для включения с ОБ и ОЭ, соответственно; $f_{h_{216}}$, $f_{h_{219}}$ – предельные частоты коэффициентов передачи по току для схемы с ОБ и ОЭ соответственно.

Причем связь между этими частотами определяется выражением $f_{h_{219}} = f_{h_{216}} / (1 + \beta)$.

Пусть, например, $f_{h_{216}} = 5$ МГц; $\alpha = 0,98$; $f = 200$ кГц. Определим статический коэффициент передачи по току для включения с ОЭ:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,98}{1 - 0,98} = 49.$$

Тогда предельная частота коэффициента передачи по току для включения с ОЭ

$$f_{h_{219}} = \frac{f_{h_{216}}}{1 + \beta} = \frac{5 \cdot 10^6}{1 + 49} = 100 \text{ кГц},$$

модуль коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ

$$|h_{219}| = \frac{49}{\sqrt{1 + (200/100)^2}} \approx 22$$

и фаза коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ

$$\varphi_{h_{219}} = \arctg(f/f_{h_{219}}) = \arctg(2) = 63,4^\circ.$$

Максимальная частота генерации БТ определяется выражением

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{f_{\text{гр}}}{8 \pi r_{\text{б}} C_{\text{К}}}},$$

где $f_{\text{гр}} = h_{216} f_{h_{216}}$ – граничная частота коэффициента передачи по току в схеме с ОБ; $r_{\text{б}}$ – объемное сопротивление базы БТ; $C_{\text{К}}$ – емкость коллекторного перехода.

Для приведенных параметров при $r_{\text{б}} = 75$ Ом и $C_{\text{К}} = 4$ пФ получим

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{0,98 \cdot 5 \cdot 10^6}{8 \cdot \pi \cdot 75 \cdot 4 \cdot 10^{-12}}} \approx 25,5 \text{ МГц}.$$

Задача №5

Усилительный каскад на ПТ, схема которого приведена на рис. 1.6, выполнен по схеме с общим истоком (ОИ). Напряжение смещения задается автоматически за счет включения в цепь истока резистора $R_{И}$, падение напряжения на котором определяет напряжение $U_{ЗИ} = U_3 - U_{И} = -I_C R_{И}$.

Уравнение нагрузочной прямой описывается выражением

$$U_{ИП} = U_{СИ} + I_C(R_C + R_{И}) = U_{СИ} + I_C R_C + |U_{ЗИ}|,$$

тогда $I_C = (U_{ИП} - U_{СИ} - |U_{ЗИ}|) / R_C$.

Нагрузочная прямая на семействе выходных характеристик ПТ проводится через две точки, лежащие на осях координат: точку $U_{ИП}$ на оси напряжений и точку $I_C = (U_{ИП} - |U_{ЗИ}|) / R_C$ на оси токов, как показано на рис. 1.7.

Точка пересечения нагрузочной прямой с характеристикой, соответствующей заданному значению $U_{ЗИ} = U_{ЗИ0}$, дает положение рабочей точки «О», которой соответствует ток стока $I_C = I_{C0}$ и напряжение $U_{СИ} = U_{СИ0}$.

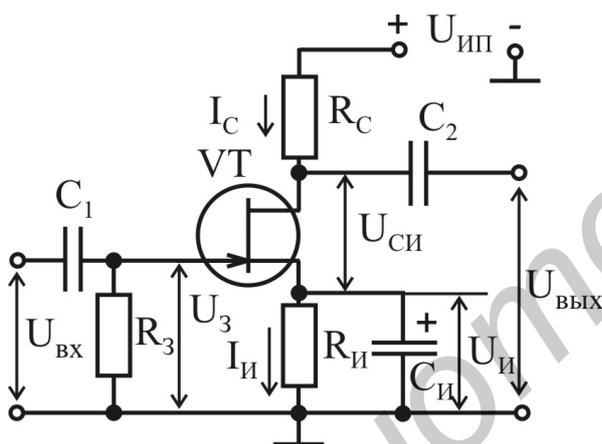


Рис. 1.6

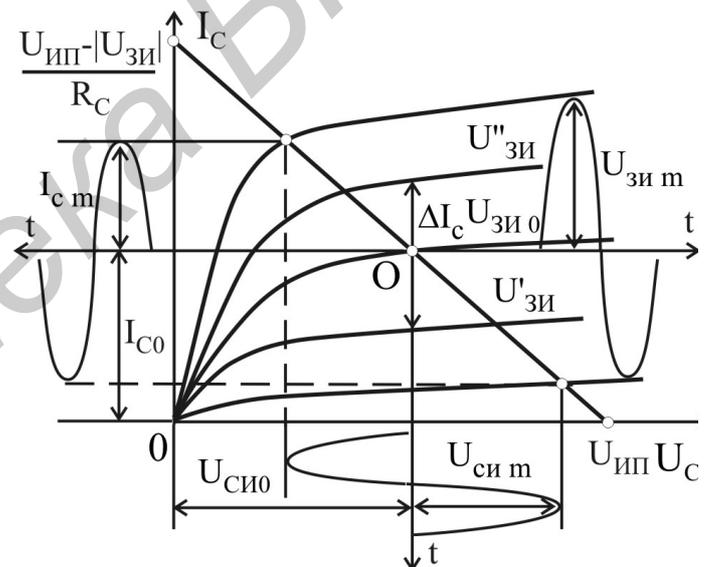


Рис. 1.7

Сопротивление резистора в цепи истока находим из формулы

$$R_{И} = U_{ЗИ} / I_C.$$

Малосигнальные параметры S , R_i и μ определяются выражениями:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ}=\text{const}}; \quad R_i = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ}=\text{const}}; \quad \mu = \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} \right|_{I_C=\text{const}} = S \cdot R_i.$$

При определении графическим методом крутизны S в рабочей точке необходимо найти изменение тока стока ΔI_C , соответствующее изменению напряжения $\Delta U_{ЗИ} = U''_{ЗИ} - U'_{ЗИ}$ при постоянном $U_{СИ}$, как показано на рис. 1.7, и воспользоваться следующим выражением:

$$S = \frac{\Delta I_C}{U''_{ЗИ} - U'_{ЗИ}}$$

Коэффициент усиления по напряжению и выходная мощность находится из выражений:

$$K_u = \frac{U_{сим}}{U_{зим}}, \quad P_{вых} = 0,5 U_{сим} \cdot I_{см}$$

Задача №6

Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов:

- 1) без внешнего источника электрической энергии (вентильный, фотогенераторный или фотогальванический режим);
- 2) с внешним источником электрической энергии (фотодиодный или фотопреобразовательный режим) (рис. 1.8).

Ток, протекающий через фотодиод, можно представить в виде формулы

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_\Phi,$$

где I_Φ – фототок; I_0 – тепловой ток p-n-перехода; U – напряжение на диоде.

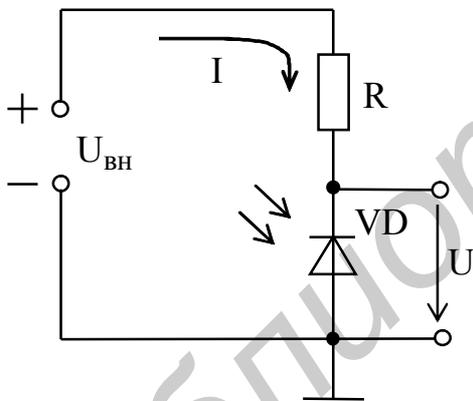


Рис. 1.8

При разомкнутой внешней цепи $R_H = \infty$, $I = 0$ легко выразить напряжение холостого хода или фотоЭДС:

$$U_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_\Phi}{I_0} \right).$$

Статическая интегральная токовая чувствительность при монохроматическом световом потоке определяется отношением $S_I = I_\Phi / \Phi$ (мкА/лм). Для фотодиода, работающего в фотодиодном режиме, удобно использовать вольттовую чувствительность $S_U = S_I \cdot R$, (В/лм).

2. АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА

2.1. Теоретическое содержание раздела

2.1.1. Параметры и характеристики аналоговых устройств

Требования, предъявляемые к аналоговым устройствам. Коэффициенты усиления: по току, напряжению, мощности. Входное и выходное сопротивления усилительных каскадов. Коэффициент демпфирования. Коэффициент полезного действия и выходная мощность каскада усиления. Чувствительность усилительных устройств и их полоса пропускания. Нелинейные и линейные искажения сигнала и их оценка. Характеристики усилительных устройств: амплитудно-частотная, фазочастотная, амплитудная и переходная.

2.1.2. Обеспечение режима работы усилительных элементов по постоянному току

Цепи питания, обеспечивающие режим покоя активного элемента в усилительном устройстве: схемы с фиксированным током базы, напряжением база – эмиттер; эмиттерная и коллекторная стабилизация, схемы с термокомпенсацией. Стабильность рабочей точки.

Генераторы стабильного тока и их использование для обеспечения стабилизации токов покоя транзисторов.

Режимы работы усилительных элементов в усилительных каскадах. Коэффициент полезного действия и допустимая мощность рассеяния на транзисторе с учетом температуры окружающей среды и наличия радиатора.

Построение нагрузочных характеристик. Определение параметров рабочего режима.

2.1.3. Обратная связь и ее влияние на показатели и характеристики усилительных устройств

Принцип и назначение обратной связи в усилительных устройствах. Основные способы обеспечения обратной связи. Методы анализа усилительных устройств, охваченных обратной связью. Влияние обратной связи на основные показатели и характеристики усилительных устройств. Чувствительность показателей усилительных устройств, охваченных обратной связью, к изменению параметров их элементов.

Многокаскадные усилители, охваченные обратной связью; использование критериев устойчивости при расчете этих усилителей. Обеспечение устойчивости усилителей, охваченных глубокой отрицательной обратной связью; применение корректирующих цепей.

2.1.4. Каскады предварительного усиления

Требования, предъявляемые к каскадам предварительного усиления и особенности их анализа. Усилительные каскады с общим эмиттером и общей

базой. Усилительные каскады на полевых транзисторах с общим истоком, их принципиальные и эквивалентные схемы. Эмиттерный и истоковый повторители. Применение упрощенных эквивалентных схем для анализа каскадов усиления по переменному току без применения ЭВМ. Расчет входного и выходного сопротивлений, коэффициентов усиления по току, напряжению, мощности.

Частотные искажения в области нижних частот и искажения вершины импульса, возникающие в резисторных каскадах усилителей переменного тока вследствие наличия разделительных конденсаторов и конденсаторов в эмиттерной (истоковой) цепи усилительного элемента.

Применение машинных методов расчета с использованием полных эквивалентных схем при разработке усилителей, изготавливаемых по интегральной технологии.

2.1.5. Оконечные каскады

Требования, предъявляемые к оконечным каскадам усиления. Особенности их работы. Однотактные оконечные каскады.

Двухтактные оконечные каскады. Особенности работы и свойства двухтактных каскадов. Трансформаторные двухтактные каскады. Применение класса работы активного элемента В и АВ. Нелинейные искажения в двухтактных каскадах. Бестрансформаторные двухтактные каскады и их расчет.

Оконечные каскады усиления мощности с повышенным коэффициентом полезного действия.

2.1.6. Усилители постоянного тока

Требования, предъявляемые к усилителям постоянного тока. Усилители постоянного тока прямого усиления, особенности задания тока покоя. Причины возникновения и способы уменьшения дрейфа нуля. Усилители постоянного тока с преобразованием сигнала. Принципы построения, основные преимущества и недостатки.

Дифференциальный усилительный каскад. Основные свойства и расчет этого каскада. Коэффициент усиления по дифференциальному и синфазному сигналам. Относительное ослабление синфазной составляющей сигнала. Дифференциальные усилительные каскады с повышенным значением коэффициента усиления и входного сопротивления.

2.1.7. Операционные усилители и их применение

Интегральные операционные усилители (ОУ) и их классификация. ОУ общего применения, прецизионные, микромощные, быстродействующие. Принципиальная схема ОУ общего применения. Схемотехника входных и выходных каскадов. Основные параметры и характеристики операционных усилителей. Обеспечение устойчивости операционных усилителей, охваченных обратной связью.

Операционные и другие усилители – основные элементы устройства аналоговой обработки сигналов.

Инвертирующие и неинвертирующие усилители с точным значением коэффициента усиления.

Устройства, осуществляющие суммирование, вычитание, дифференцирование, интегрирование и другие операции над сигналом.

Усилители, обеспечивающие усиление сигнала с большим динамическим диапазоном.

Активные RC-фильтры и способы их реализации. Реализация активных RC-фильтров с помощью операционных усилителей, охваченных частотно-зависимой обратной связью.

2.1.8. Электронные ключевые схемы

Ключевой режим работы электронных приборов. Представление об идеальном ключевом элементе. Параметры неидеальности ключевого элемента: остаточные статические параметры, время включения и выключения. Ключевой режим работы амплитудного ограничителя.

Одновходовый транзисторный ключ с общим эмиттером: статические режимы, переходные процессы, быстродействие, методы повышения быстродействия (ключи с барьером Шотки).

Ключи на полевых транзисторах. Ключи на комплементарных транзисторах. Сравнительные характеристики ключей с нелинейной, квазилинейной и активной нагрузкой.

2.1.9. Цифровые логические устройства

Основы алгебры логики и ее основные законы. Логические функции (сложение, умножение, инверсия). Реализация логических функций с помощью электронных схем. Свойство двойственности логических элементов. Одноступенчатая и двухступенчатая логики. Логические элементы и их классификация. Базовые логические элементы цифровых интегральных микросхем. Диодно-транзисторная логика; транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ). Микросхемы ТТЛ серий с открытым коллектором и правила их схемного включения. Эмиттерно-связанная логика. Интегральная инжекционная логика. Логические элементы на МДП-транзисторах. Параметры цифровых интегральных логических схем.

2.1.10. Триггеры

Принципы построения устройства с двумя статическими состояниями устойчивого равновесия на дискретных и логических элементах, основные области их использования.

Классификация триггеров по функциональному признаку (синхронные, асинхронные), условные обозначения. Динамические, установочные и управляющие входы асинхронного триггера. Особенности использования в цифро-

вых устройствах синхронных триггеров без внутренней задержки, с внутренней задержкой и динамическим тактовым входом.

Триггеры на логических элементах с установочными входами: асинхронный RS-триггер, синхронный RS-триггер, D-триггер, T-триггер, MS-триггер, JK-триггер. Параметры триггеров.

2.1.11. Мультивибраторы

Ждущий и самовозбуждающийся мультивибратор с коллекторно-базовыми связями: схема, принцип действия, условия работоспособности, переходные процессы формирования временно устойчивого состояния и восстановления заряда на времязадающем конденсаторе. Модификация основных схем.

Ждущие и самовозбуждающиеся мультивибраторы на логических интегральных схемах: принцип действия, разновидности схемной реализации, условия работоспособности и основные характеристики.

2.1.12. Цифроаналоговые устройства

Коммутаторы аналоговых сигналов. Переключатели напряжения и тока, их основные характеристики, варианты схемной реализации на диодах и транзисторных ключевых элементах. Активные коммутаторы.

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Коммутируемые делители напряжения и тока, их основные характеристики, особенности интегрального исполнения. Параметры ЦАП.

Генераторы линейно изменяющегося (развертывающего) напряжения (ГЛИН): основные характеристики и области использования ГЛИН, структурные схемы, сравнительная характеристика ГЛИН с цифровым и аналоговым интегрированием, разновидности схемной реализации ГЛИН с аналоговым интегрированием (с простой RC-цепью, компенсационные с положительной и отрицательной обратной связью).

Устройства выборки и хранения информации.

2.1.13. Аналого-цифровые устройства

Амплитудные компараторы. Основные статические и динамические характеристики синхронных и асинхронных компараторов. Безгистерезисные асинхронные компараторы с параллельной и последовательной схемой сравнения. Интегральные компараторы. Регенеративные асинхронные компараторы (формирующие триггеры). Синхронные компараторы. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Их классификация по областям применения. Параметры АЦП.

2.2. Примерный перечень тем практических занятий

1. Способы задания рабочей точки биполярного транзистора. Расчет элементов схем.

2. Графоаналитический метод расчета усилителей.
3. Расчет по переменному току малосигнальных усилительных каскадов на биполярных транзисторах.
4. Расчет эмиттерного (истокового) повторителей.
5. Расчет по переменному току малосигнальных усилительных каскадов на полевых транзисторах.
6. Расчет по переменному току выходных усилительных каскадов на биполярных транзисторах.
7. Расчет ключевых схем.
8. Расчет мультивибраторов.
9. Расчет схем, использующих операционные усилители.

2.3. Примерный перечень тем лабораторных занятий

1. Исследование усилительных каскадов в схеме ОЭ, ОИ.
2. Исследование эмиттерного и истокового повторителей.
3. Исследование влияния обратных связей на параметры и характеристики усилителей.
4. Исследование ОУ.
5. Исследование устройств на ОУ для обработки аналоговых сигналов (инвертирующий, неинвертирующий усилители, устройства суммирования, вычитания, дифференцирования и др.).
6. Исследование ключевых схем.
7. Исследование характеристик и параметров логических устройств.
8. Исследование триггеров на логических элементах.
9. Исследование характеристик генератора линейно изменяющегося напряжения.
10. Исследование характеристик и параметров мультивибратора.
11. Исследование интегрального ЦАП и АЦП.

2.4. Литература

1. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учеб. для студ. вузов / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2011. – 682 с.
2. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учеб. для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров ; под ред. О. П. Глудкина. – М. : Радио и связь, 1999. – 768 с.
3. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 2004. – 790 с.
4. Валенко, В. С. Электроника и микросхемотехника : учеб. пособие / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Минск : Беларусь, 2000. – 320 с.
5. Павлов, В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств / В. Н. Павлов, В. Н. Ногин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2001. – 320 с.

6. Дробот, С. В. Электронные приборы и устройства. Практикум : учеб. пособие для студ. вузов по спец. информатики и радиоэлектроники / С. В. Дробот, В. А. Мельников, В. Н. Путилин. – Минск : БГУИР, 2009. – 256 с.

7. Бельский, А. Я. Электронные приборы: цифровые устройства : учеб.-метод. пособие / А. Я. Бельский. – Минск : БГУИР, 2011. – 128 с.

8. Электронные приборы и устройства : лаб. практикум. В 2 ч. Ч. 2 : Аналоговые и импульсные устройства / А. Я. Бельский [и др.]. – Минск : БГУИР, 2007. – 99 с.

9. Бельский, А. Я. Электронные приборы и устройства : практикум для студ. спец. «Электронные вычислительные средства» всех форм обуч. / А. Я. Бельский. – Минск : БГУИР, 2006. – 48 с.

10. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы : транзисторы широкого применения : справочник / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, П. М. Лямин. – Минск : Беларусь, 1995. – 383 с.

11. Нефедов, А. В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги : справочник. В 12 т. / А. В. Нефедов. – М. : КУБК-а, ИП РадиоСофт, 1996–2001.

2.5. Методические указания по изучению теоретической части раздела

2.5.1. Параметры и характеристики аналоговых устройств.

Обеспечение режима работы усилительных элементов по постоянному току

[1, с. 190–216; 2, с. 135–145; 3, с. 239–282]

Основное внимание следует уделить изучению устройства и принципа работы усилителя. Усилитель характеризуется рядом параметров и характеристик, взаимосвязанных между собой. Необходимо знать эту взаимосвязь и уметь определять основные параметры усилителя по его характеристикам, а также уяснить, для каких целей используется тот или иной параметр. Знание основных отличий характеристик идеального и реального усилителей поможет изучить в дальнейшем основные направления развития схемотехники усилителей.

Особое внимание надо уделить понятию «рабочая точка», уяснить необходимость обеспечения стабильности требуемых токов и напряжений во входной и выходной цепях усилителя, а также способов задания режима покоя и его стабилизации. Необходимо знать схемотехнику генераторов стабильного тока, используемых в интегральных усилителях.

Следует научиться выполнять графоаналитический расчет рабочего режима усилителя.

Выбором положения рабочей точки активного элемента усилителя (изменяя режим работы) можно управлять КПД и нелинейными искажениями усилителя. В диапазоне звуковых частот режимы класса В и АВ используются только в двухтактных усилителях.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите структурную схему усилителя. Запишите соотношение между выходным сопротивлением усилителя и величиной сопротивления нагрузки для обеспечения режима усиления по току, по напряжению, по мощности.

2. Что такое линейные и нелинейные искажения? Какие причины вызывают эти искажения?

3. Нарисуйте типовую переходную характеристику усилителя с RC-связью.

4. Изобразите идеальные и реальные амплитудные, амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики усилителя.

5. Перечислите признаки, по которым производится классификация усилителей.

2.5.2. Обратная связь и ее влияние на показатели и характеристики усилительных устройств

[1, с. 216–230; 2, с. 157–184; 3, с. 251–264]

Для получения более равномерной в широком частотном диапазоне АЧХ, а также для увеличения стабильности в усилителях применяют отрицательную обратную связь (ООС) по напряжению и (или) по току. Следует иметь в виду, что использование того или иного вида обратной связи диктуется теми свойствами усилителей, которые необходимо получить. Поэтому следует подробно остановиться на изменении основных параметров усилителей при введении обратных связей. Частным случаем усилителя с ООС является эмиттерный и истоковый повторители, поэтому анализ их работы аналогичен анализу работы усилителя с ООС. Обратите внимание на их схемную реализацию, а также проанализируйте параметры этих повторителей.

Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте структурные схемы усилителей, охваченных следующими видами обратных связей: параллельной по току и последовательной по напряжению.

2. Что такое глубина обратной связи, и как она влияет на коэффициент усиления?

3. Поясните, чем определяется коэффициент передачи цепи обратной связи в случае параллельной обратной связи по току и последовательной по напряжению?

4. Укажите области применения положительной обратной связи.

5. Поясните, как возникает паразитная обратная связь через общий источник питания.

6. Рассмотрите виды обратных связей, используемых в усилителях. Приведите примеры усилителей с различными обратными связями.

7. Объясните влияние обратной связи на линейные и нелинейные искажения, вносимые усилителем.

8. Объясните влияние ОС на входные сопротивления усилителя. Какой вид ОС целесообразно использовать для повышения входного сопротивления усилителя?

2.5.3. Каскады предварительного усиления

[1, с. 234–267; 2, с. 183–220; 3, с. 283–388]

При рассмотрении принципа построения, схем и свойств однокаскадных усилителей сначала обратите внимание на определение и назначение усилителей, их состав, основные элементы. Проследите, как строятся однокаскадные транзисторные усилители в соответствии с общим определением усилителя.

В результате изучения темы, связанной с построением одиночных усилительных каскадов, следует знать три способа включения усилительного элемента, а также принципиальную схему каждого из видов усилительных каскадов, уметь производить расчет усилительного каскада по постоянному и переменному току, проводить графический анализ работы.

Для соединения каскадов, а также для подключения усилителей к входной цепи и нагрузке обычно используется один из следующих видов связи: RC-связь, трансформаторная и гальваническая. Элементы в цепях связи определяют вид амплитудно-частотной и переходной характеристик усилителя. Нужно знать основные схемы низкочастотной и высокочастотной коррекции. Анализ и расчет усилителей данного класса базируется на использовании эквивалентных схем по переменному току для средних, низких и высших частот.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните работу усилительного каскада на биполярном транзисторе в схеме с ОЭ.

2. Какими особенностями отличается эмиттерный повторитель? Какие методы используются для повышения его входного сопротивления?

3. Нарисуйте принципиальную схему усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком и поясните его работу.

4. Объясните особенности характеристик и параметров истокового повторителя.

5. Приведите формулы для расчета коэффициента усиления каскада с общим эмиттером с использованием внутренних параметров транзистора.

6. Дайте сравнительную характеристику параметров каскадов, использующих три схемы включения транзистора.

7. Приведите схему усилительного каскада с общим истоком и автоматическим смещением.

2.5.4. Оконечные каскады

[1, с. 267–286; 3, с. 345–374; 5, с. 180–154]

Оконечные (выходные) усилители в литературе часто называют усилителями мощности, но усиление мощности есть свойство любого усилителя. По-

этому под окончательным мощным каскадом понимают такой усилитель, для которого задается нагрузка, а следовательно, ток и напряжение (т. е. мощность) в ней. В качестве такой нагрузки могут выступать как различные исполнительные устройства систем управления (например, обмотки реле, электродвигатели), так и входные цепи еще более мощных усилительных схем. Расчет усилителей мощности обычно производится графическим методом.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите основные расчетные соотношения для однотактного каскада класса А и двухтактного выходного каскада классов В и АВ.

2. Нарисуйте схему и поясните принцип действия бестрансформаторного выходного каскада на комплементарных транзисторах.

3. Какие особенности окончательных усилительных каскадов? Почему обычные резистивные каскады имеют малый КПД? Пути повышения КПД окончательных каскадов.

4. Назовите причины нелинейных искажений в двухтактном трансформаторном каскаде класса В.

2.5.5. Усилители постоянного тока

[1, с. 257–262, 286–307; 2, с. 221–237; 3, с. 317–329]

Особенности работы усилителей постоянного тока (УПТ) связаны с отсутствием разделительных емкостей или трансформаторов в цепях межкаскадной связи, поэтому при изучении данной темы следует рассмотреть способы согласования режимов по постоянному току смежных каскадов.

Важным параметром схемы УПТ является дрейф, приведенный ко входу усилителя. Одним из способов уменьшения дрейфа является построение УПТ с преобразованием сигнала по схеме модулятор – демодулятор – модулятор.

При изучении свойств дифференциальных каскадов усилителей обратите внимание на то, что в них отсутствуют емкостные связи. Это позволяет, с одной стороны, получать большой коэффициент усиления, с другой – устраняется постоянное напряжение на нагрузке при отсутствии сигнала. Рассмотрите принципиальные схемные решения дифференциальных каскадов, коэффициенты усиления дифференциального и синфазного сигналов. Заметьте, что стабильность рабочей точки этих усилителей такая же, как в усилителях с ООС, а коэффициент усиления значительно выше. Поэтому такие усилители в настоящее время широко используются в электронных устройствах управления.

Вопросы для самопроверки

1. Рассмотрите основные разновидности усилителей постоянного тока и их особенности.

2. Поясните работу дифференциального каскада на биполярных транзисторах.

3. Укажите причины дрейфа в УПТ и методы его снижения.
4. Что такое приведенный дрейф и как его можно определить?
5. Поясните принцип работы дифференциального усилителя при симметричном и несимметричном входе.
6. Поясните роль генератора постоянного тока в цепи эмиттеров в дифференциальном каскаде.
7. В чем заключается принцип действия УПТ с преобразованием сигнала?

2.5.6. Операционные усилители и их применение

[1, с. 307–338; 2, с. 238–245; 3, с. 389–420]

Большое внимание следует уделить схемам на основе интегральных операционных усилителей, которые в настоящее время находят широкое применение как для усиления слабых сигналов в широкой полосе частот от практически постоянных сигналов до единиц – десятков мегагерц, так и для выполнения математических операций над аналоговыми сигналами (суммирование, вычитание, логарифмирование, интегрирование и др.). Нужно различать статические параметры (напряжение смещения, входной ток, температурный дрейф напряжения смещения и др.) и динамические параметры (полоса частот усиливаемых сигналов, скорость нарастания выходного напряжения и др.), определяющие погрешность операционного усилителя соответственно в статическом и динамическом режимах.

Знание различных схем усилителей, их моделей, параметров и характеристик позволит вам более четко и глубоко сформулировать требования к параметрам ОУ как устройству, которое состоит из нескольких каскадно-соединенных простейших усилителей. Внимательно изучите типовую принципиальную схему ОУ и выделите на ней различные схемы усилителей: дифференциальный каскад, усилитель на составных транзисторах, эмиттерный повторитель, однокаскадный усилитель постоянного тока. Постарайтесь самостоятельно изобразить эквивалентную схему ОУ.

Вопросы для самопроверки

1. Какое электронное устройство называется операционным усилителем? Какие элементы используются в структурной схеме ОУ?
2. Изобразите упрощенную принципиальную схему ОУ.
3. Приведите значения основных параметров идеального ОУ.
4. Рассмотрите инвертирующее и неинвертирующее включение ОУ, запишите основные соотношения между параметрами ОУ и элементами схемы.
5. Нарисуйте структурную схему и дайте определения основных параметров интегральных ОУ.
6. Приведите основные схемы включения ОУ.

2.5.7. Электронные ключевые схемы

[1, с. 338–357; 3, с. 532–582; 7, с. 7–20]

Необходимо знать параметры, характеризующие статические состояния ключей на биполярных и полевых транзисторах, и параметры, характеризующие переходные процессы при их включении и выключении.

Обратите внимание на то, что в цифровых устройствах остаточные напряжения и токи не играют такой существенной роли, как в аналоговых ключах, здесь первостепенное значение имеет скорость переключения. Рассмотрите время формирования отдельных участков выходного импульса транзисторного ключа, способы повышения его быстродействия, основы расчета.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные параметры идеального электронного ключа.
2. Как протекает процесс включения и выключения транзисторного ключа? Назовите основные этапы переходных процессов.
3. Приведите основные способы повышения быстродействия транзисторных ключей.
4. Нарисуйте передаточную характеристику электронного ключа. Какие параметры можно определить по этой характеристике?
5. Назовите особенности ключей на основе МДП-транзисторов.

2.5.8. Цифровые логические устройства

[1, с. 357–406; 2, с. 631–372; 3, с. 583–613; 7, с. 24–52]

При изучении логических элементов познакомьтесь вначале с простейшими логическими функциями, выполняемыми этими элементами, а затем с их реализацией в различных семействах интегральных схем: транзисторно-транзисторной, интегрально-инжекционной, эмиттерно-связанной и комплементарной МОП-логики. Необходимо уметь проводить сравнение основных параметров различных семейств интегральных схем.

Вопросы для самопроверки

1. Запишите таблицу истинности функций И, ИЛИ, НЕ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ.
2. Нарисуйте принципиальную схему реализации элемента ИЛИ-НЕ, И-НЕ в интегральных схемах ТТЛ, ЭСЛ, КМОП-логики.
3. Какой логический элемент является базовым в системе И²Л? Нарисуйте схему этого элемента.
4. Перечислите основные статические параметры логических элементов.
5. Рассмотрите динамические параметры логических элементов.
6. Приведите численные значения основных статических параметров элемента ТТЛ (ТТЛШ).
7. Рассмотрите передаточную характеристику КМОП-элемента.

8. Сравните по общим эксплуатационным параметрам различные семейства логических элементов.

9. Объясните взаимосвязь между напряжением питания КМОП-элемента и его быстродействием.

2.5.9. Триггеры. Мультивибраторы

[1, с. 406–433; 2, с. 553–578; 3, с. 614–655; 7, с. 56–67, 110–117]

Простейшие ключи и логические элементы, рассмотренные в предыдущих темах, составляют основу всей цифровой схемотехники. Однако одних логических элементов для построения электронных устройств автоматики и вычислительной техники недостаточно, необходимо иметь элементы памяти, в которых хранилась бы информация о предыдущем состоянии логических схем. Такие элементы памяти строят на триггерах. Обратите внимание на схемы и принцип действия триггеров, построенных на ключевых схемах, условие устойчивости равновесных состояний, требования к цепям связи и запуска. Изучите схемы RS-, T- и D-триггеров, JK-триггера, их особенности построения и функционального назначения.

Мультивибраторы относятся к релаксационным генераторам прямоугольных импульсов. Необходимо научиться строить временные диаграммы, поясняющие работу мультивибраторов.

Вопросы для самопроверки

1. Как определяется состояние ключей в последовательной ключевой цепи?
2. Почему невозможна электрическая симметрия в бистабильной ячейке?
3. К какому результату приведет одновременное поступление управляющих импульсов на оба входа бистабильной ячейки в режиме раздельного запуска?
4. Нарисуйте схемы RS-, T-триггера. В чем сходство и различие этих схем?
5. Объясните принцип действия и назначение JK-триггера.
6. Объясните принцип работы мультивибратора на биполярных транзисторах.
7. Объясните особенности работы мультивибратора на логических элементах.
8. Поясните временные диаграммы напряжений в мультивибраторе.
9. Как влияют элементы схемы мультивибратора на его параметры?
10. Какие схемные решения используются для улучшения характеристик мультивибраторов?

2.5.10. Цифроаналоговые и аналогово-цифровые преобразователи

[1, с. 433–457; 2, с. 736–761; 7, с. 89–93]

Необходимо изучить назначение, основные параметры, особенности построения и использования различных схем ЦАП и АЦП.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение основных параметров ЦАП.
2. Назовите основные параметры АЦП.
3. Нарисуйте схему четырехразрядного ЦАП на основе двоично-взвешенных резисторов.
4. Нарисуйте структурную схему АЦП.
5. По каким признакам классифицируют АЦП?
6. Поясните принцип работы АЦП.

2.6. Контрольная работа №2

Задача №1

Нарисовать схему одиночного усилительного каскада на БТ с ОЭ и эмиттерной стабилизацией и выполнить расчет элементов схемы, задающих рабочую точку. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Последняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип транзистора	КТ 603В	КТ 325А	КТ 301Б	КТ 340А	КТ 342А	КТ 355А	КТ 368А	КТ 3127А	КТ 608А	КТ 646А
$U_{K0}, В$	6	5	8	4	5	6	8	6	4	2
$I_{K0}, мА$	80	6	3	10	2	10	8	8	100	300

Выполнить графоаналитический расчет усилительного каскада в режиме класса «А». При расчетах использовать выходные и входные статические характеристики транзистора.

Задача №2

Нарисовать схему электронного ключа на БТ с ОЭ и построить его передаточную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, если сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}} = 5 R_{\text{К}}$. Тип транзистора, напряжение питания, сопротивление резистора в цепи коллектора использовать в соответствии с исходными данными и решением задачи №1 (табл. 2.1). Сопротивление резистора в цепи базы принять равным входному сопротивлению БТ $R_{\text{Б}} = h_{113}$, рассчитанному для рабочей точки из табл. 2.1.

Задача №3

Изобразить принципиальные схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителя на основе ОУ и рассчитать для каждого усилителя коэффициент усиления $K_{\text{ОС}}$, входное $R_{\text{ВХ.ОС}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ.ОС}}$ сопротивление. Исходные данные приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Изобразить принципиальную схему автоколебательного мультивибратора на ОУ и выполнить расчет ее элементов C_1 , R_1 , R_2 и R_3 по заданным параметрам T_0 , $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{НЕИНВ}}$.

Таблица 2.2

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R , кОм	10	10	20	25	25	20	20	10	15	20
$R_{\text{ОС}}$, кОм	100	250	100	150	250	250	150	20	150	200
T_0 , мкс	2	3	1	4	5	6	7	9	12	8
$U_{\text{ВЫХ}}$, В	10	8	6	5	11	14	15	9	12	8
$U_{\text{НЕИНВ}}$, В	7	6	4	3	8	11	10	5	9	6

Таблица 2.3

Предпоследняя цифра шифра	Коэффициент усиления ОУ	Входное сопротивление ОУ $R_{\text{ВХ}}$, кОм	Выходное сопротивление ОУ $R_{\text{ВЫХ}}$, кОм
Нечетная	20000	300	0,8
Четная	40000	600	0,4

2.7. Методические указания по выполнению контрольной работы №2

Задача №1

Расчет элементов схемы одиночного усилительного каскада на БТ с ОЭ и эмиттерной стабилизацией, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.1, выполняется в следующей последовательности. Исходными данными являются тип транзистора и рабочая точка, заданная напряжением $U_K = U_{K0}$ и током $I_K = I_{K0}$.

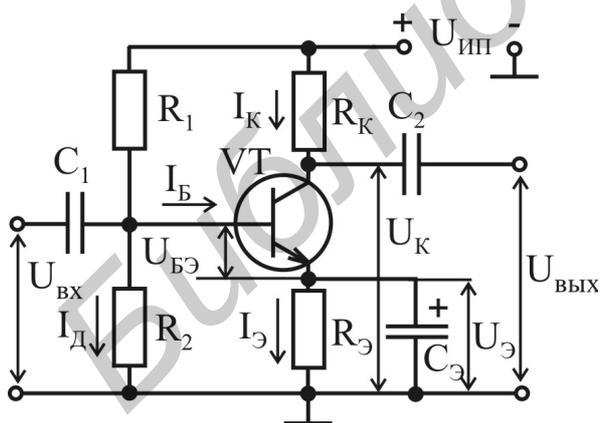


Рис. 2.1

Затем вычисляем сопротивления резисторов $R_3 = U_3 / I_3 \approx U_{R_3} / I_K$ и $R_K = U_{R_K} / I_K$.

В рассматриваемом каскаде БТ работает в режиме класса «А», и положение рабочей точки задается примерно на середине нагрузочной прямой. Поэтому напряжение источника питания определяется из условия $U_{\text{ИП}} = 2U_{K0}$, а напряжение на резисторе R_K определяется выражением $U_{R_K} = U_{\text{ИП}} - U_{K0} = U_{K0}$. Падение напряжения на резисторе R_3 рекомендуется выбирать из диапазона значений $U_3 = (0,05 \dots 0,1)U_{\text{ИП}}$.

Для обеспечения хорошей стабилизации рабочей точки ток делителя в цепи базы должен быть больше тока базы $I_D = (5 \dots 10)I_B$. Напряжение на базе БТ определяется как $U_B = U_{БЭ} + U_{Э}$. Напряжение $U_{БЭ}$ для германиевых транзисторов лежит в диапазоне $0,2 \dots 0,4$ В, для кремниевых – $0,6 \dots 0,8$ В.

С учетом связи между токами транзистора $I_B = I_K / \beta$ сопротивления резисторов делителя находим согласно выражениям:

$$R_2 = U_B / I_D, \quad R_1 = (U_{ИП} - U_B) / (I_D + I_B) \approx (U_{ИП} - U_B) / I_D.$$

В результате графоаналитического расчета необходимо определить максимальную величину неискаженного сигнала: амплитуды тока и напряжения, мощность в нагрузке, КПД каскада, коэффициенты усиления по току, напряжению, мощности, входное и выходное сопротивление.

Графоаналитический расчет усилителя проводится в следующем порядке. По справочнику определяются максимально допустимые параметры транзистора: постоянный ток коллектора $I_{K \max}$; постоянное напряжение коллектор – эмиттер $U_{КЭ \max}$; постоянная рассеиваемая мощность коллектора $P_{K \max} = I_K U_{КЭ}$. На семействе выходных характеристик транзистора, как показано на рис. 2.2, строится область допустимых режимов, ограниченная линиями, соответствующими значениям $I_{K \max}$, $U_{КЭ \max}$, $P_{K \max}$.

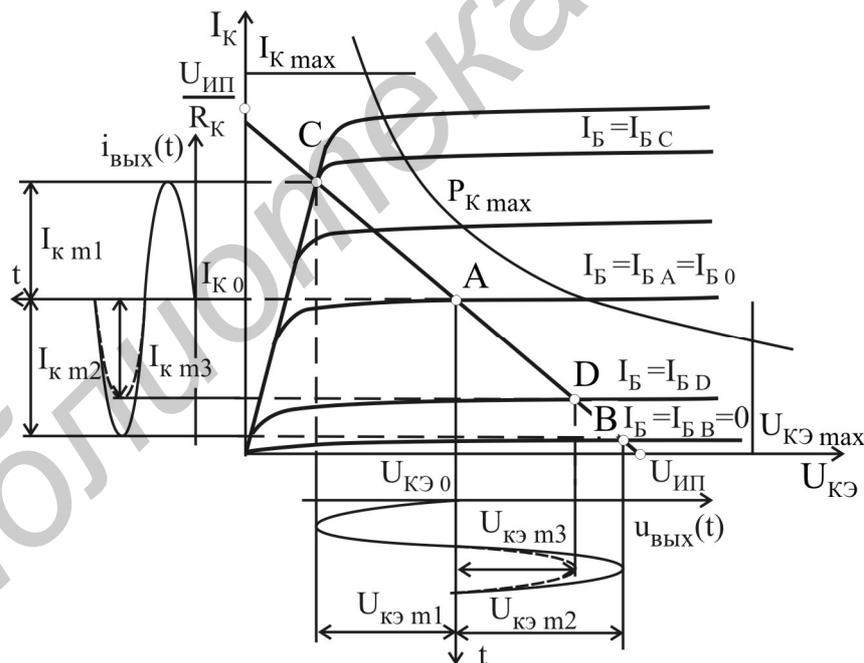


Рис. 2.2

График кривой максимально допустимой рассеиваемой мощности коллектора $I_K = f(U_{КЭ}) \Big|_{P_{K \max} = \text{const}}$ строится по результатам расчетов по формуле

$$I_{K n} = \frac{P_{K \max}}{U_{КЭ n}}, \quad n = 1, \dots, N,$$

где $N = 5 \dots 8$ точек.

Причем значения напряжения коллектор – эмиттер выбирают в пределах $0 < U_{КЭ} \leq U_{КЭ \max}$. Так же необходимо рассчитать значение напряжения коллектор – эмиттер, соответствующее максимально допустимому току коллектора:

$$U_{КЭ N+1} = \frac{P_{К \max}}{I_{К \max}}.$$

Таким образом, кривая максимально допустимой мощности рассеяния коллектора, а также область допустимых режимов работы ограничены сверху (см. рис. 2.2) максимально допустимым током коллектора $I_{К \max}$, справа – максимально допустимым напряжением коллектор – эмиттер $U_{КЭ \max}$.

Для выходной (коллекторной) цепи усилителя согласно второму закону Кирхгофа можно составить уравнение

$$U_{ИП} = I_{К} R_{К} + U_{КЭ},$$

называемое уравнением нагрузочной прямой, поскольку графиком преобразованного выражения $I_{К} = (U_{ИП} - U_{КЭ}) / R_{К}$ в системе координат $I_{К} = f(U_{КЭ})$ является прямая линия. Нагрузочная прямая является геометрическим местом рабочих точек транзистора при конкретных значениях напряжения источника питания $U_{ИП}$ и сопротивления нагрузки транзистора, т. е. сопротивления резистора $R_{К}$.

При работе транзистора в усилителе в номинальном режиме нагрузочная прямая целиком располагается в области допустимых режимов работы. Если нагрузочная прямая выходит за ее границы, то в процессе работы усилителя транзистор выйдет из строя.

Далее выполняется построение нагрузочной прямой, которая проводится через две точки, лежащие на осях координат (см. рис. 2.2.): точку с координатами $I_{К} = 0$, $U_{КЭ} = U_{ИП}$ на оси напряжений и точку с координатами $I_{К} = U_{ИП} / R_{К}$, $U_{КЭ} = 0$ на оси токов. Точка пересечения нагрузочной прямой со статической характеристикой для определенного тока базы $I_{Б} = \text{const}$ дает рабочую точку, соответствующую этому току базы.

Неискаженный выходной сигнал с максимальной амплитудой будет получен, если рабочая точка в процессе работы усилителя перемещается между точками «С» и «В» на нагрузочной прямой, которые соответствуют пересечению нагрузочной прямой с линией насыщения и статической характеристикой транзистора при нулевом токе базы $I_{Б} = 0$. Точка «С» лежит на границе между активным режимом и режимом насыщения, а точка «В» – между активным режимом и отсечкой транзистора.

Рабочая точка «А» соответствует режиму покоя, т. е. в отсутствие входного сигнала находится приблизительно на середине нагрузочной прямой

$\left(U_{КЭ} \approx \frac{U_{ИП}}{2} \right)$. Поэтому амплитудные значения положительной и отрицательной

полуволин выходного напряжения и тока определяем графически, как показано на рис. 2.2. Причем в общем случае они могут быть не одинаковыми. Их средние арифметические значения дают искомые максимальные значения амплитуд выходного напряжения и тока, соответствующие неискаженному сигналу:

$$U_{\text{вых } m} = U_{\text{кэ } m} = \frac{U_{\text{кэ } m1} + U_{\text{кэ } m2}}{2};$$

$$I_{\text{вых } m} = I_{\text{к } m} = \frac{I_{\text{к } m1} + I_{\text{к } m2}}{2}.$$

Оставшиеся параметры можно определить с использованием семейства входных статических характеристик транзистора $I_B = f(U_{\text{БЭ}})|_{U_{\text{КЭ}}=\text{const}}$ (рис. 2.3). Поскольку, как было сказано выше, входные характеристики для напряжений коллектор – эмиттер, соответствующих активному режиму, практически совпадают, то на семействе присутствует только две характеристики для $U_{\text{КЭ}} = 0$ и $U_{\text{КЭ}} \neq 0$.

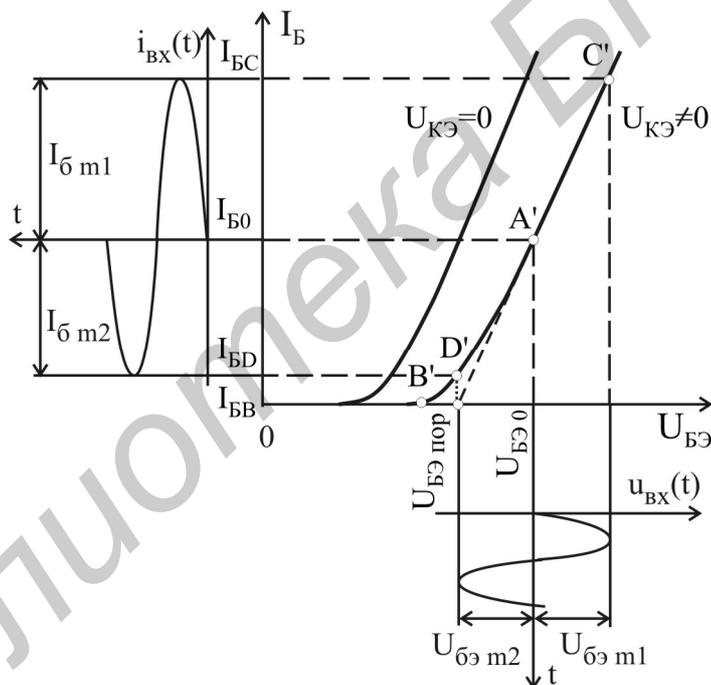


Рис. 2.3

Поэтому точки А, В и С с семейства выходных характеристик переносятся на входную характеристику для $U_{\text{КЭ}} \neq 0$. Для этого проводятся горизонтальные линии, соответствующие токам базы в точках А, В и С: $I_{\text{БА}}$, $I_{\text{БВ}}$, $I_{\text{БС}}$. Пересечение этих линий со входной характеристикой для $U_{\text{КЭ}} \neq 0$ дает точки А', В' и С'. Координаты этих точек позволяют определить амплитудные значения входных напряжения $U_{\text{вх } m}$ и тока $I_{\text{вх } m}$, которые обеспечивают достижение полученных ранее амплитудных значений выходных напряжения $U_{\text{вых } m}$ и то-

ка $I_{\text{вых } m}$. Необходимо обратить внимание на точку B' , которая располагается на резко нелинейном участке входной характеристики. Поэтому, если амплитуда входного напряжения будет такой, что рабочая точка в процессе работы усилителя будет перемещаться между точками B' и C' , то форма входного тока, а вместе с ним выходных тока и напряжения будут сильно отличаться от синусоидальной, т. е. форма сигнала будет сильно искажена. Таким образом, для неискаженного усиления минимальный ток базы должен быть не нулевым и точка B' должна находиться на линейном участке входной характеристики. Амплитуда нижней полуволны входного напряжения должна быть такой, чтобы в процессе работы усилителя напряжение база – эмиттер было не меньше порогового напряжения $U_{\text{бэ пор}}$. Пороговое напряжение определяется как напряжение база – эмиттер в точке пересечения прямой, аппроксимирующей входную характеристику при больших токах базы с осью напряжений. Определив пороговое напряжение $U_{\text{бэ пор}}$, строим точку D' , как показано на рис. 2.3. Эта точка ограничивает рабочий участок входной характеристики в области малых токов базы. Ее положение позволяет определить параметры усилителя, если выполнить ряд построений (см. рис. 2.3).

Значения искоемых параметров определяем с использованием следующих выражений:

1) амплитуды входных напряжений $U_{\text{вх } m}$ и тока $I_{\text{вх } m}$

$$U_{\text{вх } m} = U_{\text{бэ } m} = \frac{U_{\text{бэ } m1} + U_{\text{бэ } m2}}{2};$$

$$I_{\text{вх } m} = I_{\text{б } m} = \frac{I_{\text{б } m1} + I_{\text{б } m2}}{2};$$

2) максимальной мощности входного сигнала, соответствующей максимальному неискаженному выходному сигналу

$$P_{\text{вх max}} = \frac{1}{2} U_{\text{бэ } m} \cdot I_{\text{б } m}.$$

Рассчитанные выше амплитудные значения выходного напряжения $U_{\text{вых } m}$ и тока $I_{\text{вых } m}$ необходимо уточнить, поскольку они были получены, как мы видим, для искаженного выходного сигнала. Для этого на семействе выходных характеристик $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}}) \Big|_{I_{\text{б}} = \text{const}}$ необходимо построить точку D , соответствующую точке D' на семействе входных характеристик. Точка D лежит на пересечении нагрузочной прямой и выходной характеристики, проведенной для тока базы в точке D' : $I_{\text{б}} = I_{\text{б } D}$. Строим кривую $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}}) \Big|_{I_{\text{б}} = I_{\text{б } D}}$, находим точку D , определяем $U_{\text{кэ } m3}$ и $I_{\text{к } m3}$ (см. рис. 2.2) и уточняем амплитудные зна-

чения выходных напряжения и тока, которые соответствуют неискаженному выходному сигналу:

$$U_{\text{ВЫХ } m} = U_{\text{кэ } m} = \frac{U_{\text{кэ } m1} + U_{\text{кэ } m3}}{2};$$

$$I_{\text{ВЫХ } m} = I_{\text{к } m} = \frac{I_{\text{к } m1} + I_{\text{к } m3}}{2}.$$

Максимальная мощность неискаженного выходного сигнала определяется выражением

$$P_{\text{ВЫХ } \text{max}} = \frac{1}{2} U_{\text{кэ } m} \cdot I_{\text{к } m},$$

мощность, потребляемая от источника питания:

$$P_0 = U_{\text{ИП}} \cdot I_{\text{К}0},$$

тогда коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ } \text{max}}}{P_0} = \frac{U_{\text{кэ } m} \cdot I_{\text{к } m}}{2 \cdot U_{\text{ИП}} \cdot I_{\text{К}0}}.$$

Оставшиеся искомые параметры усилителя определяем в соответствии с выражениями:

1) коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности:

$$K_u = \frac{U_{\text{кэ } m}}{U_{\text{бэ } m}};$$

$$K_i = \frac{I_{\text{к } m}}{I_{\text{б } m}};$$

$$K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ } \text{max}}}{P_{\text{ВХ } \text{max}}};$$

2) входное сопротивление

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{бэ } m}}{I_{\text{б } m}};$$

3) выходное сопротивление

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{кэ } m}}{I_{\text{к } m}}.$$

Задача №2

Передаточная характеристика $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ электронного ключа на БТ, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.4, выполняется в следующей последовательности.

Находим параметры эквивалентной схемы ключа, показанной на рис. 2.5:

$$U_{\text{ИП экв}} = U_{\text{ИП}} \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{К}} + R_{\text{Н}}}; \quad R_{\text{К экв}} = \frac{R_{\text{Н}} \cdot R_{\text{К}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{К}}}.$$

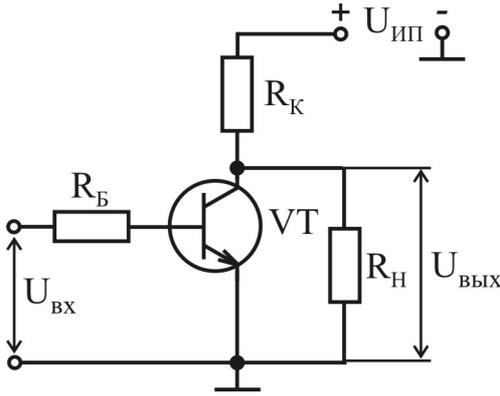


Рис. 2.4

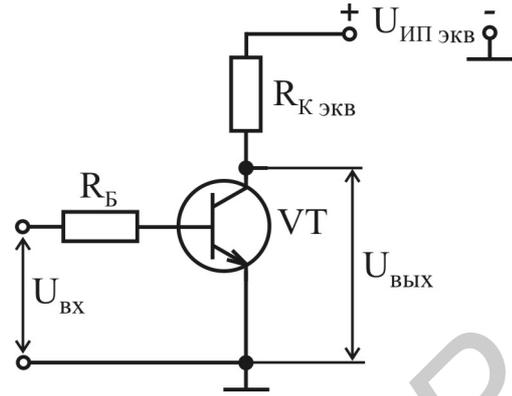


Рис. 2.5

На семействе выходных характеристик БТ $I_K = f(U_{КЭ})|_{I_B = \text{const}}$ проводим нагрузочную прямую (рис. 2.6), описываемую уравнением $I_K = \frac{U_{ИП\text{ЭКВ}} - U_{КЭ}}{R_{КЭКВ}}$, через две точки, лежащие на осях координат: точку с координатами $I_K = 0$, $U_{КЭ} = U_{ИП\text{ЭКВ}}$ на оси напряжений и точку с координатами $I_K = U_{ИП\text{ЭКВ}}/R_{КЭКВ}$, $U_{КЭ} = 0$ на оси токов. Находим точки пересечения нагрузочной прямой с кривыми $I_K = f(U_{КЭ})|_{I_B = \text{const}}$, которые определяют токи базы I_{B_i} и выходные напряжения ключа

$$U_{ВЫХ_i} = U_{КЭ_i} \quad (i = 1, \dots, N),$$

где N – количество таких точек.

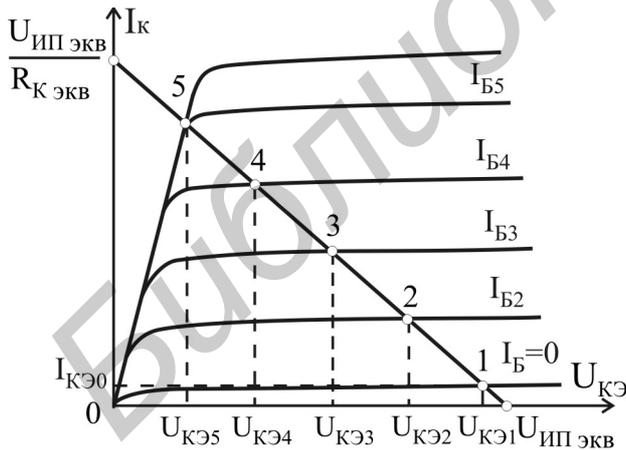


Рис. 2.6

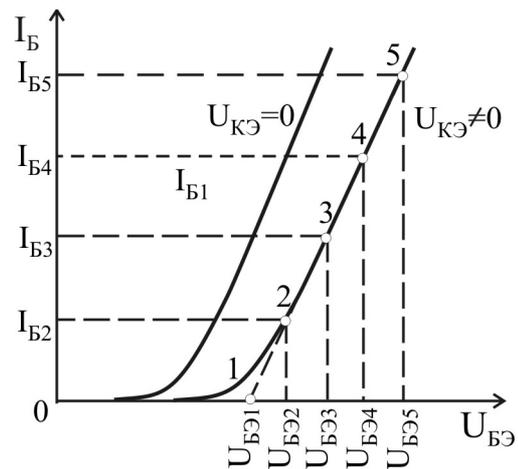


Рис. 2.7

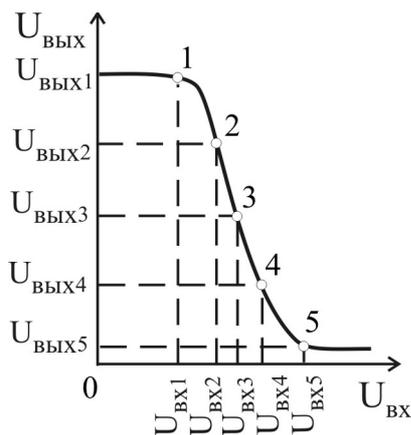


Рис. 2.8

Входная ВАХ БТ $I_B = f(U_{БЭ})|_{U_{КЭ}=\text{const}}$, соответствующая $U_{КЭ} \neq 0$ (обычно в справочнике приводятся две характеристики для $U_{КЭ} = 0$; $|U_{КЭ}| = 5 \text{ В}$ или $|U_{КЭ}| = 10 \text{ В}$), позволяет найти напряжения $U_{БЭ i}$, соответствующие выходным напряжениям $U_{\text{ВЫХ} i}$, как показано на рис. 2.7.

В качестве напряжения $U_{БЭ1}$, соответствующего $I_B = 0$, используют пороговое напряжение $U_{БЭ \text{ пор}}$, которое определяется напряжением точки пересечения прямой, аппроксимирующей входную

ВАХ при больших значениях тока базы, с осью абсцисс (см. рис. 2.7). Тогда соответствующие входные напряжения вычисляются согласно выражению

$$U_{\text{ВХ} i} = U_{БЭ i} + I_{B i} \cdot R_B.$$

Полученные пары значений $U_{\text{ВЫХ} i}$ и $U_{\text{ВХ} i}$ позволяют построить передаточную характеристику ключа, представленную на рис. 2.8. Высокий выходной уровень $U_{\text{ВЫХ}}^1$ соответствует работе БТ в режиме отсечки (точка «1»):

$$U_{\text{ВЫХ}}^1 = U_{\text{ИПЭКВ}} - I_{КЭ0} R_K \approx U_{\text{ИПЭКВ}}.$$

Низкий выходной уровень соответствует работе в режиме насыщения (точка «5»):

$$U_{\text{ВЫХ}}^0 = U_{КЭ \text{ нас}}.$$

На передаточной характеристике ключа имеется три области: 1) отсечки, соответствующие малым уровням входного напряжения; 2) активная область, соответствующая переключению БТ из режима отсечки в режим насыщения и наоборот; 3) область насыщения, соответствующая большим уровням входного напряжения. При более точных расчетах передаточной характеристики ключа необходимо учитывать зависимость статического коэффициента передачи по току от величины тока базы $\beta = f(I_B)$.

Задача №3

Параметры инвертирующего и неинвертирующего усилителей практически полностью определяются элементами цепи обратной связи. Для выполнения данной задачи необходимо разобраться в вопросах влияния обратной связи на параметры усилителей, а также в структуре и принципе работы операционных усилителей (ОУ). Схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей на основе ОУ приведены на рис. 2.9 и 2.10 соответственно.

Расчет инвертирующего и неинвертирующего усилителей на ОУ сводится к определению параметров цепи отрицательной обратной связи (ОС),

которой охвачен усилитель, поскольку все его параметры определяются цепью ОС. Коэффициент усиления по напряжению усилителя, охваченного петлей отрицательной ОС, можно рассчитать по формуле

$$K_{OC} = \frac{K}{1 + \beta \cdot K},$$

где K – собственный коэффициент усиления по напряжению ОУ; β – коэффициент передачи цепи ОС.

Для схемы инвертирующего усилителя (см. рис. 2.9) коэффициент передачи цепи ОС $\beta = R/R_{OC}$. В случае реального ОУ коэффициент усиления инвертирующего усилителя определяется выражением

$$K_{OC} = -\frac{K_{эф}}{1 + \beta \cdot K_{эф}},$$

где $K_{эф} = \frac{K \cdot R_{OC}}{R_{OC} + R}$.

Знак «минус» отражает инвертирование входного сигнала.

В случае идеального ОУ $K \rightarrow \infty$,

тогда $K_{OC} = -\beta = -R_{OC}/R$.

Для схемы неинвертирующего усилителя (см. рис. 2.10) коэффициент передачи цепи ОС $\beta = \frac{R}{R + R_{OC}}$. В случае реального ОУ коэффициент усиления неинвертирующего усилителя определяется выражением

$$K_{OC} = \frac{K}{1 + \frac{R \cdot K}{R + R_{OC}}}.$$

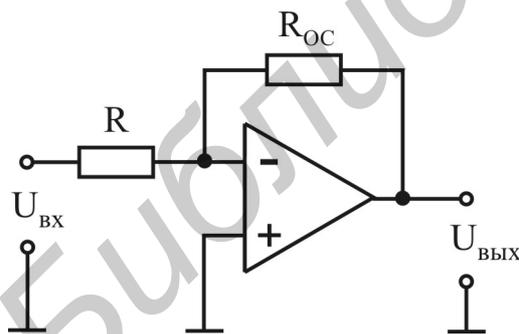


Рис. 2.9

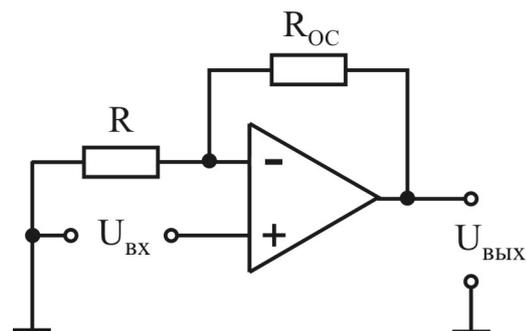


Рис. 2.10

В случае идеального ОУ $K \rightarrow \infty$,

тогда $K_{OC} = 1 + \frac{R_{OC}}{R}$.

Дифференциальное входное сопротивление инвертирующего усилителя определяется сопротивлением резистора на входе

$$R_{\text{вх.ОС}} = R.$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя определяется как входное сопротивление усилителя, охваченного последовательной отрицательной ОС

$$R_{\text{вх.ОС}} = R_{\text{вх}}(1 + \beta \cdot K),$$

где $R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление ОУ без ОС.

Выходное сопротивление для обеих схем усилителей определяется как

$$R_{\text{вых.ОС}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + \beta \cdot K}.$$

Принципиальная схема автоколебательного мультивибратора, выполненного на основе операционного усилителя, представлена на рис 2.11. Период колебаний мультивибратора определяется выражением

$$T_0 = 2R_1C_1 \ln \left(1 + \frac{2R_3}{R_2} \right).$$

Напряжение на неинвертирующем входе ОУ находится как

$$U_{\text{неинв}} = U_{\text{вых}} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = K_{\text{д}} U_{\text{вых}},$$

где $K_{\text{д}} = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$ – коэффициент деления делителя напряжения, образованного резисторами R_2 и R_3 .

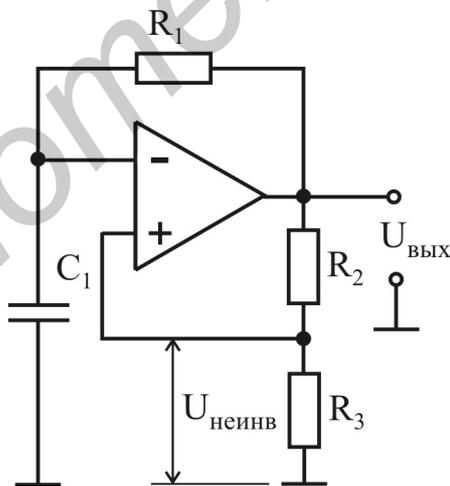


Рис. 2.11

Сопротивление резистора R_1 выбираем равным $R_{\text{ОС}}$, а резисторов R_2 и R_3 много больше выходного сопротивления ОУ (на два порядка) $R_{\text{вых}}$.

3. СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ И КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ

3.1. Теоретическое содержание раздела

3.1.1. Клистроны

Пролетные клистроны. Двухрезонаторный усилительный клистрон и его устройство. Принцип действия двухрезонаторного усилительного клистрона: модуляция электронов по скорости (коэффициент эффективности электронного взаимодействия), группирование электронов в сгустки (влияние параметра группирования на конвекционный ток), энергетическое взаимодействие электронных сгустков с переменным электрическим полем выходного резонатора; пространственно-временная диаграмма (ПВД). Параметры и характеристики двухрезонаторного пролетного клистрона. Двухрезонаторный пролетный клистрон в автогенераторном режиме: условия самовозбуждения, баланс амплитуд и баланс фаз, пусковой ток, электронная перестройка частоты. Умножители частоты на пролетных клистроны: устройство, принцип действия и параметры. Многорезонаторный усилительный клистрон, его устройство и принцип действия.

Отражательный клистрон, его устройство и принцип действия, ПВД. Условие самовозбуждения, зоны генерации колебаний. Механическая и электронная перестройка частоты, крутизна электронной перестройки отражательных клистронов. Митрон. Области применения.

3.1.2. СВЧ-приборы типа «О»

Лампа бегущей волны типа «О» (ЛБВО). Особенности и преимущества приборов с длительным взаимодействием. Условие синхронизма. Замедляющие системы (ЗС). Коэффициент замедления. Понятие о пространственных гармониках. Дисперсия ЗС. Сопротивление связи. Устройство ЛБВО, принцип действия; энергетическое взаимодействие электронов с бегущей волной. Основные параметры и характеристики ЛБВО. Особенности конструкции и области применения ЛБВО.

Лампа обратной волны типа «О» (ЛОВО), устройство и принцип действия. Баланс амплитуд и фаз. Параметры и характеристики: пусковой ток, электронная перестройка частоты и крутизна электронной перестройки, выходная мощность, КПД. Области применения ЛОВО.

3.1.3. СВЧ-приборы типа «М»

Физические основы работы электронных приборов типа «М». Движение электронов в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях; парабола критического режима. Взаимодействие электронов с неоднородным СВЧ электрическим полем: влияние продольной и поперечной составляющих поля. Энергетическое взаимодействие электронов с волной. Условие синхронизма.

Многорезонаторные магнетроны, конструкция, принцип действия. Ам-

плитудное и фазовое условия самовозбуждения магнетрона. Резонансные свойства кольцевой замедляющей системы. Параметры магнетронов: выходная мощность, рабочая частота, электронный КПД, электронное смещение частоты. Разновидности магнетронов, их особенности. Области применения многорезонаторных магнетронов.

Лампа бегущей волны типа «М» (ЛБВМ) и лампа обратной волны типа «М» (ЛОВМ): устройство и принцип действия, параметры и характеристики, области применения ЛБВМ.

Амплитрон, стабилотрон, устройство, принцип действия, параметры и характеристики. Области применения.

Сравнительная оценка различных электровакуумных СВЧ-приборов, преимущественные области их применения и перспективы развития.

3.1.4. Полупроводниковые СВЧ-приборы

Разновидности полупроводниковых СВЧ-диодов – детекторные, смесительные, параметрические, умножительные и настроенные, переключательные и ограничительные: основные особенности, эквивалентные схемы и системы параметров, назначение.

Лавинно-пролетный диод (ЛПД). Устройство. Основные физические процессы в ЛПД: в пролетном режиме и режиме с захваченной плазмой. Эквивалентная схема, параметры и характеристики ЛПД, области применения. Конструкции и эквивалентные схемы СВЧ-генераторов на ЛПД.

Диоды с объемной неустойчивостью (диоды Ганна). Физические процессы в двухдолинных полупроводниках, формирование домена сильного поля, форма тока, различные режимы работы ДГ. Особенности конструкции, эквивалентная схема и основные параметры ДГ, области применения. Конструкции и эквивалентные схемы генераторов на ДГ.

Биполярные СВЧ-транзисторы, особенности конструкции, эквивалентные схемы, характеристики и параметры, области применения. Гетеропереходные биполярные транзисторы.

Полевые СВЧ-транзисторы, особенности конструкции, эквивалентные схемы, характеристики и параметры, области применения. Гетеропереходные полевые транзисторы с барьером Шотки.

Сравнительная оценка различных полупроводниковых СВЧ-приборов, преимущественные области их применения. Перспективы развития полупроводниковых приборов миллиметрового диапазона.

3.1.5. Квантовые приборы сверхвысокочастотного и оптического диапазонов

Физические основы квантовых приборов. Энергетические спектры атомов, молекул и твердых тел. Нормальное и возбужденное состояние системы, понятие о спонтанных переходах и спонтанном излучении. Метастабильное состояние, среднее время жизни частиц. Понятие об индуцированном (вынужден-

ном) излучении и поглощении. Соотношения Эйнштейна. Понятие об инверсии населенностей. Методы создания инверсии населенностей. Спектральные свойства активной среды, ширина спектральной линии, причины ее уширения.

Квантовые приборы сверхвысоких частот (мазеры). Особенности квантовых СВЧ-приборов. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР). Квантовые парамагнитные усилители (КПУ), их устройство, особенности колебательных систем. Параметры и характеристики КПУ.

Квантовые приборы оптического диапазона. Функциональная схема оптического квантового генератора (лазера). Условия генерации. Оптический резонатор, его устройство, типы колебаний. Спектр и свойства излучения лазера, КПД.

Газовые, жидкостные твердотельные, полупроводниковые лазеры: устройство, принцип действия, основные параметры и характеристики.

Сравнительная оценка квантовых приборов различных типов, области их применения. Перспективы развития электронных и квантовых приборов.

3.2. Примерный перечень тем лабораторных занятий

1. Исследование характеристик и параметров генератора на отражательном клистроне.
2. Исследование характеристик и параметров усилителя на пролетном клистроне.
3. Исследование характеристик и параметров усилителя на ЛБВ.
4. Исследование характеристик и параметров генератора на ЛОВ.
5. Исследование характеристик и параметров генератора на многорезонаторном магнетроне.
6. Исследование характеристик и параметров детекторного и смесительного диодов СВЧ.
7. Исследование характеристик и параметров генератора на ЛПД.
8. Исследование характеристик и параметров генератора на ДГ.
9. Исследование характеристик и параметров усилителя на СВЧ полевом транзисторе.
10. Исследование характеристик и параметров полупроводникового лазера.

3.3. Литература

1. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника : учеб. пособие для вузов / Ю. Л. Бобровский [и др.] ; под ред. Н. Д. Федорова. – М. : Радио и связь, 1998. – 560 с.
2. Шишкин, Г. Г. Электроника : учеб. для вузов / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. – М. : Дрофа, 2009. – 703 с.
3. Хандогин, М. С. Электронные приборы : учеб. пособие для студ. вузов / М. С. Хандогин, В. Б. Рожанский, С. В. Дробот. – Минск : БГУИР, 2011. – 310 с.

4. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учебник для студ. вузов / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. – 682 с.

5. Андрушко, Л. М. Электронные и квантовые приборы СВЧ / Л. М. Андрушко, Н. Д. Федоров. – М. : Радио и связь, 1981. – 208 с.

6. Электронные приборы СВЧ / В. М. Березин [и др.]. – М. : Высш. шк., 1985. – 296 с.

7. Пихтин, А. Н. Оптическая и квантовая электроника / А. Н. Пихтин. – М. : Высш. шк., 2001. – 573 с.

8. Рожанский, В. Б. Сверхвысокочастотные и квантовые приборы : лаб. практикум для студ. радиотех. и телекомм. спец. БГУИР всех форм обуч. / В. Б. Рожанский. – Минск : БГУИР, 2004. – 89 с.

3.4. Методические указания по изучению теоретической части раздела

3.4.1. Клистроны

[1, с. 372–398; 2, с. 363–377; 3, с. 205–227]

При изучении данной темы основное внимание необходимо уделять процессу преобразования модуляции электронов по скорости в модуляцию по плотности, пространственно-временным диаграммам. Необходимо уяснить принцип усиления СВЧ-колебаний в клистроне за счет уменьшения кинетической энергии электронов. В отражательном клистроне особое внимание следует уделить условию баланса фаз и мощностей, а также принципу электронной перестройки частоты.

Вопросы для самопроверки

1. Какой из электронов является центром образования сгустка и почему?
2. Что такое параметр группирования?
3. Что такое оптимальный параметр группирования для двухрезонаторного пролетного клистрона и чему он равен?
4. Зачем нужен промежуточный резонатор в многорезонаторном клистроне?
5. Как связано напряжение на отражателе в отражательном клистроне с номером зоны?
6. Как зависит мощность отражательного клистрона от номера зоны?
7. Как зависит частота отражательного клистрона от напряжения на отражателе?
8. Каким образом производится механическая перестройка частоты клистрона?

3.4.2. СВЧ-приборы типа «О»

[1, с. 399–422; 2, с. 377–395; 3, с. 227–239]

При изучении ЛБВ и ЛОВ типа «О» особое внимание необходимо уделить уяснению механизма взаимодействия с полем бегущей или обратной волны. Длительное взаимодействие обуславливает такие важнейшие свойства уси-

лителей на ЛБВ, как широкополосность, большой коэффициент усиления, низкий коэффициент шума. Необходимо понять назначение устройств согласования ламп со входом и выходом.

При изучении ЛОВ обратить внимание на условия самовозбуждения ЛОВ и на электронную перестройку частоты, что является важнейшей особенностью ЛОВ.

Вопросы для самопроверки

1. Каково должно быть соотношение между скоростью электронов и фазовой скоростью волны в ЛБВ?
2. Как изменяется амплитуда высокочастотного поля вдоль оси лампы?
3. Что такое параметр усиления?
4. Каково назначение поглотителя в ЛБВ?
5. Что является источником собственных шумов ЛБВ?
6. Запишите условие баланса фаз для ЛОВ.
7. Что такое режим регенеративного усиления в ЛОВ?
8. Чем объясняется изрезанность АЧХ ЛОВ?
9. Что такое пусковой ток?

3.4.3. Электронные приборы типа «М»

[2, с. 70–85; 2, с. 395–416; 3, с. 239–251]

При изучении приборов со скрещенными электрическим и магнитным полями обратить внимание на траекторию движения электронов в таких полях, уяснить, что в этих приборах происходит изменение потенциальной, а не кинетической энергии электрона, разобраться в механизме фазовой фокусировки и образования электронных спиц.

При излучении ЛБВМ и ЛОВМ необходимо уяснить отличие этих ламп от аналогичных ламп типа «О».

При излучении платинотронов необходимо выяснить сходство и различие этих приборов с другими приборами типа «М». Следует обратить внимание на схему включения платинотрона в качестве стабилотрона и назначение ее элементов.

Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте траекторию движения электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях при различных значениях магнитной индукции.
2. Почему переносная скорость электронов при взаимодействии с СВЧ-полем не изменяется?
3. Зачем нужен поглотитель в ЛОВМ?
4. Почему ЛБВМ имеет более широкую полосу частот, чем ЛБВО?
5. Что такое синфазный и противофазный вид колебаний в магнетроне?
6. Каково назначение связок в магнетроне?

7. Объясните процесс формирования спиц в магнетроне.
8. Запишите формулу КПД магнетрона.
9. Какая пространственная гармоника используется в платинотроне?
10. Зачем нужен резонатор в стабилотроне?

3.4.4. Твердотельные СВЧ-приборы

[1, с. 425–441; 2, с. 90–115; 3, с. 251–282]

При изучении полупроводниковых диодов и транзисторов СВЧ необходимо уделять внимание особенностям этих приборов в диапазоне СВЧ, методам повышения рабочей частоты этих приборов.

Для диодов Ганна и ЛПД очень важным является наличие отрицательного дифференциального сопротивления, причинам его возникновения следует уделить особое внимание. Необходимо получить представление о колебательных системах, которые используются для создания генераторов и усилителей на основе этих приборов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие диоды используются в качестве смесительных и почему?
2. Что такое переключающий диод?
3. Чем ограничена граничная частота биполярного транзистора?
4. Из какого материала изготавливают полевые СВЧ-транзисторы?
5. Чем вызвано наличие отрицательной дифференциальной проводимости в диоде Ганна?
6. Что такое пролетная частота диода Ганна?
7. Изобразите конструкцию генератора на диоде Ганна?
8. Нарисуйте структуру ЛПД.
9. Чем обусловлено возникновение отрицательной дифференциальной проводимости в ЛПД?
10. Чем обусловлен высокий уровень шумов в ЛПД?

3.4.5. Квантовые приборы сверхвысокочастотного и оптического диапазонов

[1, с. 480–535; 2, с. 521–622; 3, с. 282–308]

При изучении данной темы необходимо уяснить динамику квантовых переходов, получить четкое представление о возможности усиления в активной квантовой среде при наличии инверсии населенности на рабочем переходе.

Необходимо обратить особое внимание на метод создания инверсии населенностей в парамагнитном веществе. Следует четко уяснить различие в устройстве и характеристиках КПУ бегущей волны и резонаторного типа.

При изучении лазеров уделить особое внимание оптическим резонаторам и их назначению в лазерах. Необходимо уяснить условия самовозбуждения лазера и изучить характеристики излучения.

Вопросы для самопроверки

1. Запишите выражение для частоты квантового перехода.
2. Что такое вынужденный переход?
3. Чем вызвано уширение спектральной линии?
4. Как получить инверсию населенностей в трехуровневой системе?
5. Изобразите схематически устройство отражательного и проходного КПУ.
6. Что такое продольная и поперечная мода оптического резонатора?
7. Зачем нужна смесь газов в гелий-неоновом лазере?
8. Какая разница между газовым и ионным лазером?
9. Почему КПД молекулярных лазеров выше, чем ионных?
10. Назовите методы получения инверсии населенностей в полупроводниковом лазере.

3.5. Контрольная работа №3

Контрольная работа состоит из четырех задач, каждая из которых имеет несколько вариантов, отличающихся исходными данными. Выполняемый студентами вариант задачи определяется тремя последними цифрами номера зачетной книжки или, в отдельных случаях, преподавателем, рецензирующим контрольные работы. Номер варианта исходных данных к задаче 1 определяется последней цифрой номера зачетной книжки; к задаче 2 – последней цифрой суммы двух последних цифр номера зачетной книжки; к задачам 3 и 4 – последней цифрой суммы трех последних цифр номера зачетной книжки. Цифре «0» во всех случаях соответствует вариант 10.

При выполнении контрольной работы необходимо придерживаться следующих правил:

1. Прежде, чем выполнить какой-либо расчет, необходимо указать цель данного расчета и привести общую формулу для определения рассчитываемой величины. При этом необходимо указать источник формулы.
2. В общую формулу подставляются числовые значения известных величин, приводятся результаты промежуточных вычислений и конечный результат с указанием размерности определяемой величины.
3. Все величины следует выражать в единицах системы СИ.
4. Все расчеты должны выполняться до третьей значащей цифры.
5. В конце работы необходимо привести список используемой литературы.

При выполнении ряда задач используйте значения функций Бесселя, а также параметров полупроводниковых материалов, которые представлены в прил. 1 и 2.

Задача №1

Для двухрезонаторного усилительного клистрона в табл. 3.1 заданы: 1) ускоряющее напряжение U_0 ; 2) ток луча I_0 ; 3) рабочая частота f_0 ; 4) длина пролетного пространства L ; 5) ширина зазоров входного d_1 и выходного d_2 резонаторов ($d_1 = d_2 = d$); 6) эквивалентное сопротивление входного резонатора R_{0e1} .

Таблица 3.1

Номер варианта	U_0 , В	I_0 , А	f_0 , МГц	L , м	d , м	R_{0e1} , кОм
1	8000	2,5	8000	$7 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	6
2	5000	1,0	3000	$10 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	9
3	9500	2,0	10000	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	11
4	7000	1,5	4000	$8 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	7
5	7500	1,5	3000	$15 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	6
6	9000	1,3	6000	$10 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	11
7	10000	2,0	6500	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10
8	6000	1,25	5000	$17 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	12
9	6500	2,2	8000	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	12
10	4000	1,3	4000	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	7

Требуется рассчитать:

1. Оптимальную мощность сигнала на входе клистрона $P_{\text{вх опт}}$, соответствующую максимальной электронной мощности $P_{\text{вых e max}}$ на выходе. Для этого необходимо предварительно:

а) определить коэффициент взаимодействия M_1 электронного потока с высокочастотным полем в зазоре входного резонатора;

б) определить амплитуду СВЧ-напряжения на зазоре входного резонатора, соответствующую оптимальному параметру группирования $X = 1,84$.

2. Эквивалентное сопротивление выходного резонатора R_{0e2} , обеспечивающее условие оптимальной нагрузки клистрона.

3. Коэффициент усиления клистрона по мощности K_p в режиме максимальной выходной мощности. Для этого предварительно определить амплитуду наведенного тока в выходном резонаторе тока с учетом коэффициента взаимодействия M_2 .

4. Электронный коэффициент полезного действия $\eta_{e \text{ max}}$ в режиме максимальной выходной мощности.

5. Контурный коэффициент полезного действия η_k .

6. Мощность в нагрузке $P_{\text{вых}}$.

Задача № 2

Для лампы бегущей волны (ЛБВ) малой мощности в табл. 3.2 заданы: 1) фазовая скорость распространения волны по замедляющей системе V_ϕ ; 2) ток

луча I_0 ; 3) сопротивление связи замедляющей системы $R_{св}$; 4) электрическая длина замедляющей системы N ; 5) затухание локального поглотителя $L_{п}$; 6) входная мощность сигнала $P_{вх}$; 7) рабочая частота f_0 .

Таблица 3.2

Номер варианта	V_{ϕ} , м/с	I_0 , мА	$R_{св}$, Ом	$P_{вх}$, Вт	f_0 , МГц	$L_{п}$, дБ	N
1	$26 \cdot 10^6$	1,3	160	$9 \cdot 10^{-5}$	7000	6	35
2	$19 \cdot 10^6$	0,9	130	$5 \cdot 10^{-5}$	5000	11	35
3	$23 \cdot 10^6$	0,8	200	$5 \cdot 10^{-5}$	4500	6	30
4	$19 \cdot 10^6$	1,2	130	$8 \cdot 10^{-6}$	6000	10	35
5	$18 \cdot 10^6$	1,0	110	$3 \cdot 10^{-5}$	3000	9	30
6	$16 \cdot 10^6$	1,0	80	$4 \cdot 10^{-5}$	2500	10	30
7	$29 \cdot 10^6$	0,8	170	$6 \cdot 10^{-5}$	5500	9	30
8	$17 \cdot 10^6$	0,7	140	$2 \cdot 10^{-5}$	5000	7	30
9	$23 \cdot 10^6$	0,8	200	$5 \cdot 10^{-5}$	4500	6	30
10	$10 \cdot 10^6$	1,0	120	$4 \cdot 10^{-5}$	4000	12	35

Требуется рассчитать:

1. Величину ускоряющего напряжения U_0 , при котором обеспечивается синхронизм электронного потока с основной гармоникой электромагнитной волны на частоте f_0 .
2. Коэффициент усиления ЛБВ на заданной частоте f_0 .
3. Выходную мощность ЛБВ $P_{ввых}$.
4. Электронный КПД ЛБВ η_e .
5. Распределение амплитуды напряженности продольной составляющей электрического поля E_{mz} по длине замедляющей системы. Построить график зависимости $E_{mz} = \varphi(z)$.

Задача № 3

1. Концентрация донорной примеси в базе диода с барьером Шотки на основе GaAs с собственной концентрацией носителей $n_i \approx 10^{15} \text{ м}^{-3}$ равна $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Определить примерное значение граничной частоты, зависящее от постоянной времени $\tau = r_s \cdot C_{\bar{c}}$, где r_s – объемное сопротивление полупроводника; $C_{\bar{c}}$ – барьерная емкость перехода.

2. Определить относительное изменение барьерной емкости диода с барьером Шотки на основе GaAs C_{\max}/C_{\min} , если обратное напряжение на диоде изменялось в пределах от 0 до 5 В.

3. Определить минимальную концентрацию донорной примеси N_d в материале, из которого изготовлен диод Ганна, работающий на частоте $f = 20 \text{ ГГц}$.
4. Определить ослабление, создаваемое p-i-n-диодом в СВЧ-тракте с характеристическим сопротивлением 50 Ом , если известно, что активное сопротивление диода при постоянном токе прямого смещения 1 мА составляет 10 Ом . Как изменится ослабление при увеличении тока смещения до 2 мА ? Реактивной составляющей импеданса диода пренебречь.
5. Какой должна быть длина пролетного пространства лавинно-пролетного диода, предназначенного для работы при длине волны $\lambda = 3 \text{ см}$? Материал – кремний, движение электронов – с дрейфовой скоростью насыщения. Оптимальный угол пролета принять равным π радиан.
6. Определить частоту генерации диода Ганна, выполненного на критическом образце, если концентрация примеси $N_d = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.
7. Определить длину активной области арсенид-галлиевого диода Ганна, если напряжение, при котором ток через диод максимален, равно $3,5 \text{ В}$.
8. Определить пролетную частоту арсенид-галлиевого диода Ганна с длиной активной области $L = 10 \text{ мкм}$.
9. Определить коэффициент усиления по мощности на частоте $f = 1,5 \text{ ГГц}$ для СВЧ-транзистора со следующими параметрами: граничная частота $f_{гр} = 2 \text{ ГГц}$ (частота, на которой модуль параметра $h_{21э} \approx 1$); объемное сопротивление базы $r_b = 3 \text{ Ом}$, $C_K = 4 \text{ пФ}$ и при условии, что $\alpha_0 \approx 1$.
10. Определить максимальную частоту генерации полевого транзистора с барьером Шоттки на основе арсенида галлия, если длина канала составляет 5 мкм .

Задача №4

1. Поперечное сечение луча газового оптического квантового генератора представляет собой круг. Определить угол расходимости луча, если на расстоянии $L_1 = 2 \text{ м}$ от генератора диаметр круга $d_1 = 4 \text{ мм}$, а при $L_2 = 20 \text{ м}$, $d_2 = 10 \text{ мм}$.
2. Квантовый генератор работает на частоте $23\,870 \text{ МГц}$. Определить разность энергии уровней, переход между которыми в данном случае используется.
3. Коэффициент квантового усиления рубина равен $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$. Определить усиление волны при двукратном прохождении ее через кристалл длиной $0,1 \text{ м}$.
4. Пройдя один раз через активное вещество лазера, сигнал усиливается в $1,2$ раза. Возможна ли генерация на этом веществе, если использовать зеркала с коэффициентами отражения $R_1 = 0,8$; $R_2 = 0,9$.
5. Определить энергию кванта, излучаемого гелий-неоновым лазером, длина волны излучения которого $\lambda = 6\,328 \text{ А}$.

6. Кристалл, используемый в лазере, обладает коэффициентом квантового усиления $\beta = 0,08 \text{ см}^{-1}$. Во сколько раз усиливается сигнал при прохождении через кристалл длиной 20 см?

7, 8, 9. Определить длину волны излучения, возникающего при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону для следующих полупроводников: Si, GaAs, InP, а также принадлежность излучения к соответствующему спектру колебаний (видимый, ультрафиолетовый, инфракрасный).

10. Для энергетического перехода $\Delta W = 0,1 \text{ кТ}$ при $T = 300 \text{ К}$ определить длину волны излучения и принадлежность излучения к соответствующему спектру колебаний.

3.6. Методические указания по выполнению контрольной работы №3

Задача №1

1. При решении задачи следует пренебречь проводимостями электронной нагрузки в зазорах входного и выходного резонаторов, т. е. считать, что справедливы соотношения $P_e = \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{R_{0e}} = \frac{1}{2} I_m^2 R_{0e}$, где U_m – амплитуда высокочастотного напряжения, I_m – амплитуда наведенного в резонаторе тока.

2. При определении оптимальной величины сопротивления второго резонатора R_{0e2} следует принять, что $M_2 U_{m2} = U_0$.

3. Контурный КПД выходного резонатора η_k учитывает, какую часть электронной мощности P_e составляет величина $P_{\text{вых}}$. При определении η_k следует принять, что проводимость собственных потерь входного $G_{\text{п1}}$ и выходного $G_{\text{п2}}$ резонаторов одинаковы и могут быть определены из условия

$$G_{\text{п1}} = G_{\text{п2}} = \frac{1}{2R_{0e1}}.$$

Для обеспечения оптимальной нагрузки выходного резонатора параллельно проводимости его собственных потерь $G_{\text{п2}}$ вводится проводимость полезной нагрузки $G_{\text{н2}}$, так, что $G_{\Sigma 2} = G_{\text{п2}} + G_{\text{н2}} = \frac{1}{R_{0e2\text{опт}}}$. Контурный КПД

$$\eta_k = \frac{G_{\text{н2}}}{G_{\Sigma 2}}.$$

При выполнении условия $G_{\text{п2}} \ll G_{\text{н2}}$, т. е. собственные потери выходного резонатора малы по сравнению с полезной нагрузкой, $\eta_k \rightarrow 1$ и $P_{\text{вых}} \rightarrow P_e$.

4. При определении выходной мощности $P_{\text{вых}}$ следует исходить из условия $R_{0e2} = R_{0e\text{опт}}$.

Задача №2

1. При определении величины ускоряющего напряжения U_0 можно исходить из выполнения приблизительного равенства $V_0 \approx V_\phi$.

2. При вычислении коэффициента усиления ЛБВ $K_p = \varphi(NC)$ необходимо учесть ослабление локального поглотителя, т. е. от полученной величины в дБ следует отнять величину затухания локального поглотителя L_{Π} .

3. При определении выходной мощности $P_{\text{вых}}$ по найденному коэффициенту усиления K_p необходимо помнить, что найденное значение K_p является коэффициентом усиления по мощности, т. е. $K_p = 10 \lg P_{\text{вых}}$.

4. При нахождении электронного КПД ЛБВ η_e достаточно ограничиться качественной оценкой его величины, считая, что электронный поток обладает энергией пропорциональной разности $V_0^2 - V_\phi^2$, а фазовая скорость волны связана со скоростью потока условием синхронизма

$$V_\phi = \frac{V_0}{1 + C/2},$$

где C – параметр усиления.

5. Амплитуда напряженности поля электромагнитной волны E_{m2} связана с продольной координатой z и амплитудой входного сигнала $E_{\text{вх}m}$ следующим соотношением:

$$E_{mz} = \frac{1}{3} E_{\text{вх}m} e^{\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega}{V_\phi} \cdot C \cdot z},$$

где $E_{\text{вх}m} = \sqrt{2 \left(\frac{\omega}{V_\phi} \right)^2 P_{\text{вх}} R_{\text{св}}}$.

Задача № 3

Вариант 1

Принять: длину базы диода $L = 1$ мкм, подвижность электронов в GaAs $\mu_n = 0,45 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Учесть, что постоянная времени диода Шоттки не зависит от площади контакта и определяется выражением

$$\tau = r_s C_\delta = \frac{(L - d) \epsilon \epsilon_0}{dq N_d \mu_n},$$

где $d = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 \varphi_K}{q N_d}}$ – толщина обедненного слоя; q – элементарный электрический заряд; ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая

проницаемость GaAs; $\varphi_k = \varphi_T \ln \frac{N_d}{n_i}$ – контактная разность потенциалов, которая определяется концентрацией примеси N_d в полупроводнике; $\varphi_T = \frac{kT}{q} = 0,026$ В при температуре $T = 300$ К.

Вариант 2

Считать, что зависимость барьерной емкости диода Шотки от приложенного напряжения описывается таким же выражением, что и аналогичная зависимость резкого p-n-перехода.

Вариант 3

Минимальную концентрацию донорной примеси N_d следует находить из условия возникновения пролетного режима в диоде Ганна (условие Крамера) [2, с. 112], [5, с. 128].

Вариант 4

При параллельном включении p-i-n-диода в СВЧ-тракт с характеристическим сопротивлением Z_0 ослабление L , создаваемое p-i-n-диодом, представляет собой выраженное в децибелах отношение СВЧ-мощностей: падающей $P_{пад}$ к прошедшей $P_{пр}$. Это ослабление обусловлено частичным отражением СВЧ-волны от p-i-n-диода и частичным рассеиванием мощности в виде тепла в полупроводниковой структуре диода:

$$L[\text{дБ}] = \lg \frac{P_{пад}}{P_{пр}} = 10 \lg \left| 1 + \frac{Z_0}{Z_d} \right|^2.$$

Пренебрегая реактивной составляющей импеданса диода, считаем:

$$Z_d \approx R_d(I_d),$$

причем активная составляющая p-i-n-диода обратно пропорциональна току диода.

Вариант 5

При решении задачи использовать понятие угла пролета.

Варианты 6–10

Для решения задач использовать соответствующие разделы рекомендуемой литературы [1], [2], [5], [6].

Задача №4

Рекомендуется использовать литературу [3], [5], [7].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения функций Бесселя первого $J_1(X)$
и второго порядка $J_2(X)$ аргумента X

X	$J_1(X)$	$\frac{2J_1(X)}{X}$	$XJ_1(X)$	$J_2(2X)$	X	$J_1(X)$	$\frac{2J_1(X)}{X}$	$XJ_1(X)$
0	0	1,0	0	0	2,0	0,57	0,57	1,15
0,1	0,05	0,99	0,01	0,00	2,1	0,57	0,54	1,19
0,2	0,10	0,99	0,02	0,02	2,2	0,55	0,51	1,22
0,3	0,15	0,98	0,04	0,04	2,3	0,54	0,47	1,24
0,4	0,20	0,98	0,08	0,08	2,4	0,52	0,43	1,25
0,5	0,24	0,97	0,12	0,11	2,5	0,50	0,40	1,24
0,6	0,29	0,96	0,17	0,16	2,6	0,47	0,36	1,22
0,7	0,33	0,94	0,23	0,21	2,7	0,44	0,31	1,20
0,8	0,37	0,92	0,29	0,26	2,8	0,41	0,29	1,15
0,9	0,41	0,90	0,35	0,31	2,9	0,37	0,26	1,09
1,0	0,44	0,88	0,44	0,36	3,0	0,34	0,23	1,02
1,1	0,47	0,86	0,52	0,39	3,1	0,30	0,19	0,93
1,2	0,50	0,83	0,60	0,43	3,2	0,26	0,16	0,83
1,3	0,52	0,80	0,67	0,46	3,3	0,22	0,13	0,73
1,4	0,54	0,77	0,76	0,48	3,4	0,18	0,10	0,61
1,5	0,56	0,74	0,84	0,49	3,5	0,14	0,08	0,48
1,6	0,57	0,71	0,91	0,48	3,6	0,10	0,05	0,35
1,7	0,58	0,68	0,98	0,45	3,7	0,01	0,01	0,05
1,8	0,58	0,65	1,05	0,44	3,8	0,00	0,00	0,00
1,9	0,58	0,61	1,10	0,41	3,83	0	0	0

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Электрофизические параметры полупроводниковых материалов

Параметр	Ge	Si	GaAs	InP
Плотность, г/см ³	5,33	2,33	5,31	4,79
Температурный коэффициент линейного расширения, 1/°C	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности при 300 К, Вт/(м·°C)	60	140	50	68
Удельная теплоемкость при 300 К, Дж/(г·°C)	0,31	0,75	0,35	–
Температура плавления, К	1209	1690	1503	1335
Ширина запрещенной зоны при 300 К, эВ	0,67	1,12	1,42	1,35
Относительная диэлектрическая проницаемость	16	11,8	12,9	12,4
Тангенс угла диэлектрических потерь	–	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	–
Пробивная напряженность, кВ/см	100	300	400	500
Подвижность электронов, дырок, см ² /(В·с)	3900, 1900	1500, 600	8000, 400	4600, 150
Дрейфовая скорость насыщения электронов при 300 К, м/с	$6 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$
Критическая напряженность поля, кВ/см	2,3	10	3,2	10,5
Время жизни неосновных носителей заряда, с	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$

Учебное издание

Бельский Алексей Якимович
Дробот Сергей Викторович
Мельников Владимир Александрович и др.

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ.
ПОСОБИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ**

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*
Корректор *Е. И. Герман*
Компьютерная правка, оригинал-макет *А. А. Лысеня*

Подписано в печать 27.06.2013. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 400 экз. Заказ 488.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6