

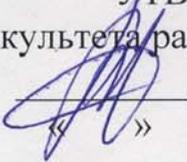
**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета радиотехники и электроники

 Небольсин В.А.

2019 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

**«Компоненты силовой электроники»**

**Направление подготовки 16.04.01 ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

**Профиль Прикладная физика твердого тела**

**Квалификация выпускника магистр**

**Нормативный период обучения 2 года**

**Форма обучения очная**

**Год начала подготовки 2019**

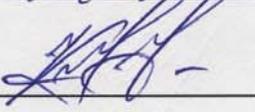
Автор программы

 /Коротков Л.Н. /

И.о. заведующего кафедрой  
Физики твердого тела

 /Костюченко А.В./

Руководитель ОПОП

 /Костюченко А.В./

Воронеж 2019

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цели дисциплины:

Ознакомление студентов с принципами функционирования устройств силовой электроники и их современной элементной базой; связь материаловедческой компоненты знаний студентов с компонентой, относящейся к задачам конструирования мощных электронных приборов и силовых устройств на их основе.

### 1.2. Задачи освоения дисциплины :

- формирование представлений об основных типах силовых полупроводниковых приборов, их характеристиках и физических принципах функционирования; представлений о современных направлениях развития современной силовой электроники и ее элементной базы;
- развитие способности осуществлять оптимальный выбор компонентов силовой электроники для силовых установок;
- выработку навыков организации процесса измерения статических и динамических характеристик элементов силовой электроники.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Компоненты силовой электроники» относится к блоку **Б1.В.03**.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Компоненты силовой электроники» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-5 - способность критически анализировать современные проблемы технической физики, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты;

ДПК-2 - способность самостоятельно разрабатывать новые материалы, элементы, приборы и устройства электронной техники, работающие на новых физических принципах

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-5	знать особенности функционирования и актуальные проблемы силовой электроники
	уметь находить технические решения для получения требуемых характеристик силовых приборов
	владеть методами экспериментального исследования компонентов силовой электроники
ДПК-2	знать физические принципы функционирования приборов силовой твердотельной электроники.

	уметь выбирать оптимальные материалы и типовые конструкции компонентов силовой электроники
	владеть методами проектирования твердотельных приборов силовой электроники

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Компоненты силовой электроники» составляет 5 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		3
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	37	37
В том числе:		
Лекции	18	18
Практические занятия (ПЗ)	10	10
Лабораторные работы (ЛР)	9	9
<b>Самостоятельная работа</b>	107	107
<b>Курсовой проект</b>	+	+
Часы на контроль	36	36
Виды промежуточной аттестации – экзамен	+	+
Общая трудоемкость: академические часы зач.ед.	180 5	180 5

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

**очная форма обучения**

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Введение в силовую электронику	Введение. Область применения и основные требования к электронным силовым установкам. Общие подходы к построению силовых устройств. Бесконтактные переключающие устройства. Требования, предъявляемые к компонентам силовой электроники и материалам для них.	2	1	-	11	14
2	Силовые диоды.	Основные технические характеристики силовых п/п диодов и структур. Физические процессы на контакте «металл – полупроводник». Барьер Шоттки. Диод Шоттки, ВАХ, динамические характеристики полупроводниковых диодов	2	1	-	16	19
3	Биполярные транзисторы	Биполярный транзистор (БТ). Принцип работы. Усиление сигнала. Схемы включения би-	4	2	4	16	26

		полярного транзистора. Статические ВАХ. Режимы работы: активный, насыщение, отсечка, инверсный. Понятие рабочей точки Импульсный режим работы БТ. Переходные характеристики. Требования, предъявляемые к мощным БТ. Конструкции мощных БТ. Схема Дарлингтона. Конструкции высоковольтных БТ					
4	Динисторы, тиристоры, симисторы.	Динистор, устройство и принцип работы. Тиристоры. Статические ВАХ тиристора. Способы управления тиристором. Разновидности тиристоров. Требования, предъявляемые к мощным тиристорам. Конструкции мощных.	2	-	5	16	23
5	Полевые транзисторы с управляющим р-п – переходом.	Полевой транзистор с управляющим р-п – переходом (ПТУП). Принцип работы. Выходные и передаточные ВАХи. Особенности конструкции и варианты технологии мощных ПТУП Статические индуцированные транзисторы (СИТ). Устройство и принцип действия. Выходные вольтамперные характеристики	2	2	-	16	20
6	Полевые транзисторы с изолированным затвором	Полевой транзистор с изолированным затвором. (МДП). Условия формирования канала. Принцип работы. Выходные ВАХ. Разновидности конструкций, их сравнительные характеристики	2	2	-	16	20
7	Биполярные транзисторы с изолированным затвором	Биполярные транзисторы с изолированным затвором. (БТИЗ). Принцип работы. Разновидности конструкций. Статические ВАХ. Динамические характеристики. Модули БТИЗ	4	2	-	16	22
<b>Итого</b>			<b>18</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>107</b>	<b>144</b>
<b>Экзамен</b>							<b>36</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

1. Переходные процессы в мощном биполярном транзисторе.
2. Исследование статических вольтамперных характеристик тиристора.

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

1. Проектирование силового полупроводникового диода
2. Проектирование силового тиристора.
3. Проектирование мощного биполярного транзистора.

Курсовой проект содержит следующие разделы:

- 1 Задание.
- 2 Введение.
3. Литературный обзор по теме исследования.
4. Расчетно-конструкторская часть.
5. Технологическая часть.
- 6 Графическая часть.
- 7 Заключение.

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

#### 7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-5	знать особенности функционирования и актуальные проблемы силовой электроники	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь находить технические решения для получения требуемых характеристик силовых приборов	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта, выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть методами экспериментального исследования компонентов силовой электроники	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта, выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ДПК-2	знать физические принципы функционирования приборов силовой твердотельной электроники.	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь выбирать оптимальные материалы и типовые конструкции компонентов силовой электроники	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта, выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть методами проектирования твердотельных приборов силовой электроники	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта, выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 3 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ОПК-5	знать особенности функционирования и актуальные проблемы силовой электроники	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	уметь находить технические решения для получения требуемых характеристик силовых приборов	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть методами экспериментального исследования компонентов силовой электроники	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-16	знать физические принципы функционирования приборов силовой твердотельной электроники.	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	уметь выбирать оптимальные материалы и типовые конструкции компонентов силовой электроники	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть методами проектирования твердотельных приборов силовой электроники	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

## 7.2 Примерный перечень оценочных средств ( типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

### 7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Какой способ регулирования мощности, выделяемой в нагрузке, наиболее предпочтителен в устройствах силовой электроники?

1. Амплитудная модуляция
2. Амплитудно-импульсная модуляция
3. Широтно-импульсная модуляция

Правильный ответ – 3.

2. Какие структуры, как правило, используют для создания силовых диодов?

Ответы:

1. p-n
2. p<sup>+</sup>-p-n-n<sup>+</sup>.
3. p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>

Правильные ответы – 2 и 3.

3. Каким образом диффузионная емкость p-n – перехода ( $C_{\text{диф}}$ ) зависит от протекающего через него прямого тока (I)?

1.  $C_{\text{диф}} \sim I$ ,
2.  $C_{\text{диф}} \sim I^2$ ,
3.  $C_{\text{диф}} \sim I^{1/2}$ .

Правильный ответ – 1.

4. Почему стремятся увеличить периметр эмиттера мощных транзисторов, предназначенных для работы в импульсном режиме.

Ответы:

1. Разветвленный периметр эмиттера повышает надежность транзистора.
2. Разветвленный периметр эмиттера улучшает частотные характеристики транзистора.
3. Инжекция из эмиттера вследствие поверхностного эффекта в момент переключения преимущественно идет по его периметру.

Правильный ответ – 3.

5. Какой из двух типов диодов обладает меньшим временем восстановления?

1. Диод на основе p-n – перехода.
2. Диод на основе контакта металл – полупроводник.

Правильный ответ - 2.

5) Как зависит высота потенциального барьера p-n-перехода с изменением концентрации примесей в прилегающих к переходу областях:

- 1- возрастает при увеличении концентрации примесей в соответствующих областях,
- 2 - уменьшается при увеличении концентрации примесей в соответствующих областях,

Правильный ответ: 1.

6) Как правило, высоковольтные биполярные транзисторы обладают низким коэффициентом передачи по току. Чем это обусловлено?

1. Сравнительно низким коэффициентом инжекции.
2. Сравнительно низким коэффициентом переноса.
3. Сравнительно низкой эффективностью коллектора.

Правильный ответ – 2.

7. Назовите, в каком случае тиристор перейдет из «открытого» состояния в «закрытое»?

1. На управляющий электрод подать «нулевой потенциал».
2. Напряжение на аноде равно нулю.
3. Напряжение на аноде и на управляющем электроде равно нулю.

Правильный ответ - 3.

8. Что имеют ввиду, когда говорят о пороговом напряжении МДП транзистора?

1. Максимально допустимое напряжение между стоком и истоком.
2. Максимально допустимое напряжение между затвором и подложкой.
3. Напряжение, при котором возникает проводящий канал. в режиме слабой инверсии,
4. Напряжение, при котором на кристалле в промежутке между стоком и истоком образуется слой с инверсной проводимостью.

Правильные ответы – 3 и 4.

9. Что такое «крутизна характеристики» полевого транзистора?

1. Отношение приращения тока стока к приращению тока затвора при постоянном напряжении между выходными электродами.
2. Отношение приращения тока стока к приращению напряжения между затвором и истоком при постоянном напряжении между выходными электродами.
3. Отношение приращения тока стока к приращению тока затвора.

Правильный ответ - 2.

10. Как изменяется барьерная емкость при увеличении обратного напряжения на p-n-переходе?

- 1 – возрастает
- 2 – не меняется
- 3 - уменьшается

Правильный ответ - 3.

## 7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Мощность, выделяемая в нагрузке, регулируются с применением ШИМ. Период следования импульсов прямоугольной формы ( $T$ ) напряжением  $V=300$  В составлял 10 мс. За время наблюдения длительность импульсов ( $\tau$ ) была 4 мс. Определить среднюю мощность ( $P$ ) в нагрузке, имеющей активное сопротивление  $R = 30$  Ом.

Решение.

Максимальная мощность при данном способе управления  $P_{\max} = V^2/R = 3$  кВт.

$$P = P_{\max}(\tau/T) = 1,2 \text{ кВт}$$

2. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток коллектора равен 15 А, ток базы равен 0,5 А. Чему равен коэффициент передачи тока эмиттера?

Решение.

Коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером определяется выражением

$$\beta = I_K / I_B = 30.$$

Коэффициент передачи по току транзистора в схеме с общим эмиттером связан коэффициентом передачи по току в схеме с общей базой  $\alpha$  следующим соотношением  $\alpha = \beta/(1+\beta) = 0,968$ .

3. В каком режиме работает биполярный n-p-n-транзистор, если напряжение база-эмиттер  $U_{бэ} = 0,8$  В, а напряжение коллектор-эмиттер  $U_{кэ} = 0,5$  В.

Ответ - в режиме насыщения.

4. Для транзистора типа p-n-p типа известна дырочная и электронная составляющие тока эмиттера:  $I_{pэ}=10$  А,  $I_{nэ}=0.1$  А, соответственно. Дырочная составляющая тока коллектора  $I_{pk}=9,8$  А, а электронная  $I_{nk}=0.1$  А. Вычислить: а) статический коэффициент передачи тока базы -  $\alpha$ ; б) коэффициент инжекции -  $\gamma$ ; в) коэффициент передачи тока в схеме с ОБ -  $\alpha$ ; г) коэффициент передачи тока в схеме ОЭ -  $\beta$ ;

Решение

- а) статический коэффициент переноса базы  $b=I_{pk}/I_{pэ}=0,98$ ;  
 б) эффективность эмиттера  $\gamma=I_{pэ}/(I_{pэ}+I_{nэ})=0,99$ ;  
 в) коэффициент передачи тока в схемах с ОБ  $\alpha=b\gamma=0.97$   
 г)  $\beta=\alpha/(1-\alpha)=32,3$

5. Работа выхода электрона из металла  $\Phi_{me}=4,2$  эВ, а из полупроводника n-типа  $\Phi_{np}=3,5$  эВ. Определить контактную разность потенциалов и напряженность электрического поля в полупроводнике на расстоянии  $x=0,05$  мкм от контакта, если  $n_0=10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника  $\epsilon=16$

Решение

Напряженность электрического поля в однородном полупроводнике дается формулой:

$$E = \frac{d\phi}{dx} = \frac{qn_0W}{\epsilon\epsilon_0} \left(1 - \frac{x}{W}\right),$$

где  $\phi$  - электрический потенциал,  $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-14}$  Ф/см - абсолютная электрическая постоянная,  $W$  - ширина области обеднения.

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_k}{qn_0}}.$$

Контактная разность потенциалов  $\phi_k=(\Phi_{me}-\Phi_{np})/q=0,7$  В.

$$W = (0,7 \cdot 2 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{17})^{0,5}) = 0,11 \text{ мкм}$$

$$E = [(1,11 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{17}) / (16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14})] (1-0,45) = 6,8 \cdot 10^5 \text{ В/см}$$

6. Через диод течет прямой ток  $I=100$  А. Найти диффузионную емкость  $p^+$ - $n$ -перехода  $C_d$  при комнатной температуре, полагая, что время жизни дырок в  $n$ - области перехода  $\tau_p=10^{-7}$  с.

Решение. Поскольку переход асимметричный, то прямой ток преимущественно будет связан с инжекцией дырок. Поэтому  $I \approx I_p$ . Тогда диффузионную емкость найдем по формуле.

$$C_d = I_p \tau_p q / 2kT = I_p \tau_p / 2\phi_T = 100 \cdot 10^{-7} / (2 \cdot 0,0256) = 195,3 \text{ мкФ}$$

7. Кремневый МОП транзистор с отношением ширины к длине канала  $W/L=5$ , толщиной затворного окисла  $d=0,08$  мкм и подвижностью электронов в канале  $\mu=600$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup> предполагается использовать как управляемый резистор. Рассчитать превышение затворного напряжения  $V_G$  над пороговым напряжением  $V_t$ , при котором сопротивление транзистора  $R$  при малых напряжениях на стоке  $V_d$  будет равно 2.5 кОм.

Решение. Зависимость тока стока от напряжения на электродах МДП - транзистора на начальном участке ВАХ описывается формулой:

$$I_d = \frac{W}{L} C_{ox} \mu (V_G - V_t) V_d$$

где  $C_{ox} = \epsilon\epsilon_0/d$  - удельная емкость затвор - подложка. Учитывая, что  $R = V_d/I_d$ , имеем:

$$(V_G - V_t) = \frac{L}{W} \frac{1}{RC_{ox} \mu}$$

Подставив численные значения, получим:  $(V_G - V_t) = 3.1$  В.

8. Вычислить прямое напряжение на р-п-переходе при прямом токе  $I = 9\text{А}$ , если обратный ток насыщения при температуре  $T = 300\text{К}$  равен  $1\text{ мА}$ . Определить выделяемую мощность ( $P$ ).

Решение. Ток через идеальный р-п-переход описывается формулой

$$I = I_0 [\exp(V/\varphi_T) - 1]. \text{ Если } I \gg I_0, I \approx I_0 \exp(V/\varphi_T).$$

$$\text{Прямое падение напряжения } V = \varphi_T \ln(I/I_0) = 0,233\text{ В}$$

$$P = I \cdot V = 2,1\text{ Вт.}$$

9. Удельная проводимость канала n-типа полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и двумя затворами равна  $\sigma = 8,85\text{ См/м}$ , подвижность электронов  $\mu = 0,12\text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , относительная диэлектрическая проницаемость кремния  $12$ , расстояние между металлургическими границами р-п-переходов затвора  $L = 4,8\text{ мкм}$ , а контактная разность потенциалов  $\varphi_k = 0,6\text{ В}$ . Определить абсолютную величину напряжения отсечки.

Решение. Определим концентрацию электронов в канале

$$n = \sigma/\mu \cdot q = 8,85/(0,12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) = 4,6 \cdot 10^{20}\text{ м}^{-3}.$$

Напряжение отсечки соответствует напряжению, при котором область обеднения вблизи каждого р-п-перехода  $W$  достигнут половины расстояния между металлургическими границами р-п-переходов.

$$\text{Поскольку } W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - V)}{qn}}, \text{ где } V - \text{ обратное напряжение на р-п-переходе затвора, то}$$

$$qn(L/2)^2 = 2\varepsilon_0\varepsilon(\varphi_k - V_0).$$

$$\text{Напряжение отсечки } V_0 = qn(L/2)^2/2\varepsilon_0\varepsilon - \varphi_k = 2 - 0,6 = 1,4\text{ В}$$

Ответ:  $1,4\text{ В}$ .

10. МДП-транзистор работает в ключевом режиме. Определить сопротивление транзистора  $R$  во включенном состоянии, если удельная крутизна равна  $0,5\text{ мА/В}^2$ , пороговое напряжение  $V_0 = 1\text{ В}$ , а напряжение затвор-исток  $V_з = 5\text{ В}$ .

Решение: Сопротивление канала на крутом участке ВАХ описывается формулой  $R = [S_0(V_з - V_0 - V_c)]^{-1}$ , где  $V_c$  – напряжение между стоком и истоком. При работе в ключевом режиме, учитывая, что транзистор находится во включенном состоянии, можно положить, что  $V_c \approx 0$ .

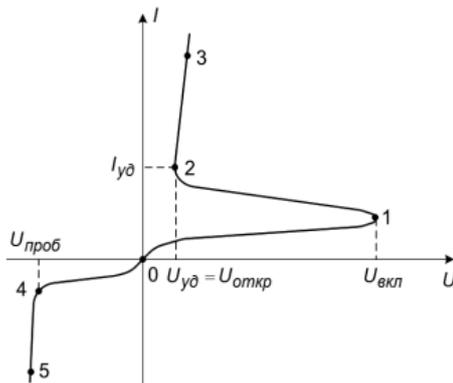
$$\text{Подставив численные значения найдем } R = [0,5\text{ мА/В}^2 (5\text{В}-1\text{В})]^{-1} = 500\text{ Ом}$$

### 7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Крутизна характеристики, входящего в состав БТИЗ полевого транзистора  $S_{пт} = 1,6\text{ мА/В}$ , коэффициент передачи по току биполярного транзистора  $\beta = 20$ . Оценить крутизну характеристики БТИЗ

$$\text{Решение. } S = S_{пт} \beta = 32\text{ мА/В}$$

2. Какой участок ВАХ диноистора, представленной на рисунке, соответствует режиму прямого запираания?



Ответ: участок 0 — 1.

3. Определите напряжение пробоя сплавного кремневого диода с переходом  $p^+-n$ , если удельное сопротивление базы диода  $\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Решение. Поскольку база прибора изготовлена из высокоомного кремния, то при подаче на структуру обратного напряжения определенной величины, в ней будет развиваться лавинный электрический пробой. Напряжение пробоя определяется эмпирическим соотношением  $V_{\text{п}} = 96\rho^{0,78}$ , где напряжение лавинного пробоя получается в вольтах, если удельное сопротивление базы брать в  $\text{Ом}\cdot\text{см}$ .

Получаем  $V_{\text{п}} = 1705 \text{ В}$

4. Найти напряжения начала пробоя между базой и коллектором ( $V_{\text{кб}}$ ) и между эмиттером и коллектором ( $V_{\text{кэ}}$ ) кремневого сплавного биполярного  $p-n-p$  транзистора. Толщина базы транзистора  $w = 10 \text{ мкм}$ . Содержание донорной примеси в базе  $N_{\text{д}} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , концентрация акцепторов в коллекторе  $N_{\text{а}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Подвижности электронов и дырок составляют соответственно,  $\mu_{\text{n}} = 700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $\mu_{\text{р}} = 500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Коэффициент передачи по току в схеме с ОЭ  $\beta = 20$

Решение. Напряжение пробоя несимметричного  $n^+-p$  перехода определяется эмпирическим соотношением  $V_{\text{п}} = 48\rho^{0,78}$ , где напряжение лавинного пробоя получается в вольтах, если удельное сопротивление высокоомной области брать в  $\text{Ом}\cdot\text{см}$ .

Учитывая, что высокоомной областью является коллектор, определим ее удельное сопротивление  $\rho_{\text{к}} = (q N_{\text{а}} \mu_{\text{р}})^{-1} = (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{15} \cdot 500)^{-1} = 12,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

Напряжение  $V_{\text{кб}} = 344 \text{ В}$

В транзисторе пробой также может развиваться из-за «прокола базы», возникающего, когда область обеднения в базе достигнет границы с эмиттером.

Толщина резкого  $p-n$ -перехода дается формулой:

$$L_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - V)}{q} \left( \frac{1}{N_{\text{а}}} + \frac{1}{N_{\text{д}}} \right)}$$

Область обеднения, локализованная в базе  $L_{\text{n}}$  может быть найдена

$$L_{p-n} = L_{\text{n}} + L_{\text{р}}$$

$$N_{\text{д}} L_{\text{n}} = N_{\text{а}} L_{\text{р}}$$

На основании этих выражений получим формулу для напряжения «прокола базы»

$$V_{\text{бпр}} = \frac{w^2 \left( 1 + \frac{N_{\text{д}}}{N_{\text{а}}} \right)}{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \left( \frac{1}{N_{\text{а}}} + \frac{1}{N_{\text{д}}} \right)} - \varphi_k = 667 \text{ кВ}. \text{ Видим, что } V_{\text{бпр}} \gg V_{\text{кб}}, \text{ поэтому «прокол базы» не}$$

может быть реализован.

Напряжение пробоя  $V_{\text{кэ}} = V_{\text{кб}} / (1+\beta)^{1/m}$ , где  $m = 3.5$  для кремневого сплавного биполярного  $p-n-p$  транзистора. Подставив численные значения, найдем  $V_{\text{кэ}} = 144 \text{ В}$

5. В базе  $p-n-p$ -транзистора рекомбинирует 3% электронов, инжектированных из эмиттера. Опре-

делить коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha$ , если в токе эмиттера дырочная составляющая равна 2%, а лавинное размножение носителей заряда в коллекторном переходе отсутствует. Найдите значения токов базы  $I_b$  и коллектора  $I_k$ , если ток эмиттера  $I_3 = 15$  А.

Решение.  $\alpha = b\gamma$ , где  $b$  – коэффициент переноса,  $\gamma$  – коэффициент инжекции.

Поскольку в базе рекомбинирует 3% инжектированных из эмиттера электронов, то  $b=0,97$ .

Коэффициент инжекции  $\gamma = 0,98$ . Коэффициент передачи  $\alpha = 0,95$

$I_k = \alpha I_3 = 14,25$  А;  $I_b = I_3 - I_k = 0,75$  А.

6. Удельная проводимость n-канального полевого транзистора с управляющим p-n- переходом  $\sigma = 20,9$  См/м, ширина канала  $w = 6$  мкм при напряжении  $V_{зи} = 0$ . Найти напряжение отсечки  $V_0$ , считая подвижность электронов  $\mu = 0,13$  м<sup>2</sup>/В·с, а относительная диэлектрическая проницаемость кремния  $\epsilon = 12$ .

При  $V_{зи} = 0$  сопротивление канала транзистора  $R_0 = 4$  Ом. При каком  $V_{зи}$  сопротивление канала станет равным 16 Ом.

Решение. Удельная проводимость  $\sigma = q\mu N_d$ , где  $q$  – заряд электрона,  $N_d$  – концентрация донорной примеси в канале.

Найдем  $N_d = \sigma / q\mu = 20,9 / (0,13 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) = 10^{21}$  м<sup>-3</sup>.

Напряжение отсечки  $V_0 = (qN_d w^2 / 4) / (2\epsilon\epsilon_0)$

Подставив численные значения, получим  $V_0 = 6,8$  В

Сопротивление канала  $R = R_0 / (1 - |V_{зи} / V_0|^{1/2})^{-1}$

Откуда получаем  $V_{зи} = V_0(1 - R_0/R_0)^2 = 6,8(1 - 4/16)^2 = 3,825$  В.

7. Статический коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha_0 = 0,98$ , а его предельная частота  $f_0 = 5$  МГц. Определить модуль коэффициента передачи тока эмиттера  $\alpha$  на частоте 10 МГц и найти частоту, на которой модуль  $\alpha$  уменьшится до 0,6.

Решение. Частотная зависимость  $\alpha$  определяется выражением:

$\alpha = \alpha_0 / (1 + j(f/f_0))$ , где  $j = (-1)^{1/2}$ ,  $f_0$  – предельная частота, на которой  $\alpha = \alpha_0 / (2)^{1/2}$ .

Следовательно, на частоте 10 МГц коэффициент  $|\alpha| = 0,98 / [1 + (10/5)^2] = 0,44$

Частота, на которой  $|\alpha|$  уменьшится до 0,6 может быть рассчитана по формуле:

$$f = f_0 \sqrt{\left(\frac{\alpha_0}{\alpha}\right)^2 - 1} = 5 \sqrt{\left(\frac{0,98}{0,6}\right)^2 - 1} = 6,24 \text{ МГц}$$

8. Мощный транзистор, имеющий тепловое сопротивление между переходом и корпусом  $R_{пк} = 0,8$  К/Вт, должен рассеивать мощность  $P = 10$  Вт при температуре 32 С. Для повышения надежности температуру перехода принято ограничить величиной 70 С.

Сборочная конструкция содержит шайбу и изолирующую силиконовую смазку. Тепловое сопротивление шайбы  $R_{ш} = 1,5$  К/Вт, а силиконовая смазка уменьшает его на 40%. Определить, какова должна быть площадь теплоотвода  $S$ . Считать, что 1 см<sup>2</sup> металлической поверхности теплоотвода имеет тепловое сопротивление  $R_{т0} = 800$  К/Вт.

Решение. Определим тепловое сопротивление между корпусом и теплоотводом  $R_{кт}$  с учетом силиконовой смазки.

$R_{кт} = R_{ш} (1 - 0,4) = 1,5 \cdot 0,6 = 0,9$  К/Вт.

Полное тепловое сопротивление между коллекторным p-n- переходом и внешней средой  $R_{пс} = R_{пк} + R_{кт} + R_{тс}$ , (1)

где  $R_{тс}$  – тепловое сопротивление теплоотвод – среда.

В этом уравнении неизвестны  $R_{пс}$  и  $R_{тс}$ .

Запишем  $T_{п} = T_c + R_{пс} \cdot P$ . (2)

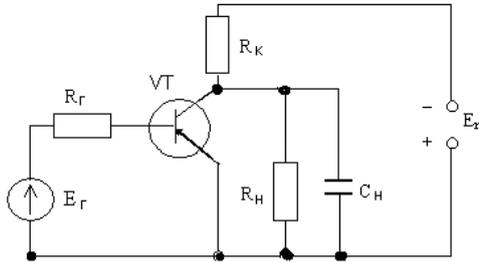
Из (2) найдем  $R_{пс} = (T_{п} - T_c) / P = (70 - 32) / 10 = 3,8$  К/Вт

Подставив значение  $R_{пс}$  в (1), найдем  $R_{тс} = R_{пс} - R_{пк} - R_{кт} = 3,8 - 0,8 - 0,9 = 2,1$  К/Вт.

Определим теперь требуемую площадь теплоотвода  $S$ .

$S = R_{т0} / R_{тс} = 800 / 2,1 = 381$  см<sup>2</sup>.

9. Определить длительности фронта ( $t_f$ ), среза ( $t_c$ ) и рассасывания при переключении транзисторного ключа, нагруженного на RC - цепь (рис.) в результате скачкообразного изменения напряжения от  $E_{r2} = -2$  В до  $E_{r1} = 1$  В. Внутреннее сопротивление генератора  $R_r = 1$  кОм,  $E_{п} = 10$  В,  $R_k = R_n = 1$  кОм,  $C_n = 100$  пФ, тип транзистора П210А.



Решение.

$t_f = \tau' \ln [I_{б1} / (I_{б1} - I_{бн})]$ , где  $I_{бн} = I_{кн} / \beta$ ,  $I_{кн} \approx E_{п} / R_k$ ,  $\tau' = \tau_{\beta} + [C_n(1+\beta) + C_n] \cdot R_k R_n / (R_k + R_n)$ ,  $\tau_{\beta}$  - время жизни неосновных носителей в базе.

$t_c = \tau' \ln \left( \frac{I_{кн}}{\beta I_{б2}} + 1 \right)$ , где  $I_{б1} \approx E_{r1} / (R_r + r_{б})$ ,  $I_{б2} \approx E_{r2} / (R_r + r_{б})$ ,  $r_{б}$  - сопротивление базы транзистора,

$\beta$  - коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером.

Подставив численные значения, получим  $t_f = 80$  нс,  $t_c = 60$  нс.

Время рассасывания неосновных носителей

$$t_{рас} = \tau'_{\beta} \ln \frac{(I_{б1} + I_{б2})\beta}{I_{кн} + I_{б2}\beta} \approx 84 \text{ нс}$$

10. Определить дифференциальное сопротивление идеального выпрямляющего контакта металл-полупроводник при температуре = 300К и прямом токе  $I = 2$ мА.

Решение.  $R_{диф} \approx \varphi_T / I = 0.0256 / 0.002 = 13$  Ом.

## 7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом

## 7.2.5 Примерный перечень вопросов для экзамена

1. Область применения и основные требования к электронным силовым установкам. Общие подходы к построению силовых устройств.
2. Бесконтактные переключающие устройства. Требования, предъявляемые к компонентам силовой электроники и материалам для них.
3. Проблемы отвода тепла в мощных пп вентилях. Конструктивные особенности мощных диодов.
4. Физические процессы на контакте полупроводников p- и n- типов. Контактная разность потенциалов, ОПЗ. Прямое и обратное смещение p- n- перехода. Инжекция и экстракция носителей. Лавинный пробой, p – n-структуры.
5. Основные технические параметры силовых п/п диодов и структур. Статические и динамические характеристики.
6. Физические процессы на контакте «металл – полупроводник». Барьер Шоттки. Диод Шоттки, ВАХ, динамические характеристики
7. Применение неуправляемых вентилях (диодов) в схемах двух – и однополупериодных выпрямителей. Схемы диодных умножителей напряжения.
8. Биполярный транзистор (БТ). Принцип работы. Эффективность эмиттера и коэффициент переноса. Усиление сигнала. Схемы включения биполярного транзистора.
9. Статические ВАХ. Режимы работы: активный, насыщение, отсечка, инверсный. Понятие рабочей точки.

10. Импульсный режим работы БТ. Переходные характеристики.
11. Особенности технологии сплавных, планарных и планарно-эпитаксиальных транзисторных структур.
12. Особенности и разновидности конструкций мощных БТ.
13. Требования, предъявляемые к мощным БТ. Конструкции мощных БТ. Конструкции высоковольтных БТ.
14. Динистор, устройство и принцип работы. Эквивалентная схема динистора.
15. Разновидности тиристоров. Способы управления тиристором. Статические ВАХ тиристора.
16. Конструкция и технология изготовления мощных тиристоров. Симисторы (триаки).
17. Варианты электрических схем на тиристорах для управления мощностью, подводимой к нагрузке.
18. Полевой транзистор с управляющим р-п – переходом (ПТУП). Принцип работы. Выходные и передаточные ВАХи.
19. Статические индуцированные транзисторы (СИТ). Устройство и принцип действия. «Полевой» и «биполярный» режимы работы. Выходные вольтамперные характеристики.
20. Схемотехника электронных ключей на ПТУП. Варианты использования СИТ в импульсных схемах.
21. Полевой транзистор с изолированным затвором. (МДП). Условия формирования канала. Принцип работы. Выходные ВАХ.
22. Биполярные транзисторы с изолированным затвором. (БТИЗ). Принцип работы. Разновидности конструкций. Статические ВАХ..
23. Динамические характеристики БТИЗ.
24. Основные тенденции в развитии силовой электроники.

### 7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация осуществляется по нескольким критериям:

1. Тестирование по темам курса тест-задания.
2. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил правильно на 40% вопросов и меньше.
3. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил правильно на 40-60% вопросов.
4. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент ответил правильно на 60-80% вопросов.
5. Оценка «Отлично» ставится, если студент ответил правильно на 80% вопросов и более.
  2. Ответы на семинарских занятиях по теме курса.
  3. Подготовка и защита курсового проекта.
  4. Экзамен.

### 7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Введение в силовую электронику	ПК-5; ДПК-2	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
2	Силовые диоды.	ПК-5; ДПК-2	Тест, контрольная работа, за-

			щита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
3	Биполярные транзисторы	ПК-5; ДПК-2	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
4	Динисторы, тиристоры, симисторы.	ПК-5; ДПК-2	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
5	Полевые транзисторы с управляющим р-n – переходом.	ПК-5; ДПК-2	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
6	Полевые транзисторы с изолированным затвором	ПК-5; ДПК-2	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....

### **7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

## **8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)**

### **8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **Основная литература**

1. В.И. Лачин, Н.С. Савелов. Электроника. Уч. пособие. Ростов – на- Дону, Феникс 2007 г. 704 с
2. Б.Ю. Семенов Силовая электроника. От простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс, 2005, 416с.
3. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, при-

менение. М.: - Издательский дом Додэка, XXI, 2001, 384 с

#### **Дополнительная литература**

1. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Чисть 1 и часть 2. М.: Мир.1984.
2. Под ред. Я.А. Федотова. Кремневые планарные транзисторы. /Под ред. Я.А. Федотова М.: Сов. Радио. 1973, 335 с.
3. Ю.А. Евсеев, П.Г. Дерменжи. Силовые полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат. 1981.472 с.

#### **Методические разработки**

Т.В. Свистова МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к выполнению курсовых проектов «**Расчет силового тиристора**» по дисциплине «**Твердотельная электроника**» для студентов специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения. ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2007

**8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**

Microsoft Word, Microsoft Excel, Internet Explorer, Origin

### **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

Научно-учебная лаборатория кафедры ФТТ с научно-исследовательскими измерительными стендами, комплексами и оборудованием, компьютерный класс. (аудитории 226, 226а первого корпуса ВГТУ)

### **10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

По дисциплине «Хранение и транспортировка криогенных жидкостей» читаются лекции, проводятся практические занятия.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета твердотельных силовых структур. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

<b>Вид учебных занятий</b>	<b>Деятельность студента</b>
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск от-

	ветов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом с оценкой три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

