

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФРТЭ Ф.А. Небольсин  
«21» декабря 2021 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
дисциплины  
«СВЧ-электроника»

Направление подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Профиль Компоненты микро- и наносистемной техники

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2022

Автор программы

К.Г. Королев /Королев К.Г./

И.о. заведующего кафедрой  
Физики твердого тела

Ю.Е. Калинин /Калинин Ю.Е./

Руководитель ОПОП

О.В. Стогней /Стогней О.В./

Воронеж 2021

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цели дисциплины

*Формирование профессиональных компетенций в области фундаментальных основ СВЧ электроники, необходимых для использования и создания СВЧ излучений, колебаний и волн, в научных лабораториях, в условиях производства и другой практической деятельности*

### 1.2. Задачи освоения дисциплины

- *Формирование знаний физических основ вакуумной СВЧ электроники*
- *Формирование умений оценки области возможного применения*
- *Развитие навыков владения информацией об основных научно-технических проблемах и перспективах развития СВЧ электроники*
- *Формирование знаний принципов создания и механизмов работы важнейших типов СВЧ приборов и устройств*
- *Формирование умений определять достижимые характеристики основных типов СВЧ устройств*
- *Развитие навыков практического использования методов оценки характеристик СВЧ устройства различного назначения*

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «СВЧ-электроника» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений (дисциплина по выбору) блока Б1.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «СВЧ-электроника» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-4 - Способен участвовать в реализации технологических процессов в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем

<b>Компетенция</b>	<b>Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции</b>
ПК-4	<i>Знать технологические процессы в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем</i>
	<i>Уметь участвовать в реализации технологических процессов в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем</i>
	<i>Владеть навыками участия в реализации технологических процессов в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем</i>

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «СВЧ-электроника» составляет 4 з.е.  
Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		8
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	60	60
В том числе:		
Лекции	36	36
Практические занятия (ПЗ)	24	24
<b>Самостоятельная работа</b>	84	84
Виды промежуточной аттестации - зачет с оценкой	+	+
Общая трудоемкость: академические часы	144	144
зач.ед.	4	4

#### 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.	СРС	Всего, час
1	Электромагнитные волны в свободном пространстве	Уравнения Максвелла. Граничные условия. Электромагнитные свойства сред. Уравнения Максвелла в комплексной форме. Баланс энергии при гармонических колебаниях электромагнитного поля. Общие свойства плоских однородных электромагнитных волн. Поляризация волн. Стоячие волны. Волны с произвольным направлением распространения. Отражение и преломление электромагнитных волн. Полное внутреннее отражение. Распространение электромагнитных волн в поглощающих средах.	6	4	4	14
2	Передающие линии СВЧ диапазона	Общие сведения о передающих линиях СВЧ. Решение волнового уравнения для электромагнитных волн, направляемых вдоль однородной передающей линии. Фазовая скорость и длина волны в передающих линиях СВЧ. Дисперсия электромагнитных волн в передающих линиях СВЧ. Свойства дисперсных волн в однородных передающих линиях СВЧ. Групповая скорость волн и скорость перемещения электромагнитного энергии вдоль передающей линии СВЧ. Типы волн, распространяющихся по однородным передающим линиям СВЧ. Понятие парциальных волн.	6	4	20	30
3	Электромагнитные волны в прямоугольных металлических волноводах	Этапы решения задачи об электрических волнах в прямоугольном металлическом волноводе. Выражения для составляющих поля в прямоугольном волноводе при волнах электрического типа (при волнах типа ТМ). Примеры структуры поля в прямоугольном металлическом волноводе в случае	8	6	20	34

		волн типа ТМ. Выражения для составляющих поля в прямоугольном волноводе при волнах магнитного типа (при волнах типа ТЕ). Примеры структуры поля в прямоугольном металлическом волноводе в случае волн типа ТЕ. Токи в стенках прямоугольного металлического волновода. Устройства ввода-вывода электромагнитной энергии в прямоугольный металлический волновод для волн типа ТМ и ТЕ. Критическая длина волн и дисперсия волн в прямоугольном металлическом волноводе.				
4	Электромагнитные волны в полых металлических резонаторах	Основные типы объемных резонаторов. Общие свойства свободных колебаний в резонаторах. Параметры объемных резонаторов. Электромагнитные колебания в прямоугольных металлических резонаторах. Примеры структуры поля в резонаторах для магнитных колебаний (волн М-типа). Примеры структуры поля в резонаторах для электрических колебаний (волн Е-типа). Вырождение колебаний полых металлических резонаторов. Добротность полых металлических резонаторов.	8	6	20	34
5	Устройство и принцип действия приборов СВЧ электроники	Классификация электронных и квантовых приборов СВЧ и оптического диапазона. Триоды и тетроды СВЧ. Полный ток в промежутке между электродами и во внешней цепи электровакуумных приборов. Работа триода на СВЧ. Клистроны. Пролетный двухрезонаторный клистрон. Многорезонаторный клистрон. Двухрезонаторные клистронные генераторы. Отражательный клистрон. Лампы бегущей волны типа О. Принцип работы лампы бегущей волны. Замедляющие системы. Параметры и характеристики лампы бегущей волны. Приборы типа М. Движение электронов в встречных статических электрическом и магнитном полях. Взаимодействие электронов и СВЧ поля. Лампа бегущей волны типа М. Лампа обратной волны типа М. Многорезонаторный магнетрон. Митрон. Платинотрон. Приборы с циклотронным резонансом.	8	4	20	32
<b>Итого</b>			<b>36</b>	<b>24</b>	<b>84</b>	<b>144</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

## 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-4	Знать технологические процессы в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем	Активная работа на практических занятиях	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочей программе	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочей программе
	Уметь участвовать в реализации технологических процессов в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочей программе	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочей программе
	Владеть навыками участия в реализации технологических процессов в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочей программе	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочей программе

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 8 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-4	Знать технологические процессы в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем	Тест	Выполнение теста с проходным баллом 90% правильных ответов.	Выполнение теста с проходным баллом 80% правильных ответов.	Выполнение теста с проходным баллом 70% правильных ответов.	В тесте не набран проходной балл
	Уметь участвовать в реализации технологических процессов в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных схем	Решение стандартных практических задач	Выполнение теста с проходным баллом 90% правильных ответов.	Выполнение теста с проходным баллом 80% правильных ответов.	Выполнение теста с проходным баллом 70% правильных ответов.	В тесте не набран проходной балл

Владеть навыками участия в реализации технологических процессов в рамках планарной технологии, обеспечивающих создание монолитных интегральных	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение теста с проходным баллом 90% правильных ответов.	Выполнение теста с проходным баллом 80% правильных ответов.	Выполнение теста с проходным баллом 70% правильных ответов.	В тесте набран проходной балл
--	--	---	---	---	-------------------------------

## 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. Рабочие точки в лавинно-пролетном диоде определяются движением...
  - а) основных носителей заряда;
  - б) неосновных носителей заряда;
  - в) основных и неосновных носителей заряда;
  - г) ионами примесей.
2. Для изготовления структур лавинно-пролетных диодов используют, в основном, полупроводниковые материалы...
  - а) GaAs;
  - б) AlGaAs / GaAs;
  - в) InGaAs / InP;
  - г) Si.
3. Отрицательная динамическая проводимость лавинно-пролетного диода возникает (наблюдается) в ...
  - а) статическом режиме;
  - б) квазистатическом режиме;
  - в) электростатическом режиме;
  - г) динамическом режиме.
4. Эффект Ганна наблюдается в полупроводниках GaAs, InP с электропроводностью...
  - а) собственной;
  - б) донорной;
  - в) акцепторной;
  - г) компенсированной.
5. Возможность использования низкочастотных транзисторов в СВЧ диапазоне ограничена следующими физическими факторами...
  - а) временем переноса носителей заряда;
  - б) углом вылета носителей заряда из области базы;
  - в) скоростью изменения накопленного заряда;
  - г) схемой включения и соответствующих ей паразитных емкостей и индуктивностей.
6. Сверхтонкая база биполярного СВЧ транзистора обеспечивает...
  - а) увеличение выходной мощности;
  - б) уменьшение времени переноса носителей заряда;
  - в) увеличение обратного напряжения коллекторного перехода;
  - г) увеличение коэффициента усиления.
7. Эффект вытеснения тока эмиттера в биполярных СВЧ транзисторах

вызван...

- а) наличием сосредоточенного сопротивления в цепи эмиттера;
- б) отсутствием нагрузочного сопротивления в цепи коллектора;
- в) увеличением емкости эмиттерного перехода;
- г) наличием распределенного поперечного сопротивления базовой области.

8. Для уменьшения времени пролета электронов под выводом затвора следует...

- а) увеличивать толщину подложки транзистора;
- б) уменьшать длину затвора;
- в) повышать подвижность электронов в активном слое;
- г) снижать концентрацию электронов под выводом затвора.

9. Особенностью гетероструктурного биполярного СВЧ транзистора является...

- а) использование полупроводника с узкой запрещенной зоной для области базы;
- б) использование широкозонного полупроводника для области эмиттера;
- в) использование узкозонных полупроводников для областей эмиттера и базы;
- г) использование широкозонных полупроводников для областей базы и коллектора.

10. Максимальная частота работы МОП-транзистора от длины канала  $L$  зависит...

- а) пропорционально  $L$ ;
- б) обратно пропорционально  $L$ ;
- в) обратно пропорционально  $L^2$ ;
- г) не зависит от  $L$ .

11. Особенностью гетероструктурного полевого СВЧ транзистора (HEMT) является...

- а) использование полупроводника с высокой подвижностью электронов;
- б) использование модуляционного легирования;
- в) использование двумерного электронного газа в канале транзистора;
- г) использование двухбарьерной структуры с квантовой ямой.

### **7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач**

1. В слаболегированном образце кремния  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  делается  $p$ - $n$  переход с примесной концентрацией  $N_a$ , в 1000 раз превышающей концентрацию примеси  $n$ -типа. Рассчитать встроенный потенциал и объемный потенциал  $n$ -области такого перехода.  
Ответ:  $0,75 \text{ В}$ ;  $0,29 \text{ В}$ .

2. Резкий симметричный кремниевый  $p$ - $n$  переход имеет примесные концентрации  $N_d = N_a = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и находится при комнатной температуре в равновесном состоянии. Рассчитать ширину обедненного слоя и максимальное электрическое поле.  
Ответ:  $0,66 \text{ мкм}$ ;  $2 \cdot 10^4 \text{ В/см}$ .

3. Кремниевый диод формируется путем диффузии высокой концентрации бора в легированную фосфором пластину толщиной  $350 \text{ мкм}$ , имеющую удельное сопротивление  $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Глубина  $p$ - $n$  перехода равна

0,5 мкм, а площадь поперечного сечения  $10^{-4}$

см<sup>2</sup>. Переход можно рассматривать как односторонний и резкий. Найти ток насыщения диода, если время жизни неосновных носителей в подложке равно 1 мкс.

Ответ:  $1,2 \cdot 10^{-14}$  А.

4. Найти высоту потенциального барьера (падение напряжения на области объемного заряда) в диоде Шоттки, сформированном нанесением золота на германий n-типа с удельным сопротивлением  $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Ответ: 0,78 В.

5. Рассчитать величину тока в кремниевом p-n переходе при внешних смещениях  $V = +0,5 \text{ В}$  и  $V = -0,5 \text{ В}$ . Площадь перехода  $S = 1 \text{ мм}^2$ , уровни легирования  $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Ответ:  $j_s = 5,3 \cdot 10^{-13} \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$ ;  $I(V = +0,5 \text{ В}) = 0,13 \text{ мА}$ ,  $I(V = -0,5 \text{ В}) = 5,3 \cdot 10^{-13} \text{ А}$

6. Схематически изобразить и пояснить диаграмму энергетических зон p+i-n+ структуры в состоянии равновесия, при прямом и обратном смещениях. Чему равна контактная разность потенциалов такой структуры на кремнии? Где применяются p-i-n диоды?

Ответ: 1,1 В.

7. Для биполярного p-n-p транзистора задано:  $I_{pЭ} = 1 \text{ мА}$ ;  $I_{nЭ} = 0,01 \text{ мА}$ ;  $I_{pК} = 0,98 \text{ мА}$ ;  $I_{nК} = 0,001 \text{ мА}$ . Вычислите: статический коэффициент передачи тока базы; эффективность эмиттера (коэффициент инжекции); ток базы и коэффициент передачи тока в схемах с ОБ и ОЭ.

Ответ: 0,98; 0,99; 30 мкА; 0,97; 33.

8. Кремниевый диффузионный p-p-n транзистор имеет ширину базы без ОПЗ 0,23 мкм. Вычислить время пролета базы и граничную частоту.

Ответ:  $9,2 \cdot 10^{-12} \text{ с}$ ; 17,3 ГГц.

9. Найти величину напряжения плоских зон в идеальных МОП структурах с алюминиевым затвором, изготовленных на кремнии n- и p-типа с удельным сопротивлением  $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Дать схематическое изображение зонных диаграмм этих структур в состоянии теплового равновесия и в режиме плоских зон.

Ответ:  $-0,17 \text{ В}$ ;  $-0,90 \text{ В}$ .

10. Рассчитать пороговое напряжение в МОП структурах с алюминиевым затвором, изготовленных на кремнии n- и p-типа с удельным сопротивлением  $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Толщина окисла 100 нм, плотность эффективного поверхностного заряда  $8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$ .

Ответ:  $1,18 \text{ В}$ ;  $-2,02 \text{ В}$ .

### 7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Имеется резкий симметричный кремниевый p-n переход при температуре  $T = 300 \text{ К}$  с площадью  $S = 1 \text{ е}^{-3} \text{ см}^2$  и концентрацией легирующих примесей  $N_d = N_a = 1 \text{ е}^{18} \text{ см}^{-3}$ . Вычислить время, за которое обратное смещение возрастет от 0 до  $-10 \text{ В}$ , если ток через диод равен 1 мА.

Ответ:  $3,26 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ .

2. Оценить положение уровней Ферми относительно краев разрешенных зон в туннельном диоде из Ge при  $T = 300 \text{ К}$  с типичными для туннельного перехода уровнями легирования  $N_d = 2 \text{ е}^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_a = 4 \cdot \text{е}^{15} \text{ см}^{-3}$ . Рассчитать величину контактной разности потенциалов и толщину обедненного слоя в этом диоде.

Ответ:  $\Delta n = 34 \text{ мэВ}$ ;  $\Delta p = 124 \text{ мэВ}$ ;  $eU_k = 0,818 \text{ эВ}$ ;  $W = 10 \text{ нм}$ .

3. Кремниевый лавинно-пролетный диод Риды со структурой p+-n-i-n+ работает в



пролетном режиме. Оценить оптимальную длину области дрейфа этого диода для возбуждения колебаний с частотой 10 ГГц.

Ответ: 5 мкм.

4. Для выполнения условий, необходимых для работы диода Ганна в режиме пролета домена, оценить минимальную длину образца арсенида галлия с равновесной концентрацией электронов  $n_0 = 1e15 \text{ см}^{-3}$  и частоту осцилляций в таком образце. Для оценки воспользоваться критерием Кремера и считать, что скорость движения домена  $v_d = 1,5e7 \text{ см/с}$ , дифференциальная подвижность  $\mu_{диф} = -2200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

Ответ: 1 мкм; 150 ГГц.

5. Показать, что при экспоненциальном распределении примеси в базе n-p-n bipolarного транзистора напряженность электрического поля  $E$  постоянна. Найти в этом случае концентрацию неосновных носителей вблизи коллектора, если уровень легирования около эмиттера  $N_a = 1e17 \text{ см}^{-3}$ , толщина базы транзистора 0,3 мкм, а  $E = 4000 \text{ В/см}$ .

Ответ:  $1e15 \text{ см}^{-3}$ .

6. На подложке из кремния марки КДБ-12 сформирована МОП структура с алюминиевым затвором. Между металлом и кремнием действует разность потенциалов, обусловленная разностью их работ выхода, остальные требования идеальности МОП структуры выполняются. Нарисовать зонную диаграмму этой структуры в равновесных условиях, полагая, что падение потенциала на окисле  $V_i$  равно величине поверхностного электростатического потенциала  $\psi_s$  в полупроводнике. Пользуясь

приближением обедненного слоя определить толщину слоя двуоксида кремния, при которой  $V_i = \psi_s$ .

Ответ: 114 нм.

7. МОП структура находится в режиме глубокого неравновесного обеднения. Рассчитать плотность поверхностных состояний, при которой скорость поверхностной генерации вдвое превышает скорость генерации в обедненной области полупроводника. Считать, что сечения захвата носителей заряда равны  $\sigma_t = 1e-15 \text{ см}^2$ , тепловая скорость  $v_t = 1e7 \text{ см/с}$ , постоянная времени  $\tau = 1 \text{ мкс}$ , ширина ОПЗ  $W = 1e-6 \text{ см}$ .

Ответ:  $2e10 \text{ см}^{-2}$ .

8. МОП транзистор с отношением ширины к длине канала  $W/L = 5$ , толщиной затворного окисла 80 нм и подвижностью электронов в канале  $600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  предполагается использовать как управляемый резистор. Рассчитать превышение затворного напряжения над пороговым напряжением, при котором сопротивление транзистора при малых напряжениях на стоке будет равно 2,5 кОм.

Ответ: 3,1 В.

9. Изготовителю нужно сделать n-канальный обедненный МОП транзистор без применения ионного легирования. Заранее отработанный технологический процесс обеспечивает получение плотности эффективного поверхностного заряда величиной  $1e11 \text{ см}^{-2}$ . Толщина окисла равна 50 нм, затворы делаются из алюминия. Провести расчет и показать, пригоден ли указанный технологический процесс для изготовления обедненных МОП транзисторов на кремниевых пластинах марки КДБ-12.

Ответ:  $V_T = -0,34 \text{ В}$ ; пригоден.

10. Построить зонную диаграмму гетероперехода n-Ge -p-GaAs с концентрациями легирующих примесей  $N_d = N_a = 1e16 \text{ см}^{-3}$ . Рассчитать величину контактной разности потенциалов, ширину областей обеднения и величины разрывов энергетических зон.

Ответ:  $eU_k=1,15$  эВ;  $W_{Ge}=W_{GaAs}=0,28$  мкм;  $\Delta E_c = 0,07$  эВ;  $\Delta E_v = 0,84$  эВ.

#### **7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету**

*Уравнения Максвелла. Граничные условия. Электромагнитные свойства сред. Уравнения Максвелла в комплексной форме. Баланс энергии при гармонических колебаниях электромагнитного поля. Общие свойства плоских однородных электромагнитных волн. Поляризация волн. Стоячие волны. Волны с произвольным направлением распространения. Отражение и преломление электромагнитных волн. Полное внутреннее отражение.*

*Распространение электромагнитных волн в поглощающих средах. Общие сведения о передающих линиях СВЧ. Решение волнового уравнения для электромагнитных волн, направляемых вдоль однородной передающей линии. Фазовая скорость и длина волны в передающих линиях СВЧ. Дисперсия электромагнитных волн в передающих линиях СВЧ. Свойства дисперсных волн в однородных передающих линиях СВЧ. Групповая скорость волн и скорость перемещения электромагнитной энергии вдоль передающей линии СВЧ. Типы волн, распространяющихся по однородным передающим линиям СВЧ. Понятие парциальных волн. Этапы решения задачи об электрических волнах в прямоугольном металлическом волноводе. Выражения для составляющих поля в прямоугольном волноводе при волнах электрического типа (при волнах типа ТМ). Примеры структуры поля в прямоугольном металлическом волноводе в случае волн типа ТМ. Выражения для составляющих поля в прямоугольном волноводе при волнах магнитного типа (при волнах типа ТЕ). Примеры структуры поля в прямоугольном металлическом волноводе в случае волн типа ТЕ. Токи в стенках прямоугольного металлического волновода. Устройства ввода-вывода электромагнитной энергии в прямоугольный металлический волновод для волн типа ТМ и ТЕ. Критическая длина волн и дисперсия волн в прямоугольном металлическом волноводе. Основные типы объемных резонаторов. Общие свойства свободных колебаний в резонаторах. Параметры объемных резонаторов. Электромагнитные колебания в прямоугольных металлических резонаторах. Примеры структуры поля в резонаторах для магнитных колебаний (волн М-типа). Примеры структуры поля в резонаторах для электрических колебаний (волн Е-типа). Вырождение колебаний полых металлических резонаторов. Добротность полых металлических резонаторов. Классификация электронных и квантовых приборов СВЧ и оптического диапазона. Триоды и тетроды СВЧ. Полный ток в промежутке между электродами и во внешней цепи электровакуумных приборов. Работа триода на СВЧ. Клистроны. Пролетный двухрезонаторный клистрон. Многорезонаторный клистрон. Двухрезонаторные клистронные генераторы. Отражательный клистрон. Лампы бегущей волны типа О. Принцип работы лампы бегущей волны. Замедляющие системы. Параметры и характеристики лампы бегущей волны. Приборы типа М. Движение электронов в встречных статических электрическом и магнитном полях. Взаимодействие электронов и СВЧ поля. Лампа бегущей волны типа М. Лампа обратной волны типа М. Многорезонаторный магнетрон. Митрон.*

*Платинотрон. Приборы с циклотронным резонансом*

**7.2.5 Примерный перечень заданий для подготовки к экзамену**

*Не предусмотрено учебным планом*

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

*Зачет с оценкой проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 20 вопросов. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом. Максимальное количество набранных баллов – 20.*

- 1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится, если набрано менее 70%*
- 2. Оценка «Удовлетворительно» ставится, если набрано от 70% до 80%*
- 3. Оценка «Хорошо» ставится, если набрано от 80% до 90%*
- 4. Оценка «Отлично» ставится, если набрано более 90%*

**7.2.7 Паспорт оценочных материалов**

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	<i>Электромагнитные волны в свободном пространстве</i>	ПК-4	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
2	<i>Передающие линии СВЧ диапазона</i>	ПК-4	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
3	<i>Электромагнитные волны в прямоугольных металлических волноводах</i>	ПК-4	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
4	<i>Электромагнитные волны в полых металлических резонаторах</i>	ПК-4	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
5	<i>Устройство и принцип действия приборов СВЧ электроники</i>	ПК-4	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 методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи ком-

пьютерной 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**

1) Смоленцев, Н. И. *Электроника СВЧ : учебное пособие* / Н. И. Смоленцев. — Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2018. — 137 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/90159.html>. — Режим доступа: для авторизир. Пользователей

2) Шебалкова, Л. В. *Электродинамика, антенны и СВЧ-устройства СБЛ : учебно-методическое пособие* / Л. В. Шебалкова, В. Б. Ромодин. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 75 с. — ISBN 978-5-7782-4142-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99247.html>. — Режим доступа: для авторизир. Пользователей

3) Петрушанский, М. Г. *Электронные приборы СВЧ : учебное пособие для СПО* / М. Г. Петрушанский. — Саратов : Профобразование, 2020. — 106 с. — ISBN 978-5-4488-0572-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/92210.html>. — Режим доступа: для авторизир. Пользователей

4) Белоус, А. И. *СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. В 2-х книгах. Кн. 1 : техническая энциклопедия* / А. И. Белоус, Мерданов К. М., С. В. Шведов. — 3-е изд. — Москва : Техносфера, 2021. — 782 с. — ISBN 978-5-94836-605-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/108029.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей

5) Володько А.В. *Электромагнитные поля и волны. Часть 2. Электромагнитные волны и колебания в волноводах и резонаторах.* / А.В. Во-

лодько, Р.П. Краснов, В.И, Юдин. Воронеж, ВГТУ, 2008 г.

6) Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. Учеб. для вузов по спец. «Электронные приборы и устройства» / А.Д. Григорьев. – М.:Высш. Шк., 1990. – 335 с.

7) Андрушко Л.М. Электронные и квантовые приборы СВЧ. Учебник для вузов связи. / Л.М. Андрушко, Н.Д. Федоров. – М.: Радио и связь, 1981. – 208 с.

**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:**

1) <https://elibrary.ru>

2) <https://cchgeu.ru>

3) <https://www.iprbookshop.ru>

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

*Для проведения лекционных, лабораторных и практических занятий необходима аудитория, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой, персональными компьютерами с возможностью выхода в интернет.*

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

По дисциплине «СВЧ-электроника» 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 устройств СВЧ-электроники. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
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 ответов 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 реко-

	мендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоения 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.