

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Галунин Сергей Александрович  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 26.10.2023 14:24:49  
Уникальный программный ключ:  
08ef34338325bdb0ac5a47baa5472ce36cc3fc3b



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)»**

---

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

**«МИКРОВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»**

для подготовки бакалавров

по направлению

11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

по профилю

**«Физическая электроника»**

Санкт-Петербург

2022

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Разработчики:

доцент, к.т.н., доцент Иванов В.А.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры МВЭ  
10.03.2022, протокол № 2

Рабочая программа рассмотрена и одобрена учебно-методической комиссией  
ФЭЛ, 24.03.2022, протокол № 01/22

Согласовано в ИС ИОТ

Начальник ОМОЛА Загороднюк О.В.

## 1 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Обеспечивающий факультет	ФЭЛ
Обеспечивающая кафедра	МВЭ
Общая трудоемкость (ЗЕТ)	5
Курс	3
Семестр	6
<b>Виды занятий</b>	
Лекции (академ. часов)	34
Лабораторные занятия (академ. часов)	51
Иная контактная работа (академ. часов)	1
Все контактные часы (академ. часов)	86
Самостоятельная работа, включая часы на контроль (академ. часов)	94
Всего (академ. часов)	180
<b>Вид промежуточной аттестации</b>	
Экзамен (курс)	3

## **2 АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«МИКРОВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»**

В дисциплине «Микроволновая электроника» системно излагаются физико-технические основы микроволновой электроники, составляющие ее научный базис и определяющие с единых позиций принципы действия широкого класса приборов: механизмы индивидуального и коллективного излучения заряженных частиц, методы реализации этих механизмов в микроволновых вакуумных, плазменных и твердотельных электронных приборах. Изучаются также конструкции основных узлов микроволновых приборов, их параметры, характеристики и основные области применения. Рассматриваются перспективы развития микроволновой электроники.

## **SUBJECT SUMMARY**

### **«MICROWAVE ELECTRONICS»**

The target of the discipline “Microwave Electronics” is the knowledge of theory and practice of different electronic devices: vacuum tubes, solid state and plasma devices in microwaves. Unified physical approach uses in explanation of principle of operation each device. Studying of discipline is accompanied by laboratory practice. After studying of this course students will ready use and research microwave devices in different applications. This course creates physical bases and some practical skilling for the future study of electronics courses as Micro and Nano electronics, Digital circuit design and also Microprocessors.

## **3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **3.1 Цели и задачи дисциплины**

1. Цели дисциплины: изучение основ физики микроволновых приборов, принципов их действия, формирование умений применения методов расчета и проектирования, а также навыков экспериментального исследования компонентной базы микроволновой электроники.

2. Задачи изучения дисциплины:

-получение базовых знаний в области физических принципов работы компонентов и устройств микроволновой электроники и тенденций их развития;

-формирование умений расчета электрических и конструктивных параметров изучаемых устройств микроволновой электроники, моделирования их основных характеристик;

-формирование навыков экспериментального исследования современной компонентной базы микроволновой электроники.

3. Получение знаний по основным физическим процессам, лежащих в основе принципов действия приборов и устройств микроволновой электроники, изучение методов их аналитического описания, факторов, определяющих их параметры и характеристики, конструкции и области применения.

4. Формирование умений рассчитывать основные параметры и характеристики микроволновых электронных приборов и устройств, осуществлять оптимальный выбор прибора для конкретного применения.

5. Освоение навыков владения методами компьютерного проектирования и экспериментального исследования микроволновых приборов и устройств.

### **3.2 Место дисциплины в структуре ОПОП**

Дисциплина изучается на основе ранее освоенных дисциплин учебного плана:

1. «Информационные технологии»
2. «Математический анализ»
3. «Физика»
4. «Теоретические основы электротехники»
5. «Вакуумная и плазменная электроника»
6. «Электродинамика»

и обеспечивает изучение последующих дисциплин:

1. «Микро-и наноэлектроника»
2. «Производственная практика (производственно-технологическая практика)»
3. «Программные средства моделирования электронной компонентной базы»

### 3.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В результате освоения образовательной программы обучающийся должен достичь следующие результаты обучения по дисциплине:

<b>Код компетенции/ индикатора компетенции</b>	<b>Наименование компетенции/индикатора компетенции</b>
ПК-2	Способен аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения
<i>ПК-2.2</i>	<i>Умеет проводить исследования характеристик электронных приборов</i>
ПК-8	Способен к эксплуатации измерительного, диагностического, технологического оборудования
<i>ПК-8.1</i>	<i>Знает функциональные возможности электронного оборудования</i>
ПК-10	Способен осуществлять эксплуатацию и обслуживание приборов электроники и нанoeлектроники
<i>ПК-10.1</i>	<i>Знает принципы эксплуатации и обслуживания приборов электроники и нанoeлектроники</i>

## 4 СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1 Содержание разделов дисциплины

#### 4.1.1 Наименование тем и часы на все виды нагрузки

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Лек, ач	Лаб, ач	ИКР, ач	СР, ач
1	Введение.	3	5		9
2	Тема 1. Теоретические основы микроволновой электроники.	6	9		16
3	Тема 2. Микроволновые вакуумные приборы.	6	9	1	16
4	Тема 3. Микроволновые твердотельные приборы.	7	10		19
5	Тема 4. Шумы в микроволновых приборах и устройствах.	5	8	0	16
6	Тема 5. Области применения и перспективы развития микроволновой электроники	7	10		18
	Итого, ач	34	51	1	94
	Из них ач на контроль	0	0	0	35
	Общая трудоемкость освоения, ач/зе	180/5			

#### 4.1.2 Содержание

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
1	Введение.	Микроволновый диапазон электромагнитных колебаний и его особенности. Обзор исторического пути развития микроволновых приборов. Связь теории, технологии и практики в освоении изучаемого диапазона электромагнитных волн.



№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
2	Тема 1. Теоретические основы микроволновой электроники.	<p>Микроволновый электронный прибор как преобразователь энергии. Основные уравнения микроволновой электроники – уравнения электродинамики и уравнения движения заряженных частиц в вакууме и твердом теле. Законы сохранения числа частиц, импульса и энергии. Характерные пространственные и временные интервалы: время релаксации импульса и энергии, время максвелловской релаксации, плазменная частота и длина Дебая, время жизни и диффузионная длина. Физические механизмы обмена энергией между заряженными частицами и полем.</p> <p>Теорема Шокли-Рамо. Наведенный ток. Время и угол пролета носителей заряда в пространстве взаимодействия, коэффициент взаимодействия.</p> <p>Методы получения усиления и генерации микроволнового излучения в вакууме и твердом теле: фазировка, модуляция скорости, группировка и сортировка частиц, запаздывание инжекции, отрицательная дифференциальная подвижность, дрейф в тормозящем поле. Колебательные и волновые явления в потоках заряженных частиц (ПЗЧ).</p>
3	Тема 2. Микроволновые вакуумные приборы.	<p>Принцип действия и классификация.</p> <p>Приборы с квазистатическим управлением. Причины ограничения частотного диапазона приборов данного класса. Характерные конструкции.</p> <p>Приборы с динамическим управлением О-типа:– клистроны, лампы бегущей и обратной волны. Скоростная модуляция в высокочастотном зазоре. Коэффициент взаимодействия и электронная нагрузка. Группирование в пространстве дрейфа. Параметр группирования. Влияние пространственного заряда. Форма конвекционного тока и спектральный состав сгустка. Конструкции и параметры приборов.</p> <p>Приборы со скрещенными полями М-типа: – магнетроны, амплитроны и митроны. Принцип действия, коэффициент полезного действия. Сравнение с приборами О-типа.</p> <p>Гирорезонансные приборы. Особенности группирования и отбора энергии от электронного потока. Гиротрон – источник мощного излучения в мм диапазоне.</p> <p>Лазеры на свободных электронах: принцип действия характеристики.</p>

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
4	Тема 3. Микроволновые твердотельные приборы.	<p>Классификация. Диоды с положительным динамическим сопротивлением: детекторные, смесительные диоды, управляющие диоды, варакторы. Структура. Омические и барьерные контакты. Связь физико-топологических параметров структуры прибора с его статическими и динамическими (ВЧ) параметрами. Области применения приборов.</p> <p>Диоды с отрицательным динамическим сопротивлением: туннельные диоды, лавинно-пролетные диоды, инжекционно-пролетные диоды, диоды с междолинным переносом носителей (диоды Ганна). Статическое распределение концентрации носителей заряда и поля. Особенности дрейфа носителей заряда в средах с нулевой и отрицательной дифференциальной подвижностью. Критерий устойчивости. Образование доменов сильного поля. Динамическое сопротивление полупроводникового образца. Слоистые структуры. Критерии получения отрицательного сопротивления.</p> <p>Микроволновые биполярные и полевые транзисторы. Генеалогическое дерево транзисторов. Гетероструктурные транзисторы: транзисторы с широкозонным эмиттером.</p>
5	Тема 4. Шумы в микроволновых приборах и устройствах.	<p>Источники шумов, их спектральные и корреляционные характеристики. Расчет шумов в отсутствии термодинамического равновесия: формулы Найквиста и Ван-дер-Зила. Способы снижения коэффициента шума приборов. Сравнительная характеристика приборов по шумовым параметрам.</p>
6	Тема 5. Области применения и перспективы развития микроволновой электроники	<p>Новые материалы и технологии, многофункциональные устройства. Применение микроволновых приборов и устройств в современных микроволновых радиолокационных, телекоммуникационных, технологических, медицинских и энергетических системах.</p>

## 4.2 Перечень лабораторных работ

Наименование лабораторной работы	Количество ауд. часов
1. Исследование многорезонаторного пролетного клистрона	6
2. Исследование лампы бегущей волны	6
3. Исследование магнетрона	6
4. Исследование лампы обратной волны	5
5. Исследование детекторных и смесительных диодов	5
6. Исследование переключателя и ограничителя на p-i-n диоде	6
7. Исследование варакторного диода и устройства перестройки частоты на варакторе	6
8. Исследование полевого микроволнового транзистора	5
9. Исследование биполярного микроволнового транзистора	6

Наименование лабораторной работы	Количество ауд. часов
Итого	51

#### 4.3 Перечень практических занятий

Практические занятия не предусмотрены.

#### 4.4 Курсовое проектирование

Курсовая работа (проект) не предусмотрены.

#### 4.5 Реферат

Реферат не предусмотрен.

#### 4.6 Индивидуальное домашнее задание

**ИДЗ представляет собой ряд задач по темам дисциплины.**

- Общее количество заданий - 3 (№№ задания -1, 2, 3).
- Текст заданий находится в папке **Задания** на Яндекс диске. Ссылка на ресурс выдается на первой лекции.
- Ответы выполняются в формате **Word**-документа, который имеет имя, согласно следующему правилу: первые две буквы - аббревиатура курса **me**, далее, №группы ( ) в потоке **1-8**, далее, № студента( ) — порядковый в группе от **01 до 20**, далее, №задания. Разделитель: нижнее тире **\_**. (Пример: **me\_2\_10\_1** — работа по микроволновой электронике **me**, студента из группы **2**, порядковый номер студента **10**, задание **1**).
- Индивидуализация заданий проводится с использованием числовых данных в задачах, определяемых порядковым номером студента в группе и номера группы в потоке.
- Требования к оформлению:

- Объем отчета не менее 3 и не более 10 страниц. Число ссылок на источники не менее 3 и не более 10.
- **в начале текста ФИО студента и номер группы;**
- Решения оформляются в порядке поставленных в задании вопросов. Выполнение любого пункта задания **начинается с копирования вопроса** и конкретизации цифровых величин. Далее идет **решение**. В конце задачи обязательно пишется **ответ на поставленные вопросы**.
- весь текст должен быть **отформатирован** и иметь постоянный размер шрифта;
- при решении задач выводится общая формула, в нее подставляются цифровые значения и только потом ответ;
- при написании формул – предпочтение MathType, графиков Origin. Расчеты могут копироваться из MathCAD.
- Задания оформляются **только в электронном виде** и отправляются на почту me2014iva@ya.ru В письме в **поле «Тема»** пишется **оговоренное выше имя файла**.
- При копировании текстового и графического материала из Интернета – **ОБЯЗАТЕЛЬНО** давать ссылку. В ином варианте представленный материал будет считаться плагиатом и не засчитывается как положительный ответ. Оформление ссылки — по общим правилам оформления библиографических источников (см. файл «list\_of\_literature»).
- Проверенные работы с замечаниями отправляются на электронную почту каждого студента индивидуально.
- После проверки текущего задания преподаватель проводит «разбор полетов» на лекции. Рассматриваются типовые ошибки в задачах.
- Даты выдачи заданий и оценки озвучиваются преподавателем на лекциях.

Длительность выполнения одного задания не менее 4-х недель.

## **ПРИМЕР ЗАДАНИЯ**

*Приборы с динамическим управлением. Клистрон.*

Рассчитать угол пролета, при котором электрон, попавший в ускоряющую фазу напряжения, догонит электрон, попавший в тормозящую фазу. Расчет провести в кинематическом приближении. При расчетах принять: постоянное ускоряющее напряжение  $N_{gr}()$ , длину зазора (область взаимодействия)  $N_{gr}/N_{stud}()$ , глубину скоростной модуляции  $0,01 * N_{stud}$ , рабочая частота  $N_{gr}()$ .

Как изменится процесс группирования при учете сил пространственного заряда, если ток луча равен  $I$ , а диаметр луча  $N_{gr}()$ ? На каком расстоянии от середины модулирующего зазора будет максимальная группировка?

***Примечание: весовой коэффициент задачи 2 балла***

### **4.7 Доклад**

Доклад не предусмотрен.

### **4.8 Кейс**

Кейс не предусмотрен.

### **4.9 Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы**

Изучение дисциплины сопровождается самостоятельной работой студентов с рекомендованными преподавателем литературными источниками и информационными ресурсами сети Интернет.

Планирование времени для изучения дисциплины осуществляется на весь период обучения, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Обучающимся в рамках внеаудиторной самостоятельной рабо-

ты необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников материал, законспектированный на лекциях. При этом на основе изучения рекомендованной литературы целесообразно составить конспект основных положений, терминов и определений, необходимых для освоения разделов учебной дисциплины.

Особое место уделяется консультированию как одной из форм обучения и контроля самостоятельной работы. Консультирование предполагает особым образом организованное взаимодействие между преподавателем и студентами, при этом предполагается, что консультант либо знает готовое решение, которое он может предписать консультируемому, либо он владеет способами деятельности, которые указывают путь решения проблемы.

<b>Текущая СРС</b>	<b>Примерная трудоемкость, ач</b>
Работа с лекционным материалом, с учебной литературой	9
Опережающая самостоятельная работа (изучение нового материала до его изложения на занятиях)	5
Самостоятельное изучение разделов дисциплины	10
Выполнение домашних заданий, домашних контрольных работ	10
Подготовка к лабораторным работам, к практическим и семинарским занятиям	10
Подготовка к контрольным работам, коллоквиумам	0
Выполнение расчетно-графических работ	5
Выполнение курсового проекта или курсовой работы	0
Поиск, изучение и презентация информации по заданной проблеме, анализ научных публикаций по заданной теме	5
Работа над междисциплинарным проектом	0
Анализ данных по заданной теме, выполнение расчетов, составление схем и моделей, на основе собранных данных	5
Подготовка к зачету, дифференцированному зачету, экзамену	35
<b>ИТОГО СРС</b>	<b>94</b>

## 5 Учебно-методическое обеспечение дисциплины

### 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

№ п/п	Название, библиографическое описание	К-во экз. в библ.
Основная литература		
1	Григорьев, Андрей Дмитриевич. Микроволновая электроника [Текст] : учеб. для вузов по направлениям подгот. бакалавров и магистров "Электроника и наноэлектроника" / А. Д. Григорьев, В. А. Иванов, С. И. Молоковский ; под ред. А. Д. Григорьева, 2016. -495 с.	123
2	Пасынков, Владимир Васильевич. Полупроводниковые приборы [Текст] : [учеб. пособие для вузов по направлению подготовки бакалавров и магистров "Электроника и микроэлектроника" и по направлению подготовки диплом. специалистов "Электроника и микроэлектроника"] / В.В.Пасынков, Л.К.Чиркин, 2006. -479 с.	89
3	Лебедев, Александр Иванович. Физика полупроводниковых приборов [Текст] : учеб. пособие для вузов по специальностям 010701-Физика, 010704-Физика конденсированного состояния вещества", 010803-"Микроэлектроника и полупроводниковые приборы" / А.И. Лебедев, 2008. -487 с.	52
4	Гуртов, Валерий Алексеевич. Твердотельная электроника [Текст] : учеб. пособие для вузов по направлению подгот. бакалавров, магистров 010700 "Физика" и специальности 010701 "Физика" / В.А. Гуртов, 2005. -406 с.	25
5	Григорьев, Андрей Дмитриевич. Активные полупроводниковые приборы СВЧ [Текст] : учеб. пособие / А.Д. Григорьев, В.А. Иванов, В.Б. Янкевич, 1984. -47 с.	54
6	Барыбин, Анатолий Андреевич. Физические основы работы СВЧ -приборов на твердом теле [Текст] : текст лекций / А.А. Барыбин, Б.А. Калиникос, М.К. Ковалева, 1983. -48 с.	44
7	Компьютерное проектирование микроволнового усилителя мощности [Текст] : Метод. указания к выполнению курсовой работы по дисциплине "Микроволновые приборы и устройства" / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) "ЛЭТИ", 2004. -36 с.	78
8	Микроволновые приборы и устройства [Текст] : метод. указания к лаб. работам / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) "ЛЭТИ", 2006. -80 с.	74
9	Диоды и транзисторы сверхвысоких частот [Текст] : Учеб. пособие / А.Д. Григорьев, В.А. Иванов, М.Ф. Кокорев [и др.] ; под ред. В.А. Иванова, 1988. -58 с.	95
10	Трубецков, Д.И. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков [Текст] : В 2 т. Т. 1, 2003. -495 с.	8
Дополнительная литература		

<b>№ п/п</b>	<b>Название, библиографическое описание</b>	<b>К-во экз. в библи.</b>
1	Электронные приборы СВЧ [Текст] : учеб. пособие для вузов по специальности "Электронные приборы" / В.М. Березин [и др.], 1985. -296 с.	14
2	Кацман, Юрий Абрамович. Приборы СВЧ [Текст] : теория, основы расчета и проектирования электронных приборов : учеб. для вузов по специальности "Электронные приборы" / Ю.А. Кацман, 1983. -368 с.	98
3	Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов [Текст] : в 2 кн. Кн. 1, 1984. -455 с.	108

## **5.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», используемых при освоении дисциплины**

<b>№ п/п</b>	<b>Электронный адрес</b>
1	ГОСТ 7.322017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. ОТЧЕТ О НАУЧНОИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ. Структура и правила оформления <a href="https://cs.msu.ru/sites/cmc/files/docs/2021-11gost_7.32-2017.pdf">https://cs.msu.ru/sites/cmc/files/docs/2021-11gost_7.32-2017.pdf</a>
2	Электронные компоненты и радиодетали <a href="http://www.chipinfo.ru">http://www.chipinfo.ru</a>

## **5.3 Адрес сайта курса**

Адрес сайта курса: <https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=14043>



## 6 Критерии оценивания и оценочные материалы

### 6.1 Критерии оценивания

Для дисциплины «Микроволновая электроника» предусмотрены следующие формы промежуточной аттестации: экзамен.

#### Экзамен

<b>Оценка</b>	<b>Описание</b>
Неудовлетворительно	Курс не освоен. Студент испытывает серьезные трудности при ответе на ключевые вопросы дисциплины
Удовлетворительно	Студент в целом овладел курсом, но некоторые разделы освоены на уровне определений и формулировок
Хорошо	Студент овладел курсом, но в отдельных вопросах испытывает затруднения. Умеет решать задачи
Отлично	Студент демонстрирует полное овладение курсом, способен применять полученные знания при решении конкретных задач

## Особенности допуска

Для допуска к экзамену необходимо: выполнить и защитить все лабораторные работы, выполнить все ИДЗ. Экзамен проводится по билетам.

## 6.2 Оценочные материалы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

### Вопросы к экзамену

№ п/п	Описание
1	Микроволновый диапазон электромагнитных колебаний и его особенности. Обзор исторического пути развития микроволновых приборов. Современные технологии, использующие микроволновые приборы.
2	Индивидуальное и коллективное излучение заряженных частиц Тормозное излучение, переходное излучение, излучение Вавилова-Черенкова, осцилляторное излучение, индуцированное излучение.
3	Микроволновый электронный прибор как преобразователь энергии.
4	Основные уравнения микроволновой электроники – уравнения электродинамики и уравнения движения заряженных частиц в вакууме и твердом теле.
5	Законы сохранения числа частиц, импульса и энергии.
6	Характерные пространственные и временные интервалы: время релаксации импульса и энергии, время максвелловской релаксации, плазменная частота и длина Дебая, время жизни и диффузионная длина.
7	Физические механизмы обмена энергией между заряженными частицами и полем. Теорема Шокли-Рамо.
8	Наведенный ток. Время и угол пролета носителей заряда в пространстве взаимодействия, коэффициент взаимодействия, электронная нагрузка.
9	Анализ особенностей движения носителей заряда в вакууме и твердом теле. Сравнение типовых значений скорости носителей и плотности зарядов. Направления совершенствования приборов.
10	Методы получения усиления и генерации микроволнового излучения в вакууме и твердом теле: фазировка, модуляция скорости, группировка и сортировка частиц, запаздывание инъекции, отрицательная дифференциальная подвижность, дрейф в тормозящем поле.
11	Колебательные и волновые явления в потоках заряженных частиц (ПЗЧ).
12	Приборы с квазистатическим управлением. Причины ограничения частотного диапазона приборов данного класса. Характерные конструкции.
13	Приборы с динамическим управлением О-типа: клистроны. Скоростная модуляция в высокочастотном зазоре. Коэффициент взаимодействия, электронная нагрузка.
14	Приборы с динамическим управлением О-типа: лампы бегущей и обратной волны. Скоростная модуляция в замедляющей системе, сопротивление связи.
15	Скоростная модуляция в высокочастотном зазоре и замедляющей системе. Коэффициент взаимодействия, сопротивление связи, электронная нагрузка. Группирование потока.

16	Особенности отбора энергии в клистродах и ЛБВ. Влияние пространственного заряда на процессы группирования. Форма конвекционного тока и спектральный состав сгустка. Конструкции и параметры приборов.
17	Приборы со скрещенными полями (М-типа): – магнетроны, амплитроны и митроны. Принцип действия, коэффициент полезного действия. Основные конструктивные разновидности. Сравнение с приборами О-типа.
18	Гирорезонансные приборы. Особенности группирования и отбора энергии от электронного потока. Принцип действия убитрона.
19	Гиротрон – источник мощного излучения в мм диапазоне. Принцип действия. Типовые конструкции, параметры.
20	Лазеры на свободных электронах: принцип действия характеристики.
21	Классификация диодов с положительным динамическим сопротивлением. Функциональная роль (на примере типового приемо-передатчика). Омические и барьерные контакты в структурах диодов.
22	Диоды с положительным динамическим сопротивлением: детекторные диоды: конструкция, ВАХ, ВЧ параметры, эквивалентная схема. Связь физико-топологических параметров прибора с его статическими и динамическими (ВЧ) параметрами.
23	Диоды с положительным динамическим сопротивлением: смеси-тельные диоды: конструкция, ВАХ, ВЧ параметры, эквивалентная схема. Особенности схемотехнического применения. Принцип действия смесителя.
24	Диоды с положительным динамическим сопротивлением: управляющие диоды: конструкция, ВАХ, ВЧ параметры, эквивалентная схема. Связь физико-топологических параметров прибора с его статическими и динамическими (ВЧ) параметрами. Особенности схемотехнического применения: переключатели, ограничители, фазовращатели, аттенюаторы.
25	Диоды с отрицательным динамическим сопротивлением: лавинно-пролетные диоды, инжекционно-пролетные диоды. Статическое распределение концентрации носителей заряда и поля. Принцип действия. Зона пробоя, дрейф носителей заряда. Динамическое сопротивление ЛПД. Сравнение с диодами Ганна.
26	Диоды с отрицательным динамическим сопротивлением: диоды с междолинным переносом носителей (диоды Ганна). Характерные статические распределения концентрации носителей, заряда и поля. Динамическое сопротивление полупроводникового образца.
27	Динамическое сопротивление полупроводникового образца. Слоистые структуры. Способы получения отрицательного динамического сопротивления.
28	Классификация микроволновых транзисторов. Генеалогическое дерево транзисторов. Гомо и гетероструктурные транзисторы: транзисторы с широкозонным эмиттером, с проницаемой базой, НЕМТ-структуры. Топология, параметры и характеристики. Транзисторы с баллистическим транс-портом.
29	Полевой транзистор микроволнового диапазона. Особенности конструкции, ВАХ, динамические параметры. Эквивалентная схема. Пре-дельная частота, связь ее с физико-топологическими параметрами структуры. Параметры рассеяния.
30	Способы повышения предельной частоты и мощности транзистора. Сравнение материалов для изготовления транзисторов: кремний, арсенид галлия, карбид кремния, нитрид галлия, фосфид индия и др.
31	Схемотехнические аспекты применения транзисторов в микроволновом диапазоне. Малошумящий усилитель.

32	Природа шумов в ПТШ. Шумовая схема полевого транзистора. Анализ экспериментальных шумовых характеристик и их интерпретация.
33	Моделирование транзисторов: локально-полевая модель Шокли, модель двух областей, температурные модели.
34	Биполярный транзистор микроволнового диапазона. Особенности конструкции, ВАХ, динамические параметры. Эквивалентная схема. Предельная частота, связь ее с физико-топологическими параметрами структуры. Параметры рассеяния.
35	Способы повышения предельной частоты и мощности микроволнового биполярного транзистора. Выбор материалов для изготовления транзисторов.
36	Схемотехнические аспекты применения биполярных транзисторов в микроволновом диапазоне. Усилитель мощности.
37	Источники шумов в элементах микроволновых цепей. Спектральные и корреляционные характеристики. Математическое описание мощности: формула Найквиста, формула Ван-дер-Зила.
38	Описание шумов двух и четырехполюсника. Эквивалентное шумовое представление диодов, транзисторов и пассивных элементов. Расчет коэффициента шума схемы.
39	Способы снижения коэффициента шума приборов. Сравнительная характеристика приборов по шумовым параметрам.
40	Анализ применения микроволновых приборов и устройств в современных микроволновых радиолокационных, телекоммуникационных, технологических, медицинских и энергетических системах. Тенденции развития.

## Форма билета

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
 университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)»

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

Дисциплина: **Микроволновая электроника ФЭЛ**

1. Гиротрон – источник мощного излучения в мм диапазоне. Принцип действия. Типовые конструкции, параметры.

2. Полевой транзистор микроволнового диапазона. Особенности конструкции, ВАХ, динамические параметры. Эквивалентная схема. Предельная частота, связь ее с физико-топологическими параметрами структуры. Параметры рассеяния.

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Д.И. Холодняк

Весь комплект контрольно-измерительных материалов для проверки сформированности компетенции (индикатора компетенции) размещен в закрытой части по адресу, указанному в п. 5.3

### 6.3 График текущего контроля успеваемости

Неделя	Темы занятий	Вид контроля
1	Тема 1. Теоретические основы микроволновой электроники.	
2		
3		
4		ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
5	Тема 2. Микроволновые вакуумные приборы.	
6		
7		
8		
9		
10		ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
11	Тема 3. Микроволновые твердотельные приборы.	
12		
13		
14		
15		
16		
17		ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ

### 6.4 Методика текущего контроля

#### 1. Методика текущего контроля на лекционных занятиях.

1.1. Текущий контроль включает в себя:

- контроль посещаемости (не менее 80% занятий),

#### 2. Методика текущего контроля на лабораторных занятиях.

2.1. Порядок выполнения лабораторных работ, подготовки отчетов и их защиты.

В процессе обучения по дисциплине студент обязан выполнить 8 лабораторных работ. Под выполнением лабораторных работ подразумевается подготовка к работе, проведение экспериментальных исследований, подготовка отчета и его защита на коллоквиуме. Выполнение лабораторных работ студентами осуществляется в бригадах до 2-3 человека. Оформление отчета студентами осуществляется индивидуально в соответствии с принятыми в СПбГЭТУ

правилами оформления студенческих работ. Отчет оформляется после выполнения экспериментальных исследований и представляется преподавателю на проверку. После проверки отчет либо возвращается (при наличии замечаний) на доработку, либо подписывается к защите.

Лабораторные работы защищаются студентами индивидуально. Каждый студент получает вопрос по теоретической части, или по процедуре проведения экспериментальных исследований, или по последующей обработке результатов, после чего ему предоставляется время для подготовки ответа. При обсуждении ответа преподаватель может задать несколько уточняющих вопросов. В случае если студент демонстрирует достаточное знание вопроса, работа считается защищенной.

На защите лабораторной работы студент должен показать: понимание методики исследования и знание особенностей её применения, понимание и умение объяснять особенности применяемых методов, возможные области их применения и т.д., умение давать качественную и количественную оценку полученных экспериментальных результатов и прогнозировать реакции исследуемого объекта на различные воздействия, навыки и умения, приобретенные при выполнении лабораторной работы.

Примеры контрольных вопросов приведены в методических указаниях по выполнению лабораторных работ.

2.2. Текущий контроль включает в себя:

- выполнение и сдачу в срок отчетов по всем лабораторным работам;
- защиту на коллоквиуме всех лабораторных работ, оценка за которые по четырехбалльной шкале выставляется по следующим критериям:
  - «отлично» - на заданные вопросы даны исчерпывающие ответы
  - «хорошо» - вопросы раскрыты не полностью
  - «удовлетворительно» - ответы в принципе правильны, но в формули-

ровках имеются существенные ошибки

- «неудовлетворительно» - отсутствуют ответы на вопросы или содержание ответа не совпадает с поставленным вопросом

### **3. Методика текущего контроля самостоятельной работы студентов.**

Контроль самостоятельной работы студентов осуществляется на лекционных и лабораторных занятиях студентов по методикам, описанным в п.п. 1-2.

Результаты выполнения ИДЗ оцениваются по 10 бальной шкале. Каждая задача имеет весовой коэффициент в баллах.

- Отсутствие отчета по одному заданию влечет за собой выполнение этого задания на экзамене, перед опросом. Отсутствие 2-х и более отчетов – не допуск к экзамену без предоставления решений.

- Успешно выполненные 3 задания со средней оценкой выше 6 баллов обеспечивают высокую вероятность получения положительной оценки на экзамене без ответов на экзаменационные билеты. Чтобы вероятность перешла в реальность, студент должен подтвердить самостоятельность выполнения работы. Для этого преподаватель вправе спросить у студента разъяснения по работе, прежде всего по неправильно решенным задачам.

- Такой же порядок и для студентов, получивших среднюю оценку 8 или выше. При этом студент претендует на оценку не менее «хорошо» на экзамене.



## 7 Описание информационных технологий и материально-технической базы

Тип занятий	Тип помещения	Требования к помещению	Требования к программному обеспечению
Лекция	Лекционная аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, проектор, экран, ПК, меловая или маркерная доска.	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше
Лабораторные работы	Лаборатория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, лабораторный стенд для изучения приборов микроволновой электроники.	
Самостоятельная работа	Помещение для самостоятельной работы	Оснащено компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше

## **8 Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ**

Адаптированная программа разрабатывается при наличии заявления со стороны обучающегося (родителей, законных представителей) и медицинских показаний (рекомендациями психолого-медико-педагогической комиссии). Для инвалидов адаптированная образовательная программа разрабатывается в соответствии с индивидуальной программой реабилитации.

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

<b>№ п/п</b>	<b>Дата</b>	<b>Изменение</b>	<b>Дата и номер протокола заседания УМК</b>	<b>Автор</b>	<b>Начальник ОМОЛА</b>