

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Саровский физико-технический институт -

филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФТФ, член корр.РАН, д.ф.м.н.

_____ А.К.Чернышев

«___» _____ 2022 года

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ФИЗИКА И ТЕХНИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

наименование дисциплины

Направление подготовки (специальность)	<u>3.04.01 «Прикладные математика и физика»</u>
Наименование образовательной программы	<u>электрофизика</u>
Квалификация (степень) выпускника	<u>магистр</u>
Форма обучения	<u>очная</u>

Программа одобрена на заседании кафедры _____ Заведующий кафедрой «ЭФ»,
д.ф.м.н., доцент

протокол № 2 от 04.02.2022г.

_____ Ю.Б. Кудасов
04.02.2022г. 2022г.

г. Саров, 2022г.

Программа переутверждена на 202___/202___учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФТФ на 202___/202___ учебный год.
Заведующий кафедрой ЭФ, д.ф-м.н., доцент Ю.Б. Кудасов

Программа переутверждена на 202___/202___учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФТФ на 202___/202___ учебный год.
Заведующий кафедрой ЭФ, д.ф-м.н., доцент Ю.Б. Кудасов

Программа переутверждена на 202___/202___учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФТФ на 202___/202___ учебный год.
Заведующий кафедрой ЭФ, д.ф-м.н., доцент Ю.Б. Кудасов

Программа переутверждена на 202___/202___учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФТФ на 202___/202___ учебный год.
Заведующий кафедрой ЭФ, д.ф-м.н., доцент Ю.Б. Кудасов

Семестр	В форме практической подготовки	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРС, час.	КР/ КР	Форма(ы) контроля, экз./зач./ЗСО/
2	36	2	72	16	16	-	40	-	Зач.
3	36	1	36	16	16	-	4	-	Зач.
ИТОГО	64	3	108	32	32	-	44	-	зач

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью курса «Физика и техника СВЧ» является обеспечение подготовки студентов к самостоятельной профессиональной деятельности в области разработки и проектирования электровакуумных приборов СВЧ. Основной акцент при изучении курса делается на изучении физических основ процессов группировки, методах отбора энергии от электронных пучков и механизмах взаимодействия электронов с высокочастотными электромагнитными полями. Рассматриваются принципы функционирования, основные характеристики, преимущества и недостатки электровакуумных приборов с сосредоточенным взаимодействием (клистронов, триодов) и с распределенным взаимодействием (ЛБВ, ЛОВ, приборы М-типа).

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина «Физика и техника СВЧ» входит в первый блок: «Дисциплины» часть, формируемая участниками образовательных отношений, учебного плана по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладные математика и физика» по программе «Электрофизика». Является дисциплиной по выбору.

Опирается на материал следующих дисциплин, читаемых студентам физико-технических специальностей: теоретические основы электротехники, уравнения математической физики, электродинамика, физика плазмы, теория поля, теория функций комплексных переменных. Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и математического анализа.

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
Тип задачи профессиональной деятельности: научно-исследовательский			
планирование и проведение научных работ в соответствии с утвержденным направлением исследований в области электрофизики	мощные электрофизические установки: мощные источники электрических импульсов, крупномасштабные лабораторные электрофизические установки высоковольтные и сильноточные системы, ускорители заряженных частиц, мощные ВЧ- и СВЧ-генераторы, взрывомагнитные источники энергии, диагностические комплексы, и вспомогательное оборудование	ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательски испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области в соответствии с целями программы специализированной подготовки магистра	З-ПК-3 Знать основные методы исследований, принципы работы приборов избранной предметной области У-ПК-3 Уметь выбирать необходимые технические средства для проведения экспериментальных исследований в избранной предметной области, обрабатывать полученные экспериментальные результаты В-ПК-3 Владеть навыками работы с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области
Тип задачи профессиональной деятельности: проектный			
организация выполнения проектов исследовательской и инновационной направленности в качестве исполнителя, ответственного за выполнение отдельного направления работ	мощные электрофизические установки: мощные источники электрических импульсов, крупномасштабные лабораторные электрофизические установки высоковольтные и сильноточные системы, ускорители заряженных частиц, мощные ВЧ- и СВЧ-генераторы,	ПК-14.1 способен к обеспечению безопасности при проведении работ на ядерно-физических и электрофизических установках, с делящимися материалами, радиоактивными веществами и радиоактивными отходами	З-ПК-14.1 знать федеральные нормы и правила, отраслевые нормативные документы электробезопасности и охране труда при эксплуатации исследовательских электрофизических установок – источников излучения, высоковольтного и измерительного оборудования; технические

	<p>взрывомагнитные источники энергии, диагностические комплексы, и вспомогательное оборудование.</p>		<p>характеристики установок и оборудования; технологические регламенты безопасной эксплуатации установок и оборудования У-ПК-14.1 уметь анализировать научно-техническую информацию по теме исследований, в том числе для организации контроля за техническим состоянием установок и оборудования; средств измерений, контроля, управления и автоматике, обеспечивающих безопасную эксплуатацию установок и стендов В-ПК-14.1 владеть навыками разработки планов перспективных исследований по инновационным электрофизическим технологиям и мероприятий по обеспечению электробезопасности планируемых работ</p>
<p>организация выполнения проектов исследовательской и инновационной направленности в качестве исполнителя, ответственного за выполнение отдельного направления работ</p>	<p>мощные электрофизические установки: мощные источники электрических импульсов, крупномасштабные лабораторные электрофизические установки высоковольтные и сильноточные системы, ускорители заряженных частиц, мощные ВЧ- и СВЧ-генераторы, взрывомагнитные источники энергии, диагностические комплексы, и вспомогательное оборудование.</p>	<p>ПК-14.2 способен к проведению испытаний согласно техническим требованиям, анализу характеристик испытываемого изделия, а также к подготовке аналитической документации испытаний</p>	<p>З-ПК-14.2 знать метрологию, стандартизацию и сертификацию в атомной отрасли, методы и средства автоматизации выполнения испытаний; порядок разработки и оформления технологической, методической документации для подготовки и проведения испытаний, отчетной документации по результатам выполненных исследований У-ПК-14.2 уметь оценивать научно-</p>

			технический уровень достигнутых результатов В-ПК-14.2 владеть навыками анализа и обобщения результатов выполненных научно-технических исследований и разработок, включая разработку методик выполнения измерений, испытаний и контроля работоспособности основных подсистем и узлов испытательного оборудования и применяемых средств измерений; а также анализ результатов, полученных в результате испытаний изделий (объектов испытания)
--	--	--	--

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ*

Основной формой изложения материала курса являются лекции, которые построены на принципе последовательного изложения материала и реализуют непрерывную подготовку в рамках учебной программы в условиях межпредметных взаимосвязей. Лекции проходят с демонстрацией иллюстративного видеоматериала (слайдов и т.п.), с использованием мультимедийного проекционного оборудования, с демонстрацией примеров применения генераторов и усилителей СВЧ-диапазона на действующих лабораторных установках. Наиболее важные разделы курса выносятся на практические занятия. Предлагается для решения ряд задач, часть из которых разбирается на занятии с подробным обсуждением метода и полученных результатов. Остальные задачи студент решает самостоятельно: предусмотрено выполнение контрольных самостоятельных работ, рефератов.

№ п/п	Наименование раздела /темы дисциплины	№ недели	Виды учебной работы						
			Лекции	Практ. занятия/ семинары	Лаб. работы	СРС	Текущий контроль (форма)*	Максимальный балл (см. п. 6.3)	
			32	32	-	44			
Семестр № 2									
1.	РАЗДЕЛ 1	1-16	16	16	-	22			
1.1.	Лекция 1 Общие вопросы электроники СВЧ.	1	2	2	-	2	УО	3	
1.2.	Лекция 2 Прохождение тока через электронные приборы при сверхвысоких частотах.	2-3	2	2	-	3	УО	3	
1.3	Лекция 3 Отбор энергии от электронного потока	4	2	2	-	2	УО	3	
1.4	Лекция 4 Электронные пучки	5-6	1	1	-	2	УО	3	
1.5	Лекция 5 Основные методы управления электронными потоками в СВЧ-диапазоне	7-8	2	2	-	4	УО	3	
1.6	Лекция 6 Управление электронными потоками с использованием скоростной модуляции.	9-11	2	2	-	3	УО	3	
1.7	Лекция 7 Клистроны	12	2	2	-	2	УО	3	
1.8	Лекция 8 Многорезонаторные пролетные усилительные клистроны.	13	2	2	-	2	УО	3	
1.9	Лекция 9 Отражательные клистроны.	14	1	1	-	2	УО	3	
Рубежный контроль		15						ДЗ	5

№ п/п	Наименование раздела /темы дисциплины	№ недели	Виды учебной работы						Текущий контроль (форма)*	Максимальный балл (см. п. 6.3)
			Лекции	Практ. занятия/ семинары	Лаб. работы	СРС				
			32	32	-	44				
Промежуточная аттестация			Зачет -16				23	0-50		
Посещаемость								5		
Итого:			16	16		4	23	100		
Семестр № 3										
2.	РАЗДЕЛ 2	1-16	16	16	-	22				
2.1	Лекция 1 Замедляющие системы.	1-2	2	2	-	2	УО	3		
2.2	Лекция 2 Лампа бегущей волны типа О.	3-4	2	2	-	3	УО	3		
2.3	Лекция 3 Лампа обратной волны типа О.	5-6	2	2	-	3	УО	3		
2.4	Лекция 4 Электронные приборы СВЧ с скрещенными полями.	7-8	2	2	-	3	УО	3		
2.5	Лекция 5 Движение электронов в пространстве взаимодействия магнетронного генератора	9-10	2	2	-	3	УО	3		
2.6	Лекция 6 Полевые резонаторы	11-12	2	2	-	2	УО	3		
2.7	Лекция 7 Элементы волноводной техники	13	2	2	-	3	УО	3		
2.8	Лекция 8 Перспективы развития электровакуумных приборов СВЧ.	14	2	2	-	3	УО	3		
Рубежный контроль		15					КСР	5		
Промежуточная аттестация			Зачет-16				23	0-50		
Посещаемость								5		
Итого:			16	16	-	54	46	100		

*Сокращение наименований форм текущего, рубежного и промежуточного контроля:

УО – устный опрос

КСР – контрольные самостоятельные работы

Зач– зачет

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

Лекционный курс

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
РАЗДЕЛ 1		
1.1.	Лекция 1 Общие вопросы электроники СВЧ.	Особенности электровакуумных приборов СВЧ. Уравнения Максвелла. Уравнения непрерывности и скорости электронов в электрическом поле. Время и угол пролета электронов. Пространственно-временные диаграммы.
1.2.	Лекция 2 Прохождение тока через электронные приборы при сверхвысоких частотах.	Наведение тока при движении свободных зарядов в плоском зазоре. Уравнение наведенного тока. Форма импульсов наведенного тока. Наведение тока в плоском зазоре при прохождении модулированного по плотности электронного пучка.
1.3.	Лекция 3 Отбор энергии от электронного потока	Отбор энергии от одиночного электрона. Отбор энергии от модулированного электронного потока. Идеальная форма кривой конвекционного тока. Преобразование энергии модулированного электронного потока в устройстве с колебательным контуром. Общая блок-схема электронных генераторов и усилителей СВЧ
1.4.	Лекция 4 Электронные пучки	Параметры и типы электронных пучков. Движение электронов в постоянном магнитном поле. Способы создания протяженных электронных пучков. Фокусирующие системы электронных приборов.
1.5.	Лекция 5 Основные методы управления электронными потоками в СВЧ-диапазоне	Электростатическое управление электронными потоками на сверхвысоких частотах. Динамическое управление электронными потоками. Проводимость зазора, пронизываемого электронным потоком.
1.6.	Лекция 6 Управление электронными потоками с использованием скоростной модуляции.	<i>Уравнение скоростной модуляции.</i> Преобразование модуляции электронного потока по скорости в модуляцию по плотности. Фазовая фокусировка. Идеальная форма кривой модулирующего напряжения.
1.7.	Лекция 7 Клистроны	Пролетные клистроны. Принцип действия. Кинематическая теория группирования электронов методом дрейфа. Параметр группировки. Форма волны конвекционного тока в выходном резонаторе. Двухрезонаторные клистронные усилители и генераторы. Электронный КПД двухрезонаторного клистрона и оптимальная величина параметра группировки. Разгруппировка электронного пучка.
1.8.	Лекция 8 Многорезонаторные пролетные усилительные клистроны.	Кинематическая теория каскадной группировки. Коэффициент усиления и КПД многорезонаторного усилительного клистрона. Влияние настройки резонаторов на работу многорезонаторного клистрона. Рабочая полоса частот. Форма волны конвекционного тока в пространстве дрейфа и электронный КПД. Типичные конструкции и параметры пролетных клистронов.
1.9.	Лекция 9 Отражательные клистроны.	Качественное рассмотрение. Фазовое условие самовозбуждения отражательного клистрона. Конвекционный ток в отражательном клистроне. Условия самовозбуждения. Колебательная мощность и электронный КПД отражательного клистрона. Электронная и механическая настройка отражательных клистронов
РАЗДЕЛ 2		
2.1.	Лекция 1	Общие свойства замедленных волн. Виды и характеристики

	Замедляющие системы.	замедляющих систем. Периодические замедляющие системы Медленные волны в спирали. Дисперсионные свойства ЗС.
2.2.	Лекция 2 Лампа бегущей волны типа О.	Общие вопросы. Принцип действия ЛБВ типа О. Исходные положения Группировка электронного пучка под действием бегущей волны Действие модулированного по плотности электронного пучка на поле ЗС. Самосогласованное поле в условиях приближенного синхронизма электронов и волны. Уравнение коэффициента усиления ЛБВ.
2.3	Лекция 3 Лампа обратной волны типа О.	Переход от ЛБВ - генератора к лампе обратной волны. Принципы действия ЛОВ типа О. Зоны генерации ЛОВ типа О. Электронная настройка ЛОВ типа О. Типичные конструкции и параметры ЛОВ Оценка рабочих характеристик ЛОВ.
2.4	Лекция 4 Электронные приборы СВЧ со скрещенными полями.	Движение электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях Магнетронный генератор. Виды колебаний в резонаторной системе магнетрона. Структура высокочастотного поля в пространстве взаимодействия. Разделение видов колебаний.
2.5	Лекция 5 Движение электронов в пространстве взаимодействия магнетронного генератора	Взаимодействие электронов с СВЧ-полем резонаторной системы магнетрона. Переменный пространственный заряд в магнетроне Электронные "спицы". Фазовые условия самовозбуждения магнетрона Пороговые прямые и значения минимальных анодных напряжений Амплитудные условия самовозбуждения. Рабочие и нагрузочные характеристики магнетронов. Основные параметры и характеристики многорезонаторных магнетронов.
2.6	Лекция 6 Полые резонаторы	Виды колебаний в полых резонаторах. Обзор типов полых резонаторов Коаксиальные резонаторы. Связь полых резонаторов с нагрузкой Возбуждение резонаторов. Нагруженная и внешняя добротности резонатора.
2.7	Лекция 7 Элементы волноводной техники	Волноводы прямоугольного сечения. Структура поля в прямоугольном волноводе при волнах ТЕ и ТМ. Критическая длина волны и дисперсия волн в прямоугольном волноводе. Волны ТЕ и ТМ в круглом волноводе Коаксиальные линии передачи. Сочленение волноводов и коаксиальных линий. Короткозамыкающие поршни в волноводах и коаксиальных линиях.
2.8	Лекция 8 Перспективы развития электрорадиотехники СВЧ.	Основные направления развития электрорадиотехники СВЧ. Основные факторы, определяющие развитие приборов СВЧ. Новые методы генерации мощных импульсных СВЧ-полей. Релятивистские клистроны, магнетроны и ЛБВ. Виркатор. Релтрон.

Практические/семинарские занятия

№	Наименование раздела / темы дисциплины	Содержание
1.	РАЗДЕЛ 1	
1.1.	Занятие 1	Основные факторы, характеризующие электронику СВЧ. Вычисление скорости электронов, приобретенной в потенциальном электрическом поле с учетом релятивистских поправок. Расчет времени и угла пролета электронов. Невозмущенный угол пролета. Построение пространственно-временных диаграмм.
1.2.	Занятие 2	Оценки наведенного тока при движении электронов в сантиметровых зазорах резонаторов. Построение типичных графиков импульсов наведенного тока. Вычисление коэффициента взаимодействия электронного пучка

		электрическим полем зазора. Построение зависимости коэффициента взаимодействия от угла пролета через зазор
1.3	Занятие 3	Построение кривой конвекционного тока для полного отбора энергии от электронов. Оценка требований к выходным колебательным системам приборов СВЧ исходя из характеристик электронного пучка.
1.4	Занятие 4	Типы электронной эмиссии. Сравнение характеристик электронных пушек, использующих различные виды эмиссии. Оценки первичности электронного пучка. Закон степени «трех вторых». Оценки плотности тока пучка в электронной пушке на основе плоского диода. Оценка предельных значений токов пучка Теорема Буша.
1.5	Занятие 5	Схема электростатического управления электронным потоком в триоде. Конвекционный ток при электростатическом управлении в режиме малых и больших амплитуд. Построение векторных диаграмм токов при электростатическом управлении. Построение пространственно-временных диаграмм группирования электронов при динамическом способе группировки.
1.6	Занятие 6	Вывод уравнения скоростной модуляции. Вычисление активной проводимости электронной нагрузки. Схемы преобразования модуляции по скорости в модуляцию по плотности. Построение пространственно-временных диаграмм преобразования модуляции по скорости в модуляцию по плотности методом дрейфа и методом тормозящего поля. Концепция фазовой фокусировки.
1.7	Занятие 7	Вычисление коэффициента связи электронного пучка с полем зазора резонатора. Оценки углов пролета зазоров резонаторов и труб дрейфа. Вычисление параметра группировки. Построение зависимости фазы прибытия электрона во второй резонатор от фазы прохождения первого резонатора. Зависимость вида графика от величины параметра группировки.
1.8	Занятие 8	Качественное объяснение каскадной группировки. вычисление коэффициента усиления и КПД многорезонаторного усилительного клистрона. Зависимость фазы прибытия электрона в третий резонатор от фазы прохождения через первый резонатор при каскадной группировке. Влияние расстройки промежуточного резонатора на величину параметра группировки
1.9	Занятие 9	Вычисление оптимального время пролета центра электронного сгустка в отражательном клистроне. Зоны генерации в отражательном клистроне. Форма конвекционного тока и коэффициент взаимодействия в отражательном клистроне. Графическое решение уравнения самовозбуждения отражательного клистрона.
2.	РАЗДЕЛ 2	
2.1.	Занятие 1	Понятие коэффициента замедления. Длина замедленной волны. Дисперсионные характеристики замедляющих систем. Способы построения дисперсионных характеристик. Пространственные гармоники периодических замедляющих систем.
2.2.	Занятие 2	Вывод уравнения переменной составляющей скорости электронов под действием поля бегущей волны. Уравнение переменной составляющей плотности конвекционного тока. Самосогласованное поле в условиях синхронизма электронов и волны. Вывод уравнение коэффициента усиления ЛБВ.
2.3	Занятие 3	Основной недостаток СВЧ-генераторов на лампе прямой волны. Условия взаимодействия электронов с полем обратной волны. Внутренняя обратная связь. Зависимость генерируемой мощности и коэффициента усиления ЛОВ от постоянного конвекционного тока. Методы расчета ЛОВ.
2.4	Занятие 4	Расчет движения электронов в плоском магнетроне. Циклоидное движение электронов в скрещенных полях при отсутствии СВЧ-полей. Парабол критического режима. Качественное рассмотрение типов колебаний анодного блока магнетрона. Вид тангенциальной составляющей поля E на поверхности анодного блока. Спектр видов колебаний.

2.5	Занятие 5	Качественный вид электрического поля бегущей волны в пространстве взаимодействия. Оценка траекторий электронов при наличии синхронизма бегущей волной. Вывод условий самовозбуждения магнетрона. Понятие порогового анодного напряжения. Вычисление КПД магнетрона. Рабочие и нагрузочные характеристики магнетрона.
2.6	Занятие 6	Понятие полого резонатора. Коаксиальные, тороидальные и цилиндрические резонаторы. Связь полых резонаторов с нагрузкой возбуждение полых резонаторов. Измерение параметров полых резонаторов.
2.7	Занятие 7	Вывод уравнений составляющих поля в прямоугольном волноводе при волнах ТМ и ТМ. Вычисление критической длины волны. Низшая волна в волноводе. Возбуждение волн в волноводе с помощью штыря и петли. Типы коаксиальных волноводных переходов. Основные принципы построения.
2.8	Занятие 8	Направления развития электровакуумных приборов. Обзор современных методов генерации мощных импульсных СВЧ-полей. Особенности конструкции релятивистских клистронов, магнетронов и ЛБВ. Виркаторы – принцип действия и характеристики. Релтрон – особенности и преимущества. Магнитоизолированный линейный осциллятор -MLO.

5. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

5.1. Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Раздел	Темы занятий	Компетенция	Индикаторы освоения	Текущий контроль, неделя
Семестр № 2				
Раздел 1	Лекция 1 Общие вопросы электроники СВЧ.	ПК-3 ПК-14.1 ПК-14.2	3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-1
	Лекция 2 Прохождение тока через электронные приборы при сверхвысоких частотах.		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-2
	Лекция 3 Отбор энергии от электронного потока		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-3-4
	Лекция 4 Электронные пучки		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-5-6
	Лекция 5 Основные методы управления электронными потоками в СВЧ-диапазоне		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-7

	Лекция 6 Управление электронными потоками с использованием скоростной модуляции.		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-8
	Лекция 7 Клистроны		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.	УО-9-10
	Лекция 8 Многорезонаторные пролетные усилительные клистроны.		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.	УО-11-12
	Лекция 9 Отражательные клистроны.		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.	УО-13-14
Рубежный контроль		ПК-3 ПК-14.1 ПК-14.2	3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	ДЗ-15
Промежуточная аттестация		ПК-3 ПК-14.1 ПК-14.2	3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	Зачет-16
Семестр № 3				
Раздел 2	Лекция 1 Замедляющие системы.		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.	УО-1
	Лекция 2 Лампа бегущей волны типа О.		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.	УО-2
	Лекция 3 Лампа обратной волны типа О.		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-3-4
	Лекция 4 Электронные приборы СВЧ со скрещенными полями.		3-ПК-1; У-ПК-1; В-ПК-1 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-5-6
	Лекция 5 Движение электронов в пространстве взаимодействия магнетронного генератора	ПК-3 ПК-14.1 ПК-14.2	3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	УО-7-8
	Лекция 6 Полые резонаторы		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.	УО-9-10
	Лекция 7 Элементы волноводной техники		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.	УО-11-12
	Лекция 8 Перспективы развития электровакуумных приборов СВЧ.		3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.	УО-12-14
Рубежный контроль		ПК-3 ПК-14.1 ПК-14.2	3-ПК-3; У-ПК-3; В-ПК-3 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.2	КСР-15
Промежуточная аттестация		ПК-3 ПК-14.1 ПК-14.2	3-ПК-1; У-ПК-1; В-ПК-1 3-ПК-14.1; У-ПК-14.1; В-ПК-14.1 3-ПК-14.2; У-ПК-14.2; В-ПК-14.-	Зачет-16

5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

5.2.1 Примерные темы домашнего задания (ДЗ)

1. Проектирование электроники пролетного многорезонаторного клистрона.
2. Проектирование электроники отражательного клистрона.
3. Расчет КПД и коэффициента усиления мощного многорезонаторного клистрона.
4. Расчет коэффициента усиления по мощности малосигнальной ЛБВ.
5. Расчет пускового тока, выходной мощности и КПД ЛОВ.
6. Расчет анодного напряжения и полного КПД многорезонаторного магнетрона.

5.2.2. Примерные задания к устному опросу (УО)

Раздел 1-2	Вопросы	Макс. балл
Задача 1	Определить время и угол пролета электронов с энергией 5 кэВ зазора резонатора протяженностью 0,3 мм.	2
Задача 2	Рассчитать коэффициент взаимодействия и активную шунтирующую проводимость электронного потока в зазоре пролетного клистрона с характеристиками: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка 7 А, внутренний радиус трубы дрейфа 3 мм, радиус электронного потока 2 мм, протяженность зазора 4 мм, рабочая частота 6,5 ГГц.	2
Задача 3	Рассчитать КПД и коэффициент усиления по мощности пролетного четырехрезонаторного клистрона с параметрами: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток 1 А, внутренний радиус труб дрейфа 3 мм, радиус пучка 2 мм, Протяженность бессеточных зазоров 4 мм. полные эквивалентные длины труб дрейфа 30 мм, Частота усиливаемого сигнала 6 ГГц, добротность резонаторов 2000, волновое сопротивление 75 Ом.	2
Задача 4	Рассчитать пусковой ток, выходную мощность и КПД ЛОВ при следующих характеристиках: параметр усиления 0,5, число замедленных волн 12, волновое сопротивление 20 Ом, ускоряющее напряжение 1,5 кВ, ток пучка 50 мА.	2
Задача 5	Рассчитать анодное напряжение и электронный КПД многорезонаторного магнетрона с числом резонаторов 8, радиусом катода 9,5 мм, радиусом анода 18 мм, рабочей длиной волны 24 см, магнитной индукцией 1400 Гс.	2

5.2.3. Примерные вопросы к устному опросу и зачету

1 семестр (УО-1) и (Зачет-1)

1. Понятие угла и времени пролета. Физический смысл угла и времени пролета.
2. Определение наведенного и конвекционного токов.
3. Особенности наведения тока во внешней цепи в СВЧ- диапазоне при движении свободных зарядов.
4. Основное условие эффективного отбора энергии от модулированного электронного пучка.
5. Особенности отбора энергии с помощью резонатора и замедляющей системы.
6. Формирование электронных пучков.
7. Пучок Бриллюэна. Теорема Буша.

8. Сущность динамического метода управления электронными потоками.
9. Понятие фазовой фокусировки.
10. Ограничения на преобразование модуляции электронного потока по скорости в модуляцию по плотности.
11. Понятие и физический смысл параметра группировки.
12. Причины разгруппировки электронного пучка.
13. Понятие фазового самовозбуждения отражательного клистрона.

2 семестр (УО-2) и (Зачет-2)

1. Понятие замедленных волн.
2. Волны в периодических замедляющих системах. Виды дисперсии.
3. Принцип действия ЛБВ.
4. Спиральная замедляющая система.
5. Лампа обратной волны, отличие от ЛБВ.
6. Траектория движения электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях.
7. Понятие π -вида колебаний.
8. Структура поля в пространстве взаимодействия.
9. Понятие электронных спиц.
10. Амплитудные и фазовые условия самовозбуждения.
11. Понятие полого резонатора. Коаксиальный и тороидальный резонатор.
12. Понятие емкостного штыря и индуктивной петли.
13. Волны ТЕ и ТМ в волноводах. Коаксиально-волноводные переходы.
14. Понятие виртуального катода. Преимущества и недостатки виркатора.

5.2.4. Интерактивная форма, используемая в реализации дисциплины (УО)

Всего занятий в интерактивной форме предполагается в объеме 18 часов (из РУПа). При выполнении интерактивных занятий студентам предлагается решить следующие проблемы:

- Мозговой штурм;
- Case-study (анализ конкретных задач или ситуаций).

№	Проблемы для интерактивных занятий	Условия	Макс балл
1	Постановка измерений плотности потока энергии СВЧ-излучения, формируемого излучающей антенной	Заданы характеристики излучающей антенны и частота СВЧ-излучения, необходимо выбрать тип приемной антенны и метод регистрации параметров СВЧ-поля	3
2	Определение характеристик измерительного тракта	Известна амплитуда СВЧ-сигнала на выходе приемной антенны. Предложить схему измерений с учетом ослабления сигнала в измерительном кабеле и необходимого количества аттенюаторов с учетом чувствительности осциллографа	3
3	Постановка измерений добротности резонатора	Предложить метод измерения и обсудить его реализацию в коаксиальном резонаторе с петлевым выводом энергии	3
4	Синхронизация запуска оборудования в сложном эксперименте	Задана временная диаграмма эксперимента, предложить способ и метод синхронизации оборудования	3
5	Измерение магнитного поля в тракте проводки электронного пучка	Заданы характеристики соленоида и системы его питания, предложить методики прямого и косвенного контроля величины магнитного поля	3
6	Измерение тока пучка заряженных частиц в прямопролетном СВЧ-генераторе	Заданы характеристики пучка, предложить методы измерения тока пучка, обсудить их преимущества и недостатки	3
7	Контроль положения электронного пучка в трубе дрейфа СВЧ-генератора	Предложить методы контроля и обсудить возможности использования в импульсном режиме работы СВЧ-прибора	3
8	Измерение уровня разрежения в полости СВЧ-генератора в процессе работы	Предложить методы измерения, оценить преимущества и ограничения	3

5.3. Шкалы оценки образовательных достижений

Рейтинговая оценка знаний является интегральным показателем качества теоретических и практических знаний и навыков студентов по дисциплине и складывается из оценок, полученных в ходе текущего контроля и промежуточной аттестации.

Результаты текущего контроля и промежуточной аттестации подводятся по шкале балльно-рейтинговой системы.

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту,

			если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	В	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		С	
70-74		Д	
65-69	3 «удовлетворительно»	Е	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 «неудовлетворительно»	Ф	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. И.В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ., М., Высшая школа, 1972
2. В.М. Березин, В.С. Буряк и др. Электронные приборы СВЧ. М., Высшая школа, 1985
3. С.М. Левитский, С.В. Кошечкина. Вакуумная и твердотельная электроника СВЧ. К., «Вища школа», 1986
4. Плазменные и электронные усилители и генераторы СВЧ. Под редакцией З.С. Чернова устройств. М., 1965
5. В. Н. Васильев Электронные и квантовые приборы СВЧ. М, Связь, 1972
5. А.И. Костиенко Введение в электронику СВЧ. М., Изд-во МГУ, 1989
6. Ю.А. Кацман. Приборы СВЧ М., Высшая школа, 1973
7. Астайкин А.И., Воронина Л.В., Липатов А.Ф., Профе В.Б. Приборы физической электроники. Саров, 2002

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.Д. Федоров Электронные и квантовые приборы СВЧ. Атомиздат, 1974.
2. Дж. Лоусон. Физика пучков заряженных частиц. М., Мир, 1980.
3. Гайдук В.И., Палатов В.И., Петров Д.М. Физические основы электроники СВЧ. М. Сов.радио, 1971.
4. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки М., Советское радио, 1966

5. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки, М., Энергоатомиздат, 1991

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

1. Федеральный портал «Российское образование» (<http://www.edu.ru>)
2. Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» (<http://window.edu.ru>)
3. Сайт СарФТИ НИЯУ МИФИ (<http://sarfti.ru>), раздел «Учебно-методические пособия»
4. программное обеспечение (среда для LMTO расчетов MindLab 5.0, LMTART), интернет-ресурсы среда Maple, MatLab, базы данных aps.org, Elsevier.

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины производится на базе учебной лаборатории кафедры в СарФТИ НИЯУ МИФИ учебного корпуса. Лаборатория оснащена современным оборудованием, позволяющим проводить практические занятия. Здесь же проводятся консультации по текущим вопросам и квалификационным работам.

Самостоятельная работа студентов осуществляется на рабочих местах в подразделениях РФЯЦ-ВВИЭФ, оснащенных установками с соответствующим комплектом средств измерений и объектами исследований.

8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При чтении лекционного материала используется электронное сопровождение курса: справочно-иллюстративный материал воспроизводится и озвучивается в аудитории с использованием проектора и переносного компьютера в реальном времени. Электронный материал доступен студентам для использования и самостоятельного изучения на сайте института.

Практические работы являются частью занятия и выполняются под контролем наставника с использованием результатов практических занятий, в том числе – и в качестве практических занятий. В рабочем учебном плане предусмотрены 18 интерактивных часов – для проведения практических занятий.

В качестве материально-технического обеспечения используются также ресурсы и программно-аппаратное обеспечение компьютерного класса.

При выполнении практических, научно-исследовательских, опытно-конструкторских, хозяйственных и госбюджетных работ используются современные средства измерения и контроля разных фирм и др. Имеются и используются оснащенные компьютерными системами управления исследовательские стенды и технологические комплексы.

9. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

На практических занятиях студенты осваивают среду Maple, MatLab, широко используют компьютерные технологии, практически рассчитывают реальные физические системы. При УО – устном опросе тем лекционных занятий используются презентации, обсуждения последних научных работ, новые электрофизические установки и методы измерений. Прививаются навыки работы с научной литературой. Обязательным является самостоятельная работа студентов, выполнение индивидуальных заданий, работа с

литературой. Организация занятий обязательно включает диалог со студентами по вопросам решения задач. Во время контроля выполнения заданий, предложенных для внеаудиторной самостоятельной работы, производится выступление студентов с вариантами решений.

Самостоятельная внеаудиторная работа студентов состоит из двух взаимосвязанных частей. Первая представляет собой освоение теоретического материала, вторая – приобретение практических навыков решения задач. Освоение теоретического материала производится по лекциям и указанной основной и дополнительной литературе. Решение задач, предложенных в качестве домашнего задания, позволяет студентам научиться решать типичные задачи.

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки: 03.04.01 «Прикладные математика и физика», профиль подготовки: «Электрофизика»

Автор: доцент кафедры ЭФ, к.ф.м.н. Воронин Вячеслав Вячеславович

Рецензент: доцент кафедры ЭФ, к.ф.м.н. Платонов Вадим Васильевич