

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Основы электроники электровакуумных приборов СВЧ
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра вакуумной электроники
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.В. Коннов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры вакуумной электроники 29.05.2020

Аннотация

Рассмотрены основные типы взаимодействия электронных пучков и электромагнитных волн: продольное: О-типа, поперечное: Т-типа и взаимодействие в скрещенных полях: М-типа. Приведена общая структурная схема всех типов СВЧ усилителей. Рассмотрены типы эмиссии с катода: термоэмиссия (г и Т- режимы), полевая (автоэлектронная) эмиссия и вторичная эмиссия и области их применения в приборах СВЧ, а также вопросы формирования (фокусировки) пучков электронов статическими магнитными и электрическими полями. Введено понятие плазменных волн в бесконечно широком электронном потоке, плазменной частоты, редуцированной плазменной частоты в цилиндрическом пучке конечного радиуса в круглом волноводе. Рассмотрены поперечные волны (моды) цилиндрического электронного пучка в приближении нитевидной модели. Выведены дисперсионные характеристики собственных волн электронного потока. Описан метод Лагранжа для анализа динамики частиц, группирующихся в сеточном узком зазоре в приборах О-типа. Введено понятие конвекционного и наведенного токов, угла пролета и коэффициента взаимодействия электронов с полем ВЧ-зазора. Показано в малосигнальном приближении образование в пролетном канале гармоник конвекционного тока под действием ВЧ-полей в зазоре и дано понятие о фазовых траекториях.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- формирование у студентов знаний об основных принципах группирования (автофазировки) электронных потоков и их энергообмена с электромагнитными полями в ЭВП СВЧ различных типов, а также об областях применения ЭВП СВЧ.

Задачи дисциплины

- сформировать понимание связи типа группирования электронного пучка со структурой ВЧ полей, формируемых электродинамической системой ЭВП СВЧ.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- принципы построения ЭВП СВЧ различных типов, их конструктивные отличия и ориентироваться в областях их применения. По окончании учебного курса студенты должны понимать связь электроники и электродинамики в ЭВП СВЧ, знать предельные возможности каждого класса приборов по КПД, диапазону частот и полосовым характеристикам.

уметь:

- проводить сравнительный анализ ЭВП СВЧ, работающих на разных физических принципах.

владеть:

- физическими моделями ЭВП СВЧ различного типа.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Вакуумные приборы СВЧ	2			5
2	Катоды в ЭВП СВЧ	4			7
3	Волны в электронных потоках	2			5
4	Методы математического анализа взаимодействия в ЭВП СВЧ	4			7
5	Гармоники тока в сгруппированном электронном потоке	2			5
6	Резонаторные усилители О-типа	4			7
7	Усилители О-типа с бегущей волной	2			5
8	СВЧ приборы с поперечным взаимодействием	2			5
9	Приборы магнетронного (М) типа	4			7
10	Гирорезонансные приборы	2			5
11	Приборы терагерцового (субмиллиметрового) диапазона длин волн	2			2
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 8 (Весенний)

1. Вакуумные приборы СВЧ

СВЧ диапазон длин волн. Источники СВЧ излучения. Зачем нужен вакуум. Структура вакуумных приборов СВЧ. Электронный пучок, как рабочее тело. Классификация ЭВП СВЧ по типу взаимодействия. Место вакуумных приборов СВЧ на диаграмме частота–мощность излучения.

Области применения ЭВП СВЧ.

2. Катоды в ЭВП СВЧ

Типы эмиссии с катодов, применяемых в ЭВП СВЧ. Типы фокусировки электронных потоков в приборах ЭВП СВЧ. Связь электронной оптики и взаимодействия электронов с ВЧ-полями в ЭВП СВЧ.

3. Волны в электронных потоках

Типы волн в электронных потоках. Продольные (плазменные) и поперечные волны в электронных лучах. Редуцированная плазменная частота. Дисперсионные характеристики электронных волн.

4. Методы математического анализа взаимодействия в ЭВП СВЧ

Метод Эйлера и метод Лагранжа для анализа динамики частиц. Понятие наведенного в плоском зазоре и конвекционного тока и их связь через коэффициент взаимодействия зазора.

5. Гармоники тока в сгруппированном электронном потоке

Формирование гармоник конвекционного тока при модуляции электронного потока слабым ВЧ сигналом. Комплексная электронная нагрузка ВЧ резонатора. Условие передачи максимальной мощности от электронного пучка в нагрузку. Понятие фазовой траектории электрона.

6. Резонаторные усилители О-типа

Многорезонаторные однолучевые клистроны. Каскадная группировка. Клистроны на связанных резонаторах (с распределенным взаимодействием). Коэффициент усиления клистронов. Предельные параметры. Многолучевые клистроны, особенности их конструкции. Реверсная фокусировка электронных пучков в многолучевых клистроны. Преимущества и физические причины ограничения КПД в клистроны.

7. Усилители О-типа с бегущей волной

Принципы широкополосного группирования и автофазировки в ЛБВ. Синхронизм. Взаимодействие с пространственными гармониками. Спиральные ЛБВ. Коэффициент усиления

Генераторные лампы с обратной волной (ЛОВ). Формирование внутренней обратной связи.

Мощные ЛБВ на цепочках связанных резонаторах (ЦСР). Секционированные ЛБВ на ЦСР с запредельными секциями. Предельно достижимые параметры. Области применения ЛБВ О-типа.

8. СВЧ приборы с поперечным взаимодействием

Особенности электродинамических систем, формирующих ВЧ поля. Резонатор Каччия.

Приборы на циклотронном резонансе. Принципы группирования электронов.

Сверхмаломощные усилители. Гирокон. ЛБВ с циркулярно-поляризованной волной.

Мощные циклотронные преобразователи СВЧ энергии в постоянный ток. Области применения СВЧ приборов с поперечным взаимодействием.

9. Приборы магнетронного (М) типа

Электронные траектории в скрещенных полях. Типы колебаний ВЧ-полей в электродинамической системе магнетрона. Поля колебания п-вида. Формирование электронной втулки в магнетроне. Условие равновесия границы Бриллюэна. Условие отсечки Халла. Формирование спиц, условие синхронизма (Хартри) и автоселекции электронов, обратная бомбардировка катода. Магнетроны с бегущей волной коаксиальной и планарной конструкций на п-виде колебаний. Амплитроны. Коэффициент усиления.

Конкуренция видов и подавление паразитных видов колебаний. Приборы М-типа с холодной эмиссией. Предельные параметры приборов М-типа.

10. Гирорезонансные приборы

Электронные пушки гирорезонансных приборов. Поливинтовые потоки. Принципы релятивистской фазировки поливинтовых электронных пучков. Условие циклотронного резонанса. Конструкции гирорезонансных генераторов и усилителей. Предельные параметры гирорезонансных приборов. Области применения.

11. Приборы терагерцового (субмиллиметрового) диапазона длин волн

Особенности планарной технологии. Достигнутые параметры (частота и мощность). Области применения приборов терагерцового диапазона длин волн.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, снабженная доской, экраном, видеопроектором.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

Литература выдается студентам на кафедре.

1. Собенин Н. П., Милованов О.С. Техника сверхвысоких частот. - Москва: Энергоатомиздат, 2007
2. Лебедев. И. В. Техника и приборы СВЧ, Т. 2. - М.: Высшая школа, 1972
3. Трубецков Д. И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков, Т.1, Т.2. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000

Дополнительная литература

Литература выдается студентам на кафедре.

1. Березин В. М., Буряк В. С., Гутцайт Э. М. Электронные приборы СВЧ. - М.: Высшая школа, 1985

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

не предусмотрены.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра вакуумной электроники
курс:	4
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	А.В. Коннов, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Основы электроники электровакуумных приборов СВЧ» обучающийся должен:

знать:

- принципы построения ЭВП СВЧ различных типов, их конструктивные отличия и ориентироваться в областях их применения. По окончании учебного курса студенты должны понимать связь электроники и электродинамики в ЭВП СВЧ, знать предельные возможности каждого класса приборов по КПД, диапазону частот и полосовым характеристикам.

уметь:

- проводить сравнительный анализ ЭВП СВЧ, работающих на разных физических принципах.

владеть:

- физическими моделями ЭВП СВЧ различного типа.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В целях проведения текущего контроля успеваемости возможен краткий опрос по теме предыдущего занятия.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень вопросов для проведения дифференцированного зачета:

1. Как классифицируются СВЧ приборы ?
2. В чем преимущества вакуумных приборов СВЧ ?
3. Типы волн электронного потока и их дисперсии
4. Наведенный и конвекционный токи в плоском зазоре. Электронная проводимость ВЧ зазора.
5. Многорезонаторные клистроны. Каскадный принцип группирования. Параметры клистронов.
6. Метод Эйлера и метод Лагранжа анализа электронных потоков.
7. Принцип синхронизма в ЛБВ. Спиральные ЛБВ и ЛБВ на ЦСР. Полосовые и энергетические характеристики ЛБВ. Секционирование ЛБВ. Принцип работы запредельных секций.
8. Приборы с поперечным взаимодействием. Принцип группировки Циклотронный резонанс. Резонатор Каччия. Малошумящие циклотронные усилители.
9. Приборы магнетронного типа. Траектории электронов. Отсечка Халла. Принцип синхронизма с бегущей волной. Условие Хартри.
10. Виды колебаний в резонаторной системе магнетрона. Распределение полей п-вида. Магнетрон на п-виде взаимодействия. Подавление паразитных видов колебаний. Селекция электронов и формирование спиц.
11. Магнетроны импульсного и непрерывного действия. Параметры магнетронных генераторов и область их применения. Магнетроны с холодным запуском-принцип их действия.

12. Пушки, формирующие поливинтовые релятивистские электронные пучки. Условие циклотронного резонанса в giroприборах. Группировка и автофазировка поливинтовых пучков в резонаторах giroприборов.
13. Гирорезонаторные генераторы и усилители. Конструкции приборов. Параметры giroприборов.
14. Приборы терагерцового диапазона длин волн. Технологии их изготовления. Параметры и области применения.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 бала - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 бал - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

При проведении устного дифференцированного зачета студенту дается 20 минут на подготовку.