

**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:	Электродинамические системы мощных электровакуумных приборов
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

Курс посвящен электродинамическим системам, применяемым в современных мощных электровакуумных приборах СВЧ. Приведены основные характеристики волноведущих электродинамических замедляющих и резонаторных систем. Даны понятия типов волн, видов колебаний, пространственных гармоник. На примере замедляющих систем типа гребенок и спиралей проиллюстрирован расчет методом частичных областей. Дано понятие КСВн в реальных волноведущих системах и приведены примеры согласующих устройств и устройств ввода-вывода энергии. Для описания свойств периодической цепочки связанных резонаторов (ЦСР) использован метод декомпозиции, в котором ячейка (резонатор) ЦСР представлен шестиполюсником. Введено понятие пассивного шестиполюсника общего вида. Проведен синтез схемы замещения шестиполюсника двухполосной схемой с сосредоточенными параметрами с максимально возможным числом степеней свободы. Показана единственность такого представления. Выведены условия физической реализуемости проводимостей синтезированной схемы замещения шестиполюсника. Получены дисперсионные и импедансные характеристики ЦСР в двух полосах прозрачности, а также показана возможность моделирования реального согласования неоднородной секции ЦСР с учетом ввода-вывода энергии и конечных нагрузок. В дискретной форме записано уравнение возбуждения секции ЦСР наведенными токами. Дано понятие наведенного тока

Задачи дисциплины:

ознакомление студентов с принципами формирования быстрых и медленных волн в направляющих системах и ВЧ полей в резонаторных системах

В результате освоения данной дисциплины студенты должны знать:

основные свойства различных типов электродинамических систем, и ориентироваться в областях их применения.

Уметь:

анализировать дисперсионные свойства электродинамических систем, связывать распределения полей со структурой (симметриями) замедляющих систем, понимать принципы согласования и организации ввода-вывода энергии электромагнитных волн.

Владеть:

простейшими методами расчетов полей и параметров электродинамических систем

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Длинные линии
2. Волноводы
3. Лемма Лоренца
4. Полые резонаторы
5. Периодические бесконечные замедляющие системы
6. Гребенчатые замедляющие системы
7. Замедляющая меандровая система.
8. Спиральные замедляющие системы.
9. Цепочки связанных резонаторов (ЦСР)
- 10 Резонансный метод измерения характеристик
11. Теорема Рамо-Шокли

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- обучить студентов электрод основным электродинамическим системам, применяемым в современных мощных электровакуумных приборах.

Задачи дисциплины

- ознакомление студентов с принципами формирования быстрых и медленных волн в направляющих системах и ВЧ полей в резонаторных системах.

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:

- основные свойства различных типов электродинамических систем, и ориентироваться в областях их применения.

уметь:

- анализировать дисперсионные свойства электродинамических систем, связывать распределения полей со структурой (симметриями) замедляющих систем, понимать принципы согласования и организации ввода-вывода энергии электромагнитных волн.

владеть:

- простейшими методами расчетов полей и параметров электродинамических систем.

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	Длинные линии	4			6
2	Волноводы	4			7
3	Лемма Лоренца	2			5
4	Полые резонаторы	2			5
5	Периодические бесконечные замедляющие системы	2			5
6	Гребенчатые замедляющие системы	2			7
7	Замедляющая меандровая система	2			5
8	Спиральные замедляющие системы	2			5
9	Цепочки связанных резонаторов (ЦСР)	4			5
10	Резонансный метод измерения характеристик	4			5
11	Теорема Рамо-Шокли	2			5
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. Длинные линии

Распределенные параметры длинных линий. Система уравнений длинных линий. Решение в виде бегущих волн. Характеристическое сопротивление. Постоянная распространения, затухающие волны. Входное сопротивление нагруженной длинной линии. Закороченная длинная линия. Представление отрезка длинной линии четырехполюсником в А-форме. Ступенчатое соединение отрезков длинных линий. Согласование длинных линий с помощью четвертьволнового отрезка длинной линии. Реализация длинных линий в СВЧ диапазоне - коаксиальные линии.

2. Волноводы

Волновые уравнения, решения уравнений в виде бегущих волн Е и Н типов, постоянные распространения, фазовая скорость, групповая скорость, характеристическое сопротивление, критическая длина волны.

3. Лемма Лоренца

Лемма Лоренца, теорема взаимности. Возбуждение волноводов сторонними источниками: щелями связи, штыревыми антеннами, индуктивными петлями связи. Правила расположения источников возбуждения в волноводах. Возбуждение волноводов сторонними токами. Уравнение возбуждения.

4. Полые резонаторы

Уравнения типов колебаний. Спектры собственных частот. Эквивалентные параметры видов колебаний: частота, характеристическое сопротивление, добротность. Волны Е типа цилиндрического волновода. Тороидальный резонатор-реализация в СВЧ диапазоне колебательного контура. Влияние носиков на параметры резонатора и распределение поля Е-типа. Разновидности тороидальных резонаторов. Резонатор Каччия. Двух и многоззорные связанные резонаторы – их назначение.

5. Периодические бесконечные замедляющие системы

Симметрии в периодических системах. Теорема Флоке-Блоха. Решение волновых уравнений в виде суперпозиции пространственных гармоник, их отличие от типов волн в волноводах. Виды периодических замедляющих систем, их назначение. Синхронизация скоростей электронного потока и пространственной гармоник. Основные характеристики: дисперсия пространственных гармоник, фазовая и групповая скорости сопротивления связи (импеданс взаимодействия) с электронным потоком. Отличие бесконечных периодических систем и отрезков реальных замедляющих систем, содержащих конечное число периодов, применяемых в лампах с бегущей волной, их согласование.

6. Гребенчатые замедляющие системы

Одиночная и сдвоенная гребенки. Упрощенная система волновых уравнений для анализа бесконечно широкой сдвоенной гребенки. Метод частичных областей. Поле в канале взаимодействия и поле между зубцами гребенки. Возможные способы сшивания полей на границах. Дисперсионное уравнение, его графическое (численное) решение. Синфазный и противофазный виды колебаний. Поля синфазного и противофазного видов в канале взаимодействия. Поля одиночной гребенки как частный случай при бесконечно большом канале взаимодействия. Поток мощности через поперечное сечение гребенки. Сопротивления связи на нулевой пространственной гармонике синфазного типа. Гребенки конечной ширины в прямоугольном волноводе.

7. Замедляющая меандровая система

Волновые уравнения для бесконечно широкой меандровой линии, решение волновых уравнений в виде пространственных гармоник. Дисперсионное уравнение, сопротивление связи. Разновидность меандровой системы –петляющий волновод – основная замедляющая система ламп с бегущей волной мм и субмиллиметрового диапазона длин волн.

8. Спиральные замедляющие системы

Разновидности спиральные замедляющие систем, область применения. Ленточная спираль в круглом волноводе. Приближение бесконечно тонкой ленты. Метод частичных областей: Решение волнового уравнения методом Фурье внутри и вне спирали. Сшивание на границе. Разрыв магнитных полей на поверхности ленты. Дисперсионное уравнение. Поля внутри спирали. Поток мощности через поперечное сечение спирали. Сопротивление связи. Полосовые характеристики спиральной замедляющей системы. Учет диэлектрических опор. Согласование реальных спиральных систем и вводы-выводы энергии Бифилярная спираль.

9. Цепочки связанных резонаторов (ЦСР)

Конструкции ЦСР и их назначение. Метод декомпозиции. Представление шестиполосниками.. Вывод А-матрицы шестиполосника через проводимости его ветвей. Число степеней свободы шестиполосника общего вида в двух полосах пропускания. Двухполосная схема замещения симметричного шестиполосника общего вида. Синтез параметров шестиполосника через известные (из 3D расчетов) значения частот отсечек резонаторной и щелевой полос, частоту $\pi/2$ -вида и характеристическое сопротивление на частоте 2π -вида резонаторной полосы. Условия физической реализуемости. Влияние потерь на дисперсионные характеристики бесконечной ЦСР. Импедансные характеристики бесконечной ЦСР. А-матрица неоднородной секции ЦСР, включающей концевые нагрузки. Z-матрица и уравнение возбуждения секции ЦСР наведенными токами. Влияние угла раскрытия щели связи на характеристики ЦСР, слияние полос и их инверсия. Физический смысл инверсии полос. Трансформация ЦСР в замедляющую систему на встречных штырях. Модификации встречно-штыревых замедляющих систем.

10. Резонансный метод измерения характеристик

Резонансный метод измерения дисперсионной характеристики замедляющих систем. Метод измерения сопротивления связи. Погрешности методов. Устройства ввода-вывода энергии. Баночные выводы энергии. Технологии изготовления замедляющих систем. Источники технологического разброса параметров.

11. Теорема Рамо-Шокли

Теорема Рамо-Шокли о наведенном токе. Релятивистское уравнение движения электрона в электромагнитных полях.

Частные случаи решения уравнения движения электрона в статических электрическом и магнитном полях. Основные идеи организации энергообмена между электромагнитной волной замедляющей структуры и электронным потоком. Классификация типов взаимодействий.

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

учебная аудитория, снабженная проектором, экраном, доской

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. Лопухин В.М.. Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками, М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953
2. Люиселл У. И. Связанные и параметрические колебания в электронных потоках, М. Иностранная литература, 1963

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 «Электродинамические системы мощных электровакуумных приборов» обучающийся должен:

знать:

- основные свойства различных типов электродинамических систем, и ориентироваться в областях их применения.

уметь:

- анализировать дисперсионные свойства электродинамических систем, связывать распределения полей со структурой (симметриями) замедляющих систем, понимать принципы согласования и организации ввода-вывода энергии электромагнитных волн.

владеть:

- простейшими методами расчетов полей и параметров электродинамических систем.

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

В целях проведения текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по темам предыдущего занятия.

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

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Уравнение длинных линий. Решение в виде бегущих волн. Характеристическое сопротивление линии, постоянная распространения. Входное сопротивление линии конечной длины с нагрузкой. Согласование линий, коэффициент отражения
2. Волноводы прямоугольного сечения. Волновое уравнение. Типы волн E и H. Дисперсионное уравнение. Характеристическое сопротивление волн.
3. Лемма Лоренца. Теорема взаимности.
4. Периодические бесконечные замедляющие системы. Теорема Флоке-Блоха. Пространственные гармоники. Отличие типов волн от пространственных гармоник.
5. Дисперсионное уравнение гребенчатой замедляющей системы.
6. Замедляющая меандровая система. Дисперсионное уравнение.
7. Спиральные замедляющие системы. Дисперсионное уравнение.
8. Полые резонаторы. Виды колебаний. Характеристики видов колебаний. Возбуждение резонаторов.
9. Цепочки связанных резонаторов (ЦСР). Представление резонаторов шестиполусниками общего вида. Синтез параметров шестиполусника замещения.
10. Уравнение возбуждения цепочки связанных резонаторов.
11. Теорема Рамо-Шокли
12. Резонансный метод измерения характеристик электродинамических систем.

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 40 минут на подготовку.