

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики
А.С. Батурин**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Прикладная электродинамика
по направлению:	Электроника и нанoeлектроника
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра электроники
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - 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: С.Е. Банков, д-р техн. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры электроники 12.02.2024

Аннотация

Курс посвящен изучению современных методов электродинамического моделирования сложных структур

Курс включает следующие разделы:

1. Общая характеристика граничных задач прикладной электродинамики. Интегральные соотношения электродинамики.
2. Среда в прикладной электродинамике, материальные параметры, магнито-диэлектрики, проводники, гиротропные среды.
3. Поверхности в прикладной электродинамике, граничные условия.
4. Симметрия в электродинамике, виды симметрии, принцип зеркального изображения.
5. Электродинамика периодических структур, теорема Флоке.
6. Источники электромагнитного поля, волновые и сосредоточенные порты
7. Излучение электромагнитных волн и антенны, параметры антенн.
8. Задачи на собственные волны и собственные колебания.
9. Методы решения граничных задач электродинамики.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изучение теоретических основ применения современных систем электродинамического моделирования.

Задачи дисциплины

- изучение базовых свойств электромагнитного поля и граничных задач электродинамики;
- изучение объектов прикладной электродинамики: сред, граничных условий, источников поля;
- изучение граничных задач для структур с особыми свойствами: симметрией, периодичностью, излучением на бесконечность, острыми кромками и т.д.;
- изучение универсальных и объектно-ориентированных методов решения граничных задач электродинамики.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели

новые научные результаты

ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- уравнения Максвелла, интегральные соотношения электродинамики, виды граничных условий и способы их применения, виды источников электромагнитного поля и их свойства, виды симметричных объектов и способы их моделирования, виды периодических структур и методы их моделирования, универсальные методы решения граничных задач и их основные характеристики, проблемно-ориентированные методы, их назначение и особенности.

уметь:

- построить модель реального объекта, выбрать источник электромагнитного поля, установить граничные условия на поверхностях, выбрать метод решения граничной задачи, адекватный моделируемому объекту.

владеть:

- принципами построения электродинамических моделей и методами решения граничных задач электродинамики.

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	Общие вопросы прикладной электродинамики. Система уравнений Максвелла. Виды граничных задач. Интегральные соотношения электродинамики	1			10
2	Объекты прикладной электродинамики: среды и их параметры, граничные условия, источники поля	5			10
3	Структуры с особыми свойствами	6			10
4	Излучение и антенны. Функция Грина свободного пространства. Первичные и вторичные параметры антенн. Поглощающие поверхности. Моделирование антенн разных видов.	6			10
5	Волноводы и линии передачи, собственные волны и волновые порты. СВЧ многополюсники и их матрицы рассеяния. Матрицы рассеяния симметричных, унитарных и взаимных многополюсников.	6			10
6	Методы решения граничных задач электродинамики	6			10
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: 1 (Осенний)

1. Общие вопросы прикладной электродинамики. Система уравнений Максвелла. Виды граничных задач. Интегральные соотношения электродинамики

Система уравнений Максвелла. Виды граничных задач. Следствия из уравнений Максвелла: теорема Умова-Пойнтинга, теорема взаимности, теорема единственности решения, теорема эквивалентности, волновое уравнение Гельмгольца, плоские волны.

2. Объекты прикладной электродинамики: среды и их параметры, граничные условия, источники поля

Среды. Тензоры магнитной и диэлектрической проницаемости. Однородные, изотропные среды. Частотная дисперсия, модель Дебая. Анизотропные среды. Гиротропные среды. Проводники, с идеальной и неидеальной проводимостями, скин-слой. Искусственные среды и метаматериалы.

Граничные условия. Идеальные граничные условия - электрическая и магнитная стенки. Импедансные граничные условия разных видов: односторонние, двухсторонние, нелокальные, анизотропные.

Источники поля: сторонние токи, первичное поле. Волноводы и линии передачи. Задачи Штурма-Лиувилля на собственные волны. Волновые порты. Линии передачи и генераторы с внутренним сопротивлением, сосредоточенные порты. Понятие СВЧ многополюсника и его матрица рассеяния.

3. Структуры с особыми свойствами

Симметричные структуры. Структуры с плоскостями симметрии, зеркальное отображение. Метод симметрии, парциальные структуры.

Периодические структуры. Классификация периодических структур, одномерные, двумерные и трехмерные периодические структуры. Теорема Флоке для одномерных структур, одномерные гармоники Флоке. Теорема Флоке для двумерных структур, двумерные гармоники Флоке. Теорема Флоке для трехмерных структур, периодические среды.

Структуры с острыми кромками. Условия Мейкснера и особенности поля вблизи острых кромок. Особенности электродинамического моделирования полосковых интегральных схем.

4. Излучение и антенны. Функция Грина свободного пространства. Первичные и вторичные параметры антенн. Поглощающие поверхности. Моделирование антенн разных видов.

Функция Грина свободного пространства, приближение дальней зоны. Поле в дальней зоне, диаграмма направленности, поляризационные характеристики. Вторичные параметры антенн: коэффициент направленного действия, коэффициент усиления.

Антенные решетки. Приближение бесконечной двумерной решетки. Квазипериодический режим, волновод и канал Флоке, периодические граничные условия и поверхности master/slave. Возбуждение одиночного элемента решетки, связь с параметрами квазипериодического режима.

Особенности антенн малых электрических размеров. Критерий Харрингтона-Чу. Согласование антенн малых размеров, теорема Фано, понятие об антенне-фильтре.

5. Волноводы и линии передачи, собственные волны и волновые порты. СВЧ многополюсники и их матрицы рассеяния. Матрицы рассеяния симметричных, унитарных и взаимных многополюсников.

Матричное описание СВЧ многополюсников. Одноволновые и обобщенные матрицы рассеяния. Матрицы рассеяния симметричных, взаимных, унитарных многополюсников. Метод симметрии при анализе СВЧ многополюсников, парциальные многополюсники, четное и нечетное возбуждения.

Составные многополюсники, понятие СВЧ схемы, методы анализа СВЧ схем. Каскадное соединение четырехполюсников, волновые матрицы передачи.

СВЧ периодические структуры, разрешенные и запрещенные зоны. СВЧ фильтры. Стандартные частотные характеристики СВЧ фильтров. Обобщенный метод синтеза СВЧ фильтра.

6. Методы решения граничных задач электродинамики

Метод интегральных уравнений. Интегральные уравнения для идеально проводящих тел. Дискретизация поверхности. Алгебраизация интегральных уравнений, система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), базисные и тестовые функции, RWG функции. Сходимость СЛАУ, критерии сходимости. Метод Галеркина. Функция Грина плоско-слоистой структуры, интегральные уравнения для таких структур.

Метод конечных элементов в частотной области. Дискретизация пространства. Электродинамические функционалы. Интерполяционные базисные функции. СЛАУ по методу конечных элементов.

Асимптотические методы. Метод геометрической оптики. Метод физической оптики. Геометрическая и физическая теории дифракции. Гибридный метод физической оптики и интегральных уравнений.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиа проектором, меловой или маркерной доской.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

Литература выдается на базовой кафедре:

1. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М.: Радио и связь. 1983.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. школа. 1988.

Дополнительная литература

Литература выдается на базовой кафедре:

1. Банков С.Е. Теоретические основы применения систем электродинамического моделирования. М.: Солон-Пресс. 2024.

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.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Электроника и нанoeлектроника
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра электроники
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	С.Е. Банков, д-р техн. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Прикладная электродинамика» обучающийся должен:

знать:

- уравнения Максвелла, интегральные соотношения электродинамики, виды граничных условий и способы их применения, виды источников электромагнитного поля и их свойства, виды симметричных объектов и способы их моделирования, виды периодических структур и методы их моделирования, универсальные методы решения граничных задач и их основные характеристики, проблемно-ориентированные методы, их назначение и особенности.

уметь:

- построить модель реального объекта, выбрать источник электромагнитного поля, установить граничные условия на поверхностях, выбрать метод решения граничной задачи, адекватный моделируемому объекту.

владеть:

- принципами построения электродинамических моделей и методами решения граничных задач электродинамики.

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

В начале каждого занятия проводится краткий опрос по теме предыдущего занятия.

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

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Условие взаимности структуры. Теорема взаимности. Матрица рассеяния взаимного многополюсника. Матрица рассеяния взаимного четырехполюсника без потерь.

2. Закон сохранения энергии. Теорема Умова-Пойнтинга. Матрица рассеяния многополюсника без потерь. Матрица рассеяния взаимного четырехполюсника без потерь.
3. Построение электродинамических моделей для анализа собственных волн однородного и периодического волноводов. Программный блок Eigenmode, его назначение и возможности.
4. Симметрия в электродинамике. Моделирование структур с одной и двумя плоскостями симметрии с применением поверхностей Symmetry E,H. Принцип зеркального изображения.
5. Волновой и сосредоточенный порты. Погрешности при применении сосредоточенных портов и причины их возникновения.
6. СВЧ периодические структуры. Зонная структура периодического волновода, запрещенные и разрешенные зоны. Анализ собственных волн периодических волноводов с использованием блока Eigenmode.
7. Модель бесконечной двумерной антенной решетки в квазипериодическом режиме. Волновод и канал Флоке. Характеристика собственных волн волновода Флоке. Поверхности master/slave.
8. Бесконечная двумерная антенная решетка в режиме возбуждения одного элемента, связь между параметрами решетки при возбуждении одного элемента и в квазипериодическом режиме.
9. Излучение в свободное пространство. Функция Грина свободного пространства и поле в дальней зоне. Диаграмма направленности и поляризационные характеристики излучения. Применение поглощающих поверхностей для решения задач излучения.
10. Теорема эквивалентности. Базовые принципы метода физической оптики. Основные положения гибридного метода физической оптики - интегральных уравнений. Схема моделирования зеркальной антенны с использованием метода физической оптики.
11. Поведение поля в окрестности острых металлических кромок, условия Мейкснера. Применение метода малых возмущений для расчета потерь в полосковых структурах.
12. Односторонние и двухсторонние импедансные граничные условия, структуры, которые они описывают. Пространственная дисперсия импеданса и нелокальные импедансные граничные условия.
13. Общая схема метода интегральных уравнений. Интегральные уравнения для идеально проводящего тела. Базисные и тестовые функции. RWG функции. Метод Галеркина и его особенности.
14. Особенности решения внешних задач электродинамики методами интегральных уравнений и конечных элементов, поверхность излучения и идеально согласованный слой.
15. Декомпозиция сложного СВЧ устройства на элементарные многополюсники. Условия корректной декомпозиции. Одномодовая и обобщенная матрицы рассеяния. Анализ каскадно соединенных четырехполюсников.
16. Собственные волны волноводов и их свойства. Задача Штурма-Лиувилля. Обобщенные волны в волноводах и линиях передачи. Определение матрицы рассеяния. Сдвиг отсчетных плоскостей (de-embedding).
17. Поведение поля в дальней зоне. Параметры, описывающие поляризационные характеристики поля излучения. Виды поляризаций, понятие поляризационного базиса.

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 балла - 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 балла - 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 балла - 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 балл - 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

Оценка за семестр выставляется по результатам устного дифференцированного зачета, проводимого в конце семестра. Опрос студента не должен превышать 40 минут.