

**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: Электронная оптика интенсивных пучков в приборах 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: 7 (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: А.В. Коннов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры вакуумной электроники 29.05.2020

Аннотация

Курс посвящен методам расчета электронных пушек и фокусирующих систем, электронных пучков с высокими значениями перванса.

Задачи дисциплины:

Ознакомление студентов с основными понятиями электронной оптики интенсивных электронных пучков и параксиальными методами расчета сходящихся электронных потоков в магнитных фокусирующих полях

В результате освоения данной дисциплины студенты должны знать:

основные понятия электронной оптики интенсивных пучков и типы электронных пушек.

Уметь:

по техническому заданию на пучок рассчитать геометрию электронной пушки и подтвердить эти расчеты численным моделированием.

Владеть:

параксиальным методом анализа интенсивных электронных пучков

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Предмет электронной оптики
2. Фокусирующие свойства электрических и магнитных полей
3. Система уравнений пучка в аксиально-симметричном магнитном поле
4. Пушка Пирса с прямолинейным пучком
5. Сходящиеся электронные пучки
6. Фокусирующие магнитные системы
7. Согласование параметров пушки и магнитной фокусирующей системы.
8. МПФС
9. Контур пучка в МПФС. Уравнение Матье.
10. Коллектор электронов
11. Влияние тепловых скоростей электронов на формирование пучка
12. Многолучевые пучки и пушки
13. Численные методы моделирования электронно-оптических систем.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- обучить студентов методам расчета электронных пушек и фокусирующих систем, электронных пучков с высокими значениями перванса.

Задачи дисциплины

- ознакомление студентов с основными понятиями электронной оптики интенсивных электронных пучков и параксиальными методами расчета сходящихся электронных потоков в магнитных фокусирующих полях.

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-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики

предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	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 понятия электронной оптики интенсивных пучков и типы электронных пушек.

уметь:

- по техническому заданию на пучок рассчитать геометрию электронной пушки и подтвердить эти расчеты численным моделированием.

владеть:

- параксиальным методом анализа интенсивных электронных пучков.

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	Предмет электронной оптики	2			5
2	Фокусирующие свойства электрических и магнитных полей	2			5
3	Бриллюэновский поток	2			5
4	Пушка Пирса с прямолинейным пучком	2			4
5	Сходящиеся электронные пучки	2			4
6	Фокусирующие магнитные системы	4			5
7	Согласование параметров пушки с магнитным полем	4			5
8	МПФС	2			5
9	Коллектор электронов	2			5
10	Влияние тепловых скоростей электронов	2			5
11	Многочувствительные пушки	2			5
12	Фазовый объем пучка	2			5
13	Численные методы моделирования электронно-оптических систем	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: 7 (Осенний)

1. Предмет электронной оптики

Предмет электронной оптики: фокусировка и сопровождение. Аналогии и различия между оптикой света и оптикой электронов. Интенсивные электронные пучки. Первеанс. Схема и состав однолучевой электронно-оптической системы СВЧ прибора.

Длина волны Де-Бройля электрона и среднее расстояние между электронами в плотных пучках. Отсутствие необходимости квантово-механического описания. Релятивистские уравнения движения электрона в статических электрических и магнитных полях. Потенциалы реальных пучков в мощной СВЧ электронике пучков, отношение v/c . Когда необходимо учитывать релятивизм?

Виды электронных пучков: аксиально-симметричные сплошные и полые, пучки прямоугольного и эллиптического сечения, многолучевые пучки - области их применения. Основные характеристики электронного пучка.

Решение нерелятивистского уравнения движения электрона без учета полей пространственного заряда в статических электрических и магнитных полях. Примеры траекторий.

2. Фокусирующие свойства электрических и магнитных полей

Фокусирующие свойства электрических и магнитных полей. Некоторые примеры.

Параксиальные аксиально-симметричные пучки. Параксиальное приближение для компонент аксиально-симметричных электрических и магнитных полей.

Уравнения движения в цилиндрической системе координат.

Пространственный заряд в цилиндрических пучках. Контур пучка в трубе дрейфа. Влияние начальных условий. Кроссовер. Универсальная кривая расширения пучка под действием сил пространственного заряда.

Провисание потенциала в цилиндрических пучках.

Предельный ток в цилиндрической трубе с заданным отношением диаметра к длине.

3. Бриллюэновский поток

Электронный пучок в однородном магнитном поле. Система уравнений. Теорема Буша. Угловая скорость электрона. Уравнение контура пучка в магнитном поле. Степень экранировки катода.

Пучок постоянного диаметра. Пульсации пучка: амплитуда и длина волны пульсаций.

Бриллюэновский поток. Небриллюэновский равновесный поток.

4. Пушка Пирса с прямолинейным пучком

Пушка Пирса с прямолинейным пучком. Распределение потенциалов.

Форма фокусирующих электродов в практических конструкциях.

Анод как рассеивающая линза. Влияние диаметра отверстия. Первеанс пушки Пирса – свойство только геометрии пушки (отношения радиуса катода к расстоянию до анода)

Пушка Пирса с прямолинейным потоком в однородном магнитном поле.

Пример расчета фокусирующего магнитного поля.

Недостатки пушки Пирса с прямолинейным потоком. Область их применения.

5. Сходящиеся электронные пучки

Сходящиеся электронные пучки – их преимущества Компрессия пучка: по площади и линейная компрессия. Характерные величины компрессий пучков в реальных конструкциях пушки в зависимости от первеанса пучка.

Пушка Пирса сферического типа, формирующая сходящийся поток. Полный ток сферической пушки. Функция Лэнгмюра.

Электронный конический пучок, формируемый частью сферической поверхности. Пушка Пирса. Формы реальных электродов. Влияние отверстия в аноде.

Электронные пушки со сходящимися электронными пучками с высоким микропервеансом (> 1). Аберрации.

Практическая конструкция электронной пушки с напряжением до 10 кВ. Состав и материалы конструкции. Армирование пушек

6. Фокусирующие магнитные системы

Фокусирующие магнитные системы: соленоиды, однополярные постоянные магниты, реверсные магнитные системы на постоянных магнитах.

Магнитное поле соленоида. Влияние магнитного экрана (полюсного наконечника). Галетная конструкция. Тепловые потери в соленоидах.

В-кривые железных магнитных экранов. Влияние отверстий в экранах.

Магнитное поле постоянных магнитов: “подкова”, кольцевой магнит с продольно намагниченностью, кольцевой магнит с радиальной намагниченностью.

Магнитное поле в реверсных магнитных системах на постоянных магнитах

7. Согласование параметров пушки с магнитным полем

Согласование параметров пушки и магнитной фокусирующей системы.

Расчет “против течения”. Упрощенный расчет.

8. МПФС

Область применения МПФС. Поле отдельной ячейки МПФС. МПФС совмещенного и несовмещенного типов. Фокусирующее действие периодического магнитного поля.

Контур пучка в МПФС. Уравнение Матвея. Контур пучка в МПФС. Зоны устойчивости (решение уравнения Матвея). Зависимость токопрохождения от анодного напряжения. Трубчатые электронные пучки. Пушки магнетронного типа.

9. Коллектор электронов

Коллектор электронов. Тепловой режим и предельные удельные тепловые нагрузки.

Конструкции коллекторов. Система охлаждения. Расход охлаждающей жидкости. Обеспечение отсутствия локальных перегревов. Коллектор в статическом режиме. Коллекторы с рекуперацией энергии.

10. Влияние тепловых скоростей электронов

Влияние тепловых скоростей электронов на формирование пучка.

Перераспределение плотности тока в сходящихся пучка (влияние тепловых скоростей и крайних траекторий).

Распределение плотности тока по сечению пучка на катоде и в области пушки в практических конструкциях.

11. Многолучевые пушки

Многолучевые пушки – особенности конструкции. Фокусировка многолучевых потоков в реверсных магнитных полях.

12. Фазовый объем пучка

Теорема Лиувилля. Сохранение фазового объема. Эммитанс электронного пучка.

13. Численные методы моделирования электронно-оптических систем

Численные методы моделирования самосогласованных полей и пучков в пушках. Примеры моделирования в трехмерных пакетах программ. Влияние дискретности моделей.

Сопоставление численного и параксиального методов расчета.

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

учебная аудитория, снабженная проектором и экраном, доской.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

Литература выдается студентам на кафедре.

1. Алямовский И.В. “Электронные пучки и электронные пушки. М: Советское Радио, 1966
2. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки, М.: Энергоатомиздат, 1991

Дополнительная литература

Литература выдается студентам на кафедре.

1. Сушков А.Д. Вакуумная электроника, СПб.: Лань, 2004

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:	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: 7 (осенний) - 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-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
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 «Электронная оптика интенсивных пучков в приборах СВЧ» обучающийся должен:

знать:

- основные понятия электронной оптики интенсивных пучков и типы электронных пушек.

уметь:

- по техническому заданию на пучок рассчитать геометрию электронной пушки и подтвердить эти расчеты численным моделированием.

владеть:

- параксиальным методом анализа интенсивных электронных пучков.

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

В целях текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос студентов по теме предыдущего занятия.

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

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Конструкции электронно-оптических и электродинамических систем современных мощных электровакуумных приборов.
2. Современные системы фокусировки электронного пучка в мощных приборах.
3. Использование фокусирующих магнитных систем на постоянных магнитах для транспортировки электронного пучка.
4. Проектирование фокусирующей магнитной системы на кольцевых магнитах с униполярным фокусирующим магнитным полем.
5. Расчет величины фокусирующего поля Бриллюэна для транспортировки пучка в многолучевом клистроне.
6. Внутренняя и внешняя задачи синтеза электронного пучка.
7. Вывод параксиального уравнения внутренней задачи синтеза электронного пучка в криволинейных ортогональных координатах.
8. Вывод уравнения внешней задачи синтеза электронного пучка в параксиальном приближении.

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

Опрос на дифференцированном зачете проводится после подготовки студента в течение не менее 40 минут.