

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН)**

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора по научной работе

_____ М.Ю. Глявин

« ____ » _____ 20__ г.

Рабочая программа дисциплины

Высокочастотная релятивистская электроника

Уровень высшего образования
Подготовка кадров высшей квалификации

Направление подготовки / специальность
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность образовательной программы
01.04.03 Радиофизика

Квалификация (степень)
Исследователь. Преподаватель-исследователь.

Форма обучения
очная

Нижний Новгород

20__

1. Место и цели дисциплины в структуре образовательной программы (ОП)

Дисциплина «Высокочастотная релятивистская электроника» относится к числу профильных дисциплин вариативной части образовательной программы, является дисциплиной по выбору аспиранта, преподается на втором году обучения в четвертом семестре.

Освоение дисциплины опирается на знания, умения, навыки и компетенции, сформированные на двух предшествующих уровнях образования. В частности, на знания, умения и навыки, полученные в ходе освоения таких дисциплин, как «Теория колебаний и волн», «Электродинамика», «Электромагнитные волны», «Вакуумная электроника» и т.п.

Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у аспирантов современного представления об основных способах формирования и транспортировки интенсивных электронных пучков и явлениях и эффектах в них, а также о принципах генерации на их основе мощного электромагнитного излучения СВЧ диапазона в таких устройствах как гиротроны, черенковские приборы типа ЛБВ и ЛОВ, лазеры и мазеры на свободных электронах и др.;
- формирование у аспирантов профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» и направленностью подготовки 01.04.03 «Радиофизика»

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Таблица 1:

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код и этап формируемой компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2 <i>способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и инновационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта</i> (этап освоения – базовый)	<i>З1 (ПК-2) Знать основные явления и эффекты, возникающих в системах формирования и транспортировки интенсивных электронных пучков, принципы и особенности генерации мощного высокочастотного излучения релятивистскими пучками</i> <i>У1 (ПК-2) Уметь пользоваться основными подходами для расчета релятивистских электронных пушек, релятивистских высокочастотных генераторов и усилителей</i> <i>В1 (ПК-2) Владеть навыками решения задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях по теории формирования интенсивных электронных потоков и генерации мощного СВЧ излучения</i>
ПК-3 <i>способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)</i> (этап освоения – базовый)	<i>З1 (ПК-3) Знать основные разделы теории релятивистской высокочастотной электроники, необходимые для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач.</i> <i>У1 (ПК-3) Уметь применять полученные в области электроники знания для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач.</i> <i>В1 (ПК-3) Владеть навыками решения практических задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.</i>

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 38 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, в т.ч. мероприятия текущего контроля успеваемости, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 70 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2:

Структура дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Введение	10	4		4	6
Сильноточные ускорители электронов	12	4		4	8
Интенсивные пучки релятивистских электронов	12	4		4	8
Принципы генерации высокочастотного излучения интенсивными потоками релятивистскими электронами	12	4		4	8
Черенковские релятивистские СВЧ приборы	12	4		4	8
СВЧ приборы, основанные на циклотронном механизме индуцированного излучения электронных потоков	12	4		4	8
СВЧ приборы, основанные на ондуляторном индуцированном излучении электронных потоков и вынужденном рассеянии волн	12	4		4	8
Принципы организации обратной связи и селекции мод	12	4		4	8
Нестационарные процессы в электронных релятивистских генераторах	12	4		4	8
в т.ч. текущий контроль			4		
Аттестация по дисциплине – зачет	2			2	
Итого		108			

Содержание разделов дисциплины

Раздел 1. Введение

Предмет и задачи курса. Основные этапы развития электроники, современное состояние высокочастотной релятивистской электроники. Типичная блок-схема мощного вакуумного электронного прибора СВЧ. Разделы курса.

Раздел 2. Сильноточные ускорители электронов

- 2.1. История создания сильноточных ускорителей и физические основы их работы.
- 2.2. Компоновка сильноточного ускорителя. Электрические и магнитные накопители энергии на сосредоточенных элементах.
- 2.3. Накопители энергии на распределенных элементах. Волновые трансформаторы.

Раздел 3. Интенсивные пучки релятивистских электронов

- 3.1. Взрывная электронная эмиссия. Типы сильноточных электронных инжекторов. Релятивистское обобщение закона Чайлда-Ленгмюра.
- 3.2. Коаксиальный диод с магнитной изоляцией. Предельный ток транспортировки.
- 3.3. Неустойчивости пучков заряженных частиц в вакуумных каналах.

Раздел 4. Принципы генерации высокочастотного излучения интенсивными потоками релятивистскими электронами

- 4.1. Спонтанное и индуцированное излучение. Основные механизмы излучения.
- 4.2. Классификация электронных приборов по элементарным механизмам излучения и их основные свойства. Классификация электронных приборов по механизмам группировки частиц - приборы с инерционной и силовой группировкой и их основные свойства.

Раздел 5. СВЧ приборы, основанные на черенковском механизме индуцированного излучения электронных потоков

- 5.1. Основные типы черенковских приборов (ЛБВ, ЛОВ, оротрон, клистрон магнетрон). Самосогласованные системы уравнений ЛБВ, ЛОВ и анализ дисперсионного уравнения. Взаимодействие с быстрыми и медленными волнами пространственного заряда, конвективная и абсолютная неустойчивость.
- 5.2. Электродинамические системы черенковских СВЧ приборов с релятивистскими электронными пучками. Общие требования. Пространственно-периодические и импедансные замедляющие электродинамические системы..

Раздел 6. СВЧ приборы, основанные на циклотронном механизме индуцированного излучения электронных потоков.

- 6.1. Релятивистские мазеры на циклотронном резонансе (МЦР), основные типы МЦР (гиротроны, giro ЛОВ giro-ЛБВ). Нормальный и аномальный эффект Доплера. Азимутальная и продольная группировка.
- 6.2. Оценки параметров МЦР на основе качественного анализа механизмов группировки электронов и отбора поперечной и продольной энергии. Самосогласованные системы уравнений МЦР, анализ дисперсионного уравнения.
- 6.3. Эффект авторезонанса и особенности работы МЦР в режимах, близких к авторезонансу.

Раздел 7. СВЧ приборы, основанные на ондуляторном индуцированном излучении электронных потоков и вынужденном рассеянии волн.

- 7.1. Доплеровское преобразование частоты излучения релятивистской частицы, Лазеры и мазеры на свободных электронах (ЛСЭ и МСЭ). Усредненные уравнения движения релятивистских частиц в поле двух разночастотных волн. Усредненная ponderomotorная сила.
- 7.2. Самосогласованные системы уравнений. Линейная и нелинейная теория ЛСЭ. Рамановский и комптоновский режимы рассеяния.

Раздел 8. Принципы организации обратной связи и селекции мод

Конвективная и абсолютная неустойчивость. Нелинейная теория резонансных генераторов (генераторов с внешними резонаторами) и генераторов типа ЛОВ. Методы электронной и

электродинамической селекции мод в генераторах со сверхразмерными электродинамическими системами.

Раздел 9. Нестационарные процессы в электронных релятивистских генераторах

9.1. Методы описания нестационарных процессов с основных типах электронных генераторов. Механизмы перехода к автомодуляционным режимам генерации в ЛОВ. Конкуренции мод в резонансных генераторах.

9.2. Эффекты сверхизлучения при индуцированном излучении протяженных электронных сгустков. Особенности усиления ультракоротких электромагнитных импульсов. Солитоны и эффекты самоиндуцированной прозрачности.

4. Образовательные технологии

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Высокочастотная релятивистская электроника» являются занятия лекционного типа с применением технологий интерактивного обучения (презентаций), проблемный метод изложения материала, диалоговая форма проведения занятий и самостоятельная работа аспиранта.

5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Используются следующие виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки ИПФ РАН, в компьютерном классе с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе аудиторных занятий по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), и уровня их сформированности

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания

Для оценивания сформированности компетенций используется промежуточная аттестация в форме зачета. Зачет состоит из индивидуального собеседования и решения практических контрольных заданий. Критерии оценок выполнения задания:

Зачтено	В целом удовлетворительная подготовка, возможно с заметными, но не грубыми ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы собеседования, возможно с небольшими неточностями; допускаются негрубые ошибки при ответах на дополнительные вопросы. Полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей, возможно с не всегда полной обоснованностью выводов.
Не зачтено	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы как на теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы преподавателя, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки.

6.3. Контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

Вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Для оценки сформированности профессиональных компетенций ПК-2, ПК-3:

1. Накопители энергии и их характеристики. Электрические и магнитные накопители энергии на сосредоточенных элементах.
2. Накопители энергии на распределенных элементах. Формирование наносекундных импульсов линиями передачи.
3. Релятивистское обобщение закона Чайлда-Ленгмюра.
4. Предельный ток транспортировки в вакуумном канале.
5. Применение законов сохранения к задаче о диоде с магнитной изоляцией (Федосовское решение).
6. Магнитная фокусировка сильнооточных электронных потоков.
7. Резонанс как условие распределенного синхронного взаимодействия.
8. Оценки КПД и области оптимальных параметров, на основе анализа условий синхронизма.
9. СВЧ приборы, основанные на черенковском механизме индуцированного излучения электронных потоков (ЛБВ, ЛОВ).
10. Вывод самосогласованной системы уравнений ЛБВ
11. Генератор типа лампы обратной волны (нелинейные уравнения).
12. СВЧ приборы, основанные на циклотронном механизме индуцированного излучения электронных потоков (МЦР, гиротрон).
13. Уравнения движения частиц в гиротроне (уравнение неизохронного осциллятора).
14. Нормальный и аномальный эффект Доплера.
15. Линейная теория МЦР (дисперсионное уравнение и его анализ).
16. Эффект авторезонанса при движении частиц в однородном магнитном поле.
17. Генераторы, основанные на ондуляторном механизме индуцированного излучения электронных потоков и вынужденном рассеянии волн (лазеры на свободных электронах).
18. Усредненная пондермоторная сила. Вывод нелинейных уравнений ЛСЭ
19. Высокочастотный пространственный заряд (режимы взаимодействия на волнах пространственного заряда и частицах).
20. Абсолютная и конвективная неустойчивость. Основные типы электронных генераторов и усилителей.
21. Резонансный генератор (нелинейные уравнения одномодового режима генерации, стартовые токи).
22. Генерация ультракоротких импульсов на основе эффектов сверхизлучения.
23. Солитоны и эффекты самоиндуцированной прозрачности при распространении электромагнитных импульсов в магнитоуправляемых электронных потоках

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Гиротроны. Сб. научных трудов. Под ред. А.В.Гапонова-Грехова. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. – 15 экз.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т.7: Электродинамика сплошных сред – 4 экз.

б) дополнительная литература:

1. Миллер Р. Введение в физику сильнооточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984. 432с. – 2 экз.

2. Гильденбург В.Б., Миллер М.А. Сборник задач по электродинамике: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по физическим направлениям и специальностям. <http://www.iapas.ru/biblio/ed.html>
3. Электронные приборы сверхвысоких частот. Уч.пособие под ред. В.М.Шевчика и М.А.Григорьева. Изд. СГУ. Саратов: 1980. – 1 экз.
4. Л.А. Вайнштейн, В. А Солнцев Лекции по сверхвысокоочастотной электронике. М.: «Сов. радио», 1973. -1 экз.

в) интернет-ресурсы:

1. Сборники «Релятивистская высокочастотная электроника». Виртуальная библиотека ИПФ РАН <http://www.iapas.ru/biblio/b1r.html>
2. <https://elibrary.ru>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*);
- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, направленность 01.04.03 Радиофизика.

Автор _____ Э.Б. Абубакиров

Ответственный за направление подготовки _____ Вл.В. Кочаровский

Рецензент _____

Программа принята на заседании Ученого совета Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН, протокол № ____ от _____ года.

Ученый секретарь ОФПиЭБМ _____ О.С. Моченева

Программа принята на заседании Ученого совета отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН, протокол № ____ от _____ года.

Ученый секретарь ОГИиЦГ _____ М.В. Шаталина

Программа принята на заседании Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, протокол № ____ от _____ года.

Ученый секретарь ОНДиО _____ А.В. Коржиманов

Приложение 1

Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина

ПК-2: Способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать основные явления и эффекты, возникающих в системах формирования и транспортировки интенсивных электронных пучков, принципы и особенности генерации мощного высокочастотного излучения релятивистскими пучками	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь пользоваться основными подходами для расчета релятивистских электронных пучек, релятивистских высокочастотных генераторов и усилителей	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть навыками решения задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях по теории формирования интенсивных электронных потоков и генерации мощного СВЧ излучения	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %

ПК-3: Способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)

Индикаторы компетенций	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать основные разделы теории релятивистской высокочастотной электроники, необходимые для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач.	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь применять полученные в области электроники знания для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач.	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть навыками решения практических задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %