

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан физического факультета



С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика пучков заряженных частиц

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная физика»

Форма обучения
Очная


Квалификация
Бакалавр

Год приема
2021

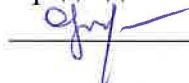
Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.03.04

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК-2. Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;
- ПК-1. Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

- ИОПК-2.2. Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования
- ИПК 1.1 Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

2. Задачи освоения дисциплины

Формирование у слушателя целостных представлений о физических основах получения, транспортировки, применений сильноточных пучков заряженных частиц.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Семестр 6, дифференцированный зачет.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Общая физика, классическая механика, классическая электродинамика, математический анализ, методы математической физики.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часа, из которых:

- лекции: 32 ч.;
- практические занятия: 32 ч.;
- в том числе практическая подготовка: 32 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Введение в дисциплину.

Электронные пучки в импульсной энергетике и сильноточной электронике.

Тема 2. Движение заряженных частиц.

Уравнения электромагнитного поля и уравнения движения заряженной частицы. Симметрии электромагнитного поля и законы сохранения. Движение заряженной частицы в постоянных однородных полях. Движение заряженной частицы в слабо

неоднородном магнитостатическом поле. Транспортировка сильноточного пучка магнитным полем.

Тема 3. Вакуумные электронные диоды.

Формирование сильноточных электронных пучков. Виды вакуумных диодов. Плоский вакуумный диод. Ток в сильноточных диодах с дискретной поверхностью эмиссии. Соотношение электрических и магнитных сил в диоде. Зарядовая и токовая нейтрализация пучков. Ток Альфвена.

Тема 4. Транспортировка сильноточных пучков.

Токопрохождение в плоском эквипотенциальном промежутке. Релаксационные колебания объемного заряда. Предельный ток транспортировки трубчатого электронного пучка в однородной круглой трубе дрейфа.

Тема 5. Диоды и линии с магнитной изоляцией. Волны объемного заряда.

Ток коаксиального диода с магнитной изоляцией. Магнитная изоляция и магнитная самоизоляция. Волны объемного заряда в электронном потоке.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится посредством тестирования и самостоятельного решения задач.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет с оценкой в 6 семестре проводится в письменной форме по экзаменационным билетам.

Результаты зачета определяются оценкой «зачтено» исходя из результатов ответов на зачете. Слушатель допускается к зачету после успешного выполнения всех промежуточных заданий курса.

Экзаменационный билет состоит из двух частей.

Первая часть представляет собой тест из 2-х основных вопросов, проверяющих сформированность компетенции ОПК 1 в соответствии с индикатором ИОПК 1.1. Ответы даются в развернутой форме, включая практические задачи.

Вторая часть содержит 2 дополнительных вопроса из списка контрольных вопросов по курсу, проверяющих соответствие индикатору достижения компетенции ИОПК 1.1. Ответ на вопрос второй части дается в краткой форме.

11. Учебно-методическое обеспечение

Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=24834>

Перечень вопросов, выносимых на зачет.

1. Записать систему уравнений Максвелла в вакууме.
2. Записать уравнение Пуассона для электростатического потенциала.
3. Записать уравнение непрерывности тока.
4. Записать выражение для компонент скорости частицы в цилиндрической системе координат.
5. Как преобразуются величины электрического и магнитного поля при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую?
6. Движение заряженной частицы описывается в цилиндрической системе координат. Как ведут себя единичные вектора при смещении заряженной частицы?
7. Записать уравнения Эйлера—Лагранжа:
8. Что такое интеграл движения?

9. Какая величина сохраняется при движении заряженной частицы в электромагнитном поле, обладающем симметрией сдвига?
10. Что является интегралом движения при движении заряженной частицы в осесимметричном электромагнитном поле?
11. Какая величина сохраняется при движении заряженной частицы в постоянном электромагнитном поле?
12. Как частица движется в однородном постоянном электрическом поле?
13. Записать выражение для частоты циклотронного вращения частицы в релятивистском случае.
14. Чему равна величина дрейфовой скорости при движении в скрещенных полях?
15. Что представляет собой нерелятивистское движение заряженной частицы в скрещенных полях при условии ?
16. Какое магнитное поле мы называем слабо неоднородным (применительно к движению в нем заряженной частицы)?
17. Записать выражения для адиабатического инварианта в общем виде.
18. Записать величину адиабатического инварианта при движении заряженной частицы в слабо неоднородном магнитостатическом поле (с точностью до постоянного коэффициента)
19. Что такое магнитная пробка и магнитная ловушка, на чем основано их действие?
20. Каковы величины собственных электрического и магнитного полей на внешней границе осесимметричного электронного пучка радиуса R с током I и продольной скоростью частиц v ?
21. Записать условие транспортировки сплошного однородного пучка электронов с релятивистским фактором g однородным магнитным полем
22. Если амплитуда периодического магнитного поля равна H , то какова его эффективная величина с точки зрения транспортировки пучка заряженных частиц?
23. Что такое параметрический резонанс? При каких условиях при транспортировке электронного пучка пространственно-периодическим магнитным полем в пучке возможна параметрическая резонансная раскачка поперечных колебаний?
24. Записать выражение для баунс-частоты.
25. Что такое ондулятор, для чего он используется?
26. Достоинства и недостатки транспортировки пучков пространственно-периодическим полем.
27. Что такое взрывная эмиссия электронов, каков ее механизм, в чем принципиальное отличие от других видов эмиссии?
28. Чем определяется максимальная плотность электронного тока, которая может быть извлечена из плазмы?
29. Основные виды сильноточных диодов, их особенности, области применения.
30. Какие поля играют важнейшую роль в формировании электронного пучка в КДМИ?
31. Какие поля играют важнейшую роль в формировании электронного пучка в род-пинч диоде?
32. Сформулировать допущения одномерной стационарной модели плоского вакуумного диода.
33. Какие уравнения, с какими граничными условиями решаются в этой модели?
34. Записать выражение для плотности тока в нерелятивистском плоском диоде.
35. Записать выражение для плотности тока в ультрарелятивистском плоском диоде.
36. Почему в нерелятивистском случае плотность тока плоского диода пропорциональна напряжению в степени $3/2$, а в ультрарелятивистском случае — напряжению в первой степени?
37. Какие существуют причины для изменения тока вакуумного диода во времени при постоянном напряжении?
38. Какова характерная скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы?

39. В чем сущность перевода системы уравнений для электронного потока в вакуумном диоде в безразмерную форму? Что достигается таким переводом?
40. Записать выражения для токового форм-фактора сильноточного вакуумного диода произвольной конфигурации.
41. Что произойдет с током нерелятивистского вакуумного сильноточного диода если все его размеры увеличить в k раз?
42. Записать выражения для тока планарного диода с зазором D , полусферическим эмиттером радиуса $R \ll D$ на катоде и приложенным напряжением U . В каком диапазоне ускоряющих напряжений оно справедливо и почему?
43. Какого типа взрывоэмиссионный катод наиболее целесообразно использовать в вакуумном диоде для получения электронного пучка с постоянным током в наносекундном диапазоне времени? Чем обеспечивается постоянство тока?
44. В каких случаях в нерелятивистском вакуумном диоде необходимо учитывать влияние собственного магнитного поля тока на движение электронов?
45. В каких случаях в релятивистском вакуумном диоде можно пренебречь влиянием собственного магнитного поля тока на движение электронов?
46. Что такое нейтрализация пучка по заряду? По току? Чем они достигаются? Что такое бессилового дрейф?
47. Что такое критический ток Альфвена, от чего зависит его величина, какова физическая причина существования этого критического тока?
48. Какие уравнения, с какими граничными условиями решаются в одномерной стационарной модели токопрохождения через плоский эквипотенциальный промежуток?
49. Что такое первый и второй критические токи?
50. Что такое виртуальный катод?
51. В чем заключается явление гистерезиса при токопрохождении в плоском эквипотенциальном промежутке?
52. Как изменяется положение виртуального катода в плоском эквипотенциальном промежутке при неограниченном увеличении тока инжекции?
53. Как ведет себя величина проходящего тока в плоском эквипотенциальном промежутке при неограниченном увеличении тока инжекции?
54. Что такое релаксационные колебания?
55. Чем определяется частота релаксационных колебаний, возникающих в процессе установления тока в нерелятивистском плоском диоде?
56. Как зависит частота релаксационных колебаний для потока отраженных электронов при большой надкритичности тока инжекции от величины последнего?
57. Как влияет разброс электронов по энергии инжекции на амплитуду автоколебаний виртуального катода в одномерной модели?
58. Сохранение каких физических величин используется при определении предельной величины тока транспортировки пучка в канале дрейфа? Сформулировать приближения использованной модели.
59. Чем определяется предельный ток транспортировки замагниченного трубчатого электронного пучка в однородной круглой трубе дрейфа?
60. Почему трубчатый электронный пучок с заданным током, направляемый сильным магнитным полем, может находиться в однородном канале транспортировки в двух состояниях, различающихся скоростью частиц и плотностью заряда?
61. Записать выражение для релятивистского фактора электронов, соответствующего предельному току транспортировки.
62. Сохранением каких физических величин следует воспользоваться при решении задачи о токе коаксиального диода с магнитной изоляцией? Сформулировать допущения использованной модели.

63. Почему поток обобщенного импульса через кромку катода в рассмотренной нами модели КДМИ равен нулю?
64. Записать выражение для релятивистского фактора электронов пучка, сформированного в КДМИ.
65. Как соотносится ток Федосова с предельным током транспортировки при заданных радиусах электронного пучка (катода КДМИ) и трубы дрейфа (анода КДМИ)?
66. Что такое магнитная изоляция? Чем она достигается?
67. Что такое изолирующий ток, от чего он зависит?
68. Как соотносится изолирующий ток линии с ее током зарядки?
69. Записать выражение для скорости движения фронта магнитной самоизоляции.
70. Записать выражение для критического тока изоляции линии в одноэлектронном приближении.
71. Сформулировать допущения одномерной модели волн объемного заряда. Какие уравнения и каким методом решаются в этой модели?
72. Записать выражение для фазовой скорости медленной и быстрой волн объемного заряда.
73. Записать выражение для групповой скорости медленной и быстрой волн объемного заряда.
74. К какому типу волн принадлежат волны объемного заряда?

Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к зачету.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

Основная:

1. Кирштейн П, Кайно Г., Уотерс У. Формирование электронных пучков. – М., Мир, 1979.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. I. Механика. М.: Наука, 1988. – 215 с.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. М.: Наука, 1988. – 509 с.
4. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М. Мир, 1980.
5. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. – М.: Мир, 1984. – 431 с.
6. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
7. Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1981. – 164 с.

Дополнительная:

8. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Советское радио, 1966. – 466 с.

9. Беломытцев С. Я., Коровин С. Д., Пегель И. В. Ток в сильноточном планарном диоде с дискретной эмиссионной поверхностью // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. – В. 6. – С. 97—101.
10. Беломытцев С. Я., Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Федосов А. И. Характеристики электронного пучка, формируемого в диоде с магнитной изоляцией // Физика плазмы. – 1981. – Т. 7. – В. 1. – С. 86—90.
11. Бугаев С. П., Зайцев Н. И., Ким А. А., Кошелев В. И., Федосов А. И., Фукс М. И. Процессы в диодах с магнитной изоляцией, использующих взрывную эмиссию электронов / в кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. В. 2. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. – Горький: ИПФ АН СССР, 1981. – С. 37.
12. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
13. Гвоздовер З. Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. – М: Гостехтеориздат, 1956. – 527 с.
14. Генерирование длинноимпульсных сильноточных электронных пучков/ Василевский М.А., Ройфе И.М., Энгелько В.И. – В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 3. – Горький: ИПФ АН СССР, 1983, с. 184—203.
15. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение, Атомиздат, 1977.
16. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1966. – 564 с.
17. Кузелев М. В., Рухадзе А. А., Стрелков П. С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника / Под ред. А. А. Рухадзе. – Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 543 с.
18. Мейлинг В. Стари Ф. Наносекундная импульсная техника. М.: Атомиздат. - 1973. – 384 с.
19. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. – 704 с.
20. Москалев В.А. Сергеев Г.И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 237 с.
21. Нечаев В. Е. Аналитическая теория формирования трубчатых электронных пучков различной толщины в сильноточных коаксиальных диодах с магнитной изоляцией // Известия вузов. Радиофизика. – 1991. – Т. 34. – № 9. – С. 1027—1039.
22. Пирс Дж. П. Теория и расчет электронных пучков. М., Сов. Радио, 1956.
23. Пространственно-временные характеристики РЭП А.Ф. Александров, С.Ю. Галузо, Н.И. Зайцев, В.И. Кошелев, П.С. Стрелков, А.В. Федотов, А.Г. Шкварунец, М.Ю. Шмелев. В.И. Энгелько. – В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 5. – Горький: ИПФ АН СССР, 1988, с. 163—182.
24. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / под ред. Г. А. Месяца. – Новосибирск: Наука, 1983. – 168 с.
25. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Том 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 496 с.
26. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Том 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 648 с.
27. Федосов А. И., Литвинов Е. А., Беломытцев С. Я., Бугаев С. П. К расчету характеристик электронного пучка, формируемого в диодах с магнитной изоляцией // Известия вузов. Физика. – 1977. – № 10. – С. 134—135.
28. Формирование сильноточных релятивистских электронных пучков для мощных генераторов и усилителей СВЧ С.П. Бугаев, В.П. Ильин, В.И. Кошелев, Г.А. Месяц, В.Е. Нечаев, Ю.П. Усов, М.И. Фукс, Б.Н. Яблоков. – В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 1. – Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 5—75.

13. Перечень информационных технологий

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX;

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

15. Информация о разработчиках

Припутнев Павел Владимирович, ассистент кафедры Физики плазмы НИ ТГУ, научный сотрудник Лаборатории нелинейных электродинамических систем ИСЭ СО РАН.