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

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

Физика пучков заряженных частиц

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения

Очная

Квалификация

Бакалавр

Год приема

2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

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. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

- Тестирование
- Реферат

1. Тестирование (ИОПК 2.2)

Примеры вопросов теста

Вопрос: При движении заряженной частицы в постоянном электромагнитном поле сохраняется

- (А) Обобщенная энергия частицы.
- (Б) Сумма кинетической энергии и потенциальной энергии частицы.
- (В) Потенциальная энергия частицы.
- (Г) Работа, совершаемая над частицей электрическим полем.

Ключ: (Б) Сумма кинетической энергии и потенциальной энергии частицы.

Вопрос: При каких условиях при транспортировке электронного пучка пространственно-периодическим магнитным полем в пучке возможна параметрическая резонансная раскачка поперечных колебаний?

- (А) При кратности баунс-частоты эффективной величине циклотронной частоты.
- (Б) При кратности эффективной величины циклотронной частоты электронной плазменной частоте.
- (В) При кратности эффективной величины циклотронной частоты баунс-частоте.
- (Г) При кратности баунс-частоты электронной плазменной частоте.

Ключ: (В) При кратности эффективной величины циклотронной частоты баунс-частоте.

Вопрос: Волны объемного заряда являются...

- (А) продольными.
- (Б) поперечными.
- (В) гибридными.
- (Г) акустическими.

(Д) электромагнитными.
(Е) разновидностью ударных волн.
Ключ: (А) продольными.

2. Реферат (ИПК 1.1)

Студентам необходимо подготовить реферат.

Темы для реферата:

- Сильноточные электронные пучки в технологиях модификации материалов
- Сильноточные электронные пучки в технологиях стерилизации
- Применение сильноточных электронных пучков для генерации мощных импульсов СВЧ-излучения
- Применение сильноточных электронных пучков для генерации мощных импульсов рентгеновского излучения
- Применение сильноточных электронных пучков для накачки активных сред мощных импульсных газовых лазеров
- Интенсивные ионные пучки — генерация и применения
- Линии с магнитной самоизоляцией — элемент мощных импульсных генераторов
- Открытые магнитные ловушки в физике и технике термоядерной плазмы

Требования к реферату:

Объем - не менее 40 тыс. печатных знаков. Число иллюстраций - не менее 10. Число ссылок на использованные источники - не менее 10. Общий объем текста, без изменений заимствованного из цитированных источников - не более 25 % (реферат будет проверен в системе "Антиплагиат").

Реферат оценивается преподавателем по следующим критериям:

- полнота и разносторонность рассмотрения вопроса;
- число и качество использованных источников;
- изложение материала научным языком, отсутствие жаргона;
- наличие самостоятельных выводов, обобщающих сделанный обзор;
- изложение материала преимущественно своими словами (минимальный объем прямых текстовых заимствований). Отсутствие прямых заимствований без ссылки на источник.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Экзамен по дисциплине проводится в устной форме по экзаменационным билетам. Билет включает два теоретических вопроса из списка вопросов по курсу, проверяющих сформированность компетенции ПК-1 в соответствии с индикатором ИПК-1.1. Ответы даются в развернутой форме. После ответа на билет студент отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы по теме вопросов билета.

Экзаменационные билеты:

Экзаменационный билет № 1

1. Уравнения электромагнитного поля и его характеристики.
2. Волны объемного заряда в электронном потоке.

Экзаменационный билет № 2

1. Уравнение Лоренца. Уравнения движения заряженной частицы в цилиндрической системе координат.
2. Магнитная самоизоляция.

Экзаменационный билет № 3

1. Уравнения Эйлера—Лагранжа и интегралы движения.
2. Магнитная изоляция в плоском диоде.

Экзаменационный билет № 4

1. Трансляционная симметрия поля и сохранение обобщенного импульса. Постоянное поле и сохранение полной энергии.
2. Ток коаксиального диода с магнитной изоляцией.

Экзаменационный билет № 5

1. Теорема Буша.
2. Предельный ток транспортировки трубчатого электронного пучка

Экзаменационный билет № 6

1. Движение заряженной частицы в слабо неоднородном магнитостатическом поле. Адиабатический инвариант.
2. Релаксационные колебания объемного заряда. Установление тока в плоском диоде.

Экзаменационный билет № 7

1. Транспортировка осесимметричного пучка однородным магнитным полем.
2. Токопрохождение в плоском эквипотенциальном промежутке. Двухпоточный режим. Виртуальный катод.

Экзаменационный билет № 8

1. Транспортировка сильноточного пучка периодическим магнитным полем.
2. Токопрохождение в плоском эквипотенциальном промежутке. Однопоточный режим. Критические токи.

Экзаменационный билет № 9

1. Взрывная эмиссия электронов. Эмиссия электронов из плазмы.
2. Соотношение электрических и магнитных сил в вакуумном диоде.

Экзаменационный билет № 10

1. Виды сильноточных диодов, их применения.
2. Условие постоянства тока в сильноточном вакуумном диоде.

Экзаменационный билет № 11

1. Ток плоского вакуумного диода (нерелятивистский и ультрарелятивистский случаи).
2. Ток диода с малым одиночным эмиттером.

Экзаменационный билет № 12

1. Причины изменения тока сильноточных диодов во времени.
2. Зарядовая и токовая нейтрализация сильноточных пучков. Критический ток Альфвена.

Экзаменационный билет № 13

1. Соотношения подобия для электронного тока в вакуумном диоде.
2. Колебательные свойства потока с виртуальным катодом.

Оценка «отлично» ставится при правильном ответе не менее чем на 90% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «хорошо» ставится при правильном ответе не менее чем на 75% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «удовлетворительно» ставится при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «неудовлетворительно» ставится при правильном ответе менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Проверка остаточных знаний проводится с использованием дополнительных вопросов по курсу.

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 γ 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?

Информация о разработчиках

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