

**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:	Физические свойства плазмы
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики высокотемпературных процессов
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Л.М. Василяк, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высокотемпературных процессов 29.05.2020

Аннотация

Курс "Физические свойства плазмы" предусматривает изучение базовых свойств плазмы, как одного из видов агрегатного состояния вещества с дальнотермическим кулоновским взаимодействием между заряженными компонентами плазмы.

Задачи курса:

- формирование представления о плазме в природе и лаборатории, как об отдельном агрегатном состоянии, изложение базовых понятий о плазме, таких как плазменная частота, экранировка зарядов, влияние слабых кулоновских воздействий на процессы переноса в плазме;
- изучение влияния на плазму постоянных и импульсных электрических и магнитных полей;
- рассмотрение возникновения волн и неустойчивостей в плазме;
- рассмотрение примеров низкотемпературной плазмы в газовых разрядах разных типов.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

базовые понятия и законы физики плазмы (плазменная частота, электронейтральность, плазменная экранировка, неустойчивая плазма, амбиполярная диффузия, кулоновское рассеяние, уравнение Саха, расходимость статистической суммы и методы ее ограничения, проводимость плазмы);

порядки численных величин, характерные для различных плазменных объектов;

направленное и хаотическое движение частиц в плазме, потери импульса при взаимодействии с нейтральными и заряженными частицами;

основные каналы рождения и гибели заряженных частиц;

основные виды волн и неустойчивостей в плазме;

электрический пробой низкотемпературной плазмы в газовых разрядах разных типов.

Уметь:

производить численные оценки плазменной частоты, длины дебаевской экранировки, степени ионизации в равновесной изотермической плазме, частот рекомбинации и ионизации, длины пробега для потери начального импульса;

абстрагироваться от несущественного при моделировании физических процессов в плазме, правильно учитывать вклад основных процессов ионизации и потерь заряженных частиц;

пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач.

Владеть:

методами расчета степени ионизации в изотермической плазме на основе уравнения Саха;

методами расчета длин свободного пробега и потери импульса;

методами расчета электропроводности слабоионизованной и полностью ионизованной плазмы;

методами нахождения дисперсионных уравнений для волн и инкрементов неустойчивостей для колебаний;

навыками постановки физических задач в области физики плазмы.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Гидродинамическая модель плазмы
2. Ионизационное равновесие
3. Магнитогидродинамическая модель плазмы
4. Неустойчивости плазменного шнура и газового разряда
5. Общие сведения о плазме
6. Плазма во внешнем поле
7. Пробой при высоком давлении
8. Процессы релаксации в плазме
9. Пучковая неустойчивость и нелинейные эффекты

10. Различные механизмы пробоя в плазме. Пробой при низком давлении
11. Рекомбинация в плазме
12. Элементарные процессы в плазме

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изучение базовых свойств плазмы, как одного из видов агрегатного состояния вещества с дальнедействующим кулоновским взаимодействием между заряженными компонентами плазмы.

Задачи дисциплины

- формирование представления о плазме в природе и лаборатории, как об отдельном агрегатном состоянии, изложение базовых понятий о плазме, таких как плазменная частота, экранировка зарядов, влияние слабых кулоновских воздействий на процессы переноса в плазме;
- изучение влияния на плазму постоянных и импульсных электрических и магнитных полей;
- рассмотрение возникновения волн и неустойчивостей в плазме;
- рассмотрение примеров низкотемпературной плазмы в газовых разрядах разных типов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

базовые понятия и законы физики плазмы (плазменная частота, электронейтральность, плазменная экранировка, неизотермическая плазма, амбиполярная диффузия, кулоновское рассеяние, уравнение Саха, расходимость статистической суммы и методы ее ограничения, проводимость плазмы);

порядки численных величин, характерные для различных плазменных объектов;

направленное и хаотическое движение частиц в плазме, потери импульса при взаимодействии с нейтральными и заряженными частицами;

основные каналы рождения и гибели заряженных частиц;

основные виды волн и неустойчивостей в плазме;

электрический пробой низкотемпературной плазмы в газовых разрядах разных типов.

уметь:

производить численные оценки плазменной частоты, длины дебаевской экранировки, степени ионизации в равновесной изотермической плазме, частот рекомбинации и ионизации, длины пробега для потери начального импульса;

абстрагироваться от несущественного при моделировании физических процессов в плазме, правильно учитывать вклад основных процессов ионизации и потерь заряженных частиц;

пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач.

владеть:

методами расчета степени ионизации в изотермической плазме на основе уравнения Саха;
 методами расчета длин свободного пробега и потери импульса;
 методами расчета электропроводности слабоионизованной и полностью ионизованной плазмы;
 методами нахождения дисперсионных уравнений для волн и инкрементов неустойчивостей для колебаний;
 навыками постановки физических задач в области физики плазмы.

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	Гидродинамическая модель плазмы	2			6
2	Ионизационное равновесие	3			6
3	Магнитогидродинамическая модель плазмы	2			6
4	Неустойчивости плазменного шнура и газового разряда	3			7
5	Общие сведения о плазме	2			6
6	Плазма во внешнем поле	3			6
7	Пробой при высоком давлении	3			6
8	Процессы релаксации в плазме	3			7
9	Пучковая неустойчивость и нелинейные эффекты	2			6
10	Различные механизмы пробоя в плазме. Пробой при низком давлении	3			6
11	Рекомбинация в плазме	2			6
12	Элементарные процессы в плазме	2			7
Итого часов		30			75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

1. Гидродинамическая модель плазмы

Два различных подхода при рассмотрении плазмы: плазма как система взаимодействующих частиц и плазма как сплошная проводящая среда. Основные модели плазмы: кинетическая и гидродинамическая. Двухжидкостная гидродинамическая модель. Примеры применения гидродинамической модели, вывод плазменных колебаний, поляризации плазмы, диэлектрической проницаемости.

2. Ионизационное равновесие

Изотермическая (равновесная) плазма. Уравнение Саха. Расходимость статистических сумм атома, методы ограничения статистических сумм в плазме. Снижение потенциала ионизации.

3. Магнитогидродинамическая модель плазмы

Плазма как проводящая жидкость. "Вмороженность" магнитного поля в плазму. Дрейф в скрещенных полях. Диффузия магнитного поля в плазме. Волновые свойства плазмы. Альфвеновские волны и магнитный звук. Прохождение поперечных электромагнитных волн через плазму, явление "отсечки".

4. Неустойчивости плазменного шнура и газового разряда

Нелинейные явления и неустойчивости в плазме. Виды неустойчивостей плазмы. Неустойчивость плазменного шнура в магнитном поле (перетяжки и изгибы), стабилизация внешним магнитным полем. Ионизационно-перегревная неустойчивость газового разряда, контракция газового разряда, методы стабилизации. Роль нелинейных явлений в плазме. Взаимодействие плазменных колебаний с электронами плазмы. Парадокс Ленгмюра, затухание Ландау.

5. Общие сведения о плазме

Введение. Понятие плазмы. Плазма в природе и лаборатории. Плазменная частота. Экранировка зарядов и дебаевская длина экранирования (Теория Дебая-Хюккеля). Идеальность плазмы, критерии неидеальности. Диаграмма состояний плазмы в различных условиях. Классификация плазмы: высоко- и низко-температурная, изотермическая, разрядная и т.д. Примеры плазмы. Генераторы плазмы.

6. Плазма во внешнем поле

Плазма во внешнем электрическом поле. Движение электронов и ионов в газе во внешних полях. Дрейф и подвижность электронов и ионов в постоянном электрическом поле. Электропроводность частично и полностью ионизованной плазмы. Средняя энергия электронов в газе, находящемся во внешнем поле. Неизотермическая плазма. Баланс энергий в плазме. Свободная и амбиполярная диффузия заряженных частиц.

7. Пробой при высоком давлении

Пробой при высоком давлении газа. Стример. Пробой длинных промежутков. Стример в длинных промежутках, лидер, искровой канал. Линейная молния. Ступенчатый и стреловидный лидер, возвратный удар, гром. Шаровая молния. Прохождение электронного пучка через вакуум, плазму и газ.

8. Процессы релаксации в плазме

Кулоновские столкновения. Кулоновский логарифм. Кулоновское сечение и частота потери направленного импульса. Время максвеллизации и выравнивания энергии в при электрон-электронных и электрон-ионных взаимодействиях.

9. Пучковая неустойчивость и нелинейные эффекты

Пучковая неустойчивость. Буннемановская (двухпотоковая) неустойчивость. Уединенные волны. Солитоны и автоволны. Уравнение Кортевега-де-Вриза. Ленгмюровский солитон в плазме. Нелинейный ионный звук. Эффект Гана.

10. Различные механизмы пробоя в плазме. Пробой при низком давлении

Ионизационное размножение, лавина. Электрический пробой газов. Таунсендовский механизм пробоя, ионизационные коэффициенты. Закон Пашена. Пробой в переменных электромагнитных полях (ВЧ и СВЧ разряды). Самостоятельные и несамостоятельные разряды. Тлеющий разряд. Дуговой разряд.

11. Рекомбинация в плазме

Парная рекомбинация положительного и отрицательного ионов. Прилипание электрона. Диссоциативная рекомбинация электрона и молекулярного иона. Тройная рекомбинация электронов и ионов. Тройная рекомбинация положительных и отрицательных ионов в газе. Кинетические уравнения образования и гибели. Уравнение диффузии.

12. Элементарные процессы в плазме

Элементарные процессы в плазме. Понятие сечения. Упругие столкновения частиц, частота упругих соударений и транспортная частота. Неупругие столкновения. Возбуждение, метастабильные частицы. Диссоциация. Резонансная перезарядка. Ионизация электронным ударом. Ионизационные процессы при столкновении атомов и молекул в основном и возбужденном состояниях, реакция Пеннинга, ассоциативная ионизация. Ступенчатая ионизация атома электронным ударом. Фотоионизация.

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

учебная аудитория, компьютеры и мультимедийное оборудование (проектор), доступ к сети Интернет.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009.
2. Фортгов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2010.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2003.
4. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. МФТИ, 1997.

Дополнительная литература

1. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980.
2. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. Курс лекций «Физика плазмы», <http://www.inp.nsk.su/chairs/plasma/sk/fpl.ru.shtml>

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: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики высокотемпературных процессов
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	Л.М. Василяк, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физические свойства плазмы» обучающийся должен:

знать:

базовые понятия и законы физики плазмы (плазменная частота, электронейтральность, плазменная экранировка, неизотермическая плазма, амбиполярная диффузия, кулоновское рассеяние, уравнение Саха, расходимость статистической суммы и методы ее ограничения, проводимость плазмы);

порядки численных величин, характерные для различных плазменных объектов;

направленное и хаотическое движение частиц в плазме, потери импульса при взаимодействии с нейтральными и заряженными частицами;

основные каналы рождения и гибели заряженных частиц;

основные виды волн и неустойчивостей в плазме;

электрический пробой низкотемпературной плазмы в газовых разрядах разных типов.

уметь:

производить численные оценки плазменной частоты, длины дебаевской экранировки, степени ионизации в равновесной изотермической плазме, частот рекомбинации и ионизации, длины пробега для потери начального импульса;

абстрагироваться от несущественного при моделировании физических процессов в плазме, правильно учитывать вклад основных процессов ионизации и потерь заряженных частиц;

пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач.

владеть:

методами расчета степени ионизации в изотермической плазме на основе уравнения Саха;

методами расчета длин свободного пробега и потери импульса;

методами расчета электропроводности слабоионизованной и полностью ионизованной плазмы;

методами нахождения дисперсионных уравнений для волн и инкрементов неустойчивостей для колебаний;

навыками постановки физических задач в области физики плазмы.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

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

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Плазма в природе и лаборатории.
2. Плазменная частота.
3. Экранировка зарядов и дебаевская длина экранирования.
4. Уравнение Саха.
5. Расходимость статистических сумм, методы ограничения статистических сумм в уравнении Саха.
6. Упругие столкновения частиц. Сечение и частота упругих соударений и передачи импульса.
7. Кулоновские столкновения.
8. Основные элементарные процессы в плазме: ионизации, рекомбинации, диффузии.
9. Образование и рекомбинация заряженных частиц в плазме.
10. Двухжидкостная гидродинамическая модель плазмы. Примеры.
11. Дрейф и подвижность электронов и ионов в постоянном электрическом поле.
12. Электропроводность частично ионизованной плазмы.
13. Электропроводность полностью ионизованной плазмы.
14. Средняя энергия электронов в газе, находящемся во внешнем поле.
15. Неизотермическая плазма. Баланс энергий в плазме.
16. Амбиполярная диффузия заряженных частиц.
17. Вмороженность магнитного поля в плазму.
18. Диффузия магнитного поля в плазме.
19. Прохождение электронного пучка через газ и плазму.
20. Ионизационное размножение, лавина. Пробой газов низкого давления.
21. Таунсендовский механизм пробоя, ионизационные коэффициенты.
22. Закон Пашена для пробоя газов.
23. Пробой газов при высоком давлении. Самоторможение лавин. Стример.
24. Стример в длинных промежутках, стримерная корона, лидер, искровой канал.
25. Молния. Шаровая молния и ее модели.
26. Пробой в высокочастотном поле. Оптический пробой.
27. Тлеющий разряд. Структура тлеющего разряда, катодный слой, положительный столб. Теория Шоттки.
28. Изотермическая (равновесная) плазма. Электрическая дуга.
29. Альфвеновские волны.
30. Ионный звук.
31. Прохождение поперечных электромагнитных волн через плазму, "отсечка".
32. Виды неустойчивостей плазмы.
33. Ионизационно-перегревная неустойчивость. Контракция газового разряда.
34. Взаимодействие плазменных колебаний с электронами плазмы. Парадокс Ленгмюра. Затухание Ландау.
35. Пучковая неустойчивость.
36. Буннемановская неустойчивость.
37. Солитоны. Уравнение Кортевега-де Вриза.
38. Ленгмюровский солитон в плазме.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Двухжидкостная гидродинамическая модель плазмы. Примеры.
2. Дрейф и подвижность электронов и ионов в постоянном электрическом поле.

Пример 2.

1. Взаимодействие плазменных колебаний с электронами плазмы. Парадокс Ленгмюра. Затухание Ландау.
2. Пучковая неустойчивость

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

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.