

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ФИЗИКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 16.03.02 Высокотехнологические плазменные и  
энергетические установки

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
8	3	108	24	36	0		48	0	3
Итого	3	108	24	36	0	0	48	0	

## АННОТАЦИЯ

Курс знакомит студентов с принципами создания лазерной плазмы при облучении в вакууме твердых мишеней лазерным излучением, основными процессами, сопровождающими образование и разлет лазерной плазмы. Уделено внимание возможностям использования лазерной плазмы для решения различных физических и технологических задач.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели дисциплины “Физика лазерной плазмы” - формирование представлений о принципах создания лазерной плазмы при облучении в вакууме твердых мишеней лазерным излучением, понимание основных процессов, сопровождающих образование и разлет лазерной плазмы. Задача курса - приобретение знаний о взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом, а также о возможностях использования лазерной плазмы для решения различных физических и технологических задач.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина базируется на курсах дисциплин по общей физике, «Теоретические основы электротехники» и "Методы и техника лазерно-физического эксперимента", "Квантовая механика". Одновременно с данным курсом студенты изучают курс "Физика плазмы и плазменные установки", который дает студентам общие представления о физике плазмы, в том числе и холодной.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
расчетно-экспериментальный с элементами научно-исследовательского			
Использование основных законов физики, оптики, лазеров и плазмы для описания и оценок параметров и	Параметры и характеристики физических объектов.	ПК-1.1 [1] - Способен использовать основные законы физики, оптики, лазеров и плазмы для описания и оценок параметров и	З-ПК-1.1[1] - Знать: основные понятия и законы физики оптики, лазеров и плазмы, основные понятия, законы и

<p>характеристик исследуемых физических объектов.</p>		<p>характеристик исследуемых физических объектов.</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>модели, используемые для описания, изучения и оценки параметров и характеристик исследуемых физических объектов ;</p> <p>У-ПК-1.1[1] - Уметь: применять основные законы физики оптики, лазеров и плазмы для описания и оценок параметров и характеристик исследуемых физических объектов ;</p> <p>В-ПК-1.1[1] - Владеть: методами получения и анализа экспериментальных данных на основе законов физики оптики, лазеров и плазмы, используемые для описания, изучения и оценки параметров и характеристик исследуемых физических объектов.</p>
<p>Эксплуатация современных приборов и установок и системы диагностики в области лазерной физики.</p>	<p>Приборы, установки и системы диагностики в области лазерной физики.</p>	<p>ПК-1.2 [1] - Способен эксплуатировать современные приборы и установки и системы диагностики в области лазерной физики.</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.002</p>	<p>З-ПК-1.2[1] - Знать: основные современные приборы и установки и диагностические системы, применяемые в лазерной физике; принципы действия современных приборов и установок и систем диагностики в области лазерной физики. ;</p> <p>У-ПК-1.2[1] - Уметь: эксплуатировать современные приборы и установки и системы диагностики в области лазерной физики; интерпретировать и оценивать результаты,</p>

			полученные с помощью современных приборов, установок и систем диагностики в области лазерной физики. ; В-ПК-1.2[1] - Владеть: навыком получения, обработки и анализа экспериментальных результатов с помощью приборов, установок и систем диагностики в области лазерной физики.
--	--	--	---

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (В17)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования чувства личной ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования социальной ответственности ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-

		исследовательские проекты.
--	--	----------------------------

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>8 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	16/18/0		25	КИ-8	3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2
2	Часть 2	9-15	8/18/0		25	КИ-15	3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2
	<i>Итого за 8 Семестр</i>		24/36/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 8 Семестр</b>				50	3	3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек.,	Пр./сем.,	Лаб.,
--------	---------------------------	-------	-----------	-------

		час.	час.	час.
	8 Семестр	24	36	0
1-8	Часть 1	16	18	0
1 - 3	<b>Основные понятия физики плазмы.</b> Плазма. Квазинейтральность плазмы. Радиус Дебая. Плазменные колебания и их частота. Экранирование внутренних и внешних электрических полей в плазме. Идеальность плазмы, вырожденность плазмы. Температура плазмы.	Всего аудиторных часов		
		6	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
4 - 6	<b>Элементарные процессы в плазме.</b> Столкновения заряженных и нейтральных частиц в плазме. Упругие, неупругие и реактивные столкновения частиц. Радиационные процессы. Сечения столкновений частиц, средняя длина свободного пробега для канала взаимодействия. Принцип детального равновесия. Константы равновесия реактивных процессов. Каналы ионизации и рекомбинации в плазме. Ионизационное равновесие в оптически толстой и тонкой плазме. Формулы Саха и Эльверта. Образование отрицательных ионов. Столкновительно-радиационная модель. Экспериментальные методы исследования рекомбинации заряженных частиц.	Всего аудиторных часов		
		6	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
7	<b>Лазерное излучение.</b> Лазер. Лазерное излучение. Свойства лазерного излучения.	Всего аудиторных часов		
		2	5	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Пробой. Лазерная искра.</b> Электрический пробой в газе. Оптический пробой в газе (лазерная искра). Лавинная ионизация.	Всего аудиторных часов		
		2	5	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	Часть 2	8	18	0
9 - 10	<b>Приповерхностная лазерная плазма.</b> Качественная картина образования приповерхностной лазерной плазмы. Плазменный факел. Обратное тормозное поглощение. Поглощение лазерного излучения веществом в различных приближениях.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	<b>Электромагнитные волны в плазме.</b> Процессы поглощения лазерного излучения для различных сред. Диэлектрическая проницаемость плазмы. Фазовая скорость. Групповая скорость. Закон дисперсии. Критическая плотность. Резонансное поглощение.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	<b>Гидродинамика лазерной плазмы.</b> Особенности гидродинамических процессов в плазме. Гидродинамика высокотемпературной плазмы. Давление разлетающейся лазерной плазмы. Ударные волны.	Всего аудиторных часов		
		2	5	0
		Онлайн		
		0	0	0
15	<b>Лазерный термоядерный синтез.</b> Энергетический выход реакции. Концепция инерциального термоядерного синтеза. Схема прямого и непрямого сжатия мишени. Понятие и неустойчивости. Надтепловые электроны. критерий Лоусона.	Всего аудиторных часов		
		2	5	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>8 Семестр</i>
1	<b>Характеристики лазерного излучения.</b> Температура лазерного излучения. Качественная картина образования и разлета лазерной плазмы (ЛП).
2	<b>Взаимодействие низких потоков лазерного излучения с веществом.</b> Лазерно-плазменный факел. Начальная стадия образования лазерно-плазменного факела. Теплопроводная стадия разлета лазерно-плазменного факела.
3	<b>Стационарная корона лазерной плазмы.</b> Сферическая стационарная корона. Модель стационарной короны с локальным энерговыделением.
4	<b>Различные представления поглощения лазерного излучения веществом.</b> Классическое представление. Квантовое представление.
5	<b>Поглощение лазерного излучения в различных средах.</b> Поглощение в металлах и полупроводниках. Обратное тормозное поглощение лазерного излучения в плазме.
6	<b>Абляция металлов ультракороткими лазерными импульсами (УКЛИ).</b> Плазменная модель. Тепловой режим абляции. Режим абляции в ударной волне. Ионизационная модель. Абляция металлов УКЛИ низкой интенсивности.
7	<b>Ионизационные свойства лазерной плазмы.</b> Модели ионизационного состояния лазерной плазмы. Применимость модели ионизационного состояния к лазерной плазме.
8	<b>Газодинамические модели многозарядной плазмы.</b> Адиабатический разлет газового шара в вакуум. Сферический разлет плазменного шара, нагреваемого лазерным излучением на поверхность плоской твердой мишени. Температура и кратности ионизации в горячей фазе факела.
9 - 10	<b>Рекомбинации в многозарядной лазерной плазме.</b> Описание процессов рекомбинации.
11 - 12	<b>Методы измерения температуры, скорости и плотности расширяющейся лазерной плазмы.</b> Зондовые измерения параметров. Экспериментальные результаты масс-спектрального анализа лазерной плазмы.
13 - 14	<b>Излучательные потери.</b> Экспериментальные методы рентгеновской диагностики лазерной плазмы. Определение электронной температуры лазерной плазмы. Пространственное распределение концентрации электронов. Форма спектра непрерывного

	рентгеновского излучения.
15 - 16	<b>Анализ экспериментальных данных по излучению лазерной плазмы.</b> Методы расчета лазерной плазмы. Излучение полностью ионизированной лазерной плазмы.

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы дисциплины предусматривается использование в учебном процессе различных образовательных технологий с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов. Аудиторные занятия предполагают применение на лекциях технических средств обучения (проектора-оверхеда, ПК и компьютерного проектора).

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1.1	З-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-15
ПК-1.2	З-ПК-1.2	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-1.2	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-1.2	З, КИ-8, КИ-15

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту,



75-84		C	если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
70-74		D	
65-69		E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64	3 – «удовлетворительно»		
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ C51 Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion : , Chen, Francis. , Cham: Springer International Publishing, 2016
2. ЭИ S96 Principles of Lasers : , Svelto, Orazio. , Boston, MA: Springer US, 2010
3. ЭИ Б 82 Лазеры: устройство и действие : , Ивакин С. В., Борейшо А. С., Санкт-Петербург: Лань, 2022

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 533 М80 Введение в плазмодинамику : , Морозов А.И., Москва: Физматлит, 2008
2. 535 Л17 Лазерная плазма : физика и применения: монография, Крохин О.Н. [и др.], М.: МИФИ, 2003
3. 533 Ф83 Лекции по физике плазмы : , Франк-Каменецкий Д.А., Долгопрудный: Интеллект, 2008

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Студентам перед началом занятий надо учесть, что курс является авторским и полноценного учебника по нему не существует. Поэтому следует аккуратно посещать лекции, перед очередной лекцией прорабатывать предыдущий материал и не стесняться задавать вопросы преподавателю. Следует учесть, что изучаемый курс опирается на многие вопросы, изучаемые в курсах: «Атомная физика» и «Методы и техника лазерного физического эксперимента». Можно обращаться к соответствующим разделам этих курсов, конспектам и рекомендованной для них литературе.

На лекции основное внимание следует уделять не формулам и математическим выкладкам, а содержанию изучаемых вопросов, определениям и постановкам задач. Перед началом занятий внимательно ознакомиться с учебным планом проведения лекций и списком рекомендованной литературы. В процессе изучения лекционного курса необходимо по возможности часто возвращаться к основным понятиям и методам. Желательно использовать конспекты лекций, в которых используется принятая преподавателем система обозначений. Следует работать с рекомендованными литературными источниками.

Изучение теоретических вопросов следует проводить по возможности самостоятельно, но при затруднениях обращаться к преподавателю. При выполнении фронтальных заданий по усмотрению преподавателя работа может быть оценена без письменного отчета на основе ответов на контрольные вопросы, при условии активной самостоятельной работы.

При изучении разделов, касающихся образованию лазерной плазмы и ее применению рекомендуется обратиться к монографии О.Б. Ананьина и др. «Лазерная плазма. Физика и применение».

Вопросы, связанные с элементарными процессами в плазме следует изучить особенно тщательно.

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

На первой лекции сделать общий обзор содержания курса. Дать перечень рекомендованной литературы и вновь появившихся литературных источников. Провести входной контроль знаний в форме устной беседы или опроса. Перед изложением текущего лекционного материала напомнить об основных итогах, достигнутых на предыдущих лекциях. С этой целью задать несколько вопросов аудитории и осуществить выборочный контроль знания студентов. Внимательно относиться к вопросам студентов и при необходимости давать дополнительные более подробные пояснения. При чтении лекций преимущественное внимание следует уделять качественным вопросам, формируя у студентов образное мышление, не следует увлекаться математическими выкладками. Активная форма проведения лекционных занятий

предполагает, в частности, что студенты самостоятельно прорабатывают отдельные разделы лекционного курса, на основе которых выполняется ряд заданий. На последней лекции делается обзор наиболее важных положений.

Особое внимание уделить качественному объяснению квазинейтральности плазмы, введению понятия Дебаевской сферы, понятию идеальности плазмы, рассмотрению лазерной плазмы как источника мягкого рентгеновского излучения, а также подробно рассмотреть вопросы, связанные с применением физики лазерной плазмы в задачах лазерного термоядерного синтеза. Этому вопросу будет посвящен целый курс лекций в следующем семестре и одна из задач текущего курса – показать связь между физикой лазерной плазмы и физическими основами лазерного термоядерного синтеза.

Автор(ы):

Вовченко Евгений Дмитриевич, к.ф.-м.н.

Степаненко Александр Александрович