

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ФИЗИКИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

ОДОБРЕНО НТС ЛАПЛАЗ

Протокол № 3

от 30.08.2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
ФИЗИКА ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Направление подготовки
(специальность)

[1] 16.04.02 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, экс./зач./КР/КП |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|---|-----------|-----------|--|
| 1 | 3 | 108 | 16 | 32 | 0 | | 24 | 0 | Э |
| Итого | 3 | 108 | 16 | 32 | 0 | 0 | 24 | 0 | |

АННОТАЦИЯ

Курс знакомит студентов с основами физики термоядерного синтеза и высокотемпературной плазмы, а также поведением вещества в экстремальных условиях. Является одним из основополагающих курсов программы "Мощные лазеры и лазерный термоядерный синтез".

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель курса – ознакомить студентов с основами физики лазерного термоядерного синтеза, высокотемпературной плазмы, поведения вещества в экстремальных условиях и связанных с ними разделами экспериментальной и теоретической физики и прикладной математики. Дать студентам ориентацию в различных экспериментальных методиках и теоретических описаниях взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, свойств плазмы, лазерного термоядерного синтеза.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина “Физика лазерного термоядерного синтеза” представляет собой развитие знаний, полученных в результате изучения законов общей физики, теории поля, квантовой механики, математического анализа, аналитической геометрии, линейной алгебры, дифференциальных уравнений и теории функций комплексного переменного. Для успешного освоения дисциплины также необходимо знание дифференциального и интегрального исчисления, векторного и тензорного анализа, электродинамики. Дисциплина изучается на первом курсе магистратуры и подразумевается, что студенты уже владеют всем необходимым аппаратом. Курс рассказывает о прикладных задачах физики лазеров и взаимодействия излучения с веществом, которые более подробно будут рассмотрены в других курсах.

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 |
|--|---------------------------|--|---|
| научно-исследовательский | | | |
| Проведение научных | Научные задачи, | ПК-1.1 [1] - Способен | 3-ПК-1.1[1] - Знать: |

| | | | |
|---|--|--|--|
| <p>исследований в области диагностики лазерной плазмы, лазерного термоядерного синтеза, лазерной физики и применения мощных лазеров.</p> | <p>плазма, лазеры.</p> | <p>к решению научных задач в области диагностики лазерной плазмы, лазерного термоядерного синтеза, лазерной физики и применения мощных лазеров</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p> | <p>основы диагностики лазерной плазмы, термоядерного синтеза, лазерной физики; У-ПК-1.1[1] - Уметь: решать научные задачи в области диагностики лазерной плазмы, термоядерного синтеза, лазерной физики и применения лазеров; В-ПК-1.1[1] - Владеть: навыком решения научных задач в области диагностики лазерной плазмы, термоядерного синтеза, лазерной физики и применения лазеров</p> |
| <p>Проведение научных исследований и опытно-конструкторских разработок в области диагностики плазмы, лазерного термоядерного синтеза и лазерной физики.</p> | <p>Научные исследования и опытно-конструкторские разработки, лазеры.</p> | <p>ПК-1.2 [1] - Способен использовать знания в области мощных лазеров, физики лазерного термоядерного синтеза и оптики в своей практической деятельности.</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p> | <p>З-ПК-1.2[1] - Знать: физику лазерного термоядерного синтеза, лазерную физику, физику и применение мощных лазеров, оптику; У-ПК-1.2[1] - Уметь: использовать знания в области оптики, мощных лазеров и физики лазерного термоядерного синтеза в практической деятельности ; В-ПК-1.2[1] - Владеть: навыками использования знаний в области оптики, мощных лазеров и физики лазерного термоядерного синтеза в практической деятельности</p> |
| <p>Обработка и обобщение</p> | <p>Результаты исследований,</p> | <p>ПК-2 [1] - Способен использовать</p> | <p>З-ПК-2[1] - Знать основные законы</p> |

| | | | |
|---|---|---|---|
| <p>результатов исследований математическими методами</p> | <p>математические методы обработки экспериментальных данных.</p> | <p>математические методы обработки результатов исследований и их обобщения</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 25.033</p> | <p>высшей математики, необходимые для математической обработки результатов исследований; основные законы теоретической физики, необходимые для обобщения и интерпретации результатов исследований; ; У-ПК-2[1] - Уметь: применять законы высшей математики и физики к обобщению и интерпретации исследований; проводить критический анализ результатов;; В-ПК-2[1] - Владеть: методами создания и анализа математических моделей; методами обработки экспериментальных данных</p> |
| <p>Анализ научно-технической информации, постановка научной проблемы, обработка и обобщение полученных результатов.</p> | <p>Научно-техническая информация по тематике исследований, результаты исследований.</p> | <p>ПК-3 [1] - Способен анализировать научно-техническую информацию, научные проблемы, результаты, перспективы по тематике проводимых исследований и разработок</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.078</p> | <p>З-ПК-3[1] - Знать специфику и современное состояние развития исследований и разработок; методы поиска, анализа научно-технической информации для выявления естественнонаучной сущности проблемы, формулирования задачи, определения пути их решения ; У-ПК-3[1] - Уметь: проводить поиск, анализ научно-технической информации для выявления естественнонаучной</p> |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | <p>сущности проблемы, формулирования задачи по тематике проводимых исследований и разработок; обобщать и критически анализировать полученную информацию; проводить критический анализ своих результатов и результатов других исследователей; В-ПК-3[1] - владеть навыками поиска и анализа научно-технической информации, выявления естественнонаучной сущности проблемы, формулирования задачи по тематике проводимых исследований и разработок, обобщения и критического анализа информации.</p> |
|--|--|--|--|

4. 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>1 Семестр</i> | | | | | | |
| 1 | Первый раздел | 1-8 | 8/16/0 | | 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, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3 |
| 2 | Второй раздел | 9-16 | 8/16/0 | | 25 | КИ-16 | 3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3 |
| | <i>Итого за 1 Семестр</i> | | 16/32/0 | | 50 | | |
| | Контрольные мероприятия за 1 Семестр | | | | 50 | Э | 3-ПК-1.1, У- |

| | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3 |
|--|--|--|--|--|--|--|--|

* – 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 |
| Э | Экзамен |

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недели | Темы занятий / Содержание | Лек., час. | Пр./сем., час. | Лаб., час. |
|------------|---|------------------------|----------------|------------|
| | <i>1 Семестр</i> | 16 | 32 | 0 |
| 1-8 | Первый раздел | 8 | 16 | 0 |
| 1 - 2 | Термоядерные реакции Области применения управляемого термоядерного синтеза. Источники электроэнергии, базовые источники, коэффициент готовности, высоко- и низкоконцентрированные источники. Энергия связи нуклонов в ядре, формула масс Вайцеккера, дефект массы, упаковочный множитель. Термоядерные реакции в звездах, протон-протонный цикл, проблема солнечных нейтрино. | Всего аудиторных часов | | |
| | | 2 | 4 | 0 |
| | | Онлайн | | |
| | | 0 | 0 | 0 |

| | | | | |
|-------------|---|------------------------|----|---|
| | Термоядерные реакции в лаборатории. Сечение и скорость реакций. Скорость термоядерных реакций в термодинамически равновесной плазме. Критерий Лоусона. | | | |
| 3 - 4 | Удержание плазмы Сила Лоренца и пинч-эффект. Линейные и тороидальные системы с магнитным удержанием плазмы: Z-пинч, тета-пинч, пробкотрон, тороидальный пинч, стелларатор, токамак. Принцип работы систем инерциального термоядерного синтеза. Критерий ρR . Драйверы для инерциального синтеза: пучки электронов и ионов, лазеры. Требования к мишени и драйверу для инерциального синтеза. Конструкции мишеней. | Всего аудиторных часов | | |
| | | 2 | 4 | 0 |
| | | Онлайн | | |
| | | 0 | 0 | 0 |
| 5 - 6 | Кинетика плазмы Кинетические уравнения для плазмы: уравнение Больцмана, уравнение Лиувилля, уравнение Власова. Уравнения переноса массы, импульса и энергии для равновесной плазмы. Интеграл столкновений в форме Ландау. Двухтемпературное приближение, время температурной релаксации. Одножидкостное приближение, дебаевский радиус. Интеграл столкновений в форме Батнагара-Гросса-Крука. Электрический ток в неоднородной плазме: проводимость, термоэлектрический коэффициент. Спитцеровская теплопроводность. | Всего аудиторных часов | | |
| | | 2 | 4 | 0 |
| | | Онлайн | | |
| | | 0 | 0 | 0 |
| 7 - 8 | Термодинамика плазмы Микроканоническое распределение. Энтропия. Термодинамические потенциалы: внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия Гиббса, свободная энергия Гельмгольца. Системы с переменным числом частиц, химический потенциал. Каноническое распределение. Больцмановский газ, газ с постоянной теплоемкостью. Химическая модель, ионизационное равновесие и формула Саха. | Всего аудиторных часов | | |
| | | 2 | 4 | 0 |
| | | Онлайн | | |
| | | 0 | 0 | 0 |
| 9-16 | Второй раздел | 8 | 16 | 0 |
| 9 - 11 | Волны в плазме Волновое уравнение для электромагнитных колебаний. Диэлектрическая проницаемость, дисперсионное уравнение. Продольная и поперечная проницаемость. Электрон в поле плоской волны, высокочастотная проницаемость. Электростатические электронные волны, плазменная частота. Электромагнитные электронные волны, нормальное и наклонное падение электромагнитной волны на неоднородную плазму, s- и p-поляризованные волны. Электростатические ионные волны. Нелинейные эффекты, параметрические неустойчивости: параметрический и двухплазмонный распад, бриллюэновское и рамановское рассеяние. | Всего аудиторных часов | | |
| | | 3 | 6 | 0 |
| | | Онлайн | | |
| | | 0 | 0 | 0 |
| 12 - 14 | Рентгеновское излучение Фотометрия. Равновесное излучение, распределение Планка, закон смещения Вина. Уравнение переноса излучения, коэффициенты испускания и поглощения излучения, закон Кирхгофа. Полное и локальное | Всего аудиторных часов | | |
| | | 3 | 6 | 0 |
| | | Онлайн | | |
| | | 0 | 0 | 0 |

| | | | | |
|---------|---|------------------------|---|---|
| | термодинамическое равновесие. Диффузионное приближение и приближение лучистой теплопроводности. Коэффициенты поглощения излучения. | | | |
| 15 - 16 | Гидродинамическое сжатие мишеней Звуковые волны, адиабата Пуассона. Ударные волны, соотношения Рэнкина-Гюгонио, адиабата Гюгонио, квазиизэнтропическое сжатие. Неустойчивости Рэлея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца, формула Такабе. Оболочечные мишени. | Всего аудиторных часов | | |
| | | 2 | 4 | 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 |

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении дисциплины применяются активная и интерактивная формы обучения в сочетании с самостоятельной работой.

Во время лекционных занятий происходит изложение нового теоретического материала. Раскрываются принципы работы с научной литературой. Организация занятий обязательно включает диалог со студентами по вопросам построения математических моделей физических процессов, происходящих в мишенях для лазерного термоядерного синтеза, составления уравнений, описывающих динамику плазмы, и осмысление полученных результатов. Обсуждаются актуальные модели в физике высоких плотностей энергии. Для более глубокого понимания разбираются типичные экспериментальные ситуации, причем особое внимание уделяется результатам последних научных исследований, выполняемых на мощных лазерных установках

6. 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 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| | У-ПК-1.1 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| | В-ПК-1.1 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| ПК-1.2 | З-ПК-1.2 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| | У-ПК-1.2 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| | В-ПК-1.2 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| ПК-2 | З-ПК-2 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| | У-ПК-2 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| | В-ПК-2 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| ПК-3 | З-ПК-3 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| | У-ПК-3 | Э, КИ-8, КИ-16 |
| | В-ПК-3 | Э, КИ-8, КИ-16 |

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, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос. |
| 75-84 | | C | |
| 70-74 | | D | |
| 65-69 | 3 – «удовлетворительно» | 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 | | | |
| 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. |
|--|--|--|--|

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ С51 Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion : , Cham: Springer International Publishing, 2016
2. ЭИ Р 62 Теория плазмы : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
3. 621.37 К43 Лазеры и их применения в ядерных технологиях : учебное пособие для вузов, С. В. Киреев, С. Л. Шнырев, Москва: МИФИ, 2008

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ В61 Лазерные методы диагностики плазмы : учебное пособие для вузов, Е. Д. Вовченко, А. П. Кузнецов, А. С. Савёлов, Москва: МИФИ, 2008
2. 535 Л17 Лазерная плазма : физика и применения: монография, О. Б. Ананьин [и др.], М.: МИФИ, 2003

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

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

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

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

9. 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 во многом опирается на оптику и

физику лазеров, физику лазерной плазмы и потому можно обращаться к соответствующим разделам этих курсов, конспектам и рекомендованной для них литературе.

На лекции основное внимание следует уделять не только формулам и математическим выкладкам, но и содержанию изучаемых вопросов, определениям и постановкам задач. Особое внимание следует уделять прикладному значению рассматриваемых в курсе вопросов, поскольку лазерный термоядерный синтез является сегодня одним из приоритетных научно-технических направлений. 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 регулярно работать как с основными, так и с дополнительными рекомендованными литературными источниками, поскольку информация в них является неотъемлемым дополнением к лекциям.

Курс предназначен для ознакомления с современным состоянием исследований взаимодействия электромагнитного излучения высокой интенсивности с веществом, включая свободные электроны, атомные системы и плазму, а также применением их для нужд лазерного термоядерного синтеза. Основное внимание уделяется изложению теоретических методов, используемых в этой области науки, и демонстрации их применения для решения конкретных задач. В курсе дается обзор важнейших результатов, полученных в этой области науки за последние десятилетия, в связи с чем этому следует уделить особое внимание.

Отдельно хочется обратить внимание на следующее – если Вы являетесь студентом, не обучавшимся в бакалавриате НИЯУ МИФИ, то при возникновении непонимания ряда вопросов по физике плазмы Вам следует обратиться к рекомендованной литературе и за консультацией к преподавателю.

10. 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. Подробно изложить суть термоядерных реакций, объяснить их значение. Также следует дать общую картину ситуации в отрасли, объяснить прикладное значение изучаемого материала.

Основное внимание при изложении материала курса рекомендуется уделить изложению теоретических методов, используемых в этой области физики сильных лазерных полей и демонстрации их применения для решения конкретных задач.

Перед изложением текущего лекционного материала следует напоминать об основных итогах, достигнутых на предыдущих лекциях. С этой целью задать несколько вопросов аудитории. 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. Очень важно изложить эволюцию представления ученых об ИТС и методах его реализации.

Автор(ы):

Гаранин Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н.

Попруженко Сергей Васильевич