

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор филиала МГУ в г.Сарове
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

Взаимодействие лазерного излучения с веществом

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Экстремальные электромагнитные поля, релятивистская плазма
и аттосекундная физика

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

к.ф.-м.н., доцент физического факультета МГУ А.Б.Федотов

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Взаимодействие лазерного излучения с веществом»

В курсе изучаются вопросы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, а именно проблемы передачи энергии и импульса электромагнитного излучения структурно организованному веществу и плазме.

Цель освоения курса — получить представления об основных подходах и моделях взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в частности, с плазмой, понимание их физической сущности, а также возможности использования этих подходов для реализации современных исследований в области лазерной физики. Рассматриваются принципиальные особенности взаимодействия электромагнитного излучения с веществом в различных состояниях: плазма и структурно-организованная материя. Кратко излагаются основные свойства вещества в плазменном состоянии (коллективные свойства плазмы, плазменные (ленгмюровские) колебания, степень ионизации, столкновения частиц и явления переноса в плазме и др.), Основное внимание посвящено взаимодействию электромагнитного излучения с плазмой (прохождение электромагнитных волн через плазму, обратнотормозное поглощение, критическая частота, высокочастотный скин-эффект, фазовая и групповая скорости света в плазме, дисперсия). Материал излагает особенности взаимодействия с веществом теплового источника, лазерного излучения, при этом уделяется внимание особенностям взаимодействия сверхкоротких импульсов и предельных интенсивностей. Большое внимание уделено вопросам оптического пробоя вещества лазерным излучением, рассмотрены ударная (лавиная), туннельная и многофотонная ионизации, а также принципиальные отличия этих режимов. Предлагаются основные принципы лазерного термоядерного синтеза, режимы и перспективы осуществления управляемого термоядерного синтеза с использованием сверхкоротких лазерных импульсов. Определены основные критерии и принципы формирования сверхсильных световых полей на основе генерации сверхкоротких лазерных импульсов, приводятся схемы построения современных мощных лазерных систем, генерирующих сверхсильные оптические поля. Рассмотрены вопросы ponderomotorного воздействия света на вещество, оптическая левитация и резонансное охлаждение частиц.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» реализуется на 1-ом курсе в 2-ом семестре и относится к обязательной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
<ul style="list-style-type: none">Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).	<p>ЗНАТЬ основные законы и направления современных научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p>УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>ВЛАДЕТЬ необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).	<p>ЗНАТЬ базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p>УМЕТЬ используя знания в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики проводить научные исследования.</p> <p>ВЛАДЕТЬ навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области экстремальных	<p>ЗНАТЬ основные направления инновационного развития в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p>УМЕТЬ проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и</p>

<p>электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики (СПК-3).</p>	<p>аттосекундной физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов. ВЛАДЕТЬ методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p>
--	--

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Введение. Основные понятия взаимодействия электромагнитного излучения с веществом.

Введение. Тепловой нагрев вещества. Формула Планка и следствие из нее в макро- и микромире. Закон Стефана-Больцмана. Принципиальное отличие лазерного нагрева от нагрева тепловым источником. Критерии разделения режимов взаимодействия излучения по интенсивности поля.

Тема 2. Передача энергии и импульса электромагнитного поля веществу.

Воздействие электромагнитного излучения на свободный электрон. Невозможность поглощения свободным электроном фотона (квантовая и классическая картина). Обратнотормозное поглощение лазерного излучения в плазме: роль дефазирующих столкновений. Скорость нарастания энергии электрона в поле электромагнитного излучения.

Тема 3. Особенности генерации и усиления лазерного излучения.

Формула Планка в представлении Эйнштейна. Вынужденные и спонтанные переходы. Усиление света с учетом спонтанного излучения как следствие формулы Планка. Принципы генерации лазерных импульсов. Методы модуляции добротности и синхронизации мод. Примеры современных лазерных систем.

Тема 4. Основные свойства и характеристики плазмы.

Определение плазмы. Состав. Коллективные свойства. Квазинейтральность. Способы получения плазмы. Плазменные колебания. Дебаевский радиус. Критерии существования и идеальности плазмы. Зависимость степени ионизации от температуры. Вырожденная (квантовая) плазма. Давление вырожденной плазмы. Плазма в полупроводниках и диэлектриках.

Тема 5. Плазма в электромагнитном поле.

Система уравнений Максвелла. Волновое уравнение. Плазма в переменном поле. Случай высоких и низких частот. Основные величины, характеризующие столкновения. Длина свободного пробега, сечение столкновений. Кулоновский логарифм. Электронная и ионная температура. Обратнотормозное поглощение. Давление плазмы. Образование плазмы при стационарном нагреве металлической мишени. Давление однонаправленного пучка фотонов. Управление механическим перемещением тел. Лазерный пинцет.

Тема 6. Ионизация вещества в мощном электромагнитном поле

Основные характеристики водородоподобного боровского атома. Атом во внешнем поле. Туннельный эффект, коэффициент прозрачности потенциального барьера. Параметр Келдыша. Многофотонная ионизация. Механизм лавинной ионизации. Развитие электронной

лавины. Пороговая интенсивность ионизации и ее зависимость от давления газа, длительности лазерного импульса и длины волны.

Тема 7. Основы теории и практические аспекты реализации лазерного термоядерного синтеза (ЛТС).

Теоретические основы термоядерного синтеза. Туннельный эффект в реакциях термоядерного синтеза. Критерий Лоусона. История ЛТС. Лазерная абляция и имплозия. Инерционное удержание плазмы. «Быстрый поджиг» термоядерной реакции.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий				дополнительная работа студента
			аудио	диалог	теоретические	практические	
Взаимодействие лазерного излучения с веществом	2	72	34	17	17	38	

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» включает в себя лекции, на которых раскрывается теоретическое содержание курса, обсуждаются вопросы, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Введение. Основные понятия взаимодействия электромагнитного излучения с веществом.	4	2	-		2	Собеседование, опрос
2	Передача энергии и импульса электромагнитного поля веществу	6	2	-	2	4	
3	Особенности генерации и усиления лазерного излучения	8	3	-	2	4	
4	Основные свойства и характеристики плазмы	8	2	-	2	4	
5	Плазма в электромагнитном поле.	14	3	-	4	6	
6	Ионизация вещества в мощном электромагнитном поле	16	3	-	4	8	Собеседование, опрос
7	Основы теории и практические аспекты реализации лазерного термоядерного синтеза (ЛТС).	12	2	-	3	6	
	Промежуточная аттестация	4				4	зачет в устной форме
ИТОГО:		72	17	-	17	38	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» проводится в форме экзамена. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: основные принципы взаимодействия лазерного излучения с плазмой и структурно-организованной средой ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний основных принципов взаимодействия лазерного излучения с плазмой и структурно-организованной средой	В целом успешные, но не систематические знания основных принципов взаимодействия лазерного излучения с плазмой и структурно-организованной средой	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания основных принципов взаимодействия лазерного излучения с плазмой и структурно-организованной средой	Успешные и систематические знания основных принципов взаимодействия лазерного излучения с плазмой и структурно-организованной средой

<p>УМЕТЬ: проводить оценки различных режимов взаимодействия лазерного излучения с веществом</p> <p>ОПК-3.Б У-6</p>	<p>Отсутствие умения проводить оценки различных режимов взаимодействия лазерного излучения с веществом</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое умение проводить оценки различных режимов взаимодействия лазерного излучения с веществом</p>	<p>В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение проводить оценки различных режимов взаимодействия лазерного излучения с веществом</p>	<p>Успешное и систематическое умение проводить оценки различных режимов взаимодействия лазерного излучения с веществом</p>
<p>ВЛАДЕТЬ: навыками анализа и расчета режимов поглощения лазерного излучения, и различных режимов ионизации.</p> <p>ОПК-3.Б В-6</p>	<p>Отсутствие/фрагментарное владение навыками анализа и расчета режимов поглощения лазерного излучения, и различных режимов ионизации</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое владение навыками анализа и расчета режимов поглощения лазерного излучения, и различных режимов ионизации</p>	<p>В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владения навыками анализа и расчета режимов поглощения лазерного излучения, и различных режимов ионизации</p>	<p>Успешное и систематическое владение навыками анализа и расчета режимов поглощения лазерного излучения, и различных режимов ионизации</p>

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Предельная стационарная температура нагрева мишени тепловым источником излучения с известной температурой (например, Солнце)
2. Оценить число фотонов в моде (тепловой источник, лазер с заданной интенсивностью излучения, длиной волны и шириной спектральной линии лазерного перехода).
3. Оценить число приведённых ко входу лазерного усилителя шумовых «спонтанных» фотонов за импульс.
4. Переход классической плазмы в вырожденную (условие вырождения).
5. Оценка энергии Ферми для электронов в металле, например, в серебре (концентрация электронов $N_e = 6 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$).
6. Зависимость кинетической энергии W_e^q свободного несталкивающегося электрона от интенсивности I_L и длины волны λ лазерного излучения.
7. Оценить электропроводность $\sigma_3 [\text{Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}]$ полностью ионизированной водородной плазмы с концентрацией электронов: 1. $N_e = N_i = 10^{29} \text{ м}^{-3}$ (ЛТС) и 2. $N_e = N_i = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ («Токомак») с

температурой $T=10^8\text{K}$. Найти время электрон-ионных столкновений τ_{ei} и длину свободного пробега $L[\text{м}]$;

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме экзамена:

- Форма планковской кривой. Поведение кривой в начале координат и на бесконечности. Закон смещения Вина.
- Принципиальное отличие лазерного нагрева от нагрева тепловым излучением. Стационарная температура мишени при нагреве лазером.
- Число фотонов в моде (тепловой источник, лазер с заданной интенсивностью излучения, длиной волны и шириной спектральной линии лазерного перехода). Вероятность вынужденного излучения $w[\text{сек}^{-1}]$ как функция числа фотонов в моде и коэффициента Эйнштейна $A[\text{сек}^{-1}]$
- Число приведённых ко входу лазерного усилителя шумовых «спонтанных» фотонов за импульс. Характеристики усилителя: длина L , диаметр D , длина волны λ , ширина линии усиления $\Delta\nu$, длительность импульса τ , степень инверсии $N_2/(N_2 - N_1)$. Минимально возможное число таких фотонов, условия и способы его достижения (пространственный селектор мод).
- Плазменные (лэнгмюровские) колебания. Плазменная частота ω_p её выражение через заряд e , массу электрона m и концентрацию электронов N_e (формула в системе СИ). Критическая длина волны электромагнитного (э/м) излучения λ_c и её выражение через N_e и r_e (классический радиус электрона). Соотношение между длиной э/м волны λ и λ_c , при которых возможно прохождение э/м излучения сквозь плазму.
- Критерий идеальности плазмы с концентрацией в ней электронов $N_e[\text{м}^{-3}]$ и . Граница между классической идеальной и классической неидеальной плазмой (на плоскости $\lg T_e - \lg N_e$)
- Зависимость степени ионизации плазмы от температуры, концентрации нейтралов и энергии (потенциала) ионизации атомов (формула Саха).
- Вырожденная (квантовая) плазма (определение). Переход классической плазмы в вырожденную (условие вырождения). Температура вырождения для электронов при заданной концентрации, её зависимость от концентрации.
- Оценка энергии Ферми для электронов в металле, например, в серебре (концентрация электронов $N_e = 6 \cdot 10^{28}\text{м}^{-3}$).
- Вырожденная электронно-дырочная плазма в полупроводниковых лазерах. Квазиуровни Ферми для электронов и дырок. Условие усиления света (соотношение между уровнями электронов и дырок и соответствующими квазиуровнями Ферми)
- Основные величины, характеризующие столкновения: концентрация частиц, сечение столкновений, длина свободного пробега. Соотношение между ними.
- Система уравнений Максвелла (в системе СИ) для векторов \mathbf{H} , \mathbf{E} , \mathbf{V} и для векторов \mathbf{B} и \mathbf{E} . Физический смысл отдельных уравнений системы
- Вклад в коэффициент преломления свободных сталкивающихся и связанных электронов. Соотношение этих вкладов.
- Коэффициент ослабления для интенсивности света при длине волны больше критической. Скин-эффект, скин-слой.
- Зависимость кинетической энергии $W_e^{\text{к}}$ свободного несталкивающегося электрона от интенсивности I_L и длины волны λ лазерного излучения. Релятивистский порог: интенсивность $I_L^{\text{р}}$, при которой $W_e^{\text{к}} = m_0c^2$ (m_0c^2 - энергия покоя электрона).
- Давление идеальной плазмы как функция температуры $T[\text{K}]$ и концентрации электронов $N_e[\text{м}^{-3}]$. Давление вырожденной плазмы как функция концентрации электронов $N_e[\text{м}^{-3}]$.
- Давление $P_\Phi[\text{Па}]$ однонаправленного пучка фотонов (лазерный пучок) интенсивностью $I[\text{Вт}/\text{м}^2]$ на плоскую поверхность вещества с коэффициентом отражения r в зависимости от угла падения Φ . Вещество за поверхностью прозрачно для лазерного излучения.
- Давление и температура плазмы как функция лазерной интенсивности при концентрации электронов меньше критической (действует закон Стефана-Больцмана).

- Туннельный эффект, его физическая сущность. Потенциальный барьер. Ширина барьера и его высота в зависимости от внешнего лазерного поля.
- Вероятность (в единицу времени) туннельной ионизации. Длительность лазерного импульса, при которой достигается полная ионизация как функция коэффициента прозрачности потенциального барьера и скорости движения связанных электронов. Надбарьерная ионизация.
- Область лазерных частот и полей (интенсивностей), в которой ионизация происходит благодаря туннельному эффекту.
- Получение плотной высокотемпературной плазмы методом абляционной имплозии полый сферической мишени при лазерном термоядерном синтезе (ЛТС). Зависимость абляционного давления и температуры плазменного сгустка от интенсивности и длины волны лазерного излучения, облучающего мишень
- Время инерционного удержания τ_y сферического объёма плазмы как функция его начального радиуса Λ_{\min} , радиальной скорости v_R расширения объёма и коэффициента $n(\tau_y)$ уменьшения начальной концентрации N_{\max} ионов: $n(\tau_y) = N_{\max}/N(\tau_y)$.
- Туннельный эффект в реакции термоядерного синтеза. Коэффициент прозрачности потенциального барьера, зависимость от энергии сталкивающихся ионов. Сечение столкновения и сечение термоядерной реакции.
- Условие энергетически выгодного ЛТС (Критерий Лоусона).
- Принцип «быстрого поджига» термоядерной реакции в ЛТС посредством УКИ. Пороговая интенсивность УКИ на поверхности плазменного сгустка, которую необходимо превзойти для «быстрого поджига» при заданной температуре и концентрации ионов в плазме.
- Давление света на макроскопические тела: формула Максвелла-Бертоли. Оптическая левитация прозрачных частиц.
- Момент импульса световой волны и его передача электронам.

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература

1. А.З.Грасюк. **Взаимодействие излучения с веществом.** - М., 2004.
2. Н.И.Коротеев, И.Л. Шумай **Физика мощного лазерного излучения.** М.: Наука, 1991.
3. С.А.Ахманов, С.Ю.Никитин. **Физическая оптика.** Изд-во МГУ, 1998.

Дополнительная литература

1. Ю. А. Ильинский, Л.В.Келдыш. **Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом.** Изд-во МГУ, 1989

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, управляющим компьютером, экраном и обычной учебной доской.