

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Саровский физико-технический институт -

филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ»

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФТФ, член-кор РАН, д. ф-м н.

_____ **А.К. Чернышев**

«___» _____ **2023 г.**

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Взаимодействие лазерного излучения с веществом

наименование дисциплины

Направление подготовки (специальность)	<u>03.04.01 Прикладные математика и физика</u>
Наименование образовательной программы	<u>Квантовая оптика и лазерная физика</u>
Квалификация (степень) выпускника	<u>магистратура</u>
Форма обучения	<u>очная</u>

Программа одобрена на заседании кафедры

Зав. кафедрой КЭ к.ф.-м.н.

_____ **Ф.А. Стариков**

протокол № _____

«___» _____ **2023г.**

г. Саров, 2023г.

Программа переутверждена на 201____/201____учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФИТЭ на 201____/201____ учебный год.

Заведующий кафедрой КЭ к. ф.-м. н.

Ф.А. Стариков

Программа переутверждена на 201____/201____учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФИТЭ на 201____/201____ учебный год.

Заведующий кафедрой КЭ к. ф.-м. н.

Ф.А. Стариков

Программа переутверждена на 201____/201____учебный год с изменениями в соответствии с семестровыми учебными планами академических групп ФИТЭ на 201____/201____ учебный год.

Заведующий кафедрой КЭ к. ф.-м. н.

Ф.А. Стариков

Программа переутверждена на 201____/201____учебный год с изменениями в соответствии с Семестровыми учебными планами академических групп ФИТЭ на 201____/201____ учебный год.

Заведующий кафедрой КЭ к. ф.-м. н.

Ф.А. Стариков

Семестр	В форме практической подготовки	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРС, час.	КР/ КП	Форма(ы) контроля, эз./зач./ЗсО/
3	32	4	144	32	32	-	44	-	Экзамен
ИТОГО	32	4	144	32	32	-	44	-	36

АННОТАЦИЯ

В курсе даются представления об основных физических процессах, которыми сопровождается взаимодействие лазерного излучения с веществом. Рассматривается широкий диапазон интенсивностей лазерного излучения от 10^4 до 10^{21} Вт/см². Анализируются тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты, возникающие при поглощении конденсированным веществом лазерного излучения. Подробно обсуждаются вопросы передачи энергии и импульса от поля веществу, действие лазерного излучения на свободные заряды и непрозрачные тела, поглощение лазерного излучения конденсированными средами, лазерный нагрев плазмы. Для анализа взаимодействия используются классические и релятивистские уравнения движения зарядов в лазерном поле, уравнения гидродинамики, уравнения Максвелла. Рассматриваемые модели взаимодействия лазерного излучения с веществом использованы для оценок результатов лазерного воздействия на различные среды. Курс снабжен несложными задачами, чтобы закрепить усвоение материала.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель курса “Взаимодействие лазерного излучения с веществом” – дать основные представления о многообразии физических процессов, происходящих при взаимодействии лазерного излучения (ЛИ) с веществом. Научить оценивать эффективность передачи энергии и импульса от поля веществу, действие лазерного излучения на свободные заряды и конденсированные тела, поглощение лазерного излучения конденсированными средами, лазерный нагрев плазмы. Познакомить с современными методами теоретического и экспериментального исследования физических процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения различной интенсивности с плазмой и конденсированным веществом разной плотности.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина “Взаимодействие лазерного излучения с веществом”, входящая в часть, формируемую участниками образовательных отношений по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладная математика и физика», является продолжением изучения основ оптики, электродинамики, физики плазмы, газодинамики и физики лазеров.

Курс опирается на материал следующих дисциплин, читаемых студентам физико-математических специальностей: уравнения математической физики, механика, электродинамика, оптика, атомная физика.

Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и университетскому курсу математики. Необходимо, знать дифференциальное и интегральное исчисление, векторный анализ, атомную физику, электричество и магнетизм, в том числе

электродинамику сплошных сред.

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

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	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
Тип задачи профессиональной деятельности: проектный			
организация выполнения проектов исследовательской и инновационной направленности в качестве исполнителя, ответственного за выполнение отдельного направления работ	мощные импульсные лазерные установки РФЯЦ ВНИИЭФ для исследований плотной горячей плазмы с диагностическими комплексами и основным и вспомогательным оборудованием; системы мощных импульсных и непрерывных лазеров различного назначения для лазерно-физических исследований со средствами управления лазерным пучком и контроля лазерного излучения; производственные и технологические процессы лазерно-физических и лазерно-плазменных исследований, средства их технологического, инструментального, метрологического, диагностического, информационного и управленческого обеспечения.	ПК-11 Способен разрабатывать методики исследований, планировать экспериментальные и теоретические работы, формулировать план исследований, распределения задач и этапов их решения, разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию в соответствии с требованиями работодателя. Профессиональный стандарт «24.078. Специалист исследователь в области ядерно-энергетических технологий» ПК-12.1 способен к обеспечению безопасности при проведении работ на лазерных установках, обеспечение высокоэффективного функционирования мощных лазерных установок РФЯЦ ВНИИЭФ, используемых при	З-ПК-11 Знать основные методики, цели и задачи научно-прикладных проектов, разрабатывать концептуальные и теоретические модели решаемых задач. У-ПК-11 Уметь формулировать план исследований, распределения задач и этапов их решения, разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию в соответствии с требованиями работодателя. В-ПК-11 Владеть навыками разработки теоретических моделей решаемых задач. З-ПК-12.1 знать стандарты, методики и инструкции, определяющие порядок подготовки и оформления отчетной документации по результатам выполненных исследований У-ПК-12.1 уметь анализировать научно-

исследовании горячей лазерной плазмы, средств их технологического оснащения, систем автоматизации, управления, контроля, диагностики и испытания Профессиональный стандарт «24.078. Специалист исследователь в области ядерно-энергетических технологий»	техническую информацию по теме исследований В-ПК-12.1 иметь навыки по разработке планов перспективных исследований по инновационным высокотехнологичным технологиям
--	--

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ*

№ п/п	Наименование раздела /темы дисциплины	№ недели	Виды учебной работы						
			Лекции	Практ. занятия/ семинары	Лаб. работы	СРС	Текущий контроль (форма)*	Максимальный балл (см. п. 6.3)	
			32	32	-	44			
Семестр 7									
1.	РАЗДЕЛ 1	1-8	16	16	-	24			
1.1	Тема 1. Свойства ЛИ	1	2	2	-	4	УО	2	
1.2	Тема 2 Лазерное воздействие на свободные заряды	2-3	2	2	-	4	УО	3	
1.3	Тема 3. Движение электрона в поле сильной электромагнитной волны	4-5	4	4	-	4	ДЗ	2	
1.4	Тема 4. Атом в сильном лазерном поле	6-7	4	4	-	4	ДЗ	4	
1.5	Тема 5 Обратнотормозное поглощение ЛИ	8	2	2	-	4	ДЗ	4	
1.6	Тема 6. Оптический пробой прозрачных диэлектриков	9	2	2	-	4	ДЗ	4	
Рубежный контроль		9	Колл						5
2.	РАЗДЕЛ 2	9-17	16	16	-	20			

№ п/п	Наименование раздела /темы дисциплины	№ недели	Виды учебной работы					
			Лекции	Практ. занятия/ семинары	Лаб. работы	СРС	Текущий контроль (форма)*	Максимальный балл (см. п. 6.3)
			32	32	-	44		
2.1	Тема 7. Поглощение и отражение ЛИ плазмой	10-12	6	6	-	4	ДЗ	4
2.2	Тема 8. Световое давление	13-14	4	4	-	6	ДЗ	4
2.3	Тема 9. Лазерный нагрев поглощающей среды	15	4	4	-	4	ДЗ	4
2.4	Тема 10. Генерация акустических импульсов и ударных волн лазерным излучением	16	2	2	-	6	ДЗ	4
Рубежный контроль		16	Колл					5
Промежуточная аттестация		Экзамен					36	0 - 50
Посещаемость								5
Итого:			32	32	-	44	-	100

*Сокращение наименований форм текущего, рубежного и промежуточного контроля:

УО – устный опрос

Тест – тестирование (письменный опрос)

Э – экзамен

Колл-коллоквиум

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

Лекционный курс

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
1.	РАЗДЕЛ 1	
1.1	Тема 1. Свойства лазерного излучения	Введение в предмет. Свойства лазерного излучения: монохроматичность, расходимость, когерентность. Поток энергии в световой волне линейной, круговой и эллиптической поляризации. Лазерные импульсы и пучки: энергия, мощность, интенсивность. Концентрация световой энергии во времени и в пространстве. «Лямбда-куб» системы. Способы задания лазерных импульсов и пучков.
1.2	Тема 2. Лазерное воздействие на свободные заряды.	Невозможность поглощения свободным электроном фотона. Комптоновское рассеяние лазерного излучения свободным электроном. Расчёт энергии и импульса свободного электрона в поле лазерного излучения. Зависимость кинетической энергии свободного электрона от интенсивности и длины волны лазерного излучения.
1.3	Тема 3. Движение электрона в поле сильной электромагнитной волны.	Критерий силы электромагнитной волны. Формулы релятивистской механики. Уравнения движения электрона в поле сильной электромагнитной волны круговой и линейной поляризации. Траектория, импульс и энергия электрона в сильном лазерном поле. Характерные интенсивности лазерного излучения в физике сверхсильных полей.
1.4	Тема 4. Атом в сильном лазерном поле.	Потенциальный барьер, его ширина и высота. Коэффициент прозрачности потенциального барьера. Туннельный эффект и многофотонная ионизация. Параметр Келдыша для туннельного эффекта при лазерном воздействии. Область частот, полей и интенсивностей, при которых возможен туннельный эффект.
1.5	Тема 5. Обратнотормозное поглощение лазерного излучения.	Уравнения набора энергии электроном в лазерном поле с учётом столкновений с ионами и нейтрами. Сечение обратнотормозного поглощения. Максимальная энергия, набираемая электроном в лазерном поле с учётом столкновений Вычисление энергии, набираемой электроном в лазерном поле с учётом и без учёта столкновений. Обмен энергией между электронами, ионами и нейтральными атомами (молекулами).
1.6	Тема 6. Оптический пробой прозрачных диэлектриков.	Механизм лавинной ионизации. Образование плазмы в фокусе лазерного пучка в газе. Пороговая интенсивность света как функция длины волны, длительности лазерного импульса и давления газа. Оценки пороговой интенсивности света для лазерного пробоя в газе. Параметры электронной лавины в поле лазерного пучка.
	Раздел 2	
1.7	Тема 7. Поглощение и отражение лазерного излучения плазмой.	Комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы в модели свободных сталкивающихся электронов и ионов. Плазменная частота. Показатель преломления и показатель поглощения

		плазмы. Коэффициенты отражения и поглощения плазмой лазерного излучения. Их зависимость от лазерной и плазменной частоты. Критическая плотность электронов. Мощности энергоснабжения в единице объёма плазмы. Глубина проникновения лазерного поля в плазму и металл. Нормальный, аномальный и высокочастотный скин-эффект. Поглощение и отражение неоднородной плазмой лазерного излучения Р- и S- поляризации при наклонном и нормальном падении луча. Резонансное поглощение.
1.8	Тема 8. Световое давление	Импульс световой волны. Давление лазерного пучка на плоскую поверхность. Оптическая левитация прозрачных частиц. Лазерное охлаждение. Примеры и расчёты физических эффектов, обусловленных давлением света.
2.1	Тема 9. Лазерный нагрев поглощающей среды.	Уравнение теплопроводности. Мощность лазерного теплового источника. Температура мишени при нагреве лазерным излучением и тепловым источником. Принципиальное отличие лазерного нагрева от нагрева тепловым излучением. Зависимость тепловых эффектов (нагрев, плавление, испарение, ионизация) от длительности лазерного импульса и его интенсивности. Лазерно-индуцированное плавление и испарение. Оценки тепловых эффектов при поглощении лазерного излучения непрозрачным телом на основе уравнения сохранения энергии.
2.2	Тема 10. Генерация акустических импульсов и ударных волн лазерным излучением	Механизмы генерации акустических импульсов и ударных волн в конденсированных средах. Возбуждение звука при поглощении лазерного импульса в поверхностном слое вещества. Оценки амплитуды, длительности и формы профиля акустических и ударных импульсов, инициированных поглощением лазерного излучения в конденсированном веществе. Эффективность преобразования поглощённой энергии излучения в акустическую энергию

4.3 Практические занятия

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
1.1	Тема 1	Решение задач на вычисление энергии, мощности, интенсивности, потоков энергии и импульса в лазерных импульсах и пучках. Обсуждение способов задания лазерных импульсов и пучков.
1.2	Тема 2	Решение задач на Комptonовское рассеяние лазерного излучения свободным электроном. Расчёт энергии и импульса свободного электрона в поле лазерного излучения
1.3	Тема 3	Решение задач на формулы релятивистской механики и уравнения движения электрона в поле сильной электромагнитной волны круговой и линейной поляризации.
1.4	Тема 4	Вычисление коэффициента прозрачности потенциального барьера для атома, помещённого в сильное лазерное поле. Оценки параметра Келдыша.

1.5	Тема 5	Вычисление энергии, набираемой электроном в лазерном поле с учётом и без учёта столкновений. Обмен энергией между электронами, ионами и нейтральными атомами (молекулами).
1.6	Тема 6	Оценки пороговой интенсивности света для лазерного пробоя в газе. Параметры электронной лавины в поле лазерного пучка.
1.7	Тема 7	Вычисление коэффициентов отражения и поглощения плазмой лазерного излучения в зависимости от соотношения между тремя частотами: лазерной, плазменной и частотой соударения электронов и ионов.
1.8	Тема 8	Глубина проникновения электромагнитного поля в плазму и металл. Связь поглощательной способности с толщиной скин-слоя. Критерии нормального, аномального и высокочастотного скин-эффекта.
1.9	Тема 9	Оценки коэффициентов поглощения и отражения лазерного излучения неоднородной плазмой при наклонном и нормальном падении луча.
1.10	Тема 10	Примеры и расчёты физических эффектов, обусловленных давлением света.
1.11	Тема 11	Оценки тепловых эффектов (нагрев, плавление, испарение, ионизация) при поглощении лазерного излучения непрозрачным телом на основе уравнения сохранения энергии.
1.12	Тема 12	Лазерно-индуцированное плавление и испарение вещества. Давление плазмы при испарении вещества лазерным излучением.
1.13	Тема 13	Оценка параметров акустических импульсов, инициированных поглощением лазерного излучения в конденсированном веществе.
1.14	Тема 14	Оценки температуры мишени при нагреве лазерным излучением и тепловым источником (солнцем) при различных условиях облучения.

4.4 ИНТЕРАКТИВНЫЕ ФОРМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РЕАЛИЗАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел учебной дисциплины	Интерактивная форма	Количество часов	Методы и средства контроля
Раздел 3 Движение электрона в поле сильной электромагнитной волны	Мозговой штурм, круглый стол, дискуссия	2	Оценка активности участия студента. Презентация результатов деятельности студентов
Раздел 4 Атом в сильном лазерном поле	Мозговой штурм, круглый стол, дискуссия	2	Оценка активности участия студента. Презентация результатов деятельности студентов
Раздел 8 Световое давление	Мозговой штурм, круглый стол, дискуссия	2	Оценка активности участия студента. Презентация результатов деятельности студентов
Раздел 11 Генерация акустических	Мозговой штурм, круглый стол,	2	Оценка активности участия студента. Презентация результатов

импульсов и ударных волн лазерным излучением	дискуссия		деятельности студентов
---	-----------	--	------------------------

4.5 ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ

1. Лазерный луч рассеивается на встречном пучке релятивистских электронов с энергией 1 ГэВ. Какую энергию приобретут фотоны лазерного пучка, рассеянные назад. Длина волны лазерного излучения 1 мкм ($\epsilon_{\text{ф}} = 1.24$ эВ).

Ответ: $\epsilon_{\text{ph2}} = (2\epsilon_{\text{ph1}} \epsilon_{\text{e1}}) / (2\epsilon_{\text{ph1}} + m^2 c^4 / 2\epsilon_{\text{e1}}) \approx 4\epsilon_{\text{ph1}}(\epsilon_{\text{e1}} / mc^2)^2 = 4\gamma^2 \epsilon_{\text{ph1}}$; $\epsilon_{\text{ph2}} \approx 20$ МэВ.

2. Линейно поляризованная плоская волна лазерного излучения падает на атом с поляризуемостью $\alpha = (a_{\text{В}})^3$, где $a_{\text{В}}$ – Боровский радиус. Определить в рамках классической электромагнитной теории полное сечение рассеяния волны на атоме. Сравнить сечение на атоме с томсоновским сечением рассеяния на свободном электроне. Длина волны излучения 0.5 мкм ($\omega = 4 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$).

3. Найти полное сечение рассеяния плоской линейно поляризованной волны заряженным упругим осциллятором. Собственная частота колебаний осциллятора равна ω_0 .

4. На какое расстояние от начального положения удалится первоначально покоящийся электрон под действием лазерного импульса, который характеризуется следующими параметрами. Длительность импульса составляет 10 периодов лазерного поля. Параметр силы волны равен $a = eE/(mc\omega) = 5$. (e – заряд электрона, E – амплитуда электрического поля волны, m – масса электрона, c – скорость света, ω – круговая частота лазерного излучения). Излучение имеет линейную поляризацию.

5. Определить среднюю скорость v_x заряженной частицы в направлении распространения волны в лазерном поле линейной поляризации при параметре силы волны $a = eE/(mc\omega) = 10$, и $a = 0.01$. Использовать параметрические уравнения движения: $X = (1/8)a^2(c/\omega)(2\eta - \sin 2\eta)$. $t = \eta/\omega + (1/8)(a^2/\omega)(2\eta - \sin 2\eta)$.

6. Электрон находится в поле плоской линейно поляризованной волны. Найти сдвиг фаз между колебаниями скорости электрона и колебаниями электрического поля волны, обусловленный радиационным трением.

7. Найти в нерелятивистском приближении уравнение движения заряда в электромагнитной волне, поляризованной по кругу. Найти скорость и кинетическую энергию заряда. Определить радиус траектории заряда. Поле волны круговой поляризации выбрать в виде:

$$E_x = -E_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$E_y = E_0 \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$H_x = -E_0 \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$H_Y = -E_0 \sin(\omega t) \quad (4)$$

Найти направление потока энергии в волне и направление вращения поля. Движение заряда в направлении распространения волны не учитывать.

8. По определению плотность собственного момента импульса (спина) электромагнитного поля равна $\mathbf{M} = (1/4\pi c)[\mathbf{E}\mathbf{A}]$, где $\mathbf{A}$ – векторный потенциал электромагнитного поля $\mathbf{E} = -c^{-1}\partial\mathbf{A}/\partial t$.

Найти плотность момента импульса волны круговой поляризации, спин одного фотона, момент импульса поля, который несёт лазерный импульс длительностью τ_L с площадью поперечного сечения пучка – S .

9. Определить сечение рассеяния сильной электромагнитной волны круговой поляризации релятивистским электроном, движущимся в поле этой волны. Учесть, что при скорости заряда $V/c \sim 1$ мощность излучения заряда вычисляется по формуле

$$d\varepsilon_{\text{rad}}/dt = (2e^2/3c^3)\{(\mathbf{V}_t)^2 - [\mathbf{V}_t\mathbf{V}]/c^2\}(1 - V^2/c^2)^{-3} \quad (2)$$

10. Излучение Nd-лазера ($\lambda = 1.06$ мкм, $h\nu = 1.17$ эВ) фокусируется в кювете с гелием. Интенсивность излучения в фокусе линзы равна 100 ГВт/см². Начальная температура гелия 273 К, а давление 100 атм. Сколько столкновений должен испытать электрон, находящийся в фокальном объёме, прежде чем он наберёт энергию, равную энергии кванта лазерного излучения? Какую среднюю энергию $(\Delta\varepsilon)_1$ набирает при этом электрон за одно столкновение? Потерями энергии электрона при столкновениях пренебречь. Сечение столкновения электрона с атомом составляет $\sigma_{\text{ea}} = 10^{-15}$ см². Скорость электрона равна $v_e = 10^8$ см/с.

11. Чему равна амплитуда колебаний электрона и амплитуда скорости электрона в аргоне при давлении 2000 атм, если газ облучается лазерным излучением с длиной волны 1 мкм ($\omega_L = 1.88 \times 10^{15}$ с⁻¹) интенсивностью 10^{10} Вт/см². Сравнить с амплитудой колебаний электрона и скорости электрона в вакууме при той же интенсивности ЛИ. Найти сдвиг фаз между скоростью электрона и полем волны, а также смещением электрона и полем волны. Сечение упругих столкновений электрона с атомами аргона равно 10^{-15} см². Скорость электронов 10^8 см/с.

12. Непрерывный гелий-неоновый лазер ($\lambda = 0.63$ мкм) используется для диагностики плазмы. При этом пучок ЛИ интенсивностью 0.1 Вт/см² и радиусом 0.2 см пропускается через слой плазмы толщиной 10 см с концентрацией свободных электронов 10^{15} см⁻³. Считая, что пучок ослабляется по закону Бугера за счёт томсоновского рассеяния на свободных электронах, определить число фотонов, которые плазма рассеивает за 1 секунду.

13. Плазменная частота тонкой металлической мишени в 4 раза больше несущей частоты лазерного излучения с длиной волны 1 мкм. При какой интенсивности лазерное излучение круговой поляризации начнёт проходить сквозь мишень?

14. Со стороны вакуума на границу плотной бесстолкновительной плазмы падает лазерное излучение, частота которого $\omega \ll \omega_p$, а амплитуда поля равна $E_{\text{падающая}}$. Найти амплитуду

электрического и магнитного поля волны, проникшей в плазму $N_{\text{плазма}}$, $E_{\text{плазма}}$, если отражение излучения от плазмы является почти полным $R \approx 1$.

15. Найти зависимость коэффициента обратнотормозного поглощения (ОТП) $\alpha_{\text{отп}}$ [см⁻¹] от интенсивности лазерного света I для слабо ионизованного газа. $n_e = n_i \ll n_a$; $\beta = n_e/n_a = 10^{-4}$. Получить аналитическое выражение. Оценить $\alpha_{\text{отп}}$ при $I = 10^8$ Вт/см², полагая длину волны 1 мкм, $M/m = 10^4$, сечение столкновений электрон-атом 10^{-15} см², $\omega\tau \ll 1$. ω - частота лазерного поля, τ - время свободного пробега электрона.

Указание. Считать скорость электрона в сечении столкновений максимальной, приобретаемой электроном при данной интенсивности. Использовать формулу для максимальной энергии электрона. $\varepsilon_{\text{max}} = mv^2/2 = (M/2m)\sigma_{\text{отп}}It = (M/2m)(r_e/\pi c)\lambda^2 I$.

Обсудить условия такого приближения.

16. Экспериментально установлено, что при комнатной температуре на длине волны 0.53 мкм (2-ая гармоника неодима) коэффициент отражения от алюминиевого зеркала равен $R \approx 0.92$. Считая, что на один атом алюминия приходится три электрона найти частоту столкновений электрона с решёткой при комнатной температуре в световом поле этой частоты. Плотность алюминия 2.7 г/см³. Атомный вес 27 единиц.

17. При облучении диэлектриков лазерным импульсом длительностью ~ 100 фс и интенсивностью $\sim 1 \times 10^{13} \dots 1 \times 10^{14}$ Вт/см² на поверхности мишени образуется слой плазмы твердотельной плотности. Параметры плазмы таковы, что $v_{ei} \sim \omega_p \sim \omega_L$ (частота столкновений $\sim$ плазменная $\sim$ несущая частота ЛИ). Показать, что при этих условиях коэффициент отражения равен $R \approx 0.05$, поглощательная способность $A \approx 0.95$, а отношение толщины скин-слоя к поглощательной способности плазмы равно $l_s/A \approx 3\lambda/2\pi$.

18. На плазму со ступенчато-экспоненциальным профилем плотности $n_e(x) = n_0 \exp(x/L)$ при $x \leq 0$; $n_e(x) = n_0$ при $0 \leq x$ падает лазерное излучение с частотой ω_L под углом 45 градусов со стороны вакуума. На каком расстоянии от точки с критической плотностью произойдёт поворот лазерного луча. Плазму считать бесстолкновительной, диэлектрическая проницаемость плазмы $\varepsilon = 1 - (\omega_p/\omega_L)^2$.

19. На плазму с экспоненциальным профилем электронов $n_e(x) = n_0 \exp(x/L)$ при $x \leq 0$; $n_e(x) = n_0$ при $0 \leq x$. падает со стороны вакуума по нормали к поверхности лазерное излучение. Коэффициент поглощения пропорционален плотности электронов $\alpha = \nu n_e(x)$. Определить коэффициент отражения излучения R .

20. На плоскую поверхность тонкой плосковыпуклой положительной линзы нанесено абсолютно отражающее покрытие. На выпуклую поверхность этой линзы падает узкий пучок импульсного лазерного излучения с энергией $\varepsilon_L = 2$ Дж и длительностью импульса $\tau_L = 10^{-8}$ с. Падающий

пучок распространяется параллельно главной оптической оси линзы на расстоянии $F/3$ от оси (F – фокусное расстояние линзы). Найдите величину средней силы, действующей на линзу со стороны света, если половина энергии лазерного излучения поглощается в линзе. Отражением от поверхности линзы без покрытия можно пренебречь.

21. Треугольная призма поворачивает луч непрерывного лазера. При какой мощности лазерного излучения призма перестанет давить на стол? С каким ускорением призма будет скользить по столу, если трением пренебречь? Масса призмы 5 г. Угол при вершине 20 градусов. Показатель преломления 1.5.

22. Излучение аргонового лазера ($\lambda = 0.5$ мкм) мощностью $W_L = 1$ Вт фокусируется на поверхность зеркально отражающего шарика. Радиус шарика $a = 2\lambda$. Диаметр пятна фокусировки $d_F = 5\lambda$. Найти ускорение шарика в единицах g , если его плотность равна $\rho = 1$ г/см³.

23. Найти время с начала воздействия, при котором поток энергии, отводимый теплопроводностью, сравнивается с потоком поглощённого излучения. Выписать параметры, которые определяют нагрев, плавление, испарение, ионизацию.

24. На какую величину поднимется давление в слое воды, который поглотил импульс излучения CO₂-лазера интенсивностью $I=1$ МВт/см² при длительности $\tau=10^{-9}$ с? Не закипит ли раньше вода при поглощении такой энергии? Коэффициент поглощения излучения водой $\alpha=800$ см⁻¹, коэффициент отражения - $R=0$. Скорость звука в воде $C_{зв}=1.5$ км/с, теплота испарения воды $Q=2.3$ кДж/г, удельная теплоёмкость воды $c=4.2$ Дж/(г К), коэффициент теплового объёмного расширения воды $\beta = 2.1 \times 10^{-4}$ 1/град.

25. Сравнить акустическое и световое давление, которое испытывает мишень из полированного алюминия с коэффициентом отражения 99% при облучении лазером с длительностью импульса $\tau=100$ фс. Коэффициент Грюнайзена алюминия $\Gamma=2$, коэффициент поглощения лазерного излучения $\alpha=1 \times 10^6$ см⁻¹, скорость звука в алюминии $C_{зв}=6.2$ км/с.

26. Какая мощность W [Вт] должна быть у непрерывного лазера с расходимостью пучка $\theta = 10^{-3}$ рад, чтобы, используя линзу с фокусным расстоянием $F = 1$ м, можно было бы выжигать узоры на деревянной доске? Излучательную способность дерева принять $\varepsilon = 1$. Коэффициент отражения считать $R = 0$. Температура воспламенения дерева $T = 1000$ К. Теплопроводностью дерева пренебречь. Постоянная Стефана-Больцмана $\sigma_{SB} = 5.67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·К⁴).

4.6 КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

4.6.1 ПРИМЕРНЫЕ ЗАДАНИЯ ПЕРВОГО КОЛЛОКВИУМА (КО1-9)

Теоретические вопросы первого коллоквиума

1. Связь интенсивности лазерного излучения (ЛИ) в вакууме с амплитудой поля плоской волны линейной и круговой поляризации, а также с энергией и плотностью фотонов.

Ответ: $I_{\text{лин}} = cE_0^2/8\pi$. $I_{\text{круг}} = cE_0^2/4\pi$. $I = c(\hbar\omega)n_\phi = c\varepsilon_\phi n_\phi$, $\hbar = 1.05 \times 10^{-27}$ эрг×с – const Планка.

2. Эффективное значение интенсивности ЛИ при фокусировке на мишень.

Ответ: $I_{\text{эфф}} = \varepsilon/(\tau S)$, где ε - энергия в импульсе, τ - длительность импульса, и S - площадь пятна фокусировки.

3. Энергия свободного электрона в лазерном поле

Ответ: $\varepsilon = e^2 E_0^2 / (4m\omega^2) = (r_e \lambda^2 / 2\pi c) I$. $r_e = e^2 / (mc^2) = 2.82 \times 10^{-13}$ см – классический радиус электрона.

4. Релятивистские формулы для энергии ε и импульса P частицы и их связь со скоростью частицы V :

Ответ: $\varepsilon = c((mc)^2 + P^2)^{1/2}$; $\varepsilon = mc^2 / (1 - (V/c)^2)^{1/2}$ $P = \varepsilon V / c^2$; $P = mV / (1 - (V/c)^2)^{1/2}$

Те же формулы для энергии и импульса фотона:

Ответ: $\varepsilon_\phi = P_\phi c$; $P_\phi = \varepsilon_\phi / c$; $\varepsilon_\phi = \hbar\omega$

5. Связь импульса p и энергии E лазерного излучения

Ответ: $p = E/c$.

Связь момента импульса и энергии лазерного излучения круговой поляризации

Ответ: $M = E/\omega$. Спин фотона $\hbar = 1.05 \times 10^{-27}$ дин×секунда×см.

6. Критерий силы волны. Энергия свободного электрона в поле волны круговой поляризации релятивистской интенсивности

Ответ: $a = eE_0/mc\omega$. $\varepsilon = mc^2(1+a^2)^{1/2}$.

7. Средняя сила, действующая на электрон, при рассеянии лазерного излучения

Ответ: $f = \sigma_T(I/c)$, $\sigma_T = (8\pi/3)r_e^2 = 6.65 \times 10^{-25}$ см² – томсоновское сечение рассеяния эл-м волны электроном.

8. Время свободного пробега электрона (e) при столкновении с атомами (a) или ионами (i)

Ответ: $\tau_{ea} = 1/(n_a v_e \sigma_{ea})$; $\tau_{ei} = 1/(n_i v_e \sigma_{ei})$. Частота столкновений с (a) или (i) $\nu = 1/\tau$

9. Уравнение движения электрона в поле плоской волны с учётом столкновений

Ответ: $m d^2r/dt^2 + (m/\tau_{ст}) dr/dt = eE_0 \cos(\omega_L t)$

10. Уравнение набора энергии электроном в лазерном поле с учётом столкновений с нейтралами или ионами:

Ответ: $d\varepsilon_e/dt = \sigma_{ОТП} I - (2m/M) \varepsilon_e/\tau_{ст}$

11. Максимальная энергия, набираемая электроном в лазерном поле при обратнотормозном поглощении (ОТП)

Ответ: $(\varepsilon_e)_{\max} = \sigma_{ОТП} I \tau_{ст} (M/2m)$

12. Сечение поглощения при ОТП:

Ответ: $\sigma_{\text{ОТП}} = (r_e \lambda^2 / \pi c) (1/\tau_{\text{ст}}) (1 + 1/(\tau_{\text{ст}} \omega_L)^2)^{-1}$

13. Связь коэффициента обратнотормозного поглощения с плотностью электронов и сечением поглощения:

Ответ: $\alpha_{\text{ОТП}} = \sigma_{\text{ОТП}} n_e$

14. Изменение интенсивности лазерного излучения при прохождении им поглощающей среды

Ответ: $I(x) = I(0)\exp(-\alpha x)$ – закон Бугера

Задачи первого коллоквиума

1. Интенсивность непрерывного лазерного излучения в вакууме равна 100 Вт/см^2 . Длина волны излучения 0.5 мкм . Чему равна плотность энергии в пучке? Определить число фотонов в единице объёма. Чему равен импульс единицы объёма пучка?

Ответ: $0.33 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/см}^3$; $8.3 \cdot 10^9 \text{ фотон/см}^3$; $0.11 \cdot 10^{-10} \text{ Н·сек/м}^3 = 0.11 \cdot 10^{-11} \text{ дин·сек/см}^3$.

2. Электрон в лазерном поле совершает гармоническое движение с амплитудой 10^{-8} см и частотой $\omega = 2 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$. Чему равна интенсивность лазерного излучения? Чему равна амплитуда электрического поля?

Ответ: $I \sim 7 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$?, $E_0 \sim 760 \text{ Гс} \sim 2.3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

3. Электрон в лазерном поле совершает гармоническое движение с амплитудой 10^{-8} см и частотой $\omega = 2 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$. Чему равна средняя излучаемая мощность? Считать, что излучение вызвано томсоновским рассеянием с сечением $6.7 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$ и найти интенсивность лазерного излучения. Ответ: Мощность равна $4.55 \cdot 10^{-10} \text{ эрг/с} = 4.55 \cdot 10^{-17} \text{ Дж/с}$. Интенсивность равна $0.68 \cdot 10^{15} \text{ эрг/см}^2 \text{ с} = 0.68 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$

4. Энергия электрона в 20 раз превышает его энергию покоя. Чему равна скорость электрона? Во сколько раз импульс электрона превышает значение mc , где m – масса электрона, c – скорость света?

Ответ: $v/c = 799/800 = 0.99875$; $p/mc = 799/40 = 19.975$.

5. Сечение ОТП лазерного излучения в плазме составляет 10^{-18} см^2 . При прохождении через слой плазмы толщиной 20 см интенсивность лазерного излучения уменьшилась на 10% . Чему равна концентрация свободных электронов в плазме?

Ответ $n = 0.1/(\sigma_{\text{ОТП}} X) = 0.510^{16} \text{ см}^{-3}$.

6. Определить максимальную энергию (в эВ), которую набирает электрон в атомарном газе под действием лазерного излучения интенсивностью 10^9 Вт/см^2 , если сечение ОТП лазерного излучения в плазме составляет 10^{-18} см^2 , время свободного пробега электрона между столкновениями с атомами равно 10^{-13} секунд , а отношение массы атома к массе электрона равно $2 \cdot 10^4$?

$W_{\text{max}} = (M/2m)\sigma_{\text{ОТП}} I \tau_{\text{ст}} = 6.25 \text{ эВ}$

7. Чему равна интенсивность лазерного излучения с энергией кванта 0.117 эВ (CO₂ - лазер), при которой свободный электрон в лазерном поле набирает энергию, равную половине своей энергии покоя? Чему равна амплитуда электрического поля?

Ответ $2.75 \cdot 10^{16}$ Вт/см², $4.8 \cdot 10^3$ Гс = $1.44 \cdot 10^6$ В/см

4.6.2 ПРИМЕРНЫЕ ЗАДАНИЯ ВТОРОГО КОЛЛОКВИУМА (КО2-16)

Теоретические вопросы второго коллоквиума

1. Формула комплексной диэлектрической проницаемости плазмы

Ответ: $\varepsilon = 1 - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\nu)]$

2. Формула плазменной частоты

Ответ: $\omega_p^2 = 4\pi n e^2 / m$ [с⁻²], $\omega_p = 5.65 \times 10^4 \times (n_e [\text{см}^{-3}])^{1/2}$ [с⁻¹].

3. Формула связи критической плотности электронов с длиной волны лазерного излучения

Ответ: $n_c \lambda^2 = \pi$ [см×см²×см⁻³].

4. Связь волнового вектора с диэлектрической проницаемостью:

Ответ: $k = (\omega/c) \sqrt{\varepsilon} = (\omega/c)(n + i\kappa)$. $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$; $\varepsilon' = n^2 - \kappa^2$; $\varepsilon'' = 2n\kappa$

5. Графики зависимости коэффициентов R и α [см⁻¹] от частоты падающего излучения ω для плазмы.

6. Связь коэффициента поглощения с показателем поглощения

Ответ: $\alpha = 2(\omega/c)\kappa$ [см⁻¹]

7. Глубина проникновения поля $\delta = c/(\omega\kappa)$ [см] в плазму при нормальном скин-эффекте и высокочастотном (бесстолкновительном) скин-эффекте

Ответ: нормальный ($\omega \ll \omega_p$ и $\omega \ll \nu$): $\delta = c/(2\pi\sigma\omega)^{1/2} = (c/\omega_p)(2\nu/\omega)^{1/2}$ [см], высокочастотный ($\nu \ll \omega \ll \omega_p$): $\delta = c/\omega_p$ [см].

8. Как выражается коэффициент отражения и поглощательная способность при нормальном падении волны на преграду через показатель поглощения и показатель преломления:

Ответ: $R = [(n-1)^2 + \kappa^2] / [(n+1)^2 + \kappa^2]$, $A = 1-R$.

9. Связь проводимости металла с плотностью электронов, частотой столкновений электрона с решёткой, массой и зарядом электрона:

Ответ: $\sigma = ne^2/m\nu$ [с⁻¹]

10. Давление лазерного излучения на площадку в зависимости от угла падения и коэффициента отражения и плотность импульса поля в лазерном луче

Ответ: $p_n = (1+R)(I/c)\cos^2\theta$; $p_\tau = (1-R)(I/c)\cos\theta\sin\theta$ [дин/см²]; $G = I/c^2$ [(дин×с)/см³] = [(г×см/с)/см³].

11. Уравнение теплопроводности с источником лазерного энерговыделения. Коэффициент температуропроводности. Мощность лазерного энерговыделения в единице объёма.

Ответ: $\partial_t T = \chi \cdot \partial_{xx} T + (1-R)\alpha I(0)\exp(-\alpha x)/(\rho c_p)$; $\chi = k_T/(\rho c_p)$ [см²/с]. $W_V = (1-R)\alpha I(0)\exp(-\alpha x)$ [эрг/(см³×с)]

12. Глубина проникновения тепла и время выравнивания температуры в области с характерным размером Δ :

Ответ: $\Delta \sim (\chi t)^{1/2}$ [см] и $t \sim \Delta^2/\chi$ [с].

Задачи второго коллоквиума

1. Луч лазера падает на поверхность стекла под углом 60° к нормали. Определить величину и направление силы, действующей на единицу площади стекла, если интенсивность излучения $I = 3 \cdot 10^9$ Вт/см², а коэффициент отражения $R = 0.9$.

Ответ: $P_n = 0.475 \cdot 10^6$ дин/см² = 4.75 Н/см², $P_\tau = 0.43 \cdot 10^5$ дин/см² = 0.43 Н/см², $f \approx 0.475 \cdot 10^6$ дин/см² = 4.75 Н/см²; $\text{tg} \gamma = 0.1$.

2. Оценить поглощательную способность серебряного зеркала $A=1-R$ для электромагнитного излучения с длиной волны $\lambda = 6$ мм. Какой тип скин-эффекта при этом реализуется? Вычислить глубину проникновения поля в металл. Проводимость серебра $\sigma = 6 \cdot 10^{17}$ сек⁻¹, плотность 10.5 г/см³, атомный вес $A = 108$. Считать, что на один атом серебра приходится один свободный электрон.

Ответ: $A = 0.58 \cdot 10^{-3}$; $\delta = c/(2\pi\sigma\omega)^{1/2} = 2.76 \cdot 10^{-5}$ см; $\omega_p = 1.36 \cdot 10^{16}$ с⁻¹; $n_e = 5.8 \cdot 10^{22}$ см⁻³, $v = 2.5 \cdot 10^{13}$ с⁻¹; $\omega = 3.14 \cdot 10^{11}$ с⁻¹.

3. Экспериментально установлено, что калий становится прозрачным при длине волны излучения меньшей $\lambda = 3150$ ангстрем. Используя эти данные, найти плотность свободных электронов в калии. Определив её, оценить глубину δ проникновения электрического поля для длины волны $\lambda = 1.06$ мкм. Классический радиус электрона $r_e = 2.8 \cdot 10^{-13}$ см.

Ответ: $n_e = 1.13 \cdot 10^{22}$ см⁻³, $\omega_p = 6.0 \cdot 10^{15}$ с⁻¹; $\delta = c/\omega_p = 5.0 \cdot 10^{-6}$ см

4. На слой плазмы с плотностью электронов $4 \cdot 10^{22}$ см⁻³ падает лазерное излучение с длиной волны 1.06 мкм. Какой должна быть интенсивность лазерного излучения круговой поляризации, чтобы волна начала проходить через плазму.

Ответ: $\omega_p = 5.65 \cdot 10^4 \times (n_e)^{1/2} = 1.13 \cdot 10^{16}$ с⁻¹, $\omega = 1.77 \cdot 10^{15}$ с⁻¹, $a = (\omega_p/\omega)^2 = 40.75$. $a = eE_0/mc\omega \Rightarrow$

$$I = cE_0^2/4\pi = \pi a^2 \left(\frac{c}{r_e} \right) \left(\frac{mc^2}{\lambda^2} \right); I \approx 4 \cdot 10^{21} \text{ Вт/см}^2$$

5. Какой импульс в направлении падающей волны получит электрон в поле лазерного излучения с интенсивностью $I = 10^{15}$ Вт/см² и длительностью $\tau = 10^{-12}$ секунд? Определить импульс, который несёт лазерное излучение, если радиус пучка равен $R = 10$ мкм. Сечение томсоновского рассеяния $\sigma_T = 6.65 \cdot 10^{-25}$ см²

Ответ: $\Pi_e = 2.2 \cdot 10^{-25}$ дин·сек = $2.2 \cdot 10^{-30}$ Н·сек, $\Pi_{las} = 1.0 \cdot 10^{-6}$ дин·сек = $1.0 \cdot 10^{-11}$ Н·сек.

6. Лазерный пучок падает по нормали на прозрачную стеклянную плоскопараллельную пластинку. Интенсивность пучка равна $I_0 = 90 \text{ Вт/см}^2$. Какова будет интенсивность пучка при выходе из стекла, если показатель преломления стекла равен 2?

Ответ: $R = (n-1)^2/(n+1)^2 = 1/9$. Через первую границу пройдёт $I_1 = (1 - R)I_0 = (8/9) \times 90 = 80 \text{ [Вт/см}^2]$.
Через вторую границу пройдёт $I_2 = (1 - R)I_1 = (8/9) \times 80 \approx 71.11 \text{ [Вт/см}^2]$.

7. Определить критическую длину волны лазерного излучения λ_{crit} для меди. Определив её, вычислить глубину проникновения δ электрического поля для длины волны $\lambda = 5 \cdot \lambda_{\text{crit}}$. Считать, что на один атом меди приходится один свободный электрон. Плотность меди $\rho = 8.9 \text{ г/см}^3$. Атомный вес $A = 64$. Классический радиус электрона $r_e = 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ см}$.

Ответ: $\lambda_{\text{crit}} = 1.16 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, $\delta = c/\omega_p = 1.84 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

8. За какое время нагреется до температуры плавления и начнёт плавиться в центре лазерного пятна пластина из алюминия, если её облучать непрерывным лазерным излучением интенсивностью $I = 10^5 \text{ Вт/см}^2$? Коэффициент отражения $R = 0.8$, температура плавления 660°C , коэффициент теплопроводности $2 \text{ Вт/(см}\cdot\text{К)}$, удельная теплоёмкость $1 \text{ Дж/(г}\cdot\text{К)}$, плотность 2.7 г/см^3 , начальная температура 0° C , теплота плавления 0.4 кДж/г . При каком размере лазерного пятна можно пренебречь теплопроводностью вдоль поверхности пластины?

Ответ: $t = 0.015 \text{ с}$, $\sqrt{S} \approx d \gg 1 \text{ мм}$.

9. За какое время расплавится лёд при температуре 0°C в области поглощения излучения Nd-лазера. Можно ли пренебречь теплопроводностью льда за это время? Интенсивность излучения $I = 10 \text{ кВт/см}^2$, коэффициент отражения 50% , коэффициент поглощения $\alpha = 0.17 \text{ см}^{-1}$. Теплота плавления льда $Q_{\text{плав}} = 330 \text{ Дж/г}$, плотность $\rho = 0.9 \text{ г/см}^3$, коэффициент температуропроводности льда $\chi = 5.7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$.

Ответ: $t \approx 0.35 \text{ с}$, $(\chi t)^{1/2} \approx 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ см} \ll (1/\alpha) = 6 \text{ см}$

4.6 ПРИМЕРНЫЕ ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Поток энергии в световой волне. Лазерные импульсы и пучки: энергия, мощность, интенсивность. Концентрация световой энергии во времени и в пространстве.
2. Поглощение и рассеяние лазерного излучения свободным электроном. Средняя энергия колебательного движения электрона в поле электромагнитной волны. Её зависимость от интенсивности и длины волны лазерного излучения.
3. Параметр силы волны (безразмерная амплитуда волны). Релятивистские импульс и энергия электрона в поле плоской электромагнитной волны круговой поляризации.
4. Уравнение движения электрона в лазерном поле с учётом столкновений с ионами и нейтралами. Сечение обратнотормозного поглощения.

5. Уравнение набора энергии электроном в лазерном поле с учётом столкновений с ионами и нейтралами. Максимальная энергия, набираемая электроном в лазерном поле с учётом столкновений.
6. Световое давление. Импульс световой волны. Давление лазерного пучка на плоскую поверхность в зависимости от угла падения и коэффициента отражения.
7. Оптический пробой газа. Механизм лавинной ионизации. Пороговая интенсивность света как функция длины волны, длительности лазерного импульса и давления газа.
8. Комплексная диэлектрическая проницаемость плазмы. Вклад в диэлектрическую проницаемость свободных сталкивающихся электронов и ионов. Соотношение этих вкладов.
9. Мнимая и действительная часть диэлектрической проницаемости. Определение волнового вектора через диэлектрическую проницаемость, показатель преломления и показатель поглощения.
10. Определение коэффициентов отражения и поглощения плазмой лазерного излучения через показатель преломления и поглощения. Мощность энергосвечения в единице объёма плазмы.
11. Коэффициент отражения и коэффициент поглощения плазмой лазерного излучения при частоте лазерного излучения много большей плазменной частоты и частоты столкновений электрона с ионами.
12. Коэффициент отражения и коэффициент поглощения плазмой лазерного излучения при частоте лазерного излучения много меньшей плазменной частоты и много большей частоты столкновений электрона с ионами.
13. Коэффициент отражения и коэффициент поглощения плазмой лазерного излучения при частоте лазерного излучения много меньшей плазменной частоты и меньшей частоты столкновений электрона с ионами.
14. Критическая плотность электронов в плазме. Глубина проникновения поля в металл и плазму. Нормальный скин-эффект. Высокочастотный скин-эффект.
15. Поглощение и отражение неоднородной плазмой (линейный профиль плотности) лазерного излучения при нормальном падении луча..
16. Поглощение и отражение неоднородной плазмой (линейный профиль плотности) лазерного излучения Р- и S- поляризации при наклонном падении луча. Резонансное поглощение.
17. Лазерный нагрев поглощающей среды: изменение температуры, плавление, испарение. Уравнение теплопроводности и мощность лазерного теплового источника.
18. Оценки тепловых эффектов (нагрев, плавление, испарение) при поглощении лазерного излучения непрозрачным телом на основе уравнения сохранения энергии.
19. Термоупругий механизм генерации акустических импульсов в конденсированной среде лазерным излучением. Акустическое давление при поглощении очень короткого лазерного импульса.

20. Атом в сильном лазерном поле. Туннельный эффект и многофотонная ионизация. Параметр Келдыша для туннельного эффекта при лазерном воздействии.

4.3. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы студентов

Основная:

1. С.В. Буланов, Т.Ж. Есиркепов, М. Кандо, А.С. Пирожов, Н.Н. Розанов. Релятивистские зеркала в плазме – новые результаты и перспективы // УФН, Т. 183, № 5, С. 449, (2013).
2. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.
3. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 84 с.
4. В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков, Е.Б. Яковлев. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. -312 с.
5. Быков В.П. Лазерная электродинамика. Элементарные и когерентные процессы при взаимодействии лазерного излучения с веществом. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. -384 с.
6. Делоне Н.Б. Атом в сильном поле лазерного излучения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 64 с.
7. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Нелинейная ионизация атомов лазерным излучением. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. - 320 с.
8. В.С. Беляев, В.П. Крайнов, В.С. Лисица, А.П. Матафонов, Генерация быстрых заряженных частиц и сверхсильных магнитных полей при взаимодействии сверхкоротких интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями, УФН, Т. 178, С. 823, (2008).

Дополнительная:

1. Коротеев Н.И., Шумай И.Л. Физика мощного лазерного излучения. Глава 2. – М.: Наука, 1991.
2. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Курс лекций. - М.: Наука, 1989.
3. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. - М.: Наука, 1970.
4. Дж. Рэди. Действие мощного лазерного излучения. - М.: Мир, 1974.
5. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. - М.: Наука, 1974.
6. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. // М.: Наука. 1966.
7. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. - М.: Наука, 1967.

РЕСУРСЫ ИНТЕРНЕТ

1. Федеральный портал «Российское образование» (<http://www.edu.ru>)
2. Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» (<http://window.edu.ru>)
3. Сайт СарФТИ НИЯУ МИФИ (<http://sarfti.ru>), раздел «Учебно-методические пособия»

5. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

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

5.1. Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине

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

№	Наименование раздела	Компетенция	Индикаторы освоения	Текущий контроль
Семестр 3				
1. РАЗДЕЛ 1		ПК-11, ПК-12.1	3-ПК-11, У-ПК-11 В-ПК-11, 3-ПК-12.1, У-ПК-12.1, В-12.1	УО
Рубежный контроль		ПК-11, ПК-12.1	3-ПК-11, У-ПК-11 В-ПК-11, 3-ПК-12.1, У-ПК-12.1, В-12.1	Тест
2. РАЗДЕЛ 2		ПК-11, ПК-12.1	3-ПК-11, У-ПК-11 В-ПК-11, 3-ПК-12.1, У-ПК-12.1, В-12.1	УО
Рубежный контроль		ПК-11, ПК-12.1	3-ПК-11, У-ПК-11 В-ПК-11, 3-ПК-12.1, У-ПК-12.1, В-12.1	Тест
Промежуточная аттестация		ПК-11, ПК-12.1	3-ПК-11, У-ПК-11 В-ПК-11, 3-ПК-12.1, У-ПК-2.1, В-12.1	Экзамен

5.1. Шкалы оценки образовательных достижений

Рейтинговая оценка знаний является интегральным показателем качества теоретических и практических знаний и навыков студентов по дисциплине и складывается из оценок, полученных в ходе текущего контроля и промежуточной аттестации.

Результаты текущего контроля и промежуточной аттестации подводятся по шкале балльно-рейтинговой системы.

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. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины производится на базе учебных лабораторий кафедры в СарФТИ НИЯУ МИФИ учебных корпусов. Основные лаборатории оснащены современным оборудованием, позволяющим проводить практические и лабораторные занятия. Выполнение лабораторных работ, а также самостоятельной работы студентов осуществляется на рабочих местах, оснащенных макетами ЛР с соответствующим комплектом средств измерений и объектами исследований. Здесь же проводятся консультации по текущим вопросам и по курсовому проектированию курсовых проектов.

Практические работы являются частью занятия и выполняются под контролем наставника с использованием результатов практических занятий, в том числе – и в качестве практических занятий.

В качестве материально-технического обеспечения используются также ресурсы и программно-аппаратное обеспечение компьютерного класса.

При выполнении практических, научно-исследовательских, опытно-конструкторских, хозяйственных и госбюджетных работ используются современные средства измерения и контроля разных фирм и др. На кафедре имеются и используются оснащенные компьютерными системами управления исследовательские стенды и технологические комплексы.

8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении дисциплины применяются активная и интерактивная формы обучения в сочетании с самостоятельной работой. На аудиторных занятиях происходит изложение нового теоретического материала в виде лекций, разбираются решения типичных задач на применение полученных сведений для более глубокого понимания, проводится контроль выполнения домашних работ. Во время лекционных и практических занятий используются презентации и обсуждаются новые эксперименты по взаимодействию лазерного излучения с веществом, а также новые работы по численному моделированию лазерного взаимодействия, которые появились в научной литературе.

Организация занятий обязательно включает диалог со студентами по вопросам решения задач. Во время контроля выполнения заданий, предложенных для внеаудиторной самостоятельной работы, производится выступление студентов с вариантами решений.

Самостоятельная внеаудиторная работа студентов состоит из двух взаимосвязанных частей. Первая представляет собой освоение теоретического материала, вторая – приобретение практических навыков решения задач. Освоение теоретического материала производится по

лекциям и указанной основной и дополнительной литературе. Решение задач, предложенных в качестве домашнего задания, позволяет студентам научиться решать типичные задачи, возникающие при изучении взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки: 03.04.01 «Прикладные математика и физика», профиль подготовки: «Квантовая оптика и лазерная физика»

Автор(ы): старший преподаватель кафедры КЭ

Рецензент(ы): старший преподаватель кафедры КЭ