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

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 01/08-577

от 28.08.2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВУЮ РАДИОФИЗИКУ

Направление подготовки (специальность) [1] 03.03.01 Прикладные математика и физика

Семестр	**Трудоемкость, кред.**	**Общий объем курса, час.**	**Лекции, час.**	**Практич. занятия, час.**	**Лаборат. работы, час.**	**В форме практической подготовки, час.**	**СРС, час.**	**КСР, час.**	**Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП**
6	2	72	30	15	0		27	0	З
Итого	2	72	30	15	0	0	27	0	

АННОТАЦИЯ

Изучение основополагающих вопросов взаимодействия оптического излучения с веществом, определяющих физические принципы работы квантовых усилителей и генераторов; получение представления о физических основах работы квантовых приборов радиодиапазона и оптического диапазона; знакомство с основными режимами работы квантовых генераторов (лазеров) и способами их реализации, с основными энергетическими и спектральными характеристиками.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение основополагающих вопросов взаимодействия оптического излучения с веществом, определяющих физические принципы работы квантовых усилителей и генераторов; получение представления о физических основах работы квантовых приборов радиодиапазона и оптического диапазона; знакомство с основными режимами работы квантовых генераторов (лазеров) и способами их реализации, с основными энергетическими и спектральными характеристиками.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими дисциплинами: атомная физика, квантовая механика, теория поля, физика конденсированного состояния вещества, теоретическая физика твердого тела.

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			
изучение и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта	модели, методы и средства фундаментальных и прикладных исследований и	ПК-1 [1] - Способен проводить сбор, анализ научно-технической информации,	З-ПК-1[1] - Знать способы сбора, анализа научно-технической информации,

по тематике исследования, сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий	разработок в области суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов в науке, технике, технологиях, а также в сферах наукоемкого производства	отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования *Основание:* Профессиональный стандарт: 40.011	отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования. ; У-ПК-1[1] - Уметь синтезировать и анализировать научно-техническую информацию по тематике исследования. ; В-ПК-1[1] - Владеть навыками сбора, синтеза и анализа научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования.
выбор методов и подходов к решению поставленной научной проблемы, формулировка математической модели явления, аналитические и численные расчеты	модели, методы и средства фундаментальных и прикладных исследований и разработок в области суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов в науке, технике, технологиях, а также в сферах наукоемкого производства	ПК-2 [1] - Способен выбирать и применять необходимое оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области *Основание:* Профессиональный стандарт: 25.035, 40.011	З-ПК-2[1] - Знать современное оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области. ; У-ПК-2[1] - Уметь критически оценивать, выбирать оборудования, инструментов и методов исследований в избранной предметной области ; В-ПК-2[1] - Владеть навыками выбора и применения оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области.

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	**Задачи воспитания (код)**
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование

	научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (В19)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (В22)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование культуры безопасности при работе с лазерным излучением (В27)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование культуры безопасности при работе на экспериментальных и промышленных установках высокой мощности (В28)

5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары)/ Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	6 Семестр						
1	Основные физические понятия	1-8	16/8/0		25	КИ-8	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2
2	Взаимодействие радиоизлучения с веществом. Мазеры	9-15	14/7/0		25	КИ-15	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2
	Итого за 6 Семестр		30/15/0		50		
	Контрольные мероприятия за 6 Семестр				50	3	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2

* – сокращенное наименование формы контроля

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

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	6 Семестр	30	15	0
1-8	**Основные физические понятия**	16	8	0
1	**Введение** Предмет фотоники и квантовой электроники. История развития. Цель и задачи курса.	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
2 - 8	**Основные физические понятия** Спонтанные и индуцированные переходы. Коэффициенты Эйнштейна. Поглощение и усиление. Инверсная населенность энергетических уровней и понятие об абсолютной отрицательной температуре. Свойства индуцированного излучения	Всего аудиторных часов		
		14	7	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	**Взаимодействие радиоизлучения с веществом. Мазеры**	14	7	0
9 - 10	**Квантовые усилители и генераторы радиодиапазона** Энергетические уровни в газах. Форма спектральной линии. Способы наблюдения поглощения радиоизлучения в газах.	Всего аудиторных часов		
		4	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	**Молекулярный генератор на пучке молекул аммиака** Способ получения усиления. Мощность генерации. Стабильность частоты NH3 мазера.	Всего аудиторных часов		
		4	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
13	**Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР)** Способы наблюдения ЭПР. Релаксация в парамагнетиках. Времена и физические механизмы релаксации. Однородное и неоднородное уширение.	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
14	**Ядерный магнитный резонанс (ЯМР)** Ширина линий ЯМР. Способы наблюдения ЯМР.	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
15	**Особенности парамагнетизма ионных кристаллов** Трехуровневые мазеры на твердом теле. Условия получения отрицательной температуры. Влияние времени релаксации. Шумовые свойства квантовых парамагнитных усилителей	Всего аудиторных часов		
		2	1	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

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашних заданий, изучении пройденного материала, подготовке к письменным тестам. Для того чтобы показать современное состояние фотоники и квантовой радиофизики, предусмотрено широкое использование современных научных работ и публикаций по данной теме, посещение лабораторий НИЯУ МИФИ. Рекомендуется посещение студентами научных семинаров и конференций, проводимых в НИЯУ МИФИ, а также в других московских университетах и институтах.

7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

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

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

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1	З-ПК-1	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-1	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-1	З, КИ-8, КИ-15
ПК-2	З-ПК-2	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-2	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-2	З, КИ-8, КИ-15

Шкалы оценки образовательных достижений

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

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-х балльной шкале	Отметка о зачете	Оценка ECTS
90-100	5 – *«отлично»*	*«зачтено»*	A
85-89	4 – «*хорошо*»		B
75-84			C
70-74			D
65-69	3 – «*удовлетворительно*»		
60-64			E
ниже 60	2 – «*неудовлетворительно*»	*«не зачтено»*	F

Оценка «отлично» соответствует глубокому и прочному освоению материала программы обучающимся, который последовательно, четко и логически стройно излагает свои ответы, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответах материалы монографической литературы.

Оценка «хорошо» соответствует твердым знаниям материала обучающимся, который грамотно и, по существу, излагает свои ответы, не допуская существенных неточностей.

Оценка «удовлетворительно» соответствует базовому уровню освоения материала обучающимся, при котором освоен основной материал, но не усвоены его детали, в ответах присутствуют неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности.

Отметка «зачтено» соответствует, как минимум, базовому уровню освоения материала программы, при котором обучающийся владеет необходимыми знаниями, умениями и навыками, умеет применять теоретические положения для решения типовых практических задач.

Оценку «неудовлетворительно» / отметку «не зачтено» получает обучающийся, который не знает значительной части материала программы, допускает в ответах существенные ошибки, не выполнил все обязательные задания, предусмотренные программой. Как правило, такие обучающиеся не могут продолжить обучение без дополнительных занятий.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ S96 Principles of Lasers : , Svelto, Orazio. , Boston, MA: Springer US, 2010

2. ЭИ И 83 Волновые процессы. Основные законы : учебное пособие, Иродов И. Е., Москва: Лаборатория знаний, 2020

3. ЭИ К 44 Квантовая и оптическая электроника : , Киселев Г. Л., Санкт-Петербург: Лань, 2022

4. ЭИ М50 Лазерная технология : , Менушенков А.П., Москва: МИФИ, 2008

5. 537 З-43 Принципы лазеров : , Звелто О., Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2008

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 621.37 Д81 Квантовая электроника. Приборы и их применение : учебное пособие для вузов, Дудкин В.И., Пахомов Л.Н., Москва: Техносфера, 2006

2. 537 Х19 Лекции по квантовой радиофизике : , Ханин Я.И., Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005

3. 537 К23 Лекции по квантовой электронике : , Карлов Н.В., М.: Наука, 1988

4. 537 С83 Основы квантовой электроники : , Успенский А.В., Страховский Г.М., М.: Высш. школа, 1979

5. 535 А91 Физические основы фотоники : учеб. пособие для вузов, Астапенко В.А., М.: , 2005

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. сайт кафедры №70 НИЯУ МИФИ (http://kaf70.mephi.ru/)

https://online.mephi.ru/

http://library.mephi.ru/

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

При изучении данного курса необходимо твердо усвоить основные законы взаимодействия электромагнитного излучения оптического и радиодиапазонов с веществом. Опираясь на законы излучения черного тела, надо уметь выводить основные закономерности спонтанного и индуцированного излучений. Надо уметь, используя соотношения неопределенностей, получить представления о нижнем пределе расходимости индуцированного излучения, о его спектральной ширине. Необходимо уметь качественно показать связь коэффициентов усиления и поглощения электромагнитного излучения в среде с распределением населенностей энергетических уровней, иметь представление об инверсной населенности и абсолютной отрицательной температуре. Надо иметь представление о способах получения усиления в пучковых молекулярных генераторов, знать физику формирования спектрального состава этих генераторов, уметь оценить мощность излучения, стабильность частоты и основные факторы, влияющие на стабильность излучения молекулярных генераторов (на примере молекулярного генератора на пучке молекул аммиака).

Необходимо знать физическое объяснение явления электронного парамагнитного резонанса и ядерного магнитного резонанса как с точки зрения классической физики, так и использованием квантовомеханических представлений. Нужно иметь представление о временах

и физических механизмах спин-спиновой и спин-решеточной релаксации, что такое однородное и неоднородное уширение спектральных линий. Представление об эффекте спинового эха, его объяснение с точки зрения классической физики. Практические применения явления спинового эха. Необходимо иметь представления об особенностях парамагнитной релаксации ионных кристаллов, их применение в квантовых многоуровневых парамагнитных усилителях. Нужно уметь показать условия получения инверсной населенности, иметь представление о шумовых свойствах квантовых парамагнитных усилителей.

Переходя к оптическому диапазону необходимо представлять особенности взаимодействия оптического излучения с веществом, особенности его использования в устройствах квантовой электроники. Необходимо иметь представление об основных способах получения инверсной населенности в оптическом диапазоне. Нужно знать, что такое оптический резонатор, чем он отличается от резонаторов радиодиапазона, уметь оценить основные виды потерь, их влияние на свойства резонаторов, иметь представления об устойчивых и неустойчивых резонаторах. Надо знать резонансные свойства резонаторов, представления о собственных типах колебаний оптических резонаторов (модах). Надо уметь качественно изобразить распределение электрического поля для различных мод, основные методы селекции типов колебаний.

Необходимо знать способы получения инверсной населенности и работу твердотельных оптических квантовых генераторов (на примере рубинового и неодимовых лазеров). Знать основные режимы работы (режим свободной генерации, модуляции добротности, режим синхронизации мод), их основные характеристики и способы их получения. Иметь представление о работе электрооптических затворов, пассивных затворов для модуляции добротности идля синхронизации мод.

Необходимо знать работу, способы получения инверсной населенности He-Ne лазера, роль буферного газа – гелия, оптимальные условия работы (парциальные давления в рабочей смеси, общее давление смеси, ток разряда, влияние диаметра газоразрядной трубки). Лазер на углекислом газе, каков состав рабочей смеси, роль каждого компонента. Типы лазеров на углекислом газе и их основные характеристики (отпаянные лазеры, с продольной прокачкой, с поперечной прокачкой, ТЕА-лазеры, их особенности).

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Необходимо дать студентам возможность усвоить основные законы взаимодействия электромагнитного излучения оптического и радиодиапазонов с веществом. Опираясь на законы излучения твердого тела, надо показать такие основные закономерности спонтанного и индуцированного излучений, как A ~ кубу частоты, равенство коэффициентов Эйнштейна для поглощения и излучения. Надо, используя соотношения неопределенностей, дать представления о нижнем пределе расходимости индуцированного излучения, о его спектральной ширине, качественно показать связь коэффициентов усиления и поглощения электромагнитного излучения в среде с распределением населенностей энергетических уровней, дать представление об инверсной населенности и абсолютной отрицательной температуре. Показать способы получения усиления в пучковых молекулярных генераторов, их основные характеристики (на примере молекулярного генератора на пучке молекул аммиака).

Необходимо объяснить явления электронного парамагнитного резонанса и ядерного магнитного резонанса как с точки зрения классической физики, так и использованием квантовомеханических представлений. Нужно дать представление о временах и физических

механизмах спин-спиновой и спин-решеточной релаксации, что такое однородное и неоднородное уширение спектральных линий. Представление об эффекте спинового эха, его объяснение с точки зрения классической физики. Практические применения явления спинового эха. Рассказать об особенностях парамагнитной релаксации ионных кристаллов, их применение в квантовых многоуровневых парамагнитных усилителях, представление о шумовых свойствах квантовых парамагнитных усилителей.

Переходя к оптическому диапазону необходимо объяснить особенности взаимодействия оптического излучения с веществом, особенности его использования в устройствах квантовой электроники. Необходимо иметь представление об основных способах получения инверсной населенности в оптическом диапазоне. Нужно рассказть, что такое оптический резонатор, чем он отличается от резонаторов радиодиапазона, научить оценивать основные виды потерь, их влияние на свойства резонаторов, дать представления об устойчивых и неустойчивых резонаторах. Расказать собственных типах колебаний оптических резонаторов (модах). Качественно изобразить распределение электрического поля для различных мод, показать основные методы селекции типов колебаний.

Рассказать способы получения инверсной населенности и работу твердотельных оптических квантовых генераторов (на примере рубинового и неодимовых лазеров), основные режимы работы, их основные характеристики и способы их получения.

Показать работу, способы получения инверсной населенности He-Ne лазера, роль буферного газа – гелия, оптимальные условия работы (парциальные давления в рабочей смеси, общее давление смеси, ток разряда, влияние диаметра газоразрядной трубки). Лазер на углекислом газе, каков состав рабочей смеси, роль каждого компонента. Типы лазеров на углекислом газе и их основные характеристики (отпаянные лазеры, с продольной прокачкой, с поперечной прокачкой, ТЕА-лазеры, их особенности).

Автор(ы):

Сипайло Игорь Петрович, к.ф.-м.н.