

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан

А.Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Квантовая радиофизика

по направлению подготовки

12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

Направленность (профиль) подготовки :
Материалы фотоники и оптоинформатики

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
А.Г. Коротаев

Председатель УМК
А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с фотонными технологиями обработки информации, проектированием, конструированием и технологиями производства элементов, приборов и систем фотоники и оптоинформатики.

ОПК-3 Способен проводить экспериментальные исследования и измерения, обрабатывать и представлять полученные данные с учетом специфики измерений в системах и устройствах фотоники и оптоинформатики.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК-1.2 Применяет инженерные знания в профессиональной деятельности.

ИОПК-1.3 Применяет знания естественных наук в инженерной практике

ИОПК-3.1 Выбирает и использует соответствующие ресурсы, современные методики и оборудование для проведения экспериментальных исследований и измерений

ИОПК-3.2 Обрабатывает и представляет полученные экспериментальные данные для получения обоснованных выводов

2. Задачи освоения дисциплины

– Получить целостное представление о принципах взаимодействия квантованных полей с квантовыми системами, объяснить основные явления взаимодействия фотонного излучения с различными средами и механизмы формирования спектральных характеристик сред.

– Познакомиться с основами физики лазеров, характеристиками конкретных лазерных устройств.

– Освоить и научиться практическому применению полученных знаний при выполнении лабораторных работ и для решения задач, возникающих при выполнении профессиональных обязанностей.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплина (модули)».

Дисциплина относится к обязательной части образовательной программы.

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Восьмой семестр, экзамен

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Линейная алгебра, Методы математической физики, Атомная и ядерная физика, Квантовая механика, Векторный и тензорный анализ.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часов, из которых:

-лекции: 46 ч.

-лабораторные: 28 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Основы квантовой радиофизики

Предмет и историческая справка развития квантовой радиофизики. Квантовые усилители и генераторы СВЧ и оптического диапазона частот. Роль квантовой радиофизики в разработке новейшей техники. Постулаты квантовой теории. Операторы и их свойства. Волновая функция и её свойства. Бра и кет вектора.

Тема 2. Квантовая теория свободного электромагнитного поля

Гармонический осциллятор (квантовый и классический) Собственные состояния и вектора. Операторы рождения и уничтожения частиц и их алгебраические свойства. Спектр и базисная система оператора числа частиц. Операторы физических величин (вектор потенциала, напряженностей электрического и магнитного поля и энергии) для электромагнитных полей. Квантование свободного электромагнитного поля. Энергетический спектр и стационарные состояния свободного электромагнитного поля. Общая характеристика и свойства электромагнитного поля в стационарном состоянии.

Тема 3. Квантовая теория взаимодействия электромагнитного поля с веществом

Поле как совокупность квантовых гармонических осцилляторов. Волновая функция поля. Математический аппарат вторичного квантования.

Оператор Гамильтона системы заряженных частиц и электромагнитного поля. Матричные элементы оператора энергии взаимодействия поля с веществом для процессов однофотонного излучения и поглощения.

Спонтанное и индуцированное излучение фотона. Свойства индуцированного и спонтанного излучения. Вероятность однофотонного поглощения.

Вероятности излучения и поглощения в мультипольном приближении. Соотношение между вероятностями индуцированного и спонтанного процессов. Правила отбора для мультипольного излучения (поглощения). Элементы теории групп для анализа симметрии состояния и связь пространственной четности волновой функции квантовой системы с правилом отбора для мультипольного излучения (поглощения). Многофотонные процессы

Тема 4. Механизмы уширения спектральных линий. Релаксация

Понятие когерентности излучения. Когерентность световых волн (временная и пространственная). Когерентность второго порядка. Продольное и поперечное время релаксации. Понятие ансамбля частиц. Спектральный контур линии Соотношение неопределенностей энергия-время и естественная ширина линии излучения. Естественное, доплеровское и ударное уширение. Физические механизмы однородного и неоднородного уширения. Оценки величин неоднородного уширения линий в различных средах. Новые формы контура и обуславливающие их эффекты.

Релаксация. Релаксационные процессы в различных физических системах Продольное и поперечное времена релаксации и их физический смысл. Оценки продольного и поперечного времен релаксации для различных сред.

Тема 5. Квантовая кинетика

Чистые и смешанные состояния. Временная эволюция статистических смесей.

Матрица плотности в квантовой теории и ее свойства. Свойства матричных элементов матрицы плотности. Оператор временной эволюции. Уравнение Лиувилля-Неймана. Временная эволюция элементов матрицы плотности.

Тема 6. Методы создания инверсной разности населенностей

Основные методы создания инверсии в средах. Метод оптической накачки. Трехуровневые системы. Представление 3-х уровневой системы. Преимущества четырехуровневых систем.

Электрический разряд. Создание инверсной разности населенностей в газах с помощью газового разряда. Возбуждение атомов при столкновении с электронами. Вероятность возбуждения атома налетающим электроном. Неупругие соударения атомов. Перенос энергии при неупругом соударении атомов и молекул.

Химический способ.

Использование p - n перехода в полупроводниках.

Газодинамический метод.

Тема 7. Элементная база лазеров и их параметры

Спектр мод резонатора Типы открытых резонаторов. Поля в открытых резонаторах. Принципы расчета оптического резонатора. Дискретные частоты внутри спектральной ширины линии излучения. Ширина полосы отдельной моды резонатора. Относительные и абсолютные значения частот. Стабильность, ее пределы. Воспроизводимость частоты. Усиление.

Тема 8. Управление параметрами лазерных систем

Параметры лазерных систем. Внешние и внутренние лазерные параметры. Мощность излучения. Распределение мощности излучения внутри пучка, энергия излучения. Угловая расходимость и линейный размер пучка. Методы повышения мощности генерации лазеров. Метод модулированной добротности.

Тема 9. Конкретные лазеры и их характеристики

Атомные лазеры. Строение атома. Атомные орбитали. Квантовые числа электрона. Сложение векторных моментов в атоме. Типы связей. Электронные конфигурации атомов. Идентификация уровней. Гелий-неоновый лазер. Состав активной среды. Механизмы возбуждения. Лазер на аргоне. Состав активной среды. Механизмы возбуждения.

Молекулярные лазеры. Основные типы движений в молекулах. Электронные, колебательные и вращательные уровни. Идентификация уровней. Оптические переходы в молекулах. Разрешенные и запрещенные переходы. Вероятность переходов. Лазер на углекислом газе. Состав рабочей смеси, роль каждой компоненты. Технические решения и особенности конструкций CO_2 лазеров (продольная, поперечная прокачка, волноводные, отпаянные, газодинамические лазеры). Лазер на оксиде углерода как пример ангармонической накачки и другие. Азотные и эксимерные лазеры.

Жидкостные лазеры (на красителях).

Твёрдотельные лазеры. Лазер на кристалле рубина. Лазер на стекле с неодимом. Лазеры на центрах окраски. Полупроводниковые лазеры.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, тестов по лекционному материалу (on-line коллоквиум), контроля выполнения лабораторных работ и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Текущая аттестация по первой и второй части теоретического курса проводится в виде коллоквиумов, результаты которых учитываются при проведении промежуточной аттестации. Коллоквиумы представляют собой on-line тестирование, каждый содержит около 40 вопросов и подробно охватывает весь пройденный материал. Оценка опроса формируется на основании критериев оценивания освоения компетенций и соответствующих им результатов обучения (см. таблицу 9.1)

Таблица 9.1 – Формирование оценки результатов коллоквиума

Оценка	Критерии оценивания освоения компетенций	
	ОПК-1	% от максимальной суммы баллов за тест
Отлично	5	$\geq 90\%$
Хорошо	4	от 70 до 89%
Удовлетворительно	3	от 60 до 69%
Неудовлетворительно	Все остальные варианты	

Текущая аттестация по лабораторным работам включает устный опрос обучающегося, выполнение им всех лабораторных работ и представление по ним письменных отчётов. Отчет по лабораторной работе должен содержать рукописное или печатное изложение цели работы, основных этапов и приемов ее достижения, полученных теоретических и экспериментальных результатов, оценку их достоверности, анализ результатов и выводы.

Текущая оценка формируется на основании опроса и содержания отчёта в соответствии с таблицей 9.2.

Таблица 9.2 – Текущая аттестация по лабораторным работам

Оценка	Критерии оценивания освоения компетенций	
	ОПК-1	ОПК-3
Аттестован	3÷5	3÷5
Не аттестован	Все остальные варианты	

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Экзамен в восьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из двух частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Первая часть содержит один вопрос, проверяющий ИОПК 1.2. Ответ на вопрос первой части дается в развернутой форме.

Вторая часть содержит один вопрос, проверяющий ИОПК 1.3. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме.

Примерный перечень теоретических вопросов

1. Постулаты квантовой теории. Операторы и их свойства.
2. Волновая функция и её свойства.
3. Бра и кет вектора.
4. Квантовые статистики. Принцип Паули. Распределения Бозе–Эйнштейна и Ферми–Дирака.
5. Чистые и смешанные состояния.
6. Общая теория матрицы плотности.
7. Временная эволюция статистических смесей.
8. Уравнение Лиувилля–Неймана.
9. Колебательное движение. Уравнение Лагранжа.
10. Уравнения Гамильтона.

11. Квантование через формализм Лагранжа.
12. Квантование электромагнитного поля, свободного от зарядов.
13. Операторы рождения, уничтожения, числа и фазы фотонов.
14. Особенности квантовой радиофизики по сравнению с квантовой электродинамикой.
15. Теория катастроф как математический аппарат исследования поведения квантовых систем.
16. Квантовые функции когерентности.
17. Механизмы уширения спектральных линий.
18. Спонтанное излучение. Среднее время жизни атома в возбуждённом состоянии.
19. Резонансное поглощение и индуцированное излучение. Коэффициенты Эйнштейна.
20. Многоэлектронные атомы.
21. Молекулярные спектры.
22. Вращательные движения молекул.
23. Колебательные движения молекул.
24. Идентификация электронных уровней в многоатомных молекулах.
25. Квантовые усилители и генераторы (общие представления, классификации).
26. Генерация лазерного излучения в двухуровневой системе. Механизмы заселения и релаксации.
27. Методы создания инверсной заселённости уровней.
28. Трёх- и четырёхуровневые схемы создания инверсной населённости (преимущества и недостатки).
29. Виды накачки активного вещества.
30. Механизмы возбуждения в газовых лазерах.
31. Принцип работы гелий-неонового лазера (атомные лазеры).
32. Принцип работы аргонового лазера (ионный лазер).
33. Принцип работы лазеров на парах металлов (He-Cd).
34. Принцип работы CO_2 -лазеров (молекулярный лазер).
35. Конструкции CO_2 -лазера.
36. Принцип работы CO -лазеров (молекулярный лазер).
37. Принцип работы азотного лазера (молекулярный лазер).
38. Принцип работы эксимерных и эксиплексных лазеров.
39. Принцип работы жидкостных лазеров (лазеров на красителях).
40. Общие представления о твердотельных лазерах. Принцип работы лазера на кристалле рубина.
41. Общие представления о твердотельных лазерах. Принцип работы лазера на стекле с неодимом.
42. Общие представления о твердотельных лазерах. Принцип работы лазеров на центрах окраски.
43. Принцип работы полупроводниковых лазеров. Достоинства и недостатки полупроводниковых лазеров.
44. Отличие полупроводниковых лазеров на гомо- и двойном гетеропереходе.
45. Основные элементы лазерной системы. Внешние и внутренние лазерные параметры.
46. Пространственное преобразование лазерного пучка. Преобразование амплитуды (лазерное усиление).
47. Преобразование частот: Оптическая параметрическая генерация. Генерация второй гармоники.
48. Управление внутренними параметрами лазерной системы. Модуляция добротности.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Промежуточная аттестация (экзамен) по дисциплине проводится в форме устного опроса по теоретическому материалу. При проведении устного опроса учитываются оценки, полученные на коллоквиумах и лабораторных работах. К промежуточной аттестации допускаются только студенты, успешно прошедшие текущие аттестации по лабораторным работам.

Каждый билет для устного опроса состоит из двух теоретических вопросов по двум темам дисциплины. В качестве дополнительных вопросов используются контрольные вопросы, предлагаемые для самостоятельной работы обучающегося.

Оценка успеваемости студента формируется в соответствии с таблицей 10.1.

Таблица 10.1 – Промежуточная аттестация по дисциплине

Оценка	Критерии оценивания освоения компетенций	
	ОПК-1	ОПК-3
Отлично	5	5
	5	4
	4	5
Хорошо	4	4
	4	3
	3	4
Удовлетворительно	3	3
Неудовлетворительно	Все остальные варианты	

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=8232>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

в) Методические указания по проведению лабораторных работ.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Войцеховская О.К. Теоретические вопросы физики лазеров: учебное пособие / О.К. Войцеховская; Том. гос. ун-т. – 2-е изд. – Томск: СКК-Пресс, 2006. - 252 с.

2. Войцеховская О.К. Лазеры и спектроскопия: учебное пособие: НИ Том. гос. ун-т. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – 286 с.

3. Штыков В.В. Квантовая радиофизика: учебное пособие для вузов / В.В. Штыков. – Москва: Академия, 2009. – 334 с.

б) дополнительная литература:

1. Коэн-Таннуджи К. Квантовая механика. Т. 1 / К. Коэн-Таннуджи, Б. Диу, Ф. Лалоз; пер. с фр. и предисл. Л. Н. Новикова. - Изд. 2-е, испр. и доп. - Москва: Ленанд [и др.], 2015. - 966 с.: рис.

2. Квантовая радиофизика: учебное пособие / П.М. Бородин, В.С. Касперович, А.В. Комолкин [и др.]; под ред. В.П. Чижики;. - СПб.: Издательство С.-Пб. гос. ун-т, 2004. - 688 с.: ил.

3. Файн В.М. Квантовая радиофизика Т. 1: Фотоны и нелинейные среды Москва: Советское радио, 1972, -471 с.

4. Пойзнер Б.Н. Физические явления в лазерах: механизмы и модели: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 154 с.

в) ресурсы сети Интернет:

– Издательство «Лань» [Электронный ресурс] : электрон.-библиотечная система.

Электрон. дан. – СПб., 2010- . – URL: <http://e.lanbook.com/>

– Электронный ресурс <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– Электронный ресурс <http://lib.tsu.ru/ru/elektronnye-resursy>

– Электронный ресурс American Physical Society (<https://www.aps.org/>)

– Электронный ресурс Journals Oxford Academic (<https://academic.oup.com/journals/>)

– Электронный ресурс Cambridge Core Journals&Books Online (<https://www.cambridge.org/core>)

– Электронный ресурс SAGE journals (<https://journals.sagepub.com/>).

– Электронный ресурс Optica Publishing Group (<https://www.osapublishing.org/>).

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office 2010 Russian Academic Open, Microsoft Windows Professional 7 Academic Open (Лицензия №47729022 от 26.11.2010).

– Пакет программного обеспечения РТС MathCad Education (Договор поставки №7193 от 14.10.2015).

– Пакет программного обеспечения MathWorks MATLAB Education (Договор поставки №7193 от 14.10.2015).

– Dr.Web Desktop Security Suite (Договор поставки №1095 от 21.10.2020).

– Microsoft office Access 2013 (Договор поставки №7193 от 14.10.2015).

– Microsoft office Vision Professional 2013 (Договор поставки №7193 от 14.10.2015).

– Microsoft office Project Professional 2013 (Договор поставки №7193 от 14.10.2015).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

В процессе освоения дисциплины, обучающиеся выполняют лабораторные работы на лабораторных стендах, расположенных в учебной лаборатории по лазерной технике № 311, и содержащих на следующие технические устройства:

– Лабораторный стол,

– измеритель энергии излучения 0,15-3 мкм и 10,6 мкм с энергетическим диапазоном: 7 мкДж-10м Дж марки ОРНІR,

– фотоприемник Рin фотодиод ФДУК-1СТ,

- осциллограф Tektronix TDS2024,
- держатели оптических элементов,
- набор нейтральных светофильтров,
- головка пирозлектрическая PE110BB,
- импульсный электроразрядный азотный лазер NL-0.5-5,
- лазер He-Ne модель ГЛ-05

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Актру»).

15. Информация о разработчиках

Лячин Александр Владимирович, кандидат физ.-мат. наук, доцент, кафедра квантовой электроники фотоники, РФФ, ТГУ, доцент.