

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Сердитова Наталья Евгеньевна
Должность: проректор по образовательной деятельности
Дата подписания: 25.08.2025 16:55:16
Уникальный программный ключ:
6cb002877b2a1ea649fdebb0cc541e4e95322d13

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Утверждаю:

Руководитель ООП

Е.В. Барабанова



«26» июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

Квантовая радиофизика

Закреплена за
кафедрой:

Прикладной физики

Направление
подготовки:

03.03.03 Радиофизика

Направленность
(профиль):

Материалы и устройства радиоэлектроники (беспилотные системы, программно-аппаратные комплексы, системы автоматизированного проектирования)

Квалификация:

Бакалавр

Форма обучения:

очная

Семестр:

8

Программу составил(и):

канд. физ.-мат. наук, доц., Васильев Сергей Александрович

Тверь, 2025

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения дисциплины (модуля):

Изучение основ лазерной физики и нелинейной оптики на максимально строгом в теоретическом отношении уровне, предполагающем решения уравнений квантовой механики. Должны быть глубоко освоены теории резонаторов и теоретические аспекты многофотонных параметрических и непараметрических процессов в нелинейных средах, методы расчета лазерных оптических схем с применением матричного аппарата, назначения и параметров основных типов лазеров.

Задачи :

Освоение практических навыков работы с газовыми, жидкостными и твердотельными лазерами

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Аналитическая геометрия и линейная алгебра

Теория вероятностей и математическая статистика

Векторный и тензорный анализ

Электричество и магнетизм

Оптика

Атомная физика

Электродинамика

Квантовая механика

Физика лазеров и лазерные технологии

Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:

Физика лазеров и лазерные технологии

Основы электромагнитной и радиационной безопасности

Резонансные методы исследования вещества

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе:	
самостоятельная работа	65
часов на контроль	27

4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

ПК-4.1: Осуществляет сбор, обработку, анализ и обобщение передового отечественного и международного опыта в соответствующей области исследований

ПК-4.4: Решает аналитические задачи в области физического материаловедения

УК-1.5: Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки

5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Виды контроля в семестрах:	
экзамены	8

6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ

Язык преподавания: русский.

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

№	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Сем.	Часов	Примечание
	Раздел 1. 1. Поглощение и вынужденное излучение света.				
1.1	Обзор теории излучения черного тела. Вычисление вероятностей поглощения и вынужденного излучения. Вынужденные переходы в случайном поле. Вычисление вероятностей квантовых переходов.	Лек	8	2	
1.2	Обзор теории излучения черного тела. Вычисление вероятностей поглощения и вынужденного излучения. Вынужденные переходы в случайном поле. Вычисление вероятностей квантовых переходов.	Пр	8	2	
	Раздел 2. 2. Спонтанное излучение.				
2.1	Вычисление вероятности спонтанного излучения. Механизмы уширения линий. Однородное и неоднородное уширения. Лоренцева и гауссова формы линий. Насыщение. Вырождение уровней. Определение полной ширины линий, вычисление интенсивностей насыщения	Лек	8	4	
2.2	Вычисление вероятности спонтанного излучения. Механизмы уширения линий. Однородное и неоднородное уширения. Лоренцева и гауссова формы линий. Насыщение. Вырождение уровней. Определение полной ширины линий, вычисление интенсивностей насыщения	Пр	8	4	
	Раздел 3. 3. Принцип действия лазера.				
3.1	Пассивные оптические резонаторы. Моды резонатора. Непрерывный и нестационарный режимы работы лазеров. - Демонстрационные работы по наблюдению мод резонатора и режимов работы He-Ne и полупроводниковых лазеров.	Лек	8	4	

3.2	Пассивные оптические резонаторы. Моды резонатора. Непрерывный и нестационарный режимы работы лазеров. - Демонстрационные работы по наблюдению мод резонатора и режимов работы He-Ne и полупроводниковых лазеров.	Пр	8	4	
	Раздел 4. 4. Свойства лазерного излучения.				
4.1	Монохроматичность и когерентность лазерного излучения. Направленность и яркость лазерного излучения. Когерентность высшего порядка.	Лек	8	2	
4.2	Демонстрационные работы по наблюдению и измерениям монохроматичности, когерентности и направленности лазерного излучения	Пр	8	2	
	Раздел 5. 5. Основные типы лазеров.				
5.1	Твердотельные лазеры. Лазеры на кристаллах и стеклах. Газовые лазеры. Процессы возбуждения и релаксации в газах. Газовые лазеры на нейтральных атомах. Ионные лазеры. Молекулярные газовые лазеры. Жидкостные лазеры. Химические лазеры. Полупроводниковые лазеры. Лазеры на свободных электронах. Решение задач, связанных с процессами накачки. Определение вращательных постоянных и ширины Лэмбовского провала.	Лек	8	4	
5.2	Демонстрационная работа по изучению свойств и особенностей излучения полупроводниковых лазеров.	Пр	8	4	
	Раздел 6. 6. Восприимчивость вещества.				
6.1	Определение и общие свойства восприимчивости. Теория дисперсии. Двухуровневая модель и эффект насыщения. Уравнения Блоха. Решение задач, связанных с матрицами Паули и разложением операторов.	Лек	8	2	
6.2	Определение и общие свойства восприимчивости. Теория дисперсии. Двухуровневая модель и эффект насыщения. Уравнения Блоха. Решение задач, связанных с матрицами Паули и разложением операторов.	Пр	8	2	
	Раздел 7. 7. Нестационарная оптика.				

7.1	Вынужденные нестационарные эффекты. Собственное излучение атома. Коллективное излучение. Решение задач, связанных с квантовыми биениями и резонансной флуоресценцией	Лек	8	2	
7.2	Вынужденные нестационарные эффекты. Собственное излучение атома. Коллективное излучение. Решение задач, связанных с квантовыми биениями и резонансной флуоресценцией	Пр	8	2	
	Раздел 8. 8. Механизмы оптической нелинейности сред.				
8.1	Нелинейные восприимчивости. Модели оптического ангарионизма. Макроскопическая нелинейная оптика. Непараметрические взаимодействия. Параметрические взаимодействия. Нелинейная спектроскопия.	Лек	8	2	
8.2	Нелинейные восприимчивости. Модели оптического ангарионизма. Макроскопическая нелинейная оптика. Непараметрические взаимодействия. Параметрические взаимодействия. Нелинейная спектроскопия.	Пр	8	2	
	Раздел 9. 9. Статистическая оптика.				
9.1	Закон Кирхгофа для квантовых усилителей. Аналитический сигнал. Корреляция интенсивностей. Гамильтонова форма уравнений Максвелла. Статистика фотонов и фотоэлектронов. Взаимодействие атома с квантовым полем. -Решение задач по статистической оптике	Лек	8	2	
9.2	Закон Кирхгофа для квантовых усилителей. Аналитический сигнал. Корреляция интенсивностей. Гамильтонова форма уравнений Максвелла. Статистика фотонов и фотоэлектронов. Взаимодействие атома с квантовым полем. -Решение задач по статистической оптике	Пр	8	2	
	Раздел 10. 10. Лазерная спектроскопия.				
10.1	Теория метода. Техническое оформление метода. Задачи, решаемые с помощью лазерной спектроскопии.	Лек	8	2	
10.2	Теория метода. Техническое оформление метода. Задачи, решаемые с помощью лазерной спектроскопии.	Пр	8	2	
	Раздел 11. Самостоятельная работа				
11.1	Самостоятельная работа	Ср	8	65	

	Раздел 12. Экзамен				
12.1	Экзамен	Экзамен	8	27	

Список образовательных технологий

1	Дискуссионные технологии (форум, симпозиум, дебаты, аквариумная дискуссия, панельная дискуссия, круглый стол, фасилитированная и т.д.)
2	Информационные (цифровые) технологии
3	Активное слушание

8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

см. приложение

8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

Задание: Дать развернутый ответ о сходстве и различии оптического и электронного ограничения в гетерогенном полупроводниковом лазере.

Способ аттестации: устный опрос.

Критерии оценки: студент должен отметить связь оптического и электронного ограничений с шириной активного слоя и длиной волны, дополнительно объяснить преимущества РОДГС лазера над ДГС и механизм создания волновода в гетероструктуре.

Задание: Назвать недостатки 532нм DPSS лазера

Способ аттестации: устный опрос.

Критерии оценки: в ответе студента должно быть подробно описано паразитное ИК излучение этих лазеров. Дополнительно можно отметить низкий КПД и высокое энергопотребление, а также неустойчивость работы такого лазера при изменении температуры.

8.3. Требования к рейтинг-контролю

Качество усвоения обучающимся каждой дисциплины оценивается по 100-балльной шкале.

Максимальная сумма рейтинговых баллов по учебной дисциплине, заканчивающейся экзаменом, по итогам семестра составляет 60.

Обучающемуся, набравшему 40–54 балла, при подведении итогов семестра (на последнем занятии по дисциплине) в рейтинговой ведомости учета успеваемости и зачетной книжке может быть выставлена оценка «удовлетворительно».

Обучающемуся, набравшему 55–57 баллов, при подведении итогов семестра (на последнем занятии по дисциплине) в графе рейтинговой ведомости учета успеваемости «Премияльные баллы» может быть добавлено 15 баллов и выставлена экзаменационная оценка «хорошо».

Обучающемуся, набравшему 58–60 баллов, при подведении итогов семестра (на последнем занятии по дисциплине) в графе рейтинговой ведомости учета успеваемости

«Премияльные баллы» может быть добавлено 27 баллов и выставлена экзаменационная оценка «отлично».

Обучающийся, набравший до 39 баллов включительно, сдает экзамен.

1. Изучение спецкурса заканчивается экзаменом.

На первый модуль отводится 30 баллов, которые распределяются следующим образом:

- 10 баллов за каждую из 3 выполненных лабораторных работ

На второй модуль отводится 30 баллов, которые распределяются следующим образом:

- 10 баллов за каждую из 3 выполненных лабораторных работ

2. Экзамен проводится в день, определенный деканатом в рамках расписания учебного процесса.

На экзамене студентам предлагается ответить на 2 теоретических вопроса, каждый из которых оценивается до 20 баллов. Максимальный балл за экзамен - 40 баллов.

3. Студенты, набравшие в течение семестра 40 баллов могут по своему желанию получить оценку «удовлетворительно» без сдачи экзамена.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Рекомендуемая литература

Перечень программного обеспечения

1	Adobe Acrobat Reader
2	Google Chrome
3	OpenOffice

Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	Репозиторий ТвГУ
2	ЭБС ТвГУ
3	ЭБС «Лань»
4	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
5	ЭБС «ЮРАИТ»
6	ЭБС «ZNANIUM.COM»

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-226	комплект учебной мебели, Микшерный пульт, Аудиокомплект, Интерактивная система, проектор, Телекоммуникационные шкафы, экран, компьютер
3-227	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран
3-228	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран

3-25	комплект учебной мебели, компьютеры, осциллограф, принтеры, спектрометр, микроскоп, дифрактометр рентгеновский, электронно-оптический комплекс,
3-28	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран настенный

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Вопросы к экзамену

1. История развития квантовой радиофизики.
2. Элементарные многофотонные процессы.
3. Восприимчивость вещества. Теория дисперсии.
4. Уравнение Блоха.
5. Нелинейная оптика.
6. Классификация нелинейных эффектов.
7. Параметрические взаимодействия.
8. Нелинейная спектроскопия.
9. Типы лазеров.
10. Основные свойства лазерного излучения: направленность, яркость, когерентность, мощность, пятнистая картина.
11. Вывод формул Рэбеля-Джинса и Планка.
12. Вычисление вероятности поглощения с помощью теории возмущения.
13. Разрешенные и запрещенные переходы.
14. Соотношение между вероятностями электрического дипольного перехода и магнитного дипольного перехода.
15. Коэффициенты Эйнштейна.
16. Вычисление вероятности спонтанного излучения из термодинамических соображений.
17. Спектральный состав спонтанного излучения.
18. Безизлучательная релаксация.
19. Механизм уширения линий.
20. Насыщение. Интенсивность насыщения.
21. Вырождение уровней.
22. Принцип работы лазера.
23. Электрическая накачка.
24. Оптическая накачка. Распределение энергии в лазерном стержне.
25. Химическая накачка.
26. Матрицы передачи для различных оптических систем.
27. Пассивные оптические резонаторы. Типы резонаторов.
28. Обобщенный сферический резонатор.
29. Непрерывный и нестационарный режимы работы лазеров.
30. Применение лазеров.

Планы лабораторных занятий

- Демонстрационные работы по наблюдению мод резонатора и режимов работы He-Ne и полупроводниковых лазеров.
- Демонстрационные работы по наблюдению и измерениям монохроматичности, когерентности и направленности лазерного излучения
- Демонстрационная работа по изучению свойств и особенностей излучения полупроводниковых лазеров.
- Решение задач, связанных с матрицами Паули и разложением операторов.
- Решение задач, связанных с квантовыми биениями и резонансной флуоресценцией
- Решение задач по нелинейной оптике
- Решение задач по статистической оптике

Типовые тесты

-Вариант 1

Указать неправильные утверждения:

а) Разность частот, соответствующих двум модам в резонаторе Фабри-Перо с одними и теми же значениями l и m , но с n , отличающимися на 1, равна $\Delta\nu n = c/d$, где c – скорость света, d – расстояние между зеркалами.

б) Если матрица передачи для оптической системы $1 \rightarrow 2$ имеет вид $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$

то фокусное расстояние для такой системы определяется формулой $f = -\frac{1}{C}$

в) Единицей измерения светимости является нит (нт).

г) Усиление излучения за один проход в активной среде определяется выражением

$K = \exp[\sigma(N_2 - N_1)l]$, где σ – сечение перехода, l – длина активной среды, N_1 и N_2 – населенности уровней 1 и 2.

д) Квантовый выход накачки η целиком зависит от спектральной интенсивности света, излучаемого источником оптической накачки.

е) При отсутствии поглощения наиболее интенсивно накачивается внешняя часть цилиндрического лазерного стержня, соответствующая неравенству $R/\eta < r < R$, где R – радиус стержня, η – показатель преломления.

ж) Спонтанное время жизни фотона $\tau_{сп}$ зависит от интенсивности падающего света.

з) В трехуровневом лазере каждый атом, оказавшийся в возбужденном состоянии, дает вклад в инверсию населенностей.

и) Конфокальный резонатор состоит из плоского и сферического зеркал.

к) Уравнение Гельмгольца имеет вид: $\nabla^2 \vec{u} = -k^2 \vec{u}$, где $\vec{u}$ – вектор напряженности электрического поля, k – волновое число.

Вариант 2

Указать правильные утверждения:

а) Квантовый выход накачки φ_r зависит от конструкции системы передачи излучения в стержень.

б) В лазерном излучении среднее число фотонов в моде может быть намного большим, чем единица.

в) Свертка лоренцевой линии шириной $\Delta\omega_1$ и гауссовой линии шириной $\Delta\omega_2$ дает линию с шириной $\Delta\omega = \sqrt{\Delta\omega_1^2 + \Delta\omega_2^2}$.

г) Спектральная плотность излучения ρ_ν зависит только от частоты ν и температуры T .

д) Если матрица передачи для оптической системы $1 \rightarrow 2$ имеет вид $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$, то для системы $2 \rightarrow 1$ она будет иметь такой же вид.

е) Вероятности поглощения и вынужденного поглощения равны друг другу: $W_{12} = W_{21}$.

ж) Величина вероятности спонтанных переходов A растет как квадрат частоты: $A \sim \omega_0^2$.

з) В формуле для разности населенностей $\Delta N = \frac{N_t}{1 + 2\omega\tau}$, где τ - безызлучательное время.

и) Плоскопараллельный резонатор неустойчив.

к) В отсутствие поглощения в лазерном стержне радиусом R наиболее сильно накачиваются области, соответствующие условию $R/\eta \leq r \leq R$, где η - показатель преломления материала стержня.

Вариант 3

Указать правильные утверждения:

а) Коэффициенты отражения зеркал, ограничивающих активную среду, в лазере должны быть близкими к единице.

б) В четырехуровневом лазере каждый атом, попавший на верхний уровень, дает вклад в инверсию населенностей.

в) Спектральная ширина линии излучения зависит от выходной мощности излучения.

г) Спектральная эффективность оптической накачки ϕ_s определяется конструкцией системы передачи.

д) При фокальной системе накачки зеркальная поверхность, внутри которой находятся лампа и стержень, представляет собой эллипсоид вращения.

е) Фокусное расстояние для оптической системы, описываемой матрицей передачи

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & -13 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}, \text{ равно: } f=2.$$

ж) Для излучения АЧТ при комнатной температуре среднее число фотонов в моде для оптического диапазона близко к единице.

з) Эксимерные лазеры относятся к лазерам на красителях.

и) Спонтанное время жизни фотона $t_{сп}$ зависит от интенсивности падающего света.

к) Состояния имеют определенную четность, если гамильтониан системы инвариантен относительно операции инверсии.

Вариант 4

Указать неправильные утверждения:

а) Квантовый выход ϕ_{21} определяется как отношение числа фотонов, испущенных при переходе $2 \rightarrow 1$ к полному числу атомов, первоначально находившихся на уровне 1. тсп, так и от безызлучательного времени $t_{безызл.}$.

в) В случае газа, состоящего из двух компонентов, возбуждение атомов может осуществляться лишь при электронном ударе.

г) При любых значения коэффицента поглощения света цилиндрическим стержнем величина плотности энергии накачки в центре стержня больше, чем на поверхности стержня.

д) Энергия электродипольного взаимодействия намного меньше соответствующей энергии магнитодипольного взаимодействия.

е) Эффект Доплера приводит к однородному уширению линий.

ж) Величина вероятности спонтанного перехода A растет как четвертая степень частоты ($A \sim \omega_o^4$).

з) В Резонаторе Фабри-Перо две соседние продольные моды всегда разрешаются по частоте.

и) Возможна и такая матрица передачи оптической системы:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{2} & -1 \\ 3 & -\sqrt{2} \end{pmatrix}.$$

к) Ксантеновые лазеры – это полупроводниковые лазеры.

Вариант 5

Указать правильные утверждения:

а) Из трех величин: ω , α и σ только α зависит исключительно от свойств среды.

б) При оптических частотах вероятность магнитного дипольного перехода примерно в 10^5 раз меньше вероятности электрического перехода.

в) Мощность, которая должна поглощаться системой для поддержания ее в состоянии насыщения, равна мощности теряемой из-за спонтанного излучения.

г) При малых давлениях газа столкновительное уширение линий больше чем доплеровское.

д) Свертка гауссовой линии с лоренцевой линией дает линию, не являющуюся ни гауссовой, ни лоренцевой.

е) Спонтанное время жизни $\tau_{сп}$ в одном случае больше, чем полное время жизни τ .

ж) Коэффициент поглощения света α не зависит от величины отношения I/I_s для данной частоты.

з) Квантовый выход накачки φ_r не зависит от спектральной интенсивности источника накачки.

и) Для лазерного излучения среднее число фотонов в моде намного меньше единицы.

к) Возможна и такая матрица передачи: $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -13 \\ -1 & 7 \end{pmatrix}$

Вариант 6

Указать правильные утверждения:

а) Число Френеля N равно одной второй отношения дифракционного полуугла α_d плоской электромагнитной волны, имеющей те же поперечные

размеры, что и резонатор, к геометрическому полууглу α_g :

$$N = \frac{\alpha_d}{2\alpha_g}.$$

б) В четырехуровневом лазере каждый атом, оказавшийся в возбужденном состоянии, дает вклад в инверсию населенностей.

в) Спектральная ширина линии лазерного излучения зависит от времени жизни фотона в резонаторе τ_e

г) Положительная инверсия ($N_2 > N_1$) является достаточным условием для достижения порога генерации.

д) Электрические дипольные переходы происходят только между состояниями, имеющими различную четность.

е) Форма линии лазерного перехода соответствует δ - функции Дирака.

ж) Возможна и такая матрица передачи для оптической системы:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

з) Помещение лазерного стержня длиной l в прозрачную сферическую обложку с диаметром $D = \eta l$ позволяет увеличить плотность энергии в стержне в η^3 раз (η - показатель преломления оболочки и стержня).

и) Формула Планка для спектральной плотности энергии ρ_ν переходит в формулу Рэлея-Джинса при условии $h\nu \rightarrow \infty$.

к) Из трех величин: w , α и σ только α (коэффициент поглощения света средой) зависит исключительно от свойств данной среды.