

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Квантовая радиофизика

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

---

Направленность образовательной программы

Радиофизика и электроника

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.32 Квантовая радиофизика относится к обязательной части образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;	ОПК-1.1: Обладает фундаментальными знаниями в области физики и радиофизики ОПК-1.2: Анализирует физические аспекты теории и возможности ее использования для решения научно-исследовательских задач ОПК-1.3: Решает научно-исследовательские задачи, в том числе в сфере педагогической деятельности	ОПК-1.1: Знать квантовую теорию электромагнитного поля; основные элементарные квантовые процессы с участием фотонов; квантовую теорию релаксации и уширения спектральных линий; различные методы создания инверсной населенности в среде; физические принципы функционирования и основные характеристики квантовых усилителей и генераторов Уметь находить аналитические решения задач квантовой теории свободного электромагнитного поля; делать численные оценки времен релаксации для различных сред; находить аналитическое решение и делать численные оценки инверсии населенностей и коэффициента усиления (поглощения) в двух-, трех- и четырехуровневых средах; делать оценки добротности различных резонаторов и параметров лазерного излучения Владеть навыками проведения аналитических расчетов для получения численных оценок порога самовозбуждения, мощности излучения,	Задачи	Экзамен: Контрольные вопросы Задания

		<p>частоты генерации для квантовых генераторов оптического диапазонов длин волн</p> <p>ОПК-1.2: Знать квантовую теорию электромагнитного поля; основные элементарные квантовые процессы с участием фотонов; квантовую теорию релаксации и уширения спектральных линий; различные методы создания инверсной населенности в среде; физические принципы функционирования и основные характеристики квантовых усилителей и генераторов Уметь находить аналитические решения задач квантовой теории свободного электромагнитного поля; делать численные оценки времен релаксации для различных сред; находить аналитическое решение и делать численные оценки инверсии населенностей и коэффициента усиления (поглощения) в двух-, трех- и четырёхуровневых средах; делать оценки добротности различных резонаторов и параметров лазерного излучения Владеть навыками проведения аналитических расчетов для получения численных оценок порога самовозбуждения, мощности излучения, частоты генерации для квантовых генераторов оптического диапазонов длин волн</p> <p>ОПК-1.3: Знать квантовую теорию электромагнитного поля; основные элементарные квантовые процессы с участием фотонов;</p>		
--	--	--	--	--

		<p>квантовую теорию релаксации и уширения спектральных линий;</p> <p>различные методы создания инверсной населенности в среде; физические принципы функционирования и основные характеристики квантовых усилителей и генераторов</p> <p>Уметь находить аналитические решения задач квантовой теории свободного электромагнитного поля; делать численные оценки времен релаксации для различных сред; находить аналитическое решение и делать численные оценки инверсии населенностей и коэффициента усиления (поглощения) в двух-, трех- и четырехуровневых средах; делать оценки добротности различных резонаторов и параметров лазерного излучения</p> <p>Владеть навыками проведения аналитических расчетов для получения численных оценок порога самовозбуждения, мощности излучения, частоты генерации для квантовых генераторов оптического диапазонов длин волн</p>		
<p>ОПК-2: Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;</p>	<p>ОПК-2.1: Использует методы радиофизических измерений и методы обработки результатов</p> <p>ОПК-2.2: Формулирует задачи экспериментального и теоретического исследования в области радиофизики, использует радиофизическое измерительное оборудование и применяет теоретические методы</p> <p>ОПК-2.3: Применяет практические навыки радиофизических исследований и представления результатов</p>	<p>ОПК-2.1:</p> <p>Знать: такие понятия, как уровень Ферми, концентрация носителей в собственных и примесных полупроводниках, область истощения примесей, комплементарные схемы, базовые элементы логики, туннельный диод, лавинно-пролетный диод, генератор Ганна, фотодетекторы, полупроводниковые лазеры, солнечные батареи.</p> <p>Уметь: различать основные способы включения транзисторов.</p> <p>Владеть: навыком анализа полупроводниковых приборов</p>	Задачи	<p>Экзамен:</p> <p>Контрольные вопросы</p>

		<p>СВЧ диапазона и оптоэлектронных приборов.</p> <p>ОПК-2.2: Знать: такие понятия, как уровень Ферми, концентрация носителей в собственных и примесных полупроводниках, область истощения примесей, комплементарные схемы, базовые элементы логики, туннельный диод, лавинно-пролетный диод, генератор Ганна, фотодетекторы, полупроводниковые лазеры, солнечные батареи. Уметь: различать основные способы включения транзисторов. Владеть: навыком анализа полупроводниковых приборов СВЧ диапазона и оптоэлектронных приборов.</p> <p>ОПК-2.3: Знать: такие понятия, как уровень Ферми, концентрация носителей в собственных и примесных полупроводниках, область истощения примесей, комплементарные схемы, базовые элементы логики, туннельный диод, лавинно-пролетный диод, генератор Ганна, фотодетекторы, полупроводниковые лазеры, солнечные батареи. Уметь: различать основные способы включения транзисторов. Владеть: навыком анализа полупроводниковых приборов СВЧ диапазона и оптоэлектронных приборов.</p>		
--	--	--	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>

<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>16</b>
- КСР	<b>2</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>22</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>Экзамен</b>

### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Тема 1. Введение	2	2		2	
Тема 2. Квантовая теория свободного электромагнитного поля	9	4	2	6	3
Тема 3. Квантовая теория взаимодействия электромагнитного поля с веществом	12	4	4	8	4
Тема 4. Механизмы уширения спектральных линий. Релаксация	7	3	2	5	2
Тема 5. Квантовая кинетика	5	3		3	2
Тема 6. Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным электромагнитным полем	9	3	2	5	4
Тема 7. Методы создания инверсной разности населенностей	8	3	3	6	2
Тема 8. Квантовые усилители и генераторы	18	10	3	13	5
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	108	32	16	50	22

### Содержание разделов и тем дисциплины

Практические занятия (семинарские занятия) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью. Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций.

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

1. Какова диаграмма направленности излучения у атома при электродипольном переходе?
2. Различаются ли по величине средние дипольные моменты атома водорода в 2P и 1S состояниях?
3. Как изменяются атомные квантовые числа  $S$ ,  $L$ ,  $J$  (приближение LS-связи) при электродипольном и магнитодипольном переходах?
4. Перечислите физические явления, в которых проявляет себя электромагнитный вакуум.
5. Мощность спонтанного излучения атома:  $\hbar\omega_{ba} \cdot A_{сп}$  не зависит от  $\hbar$ . Какой аналог в классике имеется у спонтанного излучения?
6. Почему квантовый генератор радиодиапазона запускается практически одновременно с подачей на него питания, хотя время спонтанного излучения для радиодиапазона составляет несколько лет?
7. Вероятность перехода во втором порядке теории возмущений. Условия применимости этого выражения. Какие физические явления могут быть описаны с помощью этой формулы?
8. Для процесса двухфотонного спонтанного излучения дайте характеристику виртуальных переходов и виртуальных состояний. Как зависит от энергии виртуального состояния вероятность этого процесса?
9. Излучение частоты  $\omega$  частично поглощается при распространении в веществе. Можно ли по зависимости поглощения от мощности падающего излучения сказать, какой тип процессов - однофотонный или двухфотонный, дает вклад в это поглощение?
10. Перечислите отличия комбинационного рассеяния от рэлеевского рассеяния. Чем отличается комбинационное рассеяние от вынужденного комбинационного рассеяния?
11. Газокинетические соударения атомов и их влияние на параметры излучения газов.
12. При каких условиях и в отношении каких величин квантовое и классическое описание электромагнитного поля дают одинаковый результат?
13. Объясните различные механизмы неоднородного уширения спектральных линий в различных средах.
14. Почему происходит уширение спектральных линий поглощения (излучения) вещества в сильных полях?
15. Почему в оптическом диапазоне длин волн для измерения ширины спектральных линий можно использовать явление флуоресценции, а в радиодиапазоне - только вынужденное излучение или поглощение среды во внешнем поле?
16. В чем заключаются отличия квантового кинетического уравнения от уравнений ФонНеймана и Шредингера?
17. Объясните механизмы релаксации в газах.
18. Физический смысл времени релаксации для недиагональных матричных элементов?
19. Физический смысл продольного времени релаксации  $T_1$ . Как оно соотносится с поперечным временем релаксации  $T_2$ ?
20. Объясните механизмы релаксации электронов и дырок в полупроводниках.
21. Опишите принцип работы КСЧ.
22. Опишите теоретическую модель квантового генератора и усилителя.

23. Дайте объяснение механизма возникновения стационарной генерации в квантовых генераторах.
24. Для трехуровневой схемы напишите балансные уравнения для населенностей и сформулируйте условия их применимости.
25. Дайте объяснение возможного влияния многофотонных процессов на достижение больших мощностей в лазерах?
26. Объясните возможность применения эффекта насыщения в лазерной технике для повышения мощности импульсных лазеров.
27. Объясните, какими физическими механизмами обусловлены различные члены в уравнениях для двухуровневой среды, взаимодействующей с классическим электромагнитным полем?
28. Объясните влияние расстройки частоты резонатора относительно частоты квантового перехода на мощность квантового генератора. Нарисуйте (качественный) график зависимости мощности от расстройки этих частот.
29. Объясните зависимость условия самовозбуждения квантового генератора от различных параметров рабочей среды и резонатора.
30. Какими физическими факторами обусловлена величина добротности собственного типа колебаний резонатора в квантовом генераторе или усилителе?
31. Какие процессы приводят к установлению стационарного распределения населенностей на энергетических уровнях квантовой системы? Приведите конкретные примеры.
32. Как будет изменяться частота генерации квантового генератора при увеличении добротности резонатора (до бесконечности)?
33. Зависит ли от матричного элемента дипольного момента условие самовозбуждения квантового генератора, если известно, что спектральный контур линии излучения атома обусловлен только спонтанным излучением?
34. Почему у атома есть диаграмма направленности излучения, хотя он "круглый" (обладает центром симметрии)?
35. Почему ЯМР и ЭПР наблюдают по поглощению, а не по спонтанному излучению, как это делается в оптике?
36. Релаксационные процессы. Чем они обусловлены? Какие (перечислить) физические системы играют роль термостатов (диссипативных подсистем) в квантовых генераторах и усилителях радио- и оптического диапазонов длин волн?
37. Электродипольное приближение в теории излучения (поглощения) электромагнитных волн. Условие его применимости.
38. Мощность квантового генератора и ее зависимость от насыщающей интенсивности рабочей среды. Объяснить механизм этой зависимости.
39. Мощность квантового генератора и ее зависимость от добротности резонатора (связи с нагрузкой). Качественный график этой зависимости.
40. Трехуровневая схема квантового генератора и усилителя. Ее основные недостатки.
41. Четырехуровневая схема квантового генератора и усилителя. Ее преимущества по сравнению с трехуровневой.
42. Квантовое кинетическое уравнение. Для каких физических систем необходимо использовать квантовое кинетическое уравнение?
43. Продольное и поперечное времена релаксации. Какие процессы они характеризуют?
44. Эффект насыщения. Механизм его возникновения.



45. Эффект просветления среды в сильных полях. Механизм его возникновения.

46. Диапазон перестройки частоты квантового генератора. Физические механизмы управления частотой квантового генератора.

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1:**

Пакет задач для текущего контроля успеваемости соответствует комплекту для промежуточной аттестации

#### **5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-2:**

1. Для идеальной квантовой ямы (потенциальный двусторонний барьер с бесконечными стенками) указать незапрещенные в электродипольном взаимодействии переходы. Вычислить матричные элемент оператора электродипольного взаимодействия для перехода с 1 на 2 энергетические уровни.

2. Получить выражение коэффициента Эйнштейна для стимулированного излучения через матричный элемент оператора взаимодействия. Получить связь коэффициентов Эйнштейна для стимулированного и спонтанного излучения.

3. Для электрона в атоме водорода, находящегося в  $3p$  возбужденном состоянии указать переход при электродипольном взаимодействии с максимальным значением частоты. Найти матричный элемент оператора взаимодействия для этого перехода.

4. Вычислить частоту Рэби осцилляций при точном резонансе для перехода с 1 на 2 энергетические уровни идеальной квантовой ямы. Ширина ямы 10 нм, плотность мощности поля 10 Вт/см<sup>2</sup>

5. Для двухуровневой системы получить зависимость от времени вероятности нахождения электрона на уровнях от времени под действием внешнего переменного электрического поля на частоте  $\omega = \omega_{12} + \delta\omega$ , где  $\omega_{12}$  – частота перехода,  $\delta\omega$  – отстройка.

6. Рассчитать ширину линии для  $2p-1s$  перехода в атоме водорода.

7. Для выбранного механизма получить выражение для неоднородно уширенного контура линии. Для выбранных условий оценить её ширину.

8. Найти ширину линии спонтанного излучения квантового гармонического осциллятора при переходе  $E_1-E_0$ . Наблюдаема ли такая ситуация в эксперименте.

9. Что является доминирующим механизмом уширения линии в поглощающей ячейке SF<sub>6</sub>, облучаемого CO<sub>2</sub>-лазером ( $\lambda = 10,6$  мкм,  $U = 50$  Вт), если каустика лазерного пучка в фокусе имеет диаметр 0,5 мм,  $T = 300$  К,  $p = 100$  тор,  $\sigma_{\text{погл}} = 5 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>

10. Определить естественную, доплеровскую и столкновительную ширину линии для перехода неона  $3s^2 \rightarrow 2p^4$  ( $\lambda=632,8$  нм) в He-Ne разряде при давлениях  $p_{\text{He}} = 1$  тор,  $p_{\text{Ne}} = 0,2$  тор и температуре смеси  $T = 400$  К. Остальные параметры:  $\tau(3s^2) = 60$  нс,  $\tau(2p^4) = 20$  нс,  $\sigma_{\text{изл}} = 6 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>.

11. Определить линейный коэффициент усиления слабого сигнала в 2-х уровневой среде. Если концентрация инверсии  $N_0 = 10^9$  см<sup>-3</sup>, вероятность спонтанного излучения  $10^7$  сек<sup>-1</sup>. Линия имеет форму Лоренца с шириной, определяемой спонтанным излучением.

12. Для 2-х уровневой среды без диссипации ( $T_1 = T_2 = \infty$ ) найдите выражение для поляризации при наложении на среду резонансного внешнего поля  $E = E_0 \cdot \cos(\omega_{21}t)$ .

13. Для двухуровневого парамагнетика со спином  $1/2$  найти матричный элемент перехода и доказать, что его вероятность равна 0 при  $H \sim H_0$ .

14. На 2-х уровневой атомный газ воздействует поле  $E(t) = E_0 \cdot \cos(\omega_{21}t)$ ,  $\omega_{21}$  - боровская частота атомного перехода. Для стационарного режима рассчитайте мощность спонтанного излучения (соударениями в газе пренебречь).

15. Для соседних продольных мод резонатора Фабри-Перо длиной 1 м, заполненного активной средой с шириной лоренцевой линии излучения на рабочем переходе  $\Delta\omega = 2 \cdot 10^{12}$  рад/сек (рубин), сделайте оценку относительной разницы коэффициентов (показателей) усиления.

16. Оценить минимальную мощность лампы-накачки (к.п.д. = 100 %), необходимую для создания инверсии в твердотельном лазере с концентрацией активных частиц  $n = 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, объемом кристалла  $V = 10$  см<sup>3</sup>. Частота середины полосы оптической накачки равна  $\nu = 6 \cdot 10^{14}$  Гц, время жизни частиц на верхнем рабочем уровне  $\tau_{\text{сп}} = 3 \cdot 10^{-3}$  сек.

17. Возбужденный уровень молекулы  $E_i$  связан с тремя нижними уровнями  $E_n$  радиационными переходами с вероятностями  $A_{i3} = 5 \cdot 10^7$  с<sup>-1</sup>,  $A_{i2} = 3 \cdot 10^7$  с<sup>-1</sup> и  $A_{i1} = 2 \cdot 10^7$  с<sup>-1</sup>. Вычислить время жизни по отношению к спонтанному распаду для  $E_i$  и относительные населенности  $N_n/N_i$  для случая непрерывного возбуждения уровня  $E_i$  при условии, что  $\tau_1 = 10^{-8}$  с,  $\tau_2 = 5 \cdot 10^{-7}$  с,  $\tau_3 = 5 \cdot 10^{-9}$  с. Какая требуется накачка из основного состояния  $E_0$ , чтобы обеспечить инверсию населенностей на уровнях  $E_i$  и  $E_1$ ?

18. Линия люминесценции иона  $\text{Nd}^{3+}$  в стекле для рабочего перехода Nd лазера имеет полуширину  $\sim 30$  нм. Найти ширину верхнего лазерного уровня, если нижний дезактивируется со скоростью  $10^8$  с<sup>-1</sup>.

19. Оценить квантовый и электронный КПД He-Ne лазера, если известно, что электронная температура в разрядной трубке  $\sim 5$  эВ.

20. Используя классическое определение добротности резонатора (контура)  $Q_S : |dW/dt|$  (мощность потерь) =  $\omega S/Q_S \cdot W$  (запасенная в резонаторе энергия) и концепцию плоских волн в резонаторе Фабри-Перо с коэффициентом отражения по мощности  $R_1$  и  $R_2$ , покажите, что добротность  $Q_S$  такого резонатора равна  $Q_S = -2L \cdot \omega S / (c \cdot \ln R_1 R_2)$ , где  $L$  - длина резонатора.

21. Рассчитать добротность  $Q_r$  и время жизни фотона  $\tau_f$  в резонаторе Фабри-Перо с плоскими зеркалами. Расстояние между зеркалами  $L = 1$  м, коэффициенты отражения зеркал  $R_1 = R_2 = 0,95$ , рабочая длина волны  $\lambda = 0,6$  мкм. Коэффициент поглощения среды, заполняющей резонатор,  $\alpha = 0,01$  см<sup>-1</sup>. Дифракционными потерями пренебречь.

22. Газовый лазер работает на однородно-уширенном переходе, ширина линии 200 МГц. Вероятность спонтанного излучения на рабочем переходе ( $\gamma = 1 \text{ мкс}$ )  $A_{ik} = 107 \text{ с}^{-1}$ . Параметры резонатора Фабри-Перо: длина  $L = 1 \text{ м}$ , полные потери 0,02. Определить пороговую концентрацию инверсии.

23. Рассчитать необходимую пороговую инверсию перехода газового лазера ( $\lambda = 510 \text{ нм}$ ), если вероятность перехода  $A_{ik} = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ . Однородная ширина линии  $\Delta\nu_{\text{одн}} = 20 \text{ МГц}$ , длина резонатора  $L = 20 \text{ см}$ , а потери в резонаторе при двойном проходе составляют 5%.

24. Лазерная среда имеет доплеровский профиль усиления с шириной  $\Delta\nu = 2 \text{ ГГц}$ . Однородная ширина равна  $\Delta\nu_{\text{одн}} = 50 \text{ МГц}$ , а вероятность перехода  $A_{ik} = 108 \text{ с}^{-1}$ . Пусть частота одной из мод резонатора ( $L = 30 \text{ см}$ ) совпадает с центральной частотой профиля усиления. Какова пороговая инверсия для центральной моды и при какой инверсии генерация начнется на соседних модах, если потери в резонаторе составляют 10% ?

25. Частота моды пассивного плоскопараллельного Фабри-Перо резонатора ( $L = 15 \text{ см}$ ) сдвинута на  $0,5 \cdot \Delta\nu_{\text{Доппл}}$  от центра гауссовской линии усиления газового лазера с  $\lambda = 633 \text{ нм}$ . Оценить затягивание моды, если ширина резонанса резонатора  $\Delta\nu_r = 20 \text{ МГц}$ , а  $\Delta\nu_{\text{Доппл}} = 1 \text{ ГГц}$ .

26. Для соседних продольных мод резонатора Фабри-Перо длиной 1м, заполненного активной средой с шириной лоренцевой линии излучения на рабочем переходе  $\omega = 2 \cdot 10^{12} \text{ рад/сек}$  (рубин), сделайте оценку относительной разницы коэффициентов (показателей) усиления.

27. Резонатор инжекционного полупроводникового лазера образован естественными гранями кристалла с коэффициентами отражения  $R_1 = R_2 = 0,37$ . Определите пороговый уровень усиления для резонаторов длиной  $L = 400 \text{ мкм}$  и  $L = 100 \text{ мкм}$ , если внутренние потери составляют  $\alpha_{\text{внут}} = 5 \text{ см}^{-1}$ . Что произойдет, если на грани резонатора нанести отражающие покрытия с  $R_1 = 0,98$  и  $R_2 = 1$ ?

28. Мощность непрерывной генерации полоскового полупроводникового лазера равна 10 мВт, длина волны излучения  $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$ , ширина спектральной линии  $\Delta\nu = 100 \text{ МГц}$ , размеры ближнего поля -  $1 \text{ мкм} \times 10 \text{ мкм}$ . До какой температуры надо нагреть абсолютно черное тело, чтобы его спектральная яркость в заданном диапазоне достигла яркости на зеркале лазера?

29. Определить оптимальный коэффициент пропускания зеркал резонатора лазера, позволяющий получить максимальную выходную мощность. Длина резонатора  $L = 10 \text{ см}$ , коэффициент ненасыщенного усиления на проход  $g_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$ , коэффициент потерь на проход  $\alpha = 0,01 \text{ см}^{-1}$ . Дифракционными потерями пренебречь.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных задач. Студент безупречно решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, правильно ответил на дополнительные вопросы, а также решил одно из заданий повышенной сложности, продемонстрировав способность к самостоятельной выработке умений и навыков решения нестандартных задач. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий ИЛИ Высокий уровень подготовки Студент безупречно решил задачу, а также дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше

Оценка	Критерии оценивания
	ИЛИ Хорошая подготовка. Студент решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%. ИЛИ В целом хорошая подготовка с небольшими ошибками или недочетами. Студент решил задачу, дал ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора. Студент работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%. ИЛИ Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний. Студент решил задачу, дал неполный ответ на теоретический вопрос билета, затруднялся с ответом на дополнительные вопросы. Студент посещал практические занятия. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%
не зачтено	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент не решил задачу или испытывал значительные трудности при ее решении. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора. Студент пропустил большую часть практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50% ИЛИ Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, не умеет решать задачи. Студент отсутствовал на большинстве лекций и практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20%.

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность	При решении стандартных задач не продемонстрир	Продемонстрированы основные умения.	Продемонстрированы все основные	Продемонстрированы все основные	Продемонстрированы все основные	Продемонстрированы все основные умения.

	оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	ованы основные умения. Имели место грубые ошибки	Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	умения. Решены все основные задачи с отдельными и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

**5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:**

### **5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-1**

1. Квантование свободного электромагнитного поля. Энергетический спектр и стационарные состояния свободного электромагнитного поля.
2. Понятие фотона. Понятие электромагнитного вакуума.
3. Оператор энергии взаимодействия электромагнитного поля с веществом.
4. Квантовая теория излучения. Матричные элементы оператора энергии взаимодействия поля с веществом для процессов однофотонного излучения и поглощения.
5. Индуцированное и спонтанное излучение фотона. Соотношение между вероятностями индуцированного и спонтанного процессов.
6. Вероятности излучения и поглощения в электродипольном приближении. Правила отбора для электродипольного излучения (поглощения).
7. Соотношение неопределенностей энергия-время и естественная ширина линии излучения. Спектральный контур линии спонтанного излучения. Спонтанное излучение в оптике и радиодиапазоне.
8. Механизмы уширения спектральных линий.
9. Понятие динамической и диссипативной подсистемы. Релаксация динамической подсистемы как процесс взаимодействия с диссипативной подсистемой. Оценки продольного и поперечного времен релаксации для различных сред.
10. Двухуровневая идеализация. Поведение двухуровневой среды при ее взаимодействии с резонансным электромагнитным полем.

### **5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-2**

1. Стационарные решения для двухуровневой среды, взаимодействующей с резонансным полем. Мощность, поглощаемая средой из электромагнитного поля.
2. Эффекты насыщения и просветления среды в сильном электромагнитном поле.
3. Термодинамически неравновесная система. Инверсия населенностей. Трех- и четырех-уровневые системы. Метод оптической накачки. Инверсия населенностей в Nd<sup>3+</sup> лазере.
4. Уравнение переноса излучения в усиливающей среде. Коэффициент и показатель усиления. Оценки величины показателя усиления для различных сред.
5. Полуклассические и балансные уравнения квантового генератора. Учет спонтанного излучения в балансных уравнениях.
6. Одномодовое приближение. Примеры возникновения многомодового режима генерации (выжигание спектральных и пространственных провалов).

7. Стационарный режим работы квантового генератора и его характеристики. Условие самовозбуждения квантового генератора.

8. Оптический резонатор. Типы резонаторов. Собственная и нагруженная добротность резонатора. Время жизни фотона в резонаторе.

9. Полупроводниковый инжекционный лазер, спектральные, мощностные и модуляционные характеристики.

10. Эффект затягивания частоты в квантовом генераторе.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных задач. Студент безупречно решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, правильно ответил на дополнительные вопросы, а также решил одно из заданий повышенной сложности, продемонстрировав способность к самостоятельной выработке умений и навыков решения нестандартных задач. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий
отлично	Высокий уровень подготовки Студент безупречно решил задачу, а также дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.
хорошо	В целом хорошая подготовка с небольшими ошибками или недочетами. Студент решил задачу, дал ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора. Студент работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.
удовлетворительно	Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний. Студент решил задачу, дал неполный ответ на теоретический вопрос билета, затруднялся с ответом на дополнительные вопросы. Студент посещал практические занятия. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%
неудовлетворительно	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент не решил задачу или испытывал значительные трудности при ее решении. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы

Оценка	Критерии оценивания
	билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора. Студент пропустил большую часть практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%
плохо	Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, не умеет решать задачи. Студент отсутствовал на большинстве лекций и практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20%.

### 5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

Уравнение Шредингера для двухуровневой системы.

1. Обосновать возможность применения теории возмущения к модели взаимодействия атома водорода с возбуждающим его на длине волны  $\lambda=121$  нм электрическим полем с интенсивностью  $1 \text{ кВт/см}^2$
2. Вычислить частоту Раби осцилляций при точном резонансе для перехода с 1 на 2 энергетический уровень идеальной одномерной квантовой ямы. Ширина ямы  $10 \text{ нм}$ , интенсивность внешнего поля  $10 \text{ Вт/см}^2$ .
3. В начальный момент времени  $t=0$  система находится в состоянии  $\psi_1(0)$ , относящемся к двукратно вырожденному энергетическому уровню  $E_0$ . Определить вероятность того, что в момент  $t>0$  система будет находиться в состоянии  $\psi_2(0)$  при условии, что переход возможен под действием постоянного возмущения  $V_{12}=V_{21}=V_0$ .

Указание: Решить задачу в рамках нестационарного уравнения Шредингера, представив волновую функцию системы в виде суперпозиции  $\psi_1(0)$  и  $\psi_2(0)$ .

4. Для двухуровневой системы получить временную зависимость для вероятности нахождения электрона на уровнях от времени под действием внешнего переменного электрического поля на частоте  $\omega=\omega_{12}+\delta\omega$ , где  $\omega_{12}$  – частота перехода,  $\delta\omega$  – отстройка.
5. Двухуровневая система с частотой перехода  $\omega_{12}$  находится под воздействием электромагнитного поля с напряженностью  $E = E_0 \cdot \cos \omega t$ , где  $\omega \approx \omega_{12}$  (резонансное поле). В момент включения поля квантовая система находилась на нижнем энергетическом уровне  $E_1$ . Найти волновую функцию системы в произвольный момент времени  $t>0$  и определить вероятность перехода квантовой системы к моменту времени  $t_0$  на верхний уровень.

Указание: Использовать исходную систему уравнений для коэффициентов разложения волновой функции ( $\Psi = c_1 \psi_1 + c_2 \psi_2$ ), возникающую из нестационарного уравнения Шредингера подстановкой  $\psi$  в виде суперпозиции состояний. Затем свести систему к единому дифференциальному уравнению второго порядка, для определения констант использовать начальное условие.

5. На двухуровневую систему, находящуюся в верхнем состоянии, действует переменное поле на частоте перехода в течение трех четвертей периода осцилляций Раби. Какова будет величина и



зависимость от времени дипольного момента перехода после выключения поля в этом случае. Что изменится, если длительность внешнего электрического импульса имеет произвольное значение  $\tau_0$  ?

Квантовая теория излучения и поглощения. Матричные элементы оператора взаимодействия. Правила отбора.

1. Можно ли одновременно измерить напряженности квантованных электрического и магнитного полей? Ответ обосновать расчетом.

Указание: Использовать разложение напряженностей электрического и магнитного полей по модам вектор-потенциала, а также условия ортогональности мод.

2. Покажите, что в рамках кулоновской калибровки поля операторы канонического импульса

заряженной частицы  $\hat{\mathbf{p}}_k$  и оператор вектор-потенциала  $\hat{\mathbf{A}}(\mathbf{r}_k)$  перестановочны между собой.

3. На систему возбужденных двухуровневых атомов с дипольным моментом  $\mathbf{d}$ , направленным по оси OZ, падает внешнее резонансное ( $\omega = \omega_{ba}$ ) электромагнитное поле, состоящее из двух плоских волн. Эти плоские волны имеют одинаковую интенсивность  $I$ , но распространяются под углом  $90^\circ$  друг к другу (по осям OZ и OY). Как происходит взаимодействие этих волн с системой диполей? Какова вероятность электродипольного излучения такой группы возбужденных атомов в направлении под углом  $45^\circ$  между парциальными волнами?

4. Покажите, что однофотонные переходы между уровнями 2S и 1S атома водорода запрещены в электродипольном, магнитодипольном и электроквадрупольном приближениях.

5. Можно ли получить индуцированное (лазерное) излучение в линейном гармоническом осцилляторе (ансамбль одинаковых частиц) в электродипольном приближении? Ответ обосновать расчетом/

6. Используя ортогональность шаровых (сферических) функций  $Y_{lm}$ , покажите, что правила отбора для магнитодипольного (орбитального) излучения атома сводятся к соотношениям:  $\Delta l = 0$ ,  $\Delta m_l = 0, \pm 1$ ,  $\Delta S = 0$ ,  $\Delta m_s = 0$ ,  $n_a = n_b$ .

Указание: Использовать представление волновой функции электрона в сферической системе координат и условия ортогональности сферических и спиновых функций.

7. Используя ортогональность спиновых функций  $\chi_{s,m_s}$ , покажите, что правила отбора для магнитодипольного (спинового) излучения сводятся к соотношениям:

$\Delta S = 0$ ,  $\Delta m_l = 0$ ,  $\Delta l = 0$ ,  $\Delta m_s = 0, \pm 1$ ,  $n_a = n_b$ .

8. Сформулировать правила отбора для электродипольных переходов в гармоническом осцилляторе.

Указание: Использовать свойство полиномов Чебышева-Эрмита  $\Psi_n(x)$ :

$$\xi \cdot \Psi_n(\xi) = \sqrt{\frac{n}{2}} \cdot \Psi_{n-1}(\xi) + \sqrt{\frac{n+1}{2}} \cdot \Psi_{n+1}(\xi)$$

$$x_0 = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega_0}}$$

, где  $\xi = x/x_0$  – безразмерная координата,  $m$  и  $\omega_0$  – масса и частота осциллятора соответственно).

9. Для идеальной квантовой ямы (потенциальный двусторонний барьер с бесконечными стенками) указать незапрещенные в электродипольном взаимодействии переходы. Вычислить матричные элемент оператора электродипольного взаимодействия для перехода с 1 на 2 энергетические уровни ямы с шириной 50 нм.

10. Для электрона в атоме водорода, находящегося в 3p возбужденном состоянии указать переход при электродипольном взаимодействии с максимальным значением частоты. Найти матричный элемент оператора взаимодействия для этого перехода.

Указание: Учесть правила отбора для электродипольного перехода. Выражение для радиальной части волновой функции начального состояния имеет вид:

$$R_{31}(r) = \frac{4}{27\sqrt{6}} \cdot \exp\left(-\frac{r}{3r_B}\right) \cdot \frac{r}{r_B} \cdot \left(1 - \frac{r}{6r_B}\right)$$

11. Атом находится в поле теплового электромагнитного излучения. Напишите выражения для вероятности индуцированного излучения и поглощения для такого атома.

12. Для двухуровневого парамагнетика со спином  $1/2$ , помещенного в систему из постоянного  $\vec{H}_0$  и резонансного переменного  $\vec{H}_\sim$  магнитных полей, найти матричный элемент перехода и показать, что его значение равно 0 при  $\vec{H}_\sim \parallel \vec{H}_0$ .

Уширение спектральных линий. Ширина линии излучения.

1. Известно, что время жизни электрона в возбужденном состоянии двухуровневой системы равно  $\tau_0$ . Получить выражение для наблюдаемой на данном переходе спектральной формы линии люминесценции.

2. Рассчитать ширину линии для 2p-1s перехода (случай  $0 \Rightarrow 0$  - перехода), в атоме водорода.


3. Для выбранного механизма получить спектральное выражение для неоднородно уширенного контура спектральной линии. Оценить её ширину для типичных параметров одной из возможных лазерных сред.

4. Типичное время жизни для разрешённого электродипольного перехода в видимой части диапазоне составляет 10 нс. Что можно сказать об оценке значения для естественной ширины линии активной среды для ультрафиолетового лазера, излучающего на длине волны 100 нм.

5. Доплеровская ширина линии в двухуровневом газе - 500 МГц. Оценка времени жизни верхнего уровня - 10-8с. Предложить метод (возможную оптическую схему) измерения ширины внутридоплеровского однородного лоренцевского контура.

6. Оценить ширину лэмбовского провала для He-Ne лазера и сравнить полученное значение с доплеровской шириной линии. Использовать для оценки типичные количественные параметры такого излучателя.
7. Определить естественную, доплеровскую и столкновительную ширину линии для перехода неона  $3s2 \rightarrow 2p4$  ( $\lambda = 632,8$  нм) в He-Ne разряде при давлениях  $p_{He} = 1$  тор,  $p_{Ne} = 0,2$  тор и температуре смеси  $T = 400$  К. Остальные параметры: времена жизни -  $\tau(3s2) = 60$  нс,  $\tau(2p4) = 20$  нс, эффективное сечение молекулы неона  $s_{эфф.} = 6 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup>.
8. Что является доминирующим механизмом уширения линии в поглощающей ячейке SF<sub>6</sub>, облучаемого CO<sub>2</sub>-лазером ( $\lambda = 10,6$  мкм, мощность 50 Вт), если лазерный пучок в фокусе имеет диаметр 0,5 мм, сечение молекулы SF<sub>6</sub>  $\sim 5 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>, температура ячейки  $T = 300$  К, давление  $p = 100$  тор, эффективное сечение взаимодействия  $\sigma = 3 \cdot 10^{-17}$  см<sup>2</sup>
9. Найти ширину линии спонтанного излучения квантового гармонического осциллятора при переходе  $E_1 - E_0$ . Наблюдаема ли такая ситуация в эксперименте? Можно ли получить это значение экспериментально при облучении такой среды внешним полем на частоте перехода?
10. Линия люминесценции иона Nd<sup>3+</sup> в стекле для рабочего перехода Nd лазера имеет ширину  $\sim 10$  нм. Нижний уровень рабочего перехода дезактивируется со скоростью  $10^8$  с<sup>-1</sup>. Что можно сказать о ширине верхнего уровня и характере уширения линии люминесценции?

Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным полем.

1. Исходя из уравнений для матрицы плотности 2-х уровневой среды и предполагая среду электродипольной, выведите уравнения для поляризации и разности населенностей этой среды в условиях ее взаимодействия с внешним квазимонохроматическим резонансным электромагнитным полем.
2. Исходя из уравнений Блоха, для изотропного парамагнетика, помещенного в высокочастотное резонансное магнитное поле, найти выражение для вектора намагниченности  и динамической магнитной восприимчивости  $\chi$ .
3. Для 2-х уровневой среды без диссипации ( $T_1 = T_2 = \infty$ ) найдите выражение для поляризации при наложении на среду резонансного внешнего поля  $E = E_0 \cdot \cos(\omega t)$ .
4. Используя стационарные решения для двухуровневой электродипольной среды, взаимодействующей с резонансным электромагнитным полем, получите выражение для энергии, передаваемой этой средой диссипативной подсистеме (термостату).
5. На 2-х уровневый атомный газ в ячейке воздействует поле  $E(t) = E_0 \cdot \cos(\omega t)$ ,  $\omega_0$  - частота атомного перехода. Для стационарного режима получите выражение для мощности наблюдаемого при этом спонтанного излучения (соударениями в газе пренебречь). Что изменится при учете столкновений между молекулами газа и стенками ячейки.
6. Исходя из стационарных решений уравнений для двухуровневой среды во внешнем поле, получите выражение для диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  на частотах  $\omega$  вблизи резонанса  $\omega_{12}$ , а также связь

мощности, поглощаемой 2-х уровневой средой при взаимодействии с резонансным полем, и мнимой части восприимчивости этой среды.

Коэффициент усиления двухуровневой среды. Инверсия населенностей.

1. Отношение населенностей двух уровней для вещества, находящегося в состоянии равновесия при температуре 3000K, равно 10. Вычислить частоту излучения, соответствующую переходу между этими уровнями. Что можно сказать о равновесной разности населенностей для перехода в видимой части спектра?

2. Оценить минимальную мощность оптической накачки с полным поглощением световой энергии в кристалле, необходимую для получения инвертированной среды в твердотельном лазере с концентрацией активных частиц  $N = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , объемом кристалла  $V = 10 \text{ см}^3$ . Частота середины полосы оптической накачки равна  $\nu = 5,45 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ , время жизни частиц на верхнем рабочем уровне  $\tau_{сп} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ .

3. Для соседних продольных мод резонатора Фабри-Перо длиной 1м, заполненного газовой активной средой с шириной лоренцевой линии излучения на рабочем переходе  $\Delta\omega = 2 \cdot 10^{12} \text{ рад/сек}$  (рубин), сделайте оценку относительной разницы коэффициентов (показателей) усиления.

4. Линия перехода в двухуровневой среде на длине волны  $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$  имеет форму Лоренца с шириной, определяемой спонтанным излучением. Определить линейный коэффициент усиления слабого сигнала, если концентрация инверсии  $\Delta N = 10^9 \text{ см}^{-3}$ , а вероятность спонтанного излучения  $10^7 \text{ сек}^{-1}$ . Зависит ли коэффициент усиления от дипольного момента перехода?

5. Используя уравнение переноса излучения в стационарной активной среде квантового

усилителя:  $\frac{dI}{dz} = -\alpha I + \frac{g_0 I}{1 + u^2 + I}$ , где  $z$  – ось распространения волны, найдите выражение для максимально возможной величины  $I_{\text{макс}}$  на выходе усилителя. Обозначения:  $I$  – безразмерная интенсивность, полученная нормировкой на насыщающую интенсивность рабочего перехода  $I_{\text{нас}}$ ;  $\alpha$  – коэффициент нерезонансных потерь в среде;  $g_0 = \frac{\hbar \omega \cdot N_{\text{инв}}}{2 T_1 I_{\text{нас}}}$  – коэффициент ненасыщенного усиления,  $u = (\omega - \omega_0) \cdot T_2$  – безразмерная расстройка частоты.

6. Возбужденный уровень молекулы E4 связан с тремя нижними уровнями E1, E2 и E3 радиационными переходами с вероятностями  $A_{43} = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ ,  $A_{42} = 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  и  $A_{41} = 2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ . Вычислить время жизни по отношению к спонтанному распаду верхнего уровня и относительные населенности  $N_1(2,3)/N_4$  для случая непрерывного возбуждения уровня E4 при условии, что времена жизни остальных уровней составляют  $\tau_1 = 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau_2 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ ,  $\tau_3 = 5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . На каком-то из переходов можно в рамках данной схемы создать инверсию? Какая требуется накачка из основного состояния E0, чтобы обеспечить инверсию населенностей на переходе E4 → E1?

7. Считая для рубинового лазера  $W_{32} > W_{31}$ ,  $A_{31}$  и используя уравнения баланса населенностей (для диагональных элементов матрицы плотности подсистемы), покажите, что разность населенностей на рабочей паре уровней E2 и E1 удовлетворяет уравнению:  $dN/dt = (N - N_0 \text{ эфф}) / T_1 \text{ эфф}$  при отсутствии лазерной генерации. Найдите выражения для  $N_0 \text{ эфф}$  и  $T_1 \text{ эфф}$ . Как эти выражения зависят от мощности поля накачки?

Обозначения:  $W_{13}$  - вероятность поглощения фотона накачки в единицу времени,  $W_{31}$  - вероятность индуцированного излучения под действием источника накачки,  $W_{32}$  - вероятность безызлучательного перехода между уровнями 3 и 2,  $A_{31}$  - вероятность спонтанного излучения.

Оптические лазерные резонаторы.

1. Используя классическое определение добротности резонатора (контура)  $Q$  :

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{\omega_{\text{рез}}}{Q} W$$

(где  $W$  - запасенная в резонаторе энергия моды) и концепцию плоских волн в оптическом резонаторе Фабри-Перо с коэффициентом отражения зеркал по мощности  $R_1$  и  $R_2$ , покажите, что добротность

$$Q = -\frac{2L\omega_{\text{рез}}}{c \cdot \ln(R_1 R_2)}$$

такого резонатора равна , где  $L$  - длина резонатора.

2. Рассчитать добротность  $Q_r$  и время жизни фотона  $\tau_f$  в резонаторе Фабри-Перо с плоскими зеркалами. Расстояние между зеркалами  $L = 0,2$  м, коэффициенты отражения зеркал  $R_1 = R_2 = 0,95$ , рабочая длина волны  $\lambda = 0,6$  мкм. Коэффициент поглощения среды, заполняющей резонатор,  $\alpha = 0,01$  см<sup>-1</sup>. Дифракционными потерями пренебречь.

3. В рамках одномерной модели распространения лазерного пучка в резонаторе Фабри-Перо показать, что абсолютная ширина линии открытого оптического резонатора с плоскими зеркалами не зависит от частоты. Оценить частотный интервал между продольными модами и ширину линии такого резонатора для  $R=0,99$  и  $L = 1$  м.

4. Для гелий-неонового лазера ( $\lambda = 632,8$  нм) с типичными для этого типа лазеров параметрами сделайте оценку для числа продольных мод, попадающих в контур спектральной линии усиления.

Пороговое условие лазерной генерации.

1. Лазер работает на однородно-уширенном переходе на длине волны  $\lambda = 1$  мкм, ширина линии усиления 500 МГц. Вероятность спонтанного излучения на рабочем переходе составляет  $A_{\text{сп}} = 10^7$  с<sup>-1</sup>.

Параметры резонатора Фабри-Перо: длина  $L = 0,5$  м, полные потери на проход 0,02. Определить пороговую концентрацию инверсии.

2. Найти значение ненасыщенного коэффициента усиления для работающего полупроводникового лазера на GaAs с минимальным уровнем внутренних потерь, длиной активной области 300 мкм при использовании сколов по кристаллическим поверхностям в качестве зеркал.

3. Рассчитайте величину минимальной концентрации активных ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в работающем рубиновом ОКГ. Необходимые для расчета параметры взять из справочной литературы

4. Рассчитайте минимально необходимую мощность источника накачки для неодимового лазера на кристалле YAG, если эффективность преобразования энергии накачки ( $\lambda \sim 800$  нм) в возбуждение

рабочего перехода составляет 20%. Как изменится оценка порогового уровня накачки, если использовать для возбуждения продольную накачку лазерным пучком.

Указание: Использовать для исходного расчета следующий набор параметров этого ОКГ: вероятность спонтанного излучения на рабочем переходе  $A_{32} = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ , пороговая разность населенностей  $N_{0\text{эфф}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , объем рабочей среды, взаимодействующий с полем  $V = 10 \text{ см}^3$ .

5. Рассчитать необходимую пороговую инверсию перехода газового лазера ( $\lambda = 500 \text{ нм}$ ), если спонтанное время жизни на рабочем переходе  $\tau = 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , ширина линии усиления  $\Delta\nu = 1 \text{ ГГц}$ , длина резонатора  $L = 25 \text{ см}$ , а потери в резонаторе при двойном проходе составляют 5%.

6. Лазерная среда имеет доплеровский профиль усиления с шириной  $\Delta\nu = 2 \text{ ГГц}$ . Однородная ширина равна  $\Delta\nu_{\text{одн}} = 50 \text{ МГц}$ , а вероятность перехода  $A_{ik} = 10^8 \text{ с}^{-1}$ . Пусть частота одной из мод резонатора ( $L = 30 \text{ см}$ ) совпадает с центральной частотой профиля усиления. Какова пороговая инверсия для центральной моды и при какой инверсии генерация начнется на соседних модах, если потери в резонаторе составляют 10%?

Лазерная генерация. Параметры стационарного режима лазерной генерации.

1. Покажите, исходя из уравнений лазера, что в стационарном режиме одномодовой генерации разность населенностей равна пороговому значению.

2. Резонатор инжекционного полупроводникового лазера образован естественными гранями кристалла с коэффициентами отражения  $R_1 = R_2 = 0,37$ . Определите пороговый уровень усиления для резонаторов длиной  $L = 400 \text{ мкм}$  и  $L = 100 \text{ мкм}$ , если внутренние потери составляют  $\alpha_{\text{внут}} = 5 \text{ см}^{-1}$ . Что произойдет, если на грани резонатора нанести дополнительные отражающие покрытия с  $R_1 = 0,98$  и  $R_2 = 1$ ? Нарисуйте качественно и сравните вид зависимости мощности генерации от тока для таких лазеров.

3. Считая одно зеркало в резонаторе Фабри-Перо "глухим" ( $R_1 = 1$ ), а другое полупрозрачным ( $R_2 = R$ ), найдите зависимость мощности лазера от  $R$ . Существует ли оптимальная величина  $R$ ?

4. Оценить квантовый КПД He-Ne лазеров, работающих на разных переходах с мощностью порядка 10 мВт. Что можно сказать об электронном КПД накачки в разряде, если известно, что потребляемая от сети мощность составляет 15 Вт.

5. Сделайте численные оценки насыщающей интенсивности для рабочих переходов в рубиновом и неодимовом лазерах. Как связана с этим параметром мощность, генерируемая лазером? Какой из этих лазеров обладает большей мощностью?

$$I_{\text{нас}} = \frac{c \hbar^2}{8\pi \cdot d_{12}^2 \cdot T_1 T_2} \quad \text{и}$$

Указание: Использовать выражение насыщающей интенсивности в виде типичные параметры для указанных твердотельных сред.

6. Мощность непрерывной генерации полоскового полупроводникового лазера равна 10 мВт, длина волны излучения  $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$ , ширина спектральной линии  $\Delta\nu = 100 \text{ МГц}$ , размеры ближнего поля -  $1 \text{ мкм} \times 10 \text{ мкм}$ . До какой температуры надо нагреть тепловой источник света, чтобы его спектральная яркость в заданном диапазоне достигла яркости на зеркале лазера?

Указание: Пересчитать мощность лазерного излучения в спектральную яркость ( $\text{Дж/см}^2 \cdot \text{Гц}$ ), использовать для сравнительной оценки выражение для равновесного теплового спектра излучения.

7. Нарисуйте качественно график и объясните зависимость выходной мощности лазера от величины отражения выходного зеркала резонатора.

8. Оцените максимально возможную величину затягивания частоты генерирующей моды в лазере на рубине. При проведении оценок руководствоваться типичными для данного вида лазеров количественными параметрами.

9. Частота моды пассивного плоскопараллельного Фабри-Перо резонатора ( $L = 15$  см) сдвинута на  $0,5 \cdot \Delta\nu_{\text{Doppl}}$  от центра гауссовской линии усиления газового лазера с  $\lambda = 633$  нм. Оценить эффект затягивания моды генерации, если ширина моды резонатора  $\Delta\nu_p = 20$  МГц, а  $\Delta\nu_{\text{Doppl}} = 1$  ГГц.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных задач. Студент безупречно решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, правильно ответил на дополнительные вопросы, а также решил одно из заданий повышенной сложности, продемонстрировав способность к самостоятельной выработке умений и навыков решения нестандартных задач. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий
отлично	Высокий уровень подготовки Студент безупречно решил задачу, а также дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент решил задачу, дал полный и развернутый ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Студент активно работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.
хорошо	В целом хорошая подготовка с небольшими ошибками или недочетами. Студент решил задачу, дал ответ на теоретический вопрос билета, но имеются неточности или шероховатости в ответах. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора. Студент работал на практических занятиях. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.
удовлетворительно	Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний. Студент решил задачу, дал неполный ответ на теоретический вопрос билета, затруднялся с ответом на дополнительные вопросы. Студент посещал практические занятия. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%
неудовлетворительно	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент не решил задачу или испытывал значительные трудности при ее решении. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы

Оценка	Критерии оценивания
	билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора. Студент пропустил большую часть практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%
плохо	Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, не умеет решать задачи. Студент отсутствовал на большинстве лекций и практических занятий. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20%.

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Ярив Амнон. Квантовая электроника / пер. с англ. под ред. Я. И. Ханина. - 2-е изд. - М. : Советское радио, 1980. - 488 с. : ил. - 2.70., 95 экз.
2. Страховский Глеб Михайлович. Основы квантовой электроники : учеб. пособие для вузов по специальности "Полупроводники и диэлектрики". - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1979. - 303 с. : ил. - 0.95., 41 экз.
3. Карлов Николай Васильевич. Лекции по квантовой электронике : [для физ. специальностей вузов]. - М. : Наука, 1983. - 319 с. : ил. - 1.10., 63 экз.

Дополнительная литература:

1. Ханин Яков Израилевич. Лекции по квантовой радиофизике / РАН, Ин-т приклад. физики. - Н. Новгород : ИПФ РАН, 2005. - 224 с. - ISBN 5-8048-0057-4 : 100.00., 40 экз.
2. Акулин Владимир Михайлович. Интенсивные резонансные взаимодействия в квантовой электронике. - М. : Наука, 1987. - 311 с. : ил. - 3.60., 16 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

-

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.03 - Радиофизика.



Автор(ы): Маругин Алексей Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Заведующий кафедрой: Маругин Алексей Валентинович, кандидат физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 г., протокол № 09/23.