

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
президиумом
Ученого совета ННГУ
протокол от
«14» декабря 2021 г. № 4

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Квантовая радиофизика
(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования
бакалавриат
(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность
03.03.03 Радиофизика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы
Радиофизика и электроника
(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)
бакалавр
(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения
очная
(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2022 год

1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Квантовая радиофизика» относится к дисциплинам базовой части (блок Б1.Б) основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика» на радиофизическом факультете ННГУ. Дисциплина изучается в 7-м семестре.

Целью освоения дисциплины являются формирование у студента современного представления о фотонной структуре электромагнитного поля, об элементарных квантовых актах однофотонного и многофотонного взаимодействия поля с веществом и их конкретном проявлении при преобразовании, усилении и генерации когерентного электромагнитного излучения в квантовых усилителях и генераторах радио- и оптического диапазонов длин волн. Большое внимание в курсе уделено сопутствующему математическому описанию указанных процессов, особенно квантовым кинетическим уравнениям для матрицы плотности, балансным уравнениям для лазерных источников и их использованию для расчета основных характеристик квантовых генераторов.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотношенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<i>ОПК-1</i> способность к овладению базовыми знаниями в области математики и естественных наук, их использованию в профессиональной деятельности (заключительный этап освоения)	<p>З1 (ОПК-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.</p> <p>У1 (ОПК-1). 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>В1 (ОПК-1). Владеть навыками проведения аналитических расчетов для получения численных оценок порога самовозбуждения, мощности излучения, частоты генерации для кванто-</p>

	вых генераторов оптического диапазонов длин волн.
ОПК-2 способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии (заключительный этап освоения)	32 (ОПК-2). Знать методики анализа и базовые характеристики современных устройств и систем квантовой электроники, включая новые типы лазерных излучателей У2 (ОПК-2). Уметь применять аппарат квантовой радиофизики для анализа вопросов теоретической физики, электродинамики, электроники. В2 (ОПК-2). Владеть навыками использования математического аппарата квантовой радиофизики для решения задач в теоретической физике, электродинамике, электронике.

3. Структура и содержание дисциплины «Теоретическая механика»

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего **108** часов, из которых 50 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия лекционного типа, 16 часов практические занятия, 2 часа – мероприятия промежуточной аттестации), 22 часа составляет самостоятельная работа обучающегося. На подготовку к экзамену и экзамен по учебному плану отводится 36 академических часов.

Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля)	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Введение.	2	2			2	0
Квантовая теория свободного электромагнитного поля.	8	4	2		6	2
Квантовая теория взаимодействия электромагнитного поля с веществом.	10	4	2		6	4
Механизмы уширения спектральных линий. Релаксация.	8	4	2		6	2

Квантовая кинетика.	6	4	0		4	2
Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным электромагнитным полем.	10	4	2		6	4
Методы создания инверсной разности населенностей.	10	4	4		8	2
Квантовые усилители и генераторы.	16	6	4		10	6
Промежуточная аттестация (экзамен)	36					

Текущий контроль успеваемости проходит в рамках практических занятий семинарского типа. Итоговый контроль осуществляется на экзамене

4. Образовательные технологии

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме практических занятий.

Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций

используемые на занятиях лекционного типа:

- лекции с проблемным изложением учебного материала.

используемые на занятиях практического типа:

- регламентированная самостоятельная деятельность студентов;

- решение проблемных ситуаций для реализации технологии коллективной мыслительной деятельности.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

5.1 Темы практических занятий, по которым дается домашнее задание

1. Уравнение Шредингера для двухуровневой системы.
2. Квантовая теория излучения и поглощения.
3. Матричные элементы оператора взаимодействия. Правила отбора.
4. Уширение спектральных линий. Ширина линии излучения.
5. Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным полем.
6. Коэффициент усиления двухуровневой среды. Инверсия населенностей.

7. Оптические лазерные резонаторы.
8. Пороговое условие лазерной генерации.
9. Лазерная генерация. Параметры стационарного режима лазерной генерации.

Выполнение домашних заданий проверяется на занятиях. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы – материалы лекций, основная и дополнительная литература.

5.2 Вопросы, которые должны быть проработаны в ходе самостоятельной работы

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: $\hbar\omega_{ba} \cdot A_{sp}$ 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 ω 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 Фон-Неймана и Шредингера?
17. Объясните механизмы релаксации в газах.
18. Физический смысл времени релаксации τ_{mn} для недиагональных матричных элементов σ_{mn} ?
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.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, навыков), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования

ОПК-1: способность к овладению базовыми знаниями в области математики и естественных наук, их использованию в профессиональной деятельности.

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»

<u>Знания</u> 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.	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного материала и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения</u> 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.	Отсутствует способность решения стандартных задач	Наличие грубых ошибок при решении стандартных задач	Способность решения основных стандартных задач с существенными ошибками	Способность решения всех стандартных задач с незначительными погрешностями	Способность решения всех стандартных задач без ошибок и погрешностей	Способность решения стандартных и некоторых нестандартных задач	Способность решения стандартных задач и широкого круга нестандартных задач
<u>Навыки</u> Владеть навыками проведения аналитических расчетов для получения численных оценок порога самовозбуждения, мощности излучения, частоты генерации для квантовых генераторов оптического диапазонов длин волн.	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

ОПК-2: способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии.

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать методики анализа и базовые характеристики современных устройств и систем квантовой электроники, включая новые типы лазерных излучателей.	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного материала и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения</u> Уметь применять аппарат	Отсутствует	Наличие грубых	Способность решения	Способность	Способность ре-	Способность	Способность ре-

квантовой радиофизики для анализа вопросов теоретической физики, электродинамики, электроники.	способность решения стандартных задач	ошибок при решении стандартных задач	основных стандартных задач с существенными ошибками	решения всех стандартных задач с незначительными погрешностями	решения всех стандартных задач без ошибок и погрешностей	решения стандартных и некоторых нестандартных задач	решения стандартных задач и широкого круга нестандартных задач
Навыки Владеть навыками использования математического аппарата квантовой радиофизики для решения задач в теоретической физике, электродинамике, электронике.	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

6.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Экзамен проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть экзамена предусматривает решение задачи.

Критерии оценок.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных ситуаций. Студент дал полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета, подтверждая теоретический материал практическими примерами. Студент активно работал на практических занятиях. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных

	заданий
Отлично	<p>Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дал полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета, подтверждает теоретический материал практическими примерами. Студент активно работал на практических занятиях.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше</p>
Очень хорошо	<p>Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета при наличии неточностей.</p> <p>Студент активно работал на практических занятиях.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета при наличии неточностей. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора. Студент работал на практических занятиях.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, делает существенные ошибки, но при ответах на наводящие вопросы, может правильно сориентироваться и в общих чертах дать правильный ответ. Студент посещал практические занятия.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p>
Плохо	Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы.

	Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.
--	--

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих сформированность компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- устные и письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания, включающие одну или несколько задач

Для проведения итогового контроля сформированности компетенции используются: устный опрос, решение практических задач.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Экзаменационные вопросы для оценки сформированности компетенций ОПК-1, ОПК-2

1. Квантование свободного электромагнитного поля. Энергетический спектр и стационарные состояния свободного электромагнитного поля. Пределы применимости классического описания поля.
2. Понятие фотона. Понятие электромагнитного вакуума. Операторы рождения и уничтожения для фотонов.
3. Оператор энергии взаимодействия электромагнитного поля с веществом.
4. Квантовая теория излучения. Однофотонные переходы в первом порядке теории возмущений. 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. Вероятности излучения и поглощения в электродипольном приближении. Правила отбора для электродипольного излучения (поглощения).
6. Многофотонные процессы. Типы двухфотонных и многофотонных процессов.
7. Соотношение неопределенностей энергия-время и естественная ширина линии излучения. Спектральный контур линии спонтанного излучения. Спонтанное излучение в оптике и радиодиапазоне.
8. Добротность спектральной линии. Оценки величин. Физические основы построения квантовых стандартов частоты.
9. Механизмы уширения спектральных линий.
10. Сечения фотопоглощения и излучения квантовой системы.
11. Понятие динамической и диссипативной подсистемы на примере спонтанного

излучения атома. Релаксация динамической подсистемы как процесс взаимодействия с диссипативной подсистемой.

12. Матрица плотности подсистемы. Квантовое кинетическое уравнение. Времена релаксации для диагональных и недиагональных элементов матрицы плотности. Оценки продольного и поперечного времен релаксации для различных сред.

13. Двухуровневая идеализация. Уравнения для двухуровневой среды взаимодействующей с классическим электромагнитным полем.

14. Поведение двухуровневой среды при ее взаимодействии с резонансным электромагнитным полем. Стационарные решения уровней двухуровневой среды, взаимодействующей с резонансным полем.

15. Эффекты насыщения и просветления среды в сильном электромагнитном поле. Мощность, поглощаемая средой из электромагнитного поля. Насыщающая мощность (интенсивность). Оценки насыщающей мощности для различных сред, используемых в качестве рабочих материалов в квантовой электронике.

16. Когерентное (нестационарное) взаимодействие излучения с двухуровневой системой.

17. Термодинамически неравновесная система. Инверсия населенностей. Трех- и четырехуровневые системы. Метод оптической накачки. Инверсия населенностей в Nd^{3+} лазере.

18. Создание инверсной разности населенностей в газах с помощью газового разряда. Возбуждение атомов при столкновении с электронами. Перенос энергии при неупругом соударении атомов и молекул. Гелий-неоновый лазер. Величины инверсной разности населенностей для газовых лазеров.

19. Создание инверсной разности населенностей методом сортировки атомов неоднородными статическими электрическими и магнитными полями. Атомно-лучевая трубка. Квантовые стандарты времени и частоты.

20. Уравнение переноса излучения в усиливающей среде. Коэффициент и показатель усиления. Оценки величины показателя усиления для различных сред.

21. Полуклассические и балансные уравнения квантового генератора. Одномодовое приближение. Учет спонтанного излучения в балансных уравнениях. Примеры возникновения многомодового режима генерации (выжигание спектральных и пространственных провалов).

22. Стационарный режим работы квантового генератора и его характеристики. Условие самовозбуждения квантового генератора. Эффект затягивания частоты в квантовом генераторе.

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

24. Мощность квантового генератора. Оценка мощности для различных типов лазеров.

25. Нестационарные режимы генерации. Релаксационные колебания в квантовых генераторах. Частота и декремент затухания. Методы повышения мощности генерации лазеров. Метод модулированной добротности. Метод синхронизации мод в лазерах. Генерация гигантских импульсов.

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

27. Шумы излучения лазеров. Применение полупроводниковых лазеров в оптических системах передачи информации.

Типовые задачи для оценивания сформированности умений и навыков по компетенциям ОПК-1, ОПК-2

Задача. 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.

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

значением частоты. Найти матричный элемент оператора взаимодействия для этого перехода.

Задача. Вычислить частоту Раби 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^2

Задача. Можно ли получить индуцированное (лазерное) излучение в линейном гармоническом осцилляторе в электродипольном приближении? Ответ пояснить расчетом.

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

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

Задача. 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%.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утверждённое приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля) «Квантовая радиофизика»

а) основная литература:

1. Ярив А. *Квантовая электроника*. - М.: Сов.радио, 1980.

2. Страховский Г.Н., Успенский А.В. *Основы квантовой электроники* - М.: Высшая школа, 1979.

3. Карлов Н.В. *Лекции по квантовой электронике*. - М.: Наука, 1983.

б) дополнительная литература:

1. Ханин Я.И. «Лекции по квантовой радиофизике» Н.Н., ИПФ РАН, 2005г., 224с.
2. Акулин В.М., Карлов Н.В. Интенсивные взаимодействия в квантовой электронике – М. – 1987г. – 312с.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Лекционный зал, аудитории для практических занятий в группах.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.03.03 «Радиофизика»

Автор _____доцент Маругин А.В.

Рецензент _____ профессор Осипов Г.В.

Заведующий кафедрой _____ профессор Бельков С.А.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «09» декабря 2021 года, протокол № 07/21.