

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
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от
«31» мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины

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
Фундаментальная радиофизика

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения
очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижегород

2023 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

№ варианта	Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД
1	Блок 1. Дисциплины (модули) Обязательная часть	Дисциплина <i>Б1.О.32, квантовая радиофизика</i> относится к обязательной части ООП направления подготовки <i>03.03.03 Радиофизика</i> .

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

	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**	
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.	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	<i>Собеседование, задача</i>
	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.		

		<p>(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>	
ОПК-2. Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;	ОПК-2.1 Использует методы радиофизических измерений и методы обработки результатов.	<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 СВЧ диапазона и оптоэлектронных приборов.</p>	<i>Собеседование</i>
	ОПК-2.2 Формулирует задачи экспериментального и теоретического исследования в области радиофизики, использует радиофизическое измерительное оборудование и применяет теоретические методы.		
	ОПК-2.3 Применяет практические навыки радиофизических исследований и представления результатов.		

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения
Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
самостоятельная работа	22
КСР	2
Промежуточная аттестация – экзамен	36

3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля)	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	Занятия лабораторного типа	Всего	
Введение.	2	2			2	
Квантовая теория свободного электромагнитного поля.	9	4	2		6	3
Квантовая теория взаимодействия электромагнитного поля с веществом.	12	4	4		8	4
Механизмы уширения спектральных линий. Релаксация.	7	3	2		5	2
Квантовая кинетика.	5	3			3	2
Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным	9	3	2		5	4

электромагнитным полем.						
Методы создания инверсной разности населенностей.	8	3	3		6	2
Квантовые усилители и генераторы.	18	10	3		13	5
В т. ч. текущий контроль	2		2		2	
Промежуточная аттестация – экзамен						

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 **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.

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

включающий:

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Индикаторы	Критерии оценивания (дескрипторы)
------------	-----------------------------------

компетенции	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
Знания 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
Умения 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.	Отсутствие способности 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
Навыки Владеть навыками проведения аналитических расчетов для получения численных оценок порога самовозбуждения, мощности излучения, частоты генерации для квантовых генераторов оптического диапазона 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%

Шкала оценки при промежуточной аттестации

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.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	<p>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.</p> <p>100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий</p>
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</p>

	<p>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	<p>Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.</p>

5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

5.2.1 Контрольные вопросы

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

различных сред.	
10. Двухуровневая идеализация. Поведение двухуровневой среды при ее взаимодействии с резонансным электромагнитным полем.	ОПК-1
11. Стационарные решения для двухуровневой среды, взаимодействующей с резонансным полем. Мощность, поглощаемая средой из электромагнитного поля.	ОПК-2
12. Эффекты насыщения и просветления среды в сильном электромагнитном поле.	ОПК-2
13. Термодинамически неравновесная система. Инверсия населенностей. Трех- и четырех-уровневые системы. Метод оптической накачки. Инверсия населенностей в Nd^{3+} лазере.	ОПК-2
14. Уравнение переноса излучения в усиливающей среде. Коэффициент и показатель усиления. Оценки величины показателя усиления для различных сред.	ОПК-2
15. Полуклассические и балансные уравнения квантового генератора. Учет спонтанного излучения в балансных уравнениях.	ОПК-2
16. Одномодовое приближение. Примеры возникновения многомодового режима генерации (выжигание спектральных и пространственных провалов).	ОПК-2
17. Стационарный режим работы квантового генератора и его характеристики. Условие самовозбуждения квантового генератора.	ОПК-2
18. Оптический резонатор. Типы резонаторов. Собственная и нагруженная добротность резонатора. Время жизни фотона в резонаторе.	ОПК-2
19. Полупроводниковый инжекционный лазер, спектральные, мощностные и модуляционные характеристики.	ОПК-2
20. Эффект затягивания частоты в квантовом генераторе.	ОПК-2

5.2.2. Типовые задачи для оценки сформированности компетенции ОПК-1

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.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и 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 – бакалавриат по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 7 августа 2020 г. N 912.

Автор (ы) Маругин А.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического
факультета/института

от «25» мая 2023 года, протокол № 04/23.