

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Радиофизический факультет
Кафедра квантовой радиофизики

УТВЕРЖДАЮ
Декан радиофизического факультета

_____ Якимов А.В.
« ____ » _____ 2006 г.

Учебная программа

Дисциплины ДС.05 «Квантовая радиофизика»
по специальности 010801 «Радиофизика и электроника»

Нижний Новгород
2006 г.

1. Область применения

Данная дисциплина относится к дисциплинам федерального компонента, преподается в 7 семестре.

2. Цели и задачи дисциплины

Цель курса - сформировать у студента современное представление 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 и их использованию для расчета основных характеристик квантовых генераторов.

3. Требования к уровню освоения содержания дисциплины

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- квантовую теорию электромагнитного поля;
- квантовую теорию излучения и поглощения электромагнитных волн веществом;
- основные элементарные квантовые процессы с участием фотонов;
- квантовую теорию релаксации;
- основные механизмы уширения спектральных линий;
- квантовые кинетические уравнения для матрицы плотности;
- различные методы создания инверсной населенности в среде;
- физические принципы функционирования и основные характеристики квантовых усилителей и генераторов;
- основные типы нелинейных и параметрических процессов при взаимодействии поля со средой.

Студент также должен уметь:

- находить аналитические решения задач квантовой теории свободного электромагнитного поля (волновые функции, операторные решения уравнений Гейзенберга, вероятностные распределения, средние значения и дисперсии для различных величин поля);
- проводить расчеты и делать численные оценки величин вероятностей переходов для однофотонных и двухфотонных процессов и их зависимостей от параметров спектральных линий;
- делать численные оценки времен релаксации для различных сред;
- решать квантовое кинетическое уравнение для матрицы плотности двухуровневых электро- и магнитодипольных систем, взаимодействующих с классическим резонансным полем;
- находить аналитическое решение и делать численные оценки инверсии населенностей и коэффициента усиления (поглощения) в двух-, трех- и четырехуровневых средах;
- делать числовые оценки добротности различных резонаторов;
- проводить аналитические расчеты и делать на их основе числовые оценки

порога самовозбуждения, мощности колебаний, частоты генерации и оптимальной связи с нагрузкой для квантовых генераторов радио- и оптического диапазонов длин волн.

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
Общая трудоемкость дисциплины	88	7
Аудиторные занятия	54	54
Лекции	54	54
Практические занятия (ПЗ)	-	-
Семинары (С)	-	-
Лабораторные работы (ЛР)	-	-
Другие виды аудиторных занятий	-	-
Самостоятельная работа	34	34
Курсовой проект (работа)	-	-
Расчетно-графическая работа	-	-
Реферат	-	-
Другие виды самостоятельной работы	-	-
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	экзамен	экзамен

5. Содержание дисциплины

5.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№п/п	Раздел дисциплины	Лекции	ПЗ (или С)	ЛР
1.	Введение.	*		
2.	Квантовая теория свободного электромагнитного поля.	*		
3.	Квантовая теория взаимодействия электромагнитного поля с веществом.	*		
4.	Механизмы уширения спектральных линий. Релаксация.	*		
5.	Квантовая кинетика.	*		
6.	Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным электромагнитным полем.	*		
7.	Методы создания инверсной разности населенностей.	*		
8.	Квантовые усилители и генераторы.	*		

5.2. Содержание разделов дисциплины

I. ВВЕДЕНИЕ.

Предмет квантовой радиофизики. История проблем. Квантовая радиофизика и радиоэлектроника. Роль квантовой радиофизики в разработке новейшей техники.

II. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ СВОБОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Постановка задачи. Идея квантования. Разложение электромагнитного поля по свободным типам колебаний. Канонически сопряженные переменные для электромагнитного поля. Квантование свободного электромагнитного поля. Операторы физических величин (вектор потенциала, напряженностей электрического и магнитного поля и энергии) для электромагнитных полей. Энергетический спектр и стационарные состояния свободного электромагнитного поля. Общие следствия квантования электромагнитного поля. Общая характеристика и свойства электромагнитного поля в стационарном состоянии. Понятие электромагнитного вакуума. Его характерные свойства. Понятие фотона. Свойства фотона. Операторы электромагнитных полей для плоских волн. Операторы рождения и уничтожения для фотонов.

III. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ВЕЩЕСТВОМ.

Оператор Гамильтона системы заряженных частиц и электромагнитного поля. Оператор энергии взаимодействия электромагнитного поля с веществом. Квантовая теория излучения. Однофотонные и двухфотонные переходы в первом порядке теории возмущений. Матричные элементы оператора энергии взаимодействия поля с веществом для процессов однофотонного излучения и поглощения. Плотность радиационных осцилляторов (электромагнитных мод) в свободном пространстве и резонаторе. Индуцированное излучение фотона. Вероятность индуцированного излучения. Свойства индуцированного излучения. Спонтанное излучение. Вероятность спонтанного излучения. Свойства спонтанного излучения. Однофотонное поглощение. Вероятность однофотонного поглощения. Соотношение между вероятностями индуцированного и спонтанного процессов. Влияние вырождения состояний квантовой системы на величину вероятностей излучения и поглощения. Вероятности излучения и поглощения в электродипольном приближении. Правила отбора для электродипольного излучения (поглощения). Связь пространственной четности волновой функции квантовой системы с правилом отбора для дипольного излучения (поглощения). Магнитодипольное и электродипольное излучение (поглощение). Оценка величин для вероятностей этих процессов. Вероятность спонтанного излучения. Соотношение неопределенностей энергия-время и естественная ширина линии излучения. Добротность спектральной линии. Спонтанное излучение в оптике и радиодиапазоне. Оценки величин. Связь вероятности излучения (поглощения) квантовой системы с интенсивностью, спектральной интенсивностью и спектральной яркостью источника. Влияние ширины линии излучения (поглощения) на величину вероятности излучения квантовой системы. Сечения фотопоглощения и излучения квантовой системы. Многофотонные процессы. Параметрические и непараметрические многофотонные процессы. Вероятность двухфотонного процесса. Типы двухфотонных процессов. Трехфотонные процессы.

IV. МЕХАНИЗМЫ УШИРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ. РЕЛАКСАЦИЯ.

Спонтанное излучение. Приближение Вигнера-Вайскопфа. Спектральный контур линии спонтанного излучения. Лэмбовский сдвиг уровней. Релаксация. Время релаксации. Понятие о динамической и диссипативной подсистемах на примере спонтанного излучения атома. Релаксация динамической подсистемы как процесс взаимодействия с диссипативной подсистемой. Электромагнитный вакуум как диссипативная подсистема. Релаксация и уширение спектральных линий. Однородное уширение спектральных линий. Физические механизмы однородного уширения спектральных линий в газах, жидкостях и твердых телах. Оценки величин однородного уширения спектральных линий для различных физических механизмов. Неоднородное уширение спектральных линий. Физические механизмы неоднородного уширения. Оценки величин неоднородного уширения линий в различных средах.

V. КВАНТОВАЯ КИНЕТИКА.

Матрица плотности. Свойства матрицы плотности. Уравнение для матрицы плотности (уравнение фон-Неймана). Матрица плотности подсистемы. Квантовое кинетическое уравнение (уравнение для матрицы плотности динамической подсистемы, взаимодействующей с диссипативной подсистемой-термостатом). Времена релаксации для диагональных и недиагональных элементов матрицы плотности. Условия применимости квантового кинетического уравнения. Двухуровневая система. Уравнения для двухуровневой среды взаимодействующей с классическим электромагнитным полем. Продольное и поперечное времена релаксации и их физический смысл. Влияние фазосбивающих соударений на времена релаксации. Оценки продольного и поперечного времен релаксации для различных сред.

VI. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ СРЕДЫ С РЕЗОНАНСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.

Поведение двухуровневой среды при ее взаимодействии с резонансным электромагнитным полем. Стационарные решения уровней двухуровневой среды, взаимодействующей с резонансным полем. Эффекты насыщения и просветления среды в сильном электромагнитном поле. Мощность, поглощаемая средой из электромагнитного поля. Вероятность индуцированного излучения при квантовом переходе между двумя уровнями под действием классического электромагнитного поля. Насыщающая мощность. Оценки насыщающей мощности для различных сред, используемых в качестве рабочих материалов в квантовой электронике. Применение эффекта насыщения для управления параметрами лазерного излучения. Резонансное световое давление. Сила резонансного светового давления. Лазерное охлаждение атомов и его использование в новых поколениях квантовых приборов.

VII. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ИНВЕРСНОЙ РАЗНОСТИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ.

Инверсия населенностей. Понятие отрицательной температуры. Метод оптической накачки. Трехуровневые системы. Представление 3-х уровневой системы эквивалентной 2-х уровневой системой. Инверсия населенностей в неодимовом лазере. Оценки инверсной разности населенностей для неодима.

Создание инверсной разности населенностей в газах с помощью газового разряда. Возбуждение атомов при столкновении с электронами. Вероятность возбуждения атома налетающим электроном. Неупругие соударения атомов. Перенос энергии при неупругом соударении атомов и молекул. Гелий-неоновый лазер. Величины инверсной разности населенностей для газовых лазеров. Создание инверсной разности населенностей методом сортировки атомов неоднородными статическими электрическими и магнитными полями. Водородный мазер. Атомно-лучевая трубка. Квантовые стандарты времени и частоты.

VIII. КВАНТОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ГЕНЕРАТОРЫ.

Уравнение переноса излучения в усиливающей среде. Коэффициент и показатель усиления. Оценки величины показателя усиления для различных сред. Полоса квантового усилителя типа бегущей волны. Шумы спонтанного излучения в квантовых усилителях. Предельная чувствительность квантового усилителя. Применение квантовых усилителей в науке и технике. Уравнения квантового генератора в полуклассическом приближении. Понятие о "холодных" и "горячих" модах. Одномодовое приближение. Укороченные уравнения для одномодового квантового генератора. Стационарный режим колебания квантового генератора и его характеристики. Условие самовозбуждения квантового генератора. Эффект затягивания частоты в квантовом генераторе. Собственная и нагруженная добротность резонатора. Добротность связи на нагрузку (излучение). Время жизни фотона в резонаторе. Мощность квантового генератора. Оптимальная связь резонатора с нагрузкой. Максимальная мощность квантового генератора при оптимальной связи с нагрузкой. Оценка мощности для различных типов мазеров и лазеров. Методы повышения мощности генерации лазеров. Метод модулированной добротности. Метод синхронизации мод в лазерах.

6. Лабораторный практикум.

№п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
1.	7	Оптические квантовые генераторы.
2.	5	Электронный парамагнитный резонанс.
3.	2	Генерация второй гармоники излучения неодимового лазера.

Предусмотрены в Спецпрактикуме.

7. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

7.1. Рекомендуемая литература:

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. Звелто О. *Физика лазеров* - М.: Мир,1979.
4. Карлов Н.В. *Лекции по квантовой электронике*. - М.: Наука,1983.
5. Клышко Д.Н. *Физические основы квантовой электроники*. - М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.литературы, 1986.

6. Пантелл Р., Путхоф Г. *Основы квантовой электроники*. - М.: Мир, 1972.

б) дополнительная литература:

1. Хакен Г. *Лазерная светодинамика* - М.: Мир, 1988.

2. Файн В.М. *Квантовая радиофизика, Т.1. Фотоны и нелинейные среды*. - М.: Сов.радио, 1972.

3. Ханин Я.И. *Квантовая радиофизика, Т.2. Динамика квантовых генераторов*. - М.: Сов.радио, 1975.

8. Вопросы для контроля

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.

9. Критерии оценок

Превосходно	Превосходное знание учебного материала.
Отлично	Отличное знание учебного материала.
Очень хорошо	Очень хорошее знание учебного материала.
Хорошо	Хорошее знание учебного материала.
Удовлетворительно	Удовлетворительное знание учебного материала.
Неудовлетворительно	Плохое, недостаточное знание учебного материала.
Плохо	Отсутствие знаний.

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом по специальности 010801 «Радиофизика и электроника».

Автор программы _____ Цареградский В.Б.

Программа рассмотрена на заседании кафедры 12 мая 2006 г. протокол № 3

Заведующий кафедрой _____ Андронов А.А.

Программа одобрена методической комиссией факультета 02 июня 2006 г. протокол № 3/06

Председатель методической комиссии _____ Мануилов В.Н.