

## **Вопросы к курсу «Квантовая электроника (радиофизика)»**

1. Двухуровневая система – основной простейший осциллятор КРФ. Запись уравнения Шредингера в приближении двухуровневой системы с действующим на систему гармоническим полем
2. Двухуровневая система в сильном переменном поле в рамках уравнения Шредингера – осцилляции Раби
3. Квантование свободного электромагнитного поля. Энергетический спектр и стационарные состояния свободного электромагнитного поля. Пределы применимости классического описания поля.
4. Понятие фотона. Понятие электромагнитного вакуума. Операторы рождения и уничтожения для фотонов.
5. Оператор энергии взаимодействия электромагнитного поля с веществом. Электродипольное приближение. Матричные элементы оператора энергии взаимодействия поля с веществом для процессов однофотонного излучения и поглощения.
6. Квантовая теория излучения. Однофотонные переходы в первом порядке теории возмущений. 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).
7. Соотношение неопределенностей энергия-время и естественная ширина линии излучения. Спектральный контур линии спонтанного излучения. Механизмы уширения спектральных линий.
8. Добротность спектральной линии. Оценки величин. Физические основы построения квантовых стандартов частоты.
9. Сечения фотопоглощения и излучения квантовой системы. Коэффициент усиления (поглощения). Уравнение переноса излучения в усиливающей среде.
10. Понятие динамической и диссипативной подсистемы на примере спонтанного излучения атома. Релаксация динамической подсистемы как процесс взаимодействия с диссипативной подсистемой.
11. Матрица плотности подсистемы. Квантовое кинетическое уравнение. Времена релаксации для диагональных и недиагональных элементов матрицы плотности. Оценки продольного и поперечного времен релаксации для различных сред.
12. Двухуровневая идеализация. Уравнения для двухуровневой среды, взаимодействующей с классическим электромагнитным полем, стационарные решения.

13. Эффекты насыщения и просветления среды в сильном электромагнитном поле. Мощность, поглощаемая средой из электромагнитного поля. Насыщающая мощность (интенсивность).
14. Термодинамически неравновесная система. Инверсия населенностей. Трех- и четырех-уровневые системы. Метод оптической накачки. Инверсия населенностей в  $\text{Nd}^{3+}$  лазере.
15. 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.
16. Оптические переходы в полупроводниках и условие инверсии населенностей в полупроводниковых лазерах
17. Полуклассические и балансные уравнения квантового генератора. Одномодовое приближение. Учет спонтанного излучения в балансных уравнениях.
18. Стационарный режим работы квантового генератора и его характеристики. Условие самовозбуждения квантового генератора. Эффект затягивания частоты в квантовом генераторе.
19. Возникновение многомодового режима генерации (выжигание спектральных и пространственных провалов).
20. Оптический резонатор. Типы резонаторов. Собственная и нагруженная добротность резонатора. Время жизни фотона в резонаторе.
21. Мощность квантового генератора. 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.
22. Полупроводниковый инжекционный лазер, спектральные, мощностные и модуляционные характеристики.
23. Ширина линии генерации лазера. Шумы излучения.
24. Перечислите физические явления, в которых проявляет себя электромагнитный вакуум.
25. Почему квантовый генератор радиодиапазона запускается практически одновременно с подачей на него питания, хотя время спонтанного излучения для радиодиапазона составляет несколько лет?
26. Вероятность перехода во втором порядке теории возмущений. Условия применимости этого выражения. Какие физические явления могут быть описаны с помощью этой формулы?

27. Для процесса двухфотонного спонтанного излучения дайте характеристику виртуальных переходов и виртуальных состояний.
28. 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?
29. Перечислите отличия комбинационного рассеяния от рэлеевского рассеяния. Чем отличается комбинационное рассеяние от вынужденного комбинационного рассеяния?
30. Газокинетические соударения атомов и их влияние на параметры излучения газов.
31. При каких условиях и в отношении каких величин квантовое и классическое описание электромагнитного поля дают одинаковый результат?
32. Объясните различные механизмы неоднородного уширения спектральных линий в различных средах.
33. Почему происходит уширение спектральных линий поглощения (излучения) вещества в сильных полях?
34. 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?
35. В чем заключаются отличия квантового кинетического уравнения от уравнений Фон-Неймана и Шредингера?
36. Объясните механизмы релаксации в газах.
37. Физический смысл времени релаксации  $\tau_{mn}$  для недиагональных матричных элементов  $\sigma_{mn}$ ? Физический смысл продольного времени релаксации  $T_1$ . Как оно соотносится с поперечным временем релаксации  $T_2$ ?
38. Объясните механизмы релаксации электронов и дырок в полупроводниках.
39. Опишите принцип работы КСЧ.
40. Опишите теоретическую модель квантового генератора и усилителя.
41. Дайте объяснение механизма возникновения стационарной генерации в квантовых генераторах.
42. Для трехуровневой схемы напишите балансные уравнения для населенностей и сформулируйте условия их применимости.
43. Объясните возможность применения эффекта насыщения в лазерной технике для повышения мощности импульсных лазеров.

44. Объясните, какими физическими механизмами обусловлены различные члены в уравнениях для двухуровневой среды, взаимодействующей с классическим электромагнитным полем?
45. Объясните влияние расстройки частоты резонатора относительно частоты квантового перехода на мощность квантового генератора. Нарисуйте (качественный) график зависимости мощности от расстройки этих частот.
46. Объясните зависимость условия самовозбуждения квантового генератора от различных параметров рабочей среды и резонатора.
47. Какими физическими факторами обусловлена величина добротности собственного типа колебаний резонатора в квантовом генераторе или усилителе?
48. Как будет изменяться частота генерации квантового генератора при увеличении добротности резонатора (до бесконечности)?
49. Зависит ли от матричного элемента дипольного момента условие самовозбуждения квантового генератора, если известно, что спектральный контур линии излучения атома обусловлен только спонтанным излучением?
50. Почему ЯМР и ЭПР наблюдают по поглощению, а не по спонтанному излучению, как это делается в оптике?
51. 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?
52. Электродипольное приближение в теории излучения (поглощения) электромагнитных волн. Условие его применимости.
53. Мощность квантового генератора и ее зависимость от добротности резонатора (связи с нагрузкой). Качественный график этой зависимости.
54. Трехуровневая схема квантового генератора и усилителя. Ее основные недостатки.
55. Четырехуровневая схема квантового генератора и усилителя. Ее преимущества по сравнению с трехуровневой.
56. Квантовое кинетическое уравнение. Для каких физических систем необходимо использовать квантовое кинетическое уравнение?
57. Эффект насыщения. Механизм его возникновения.
58. Диапазон перестройки частоты квантового генератора. Физические механизмы управления частотой квантового генератора.

## **Рекомендуемая литература:**

### **а) основная литература:**

1. Ханин Я.И. Лекции по квантовой радиофизике, - Н.Новгород, 2005.
2. Ярив А. Квантовая электроника. - М.: Сов.радио,1980.
3. Страховский Г.Н., Успенский А.В. Основы квантовой электроники - М.: Высшая школа, 1979.
4. Маругин А.В. Квантовая электроника. Основные принципы и модели. Учебное пособие. Изд-во ННГУ, 2022.
5. Звелто О. Физика лазеров - М.: Мир,1979.
6. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. - М.: Наука,1983.
7. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1986.

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

# **Программа по курсу «Квантовая радиофизика» («Квантовая электроника») 2022г.**

## **1. Введение**

Предмет квантовой радиофизики. История проблем. Роль квантовой электроники в разработке новейшей техники.

## **2. Квантовая теория свободного электромагнитного поля**

Фотонная структура электромагнитных полей. 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. Момент количества движения фотона. Спин фотона. Средние значения напряженностей полей и их дисперсии.

## **3. 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.

## **4. 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. Водородный мазер. Атомно-лучевая трубка. Квантовые стандарты времени и частоты.

## **5. 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. Продольное и поперечное времена релаксации и их физический смысл. Оценки продольного и поперечного времен релаксации для различных сред.

## **6. Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным электромагнитным полем**

Уравнения для двухуровневой среды, взаимодействующей с классическим 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. Электронный парамагнитный резонанс. Уравнения Блоха. Кинетические соотношения для магнитодипольных сред. Нестационарные (когерентные) явления в двухуровневых средах. Самоиндуцированная прозрачность.

## **7. Методы создания инверсной разности населенностей**

Инверсия населенностей. 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 инверсии в полупроводниковых средах. Создание инверсной разности населенностей методом сортировки атомов неоднородными статическими электрическими и магнитными полями.

## **8. Квантовые усилители и генераторы**

Уравнение переноса излучения в усиливающей среде. Коэффициент усиления. Оценки величины коэффициента усиления для различных сред. Уравнения квантового генератора в полуклассическом приближении. 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. Добротность резонатора. Время жизни фотона в резонаторе. Мощность квантового генератора. Оценка мощности для различных типов мазеров и лазеров. Балансные уравнения для квантового генератора. Учет спонтанного излучения в балансных уравнениях. Нестационарные процессы. Релаксационные колебания в квантовых генераторах. Частота и декремент затухания. Методы повышения мощности генерации лазеров. Метод модулированной добротности. Импульсная генерация в твердотельных лазерах. Метод синхронизации мод в лазерах. Различные типы лазеров – твердотельные (Nd), газовые (He-Ne), полупроводниковые – общие принципы и специфические характеристики.