

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

Квантовая электроника

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ОПК 2 – Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

– ПК 1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2 – Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования.

ИПК 1.1 - Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

- тесты;
- контрольная работа.

Примеры вопросов теста (ИОПК-2.2.)

1. Квантовая электроника - область физики, в которой занимаются изучением:
 - а) квантовых свойств электрона
 - б) методов и средств генерации и усиления электромагнитных колебаний на основе явления вынужденного излучения
 - в) генерации и усиления электромагнитных колебаний на основе явления спонтанного излучения
2. При вынужденном испускании фотона под воздействием внешнего излучения той же частоты:
 - а) фаза фотона отличается на величину, кратную π относительно фазы внешнего вынуждающего излучения
 - б) направление распространения генерируемого фотона обратно по отношению к направлению распространения внешнего излучения
 - в) характеристики генерируемого фотона тождественны характеристикам фотонов внешнего излучения
 - г) характеристики генерируемого фотона не связаны с характеристиками фотонов внешнего излучения
3. Среда с инверсной населенностью это:
 - а) среда, находящаяся в термодинамически равновесном состоянии, способная усиливать электромагнитные колебания посредством явления вынужденного излучения
 - б) среда, находящаяся в термодинамически неравновесном состоянии, способная усиливать электромагнитные колебания посредством явления вынужденного излучения
 - в) среда, в которой населенности верхнего и нижнего лазерных уровней одинаковы
4. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанного A_{21} и вынужденного B_{21} излучения:
 - а) пропорциональны друг другу
 - б) обратно пропорциональны друг другу
 - в) равны друг другу при равенстве статистических весов нижнего и верхнего лазерных уровней

5. Время жизни уровня это:

- а) временной интервал, равный временной задержке начала излучения в рассматриваемой системе относительно момента начала возбуждения частиц данной системы
- б) временной интервал, равный продолжительности свечения возбужденных частиц в рассматриваемой системе
- в) временной интервал, в течение которого населенность верхнего уровня оптического перехода уменьшается в e раз.

Ключи: 1 б), 2 в), 3 б), 4 а), 5 в).

Критерии оценивания: тест считается пройденным, если обучающий ответил правильно как минимум на половину вопросов.

Контрольная работа (ИОПК 2.2, ИПК-1.1)

Контрольная работа состоит из 2 теоретических вопросов и 2 задач.

Перечень теоретических вопросов:

1. Предмет квантовой электроники (КЭ). Общие свойства лазерного излучения.
2. Области применения лазеров. Краткая история развития идей создания усилителя света.
3. Основы КЭ: явление вынужденного усиления, открытый оптический резонатор, среда с инверсной населенностью.
4. Типы излучения в квантовых системах.
5. Свойства индуцированного излучения.
6. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанного излучения A , вынужденного излучения B_{2-1} и поглощения B_{1-2} .
7. Связь между коэффициентами Эйнштейна: вывод соотношения между ними на основе термодинамического подхода.
8. Связь между временем жизни состояния и коэффициентом A .
9. Спектральная ширина линии. Естественная ширина линии. Уширение линии столкновительное и доплеровское. Однородное и неоднородное уширение спектра линии.
10. Лоренцевский и Гауссовский контуры линии.
11. Коэффициенты поглощения / усиления в среде. Понятие инверсной населенности активной среды.
12. Связь между коэффициентом поглощения и сечением поглощения малого сигнала.
13. Населенности состояний при высокой плотности энергии излучения ($\rho \rightarrow \infty$) для стационарного состояния.
14. Понятие интенсивности насыщения.

Примеры задач:

1. Во сколько раз отличается вероятность спонтанного и вынужденного излучения некоторого атома, имеющего резонансную частоту $\omega_0 = 4 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ и помещенного в полость с равновесным излучением при температуре $T = 5000 \text{ К}$?
2. Чему равна средняя длина пробега резонансного фотона с длиной волны 500 нм в разреженном межзвездном газе с концентрацией $n = 10^2 \text{ см}^{-3}$. Энергетические уровни не вырождены, линия поглощения имеет естественную ширину.
Примечание: средняя длина пробега фотона – это обратная величина коэффициента поглощения.

Критерии оценивания:

Результаты контрольной работы определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» выставляется, если даны правильные ответы на все теоретические вопросы и все задачи решены без ошибок.

Оценка «хорошо» выставляется, если даны правильные ответы на все теоретические вопросы и 1 задача решена без ошибок или дан правильный ответ на 1 теоретический вопрос и 2 задачи решены без ошибок.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если дан правильный ответ на 1 теоретический вопрос и 1 задача решена без ошибок.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если ответы на оба теоретических вопроса неверны и задачи не решены.

3. Оценочные материалы итогового контроля и критерии оценивания

Экзаменационный билет состоит из 2 теоретических вопроса и 2 задач.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен:

15. Предмет квантовой электроники (КЭ). Общие свойства лазерного излучения.
16. Области применения лазеров. Краткая история развития идей создания усилителя света.
17. Основы КЭ: явление вынужденного усиления, открытый оптический резонатор, среда с инверсной населенностью.
18. Типы излучения в квантовых системах.
19. Свойства индуцированного излучения.
20. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанного излучения A , вынужденного излучения B_{2-1} и поглощения B_{1-2} .
21. Связь между коэффициентами Эйнштейна: вывод соотношения между ними на основе термодинамического подхода.
22. Связь между временем жизни состояния и коэффициентом A .
23. Спектральная ширина линии. Естественная ширина линии. Уширение линии столкновительное и доплеровское. Однородное и неоднородное уширение спектра линии.
24. Лоренцевский и Гауссовский контуры линии.
25. Коэффициенты поглощения / усиления в среде. Понятие инверсной населенности активной среды.
26. Связь между коэффициентом поглощения и сечением поглощения малого сигнала.
27. Населенности состояний при высокой плотности энергии излучения ($\rho \rightarrow \infty$) для стационарного состояния.
28. Понятие интенсивности насыщения.
29. Коэффициент усиления усилителя.
30. Полоса пропускания усилителя в случае однородного уширения.
31. Выражение для мощности излучения на выходе усилителя.
32. Понятие телесного угла и доли мощности спонтанного излучения, распространяющегося в пределах некоторого телесного угла.
33. Выражения для мощности излучения на выходе усилителя при низком и высоком уровне мощности оптического сигнала на входе усилителя.
34. Понятие и выражение для добротности резонатора.
35. Условие самовозбуждения $RK^2=1$.
36. Спектральный между соседними линиями, обеспечивающими условие резонансов.

37. Представление поля в усилителе в виде двух плоских волн, распространяющихся в противоположных направлениях Γ^+ , Γ^- (коэффициент отражения одного из зеркал $R=1$).
38. Выражение максимальной выходной мощности усилителя через интенсивность насыщения: $I_{\max}^{\text{Вых}} = I_s \cdot \frac{\alpha_0}{\beta}$.
39. Открытый резонатор в оптическом диапазоне: основные особенности и назначение резонатора.
40. Выражение для плоского угла, в пределах которого сохраняется высокая добротность открытого резонатора. Число резонансных колебаний в единице объема в единичном спектральном интервале.
41. Селекция высокодобротных колебаний в открытом резонаторе.
42. Понятия числа Френеля, моды резонатора.
43. Время жизни фотона в резонаторе (время затухания излучения в резонаторе в e раз).
44. Связь между добротностью резонатора и временем затухания излучения в резонаторе.
45. Расчет доли энергии, теряемой при дифракции ($\frac{4}{N_F}$).
46. Интегральное уравнение для функции распределения поля на поверхности зеркала (решение Фокса и Ли).
47. Основные свойства решения интегрального уравнения Фокса и Ли.
48. Конфокальный резонатор. Распределение поля световой волны в поперечной плоскости конфокального резонатора. Полиномы Эрмита. Моды $TEM_{\nu\mu q}$.
49. Основная мода TEM_{00q} . Ширина распределения поля в поперечной плоскости w .
50. Выражение для поперечного распределения поля основной моды при $z \gg l/2$. Радиус кривизны волны как функция координаты z .
51. Понятие устойчивости резонатора. Параметры устойчивости g_1 , g_2 . Диаграмма устойчивости. Резонаторы при $g_1=g_2=0$; $g_1=g_2=1$; $g_1=g_2=-1$; полуконфокальный резонатор

Примеры задач:

Задача 1.

Активная среда газового лазера имеет линейный коэффициент усиления $\alpha = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, а коэффициент потерь $\beta = 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. Чему равен оптимальный коэффициент отражения R_{opt} одинаковых зеркал резонатора, при котором достигается максимум выходной мощности лазера? Длина активной среды $L = 40 \text{ см}$.

Задача 2.

На какой частоте ω_m будет наблюдаться максимум плотности мощности равновесного излучения абсолютно черного тела при температуре $T = 4000 \text{ К}$? Какой длине волны λ_m соответствует эта частота?

Критерии оценивания:

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» выставляется, если даны правильные ответы на все теоретические вопросы и все задачи решены без ошибок.

Оценка «хорошо» выставляется, если даны правильные ответы на все теоретические вопросы и 1 задача решена без ошибок или дан правильный ответ на 1 теоретический вопрос и 2 задачи решены без ошибок.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если дан правильный ответ на 1 теоретический вопрос и 1 задача решена без ошибок.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если ответы на оба теоретических вопроса неверны и задачи не решены.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Тест

1. Какой из нижеперечисленных механизмов уширения спектральных линий приводит к неоднородному уширению линии:
 - а) спонтанное излучение
 - б) доплеровское уширение
 - в) столкновительное уширение
2. Под добротностью резонатора в квантовой электронике понимают:
 - а) число обходов резонатора фотонной лавиной за 2π секунд
 - б) отношение радиусов кривизны зеркал резонатора
 - в) отношение запасенной в системе энергии к энергии, теряемой в течение периода колебаний, умноженное на 2π
 - г) отношение запасенной в системе энергии к энергии, теряемой в течение периода колебаний

Ключи: 1 б), 2 в).

Задачи:

Задача 1 (ИОПК-2.2)

Найти величину плотности мощности излучения на переходе молекулы азота на длине волны азотного лазера 337,1 нм, при которой вероятности спонтанного и вынужденного излучения будут равны.

Задача 2 (ИПК-1.1)

Во сколько раз отличается вероятность спонтанного и вынужденного излучения некоторого атома, имеющего резонансную частоту $\nu_0 = 4 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ и помещенного в полость с равновесным излучением при температуре $T = 5000 \text{ К}$?

Ответы:

Задача 1. $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$

Задача 2. ≈ 45 раз

Теоретические вопросы:

1. Связь между временем жизни состояния τ и коэффициентом A_{21} .

Ответ:

Временем жизни уровня считается временной интервал τ , в течение которого населенность за счет спонтанного излучения уменьшается в e раз. Временной ход населенности состояния $N_2(t)$ связан с коэффициентом A_{21} соотношением:

$$N_2(t) = N_2(0) \exp(-A_{21}t),$$

где $N_2(0)$ – населенность состояния в начальный момент времени, t – время.

Соответственно, если $A_{21}\tau = 1$, то за временной интервал, равный τ населенность уровня уменьшится в e раз. Из этого следует, что $\tau = 1/A_{21}$.

2. Коэффициенты поглощения / усиления в среде. Понятие инверсной населенности активной среды.

Ответ:

Коэффициент поглощения α в термодинамически равновесной среде определяется выражением:

$$\alpha = -\frac{1}{I} \frac{d\rho}{dt} = \left(\frac{n_1}{g_1} - \frac{n_2}{g_2} \right) \frac{g_1 2B_{12} h \nu I}{c \pi \Delta \nu_L},$$

где ρ – объемная плотность энергии излучения, I – интенсивность излучения, n_1, n_2 – населенности состояний, g_1, g_2 – статистические веса состояний, B_{12} – коэффициент Эйнштейна для вынужденного поглощения, h – постоянная Планка, ν – частота, c – скорость света, $\Delta \nu_L$ – спектральная ширина линии.

При выполнении условия:

$$\frac{n_1}{g_1} - \frac{n_2}{g_2} > 0$$

коэффициент поглощения α положителен, что вызывает уменьшение интенсивности световой волны I при распространении в термодинамически равновесной среде в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$dI = -I \alpha dz$$

При выполнении условия:

$$\frac{n_1}{g_1} - \frac{n_2}{g_2} < 0,$$

т.е. при реализации т.н. инверсной населенности в термодинамически неравновесной среде коэффициент поглощения становится отрицательным. Это вызывает, в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера, экспоненциальный рост интенсивности излучения при распространении света в среде с инверсной населенностью. В этом случае можно ввести понятие коэффициента усиления:

$$\alpha_0 = \left(\frac{n_2}{g_2} - \frac{n_1}{g_1} \right) \frac{g_1 2B_{12} h \nu I}{c \pi \Delta \nu_L} > 0,$$

определяющего усиление световой волны при распространении в среде с инверсной населенностью:

$$dI = I \alpha_0 dz$$

Информация о разработчиках

Ломаев Михаил Иванович, д.ф.-м.н., кафедра физики плазмы НИ ТГУ, профессор