

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем имени В.П. Грязева
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры
«Приборы управления»
«22» января 2024 г., протокол №1

Заведующий кафедрой


_____ В.В. Матвеев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических (семинарских)
занятий по дисциплине (модулю)
«Лазерная техника»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

с направленностью (профилем)
Интеллектуальные фотонные системы

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Тула 2024 год

Разработчик методических указаний

Погорелов М.Г., доцент, к.т.н. _____



Содержание

№ ПЗ	Темы практических занятий	Страница
1	Мощность спонтанного и вынужденного излучений. Кинетические уравнения.	4
2	Изучение зависимости потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду.	8
3	Расчет эксплуатационных параметров лазеров	10
4	Расчет энергетических, пространственных и временных характеристик излучения лазеров.	13
5	Ослабление лазерного излучения в атмосфере.	16
6	Влияние атмосферной турбулентности и рефракции на лазерное излучение.	21
7	Ослабление излучения лазеров в воде и космосе	24
8	Особенности прохождения лазерного излучения в оптическом волокне.	27

Практическое занятие № 1

Мощность спонтанного и вынужденного излучений. Кинетические уравнения.

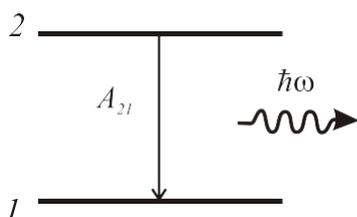
1. Цель и задачи работы

Цель работы: получение практических навыков расчета мощности спонтанного излучения.

Задачи работы: получение практических навыков расчета мощности спонтанного излучения.

2. Общие положения (теоретические сведения)

Рассмотрим сначала процесс спонтанного (самопроизвольного) излучения.



Рассмотрим пару уровней 2 и 1 между которыми разрешен оптический переход. Система не может долго находиться в возбужденном состоянии 2, она переходит в состояние с меньшей энергией 1 и при этом сбрасывает избыток энергии - излучает фотон. При спонтанном излучении переход из возбужденного состояния 2 в состояние 1 происходит мгновенно, скачком. Момент испускания фотона есть случайная величина, суждения о которой могут носить лишь статистический характер. Вероятность перехода в единицу времени обозначают A_{21} , она имеет размерность $[1/c]$.

Для ансамбля частиц, находящихся в возбужденном состоянии 2, за время от t до $t + dt$ происходит dN_{21} переходов $2 \rightarrow 1$, их число можно подсчитать следующим образом:

$$dN_{21} = N_2 \cdot A_{21} \cdot dt .$$

Физический смысл этой формулы ясен - здесь $A_{21} \cdot dt$ это вероятность перехода $2 \rightarrow 1$ за dt , а N_2 это число частиц, из которых происходит вероятностный выбор. За счет распадов $2 \rightarrow 1$ количество частиц на верхнем уровне уменьшается, т.е. $dN_{21} = - dN_2$.

Подстановка из предыдущего соотношения дает дифференциальное уравнение

$$dN_2 = - N_2 \cdot A_{21} \cdot dt , \quad N_2(t) \uparrow$$

которое легко решается:

$$N_2 = N_2(0) \cdot e^{-A_{21} \cdot t} ,$$

здесь $N_2(0)$ - число частиц на уровне 2 в начальный момент времени.

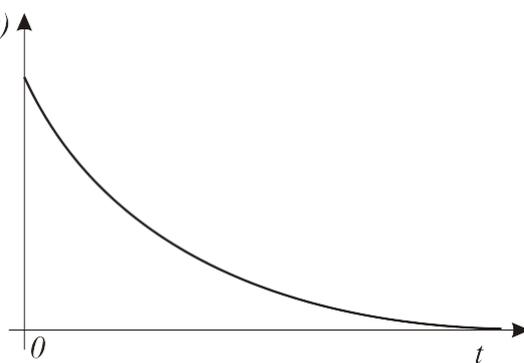
Таким образом, число частиц на возбужденном уровне из-за спонтанных распадов уменьшается экспоненциально. Константу A_{21} в

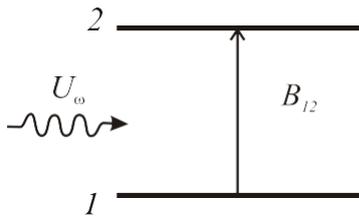
показателе экспоненты часто обозначают иначе $\tau_{21} = 1/A_{21}$, и эту величину называют временем жизни уровня 2, ее размерность $[c]$. Число переходов $2 \rightarrow 1$ в единицу времени,

$$\frac{dN_{21}}{dt} = A_{21} \cdot N_2(t) = A_{21} \cdot N_2(0) \cdot e^{-A_{21} \cdot t} ,$$

т.е. светимость газа, также уменьшается экспоненциально, что лежит в основе метода измерения времени жизни внутриатомных (или молекулярных) уровней.

Вероятности и скорости оптических переходов





Это переход $1 \rightarrow 2$ под действием электромагнитного поля с плотностью энергии U_ω с вероятностью перехода в единицу времени $B_{12} \cdot U_\omega$ (размерность $[1/c]$). Число переходов $1 \rightarrow 2$ за dt вычисляется следующим образом:

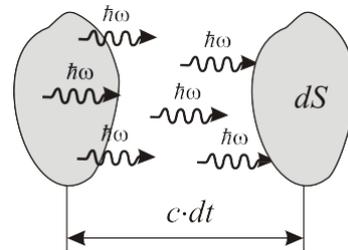
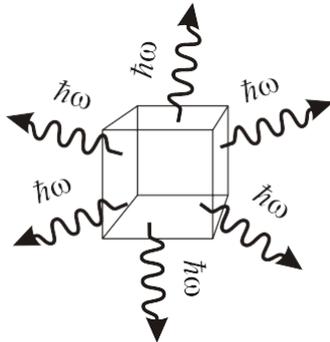
$$dN_{12} = N_1 \cdot B_{12} \cdot U_\omega \cdot dt$$

U_ω - плотность энергии электромагнитного поля

$$U_\omega = \hbar \omega \cdot n_\phi$$

может быть, очевидно, вычислена следующим образом:

где $\hbar \omega$ - энергия фотона, а n_ϕ - плотность фотонов (число фотонов в единице объема) имеет размерность $[1/\text{см}^3]$.



Для направленного потока фотонов, а это случай интересный для лазера, плотность фотонов можно связать с плотностью потока фотонов:

$$dN_\phi = n_\phi \cdot c \cdot dt \cdot dS,$$

здесь dN_ϕ - число фотонов, пролетающих через площадку dS за dt , c - скорость света и далее по определению плотности потока фотонов, F ,

$$F = \frac{dN_\phi}{dS \cdot dt} = n_\phi \cdot c,$$

$$F = n_\phi \cdot c.$$

Плотность потока фотонов F связана в свою очередь с интенсивностью света I_ω очевидным соотношением:

$$I_\omega = \hbar \omega \cdot F.$$

Таким образом, введенные Эйнштейном величины для поглощения $1 \rightarrow 2$, связаны

$$U_\omega = \frac{\hbar \omega}{c} \cdot F,$$

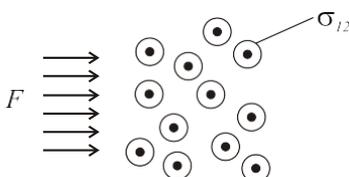
$$U_\omega = \frac{I_\omega}{c},$$

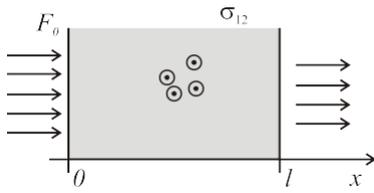
$$B_{12} U_\omega = B_{12} \frac{\hbar \omega}{c} \cdot F.$$

В последнем соотношении комбинация $B_{12} \frac{\hbar \omega}{c}$ имеет размерность площади, $[\text{см}^2]$, её обозначают σ_{12} и называют сечением поглощения с уровня 1 на уровень 2. В новых обозначениях формула

$$dN_{12} = N_1 \cdot \sigma_{12} \cdot F \cdot dt$$

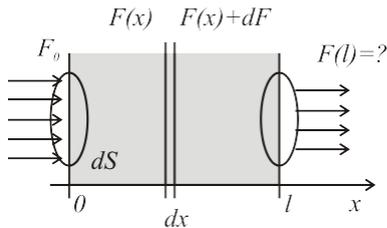
приобретает весьма прозрачный физический смысл. ...





$$dN_{\phi} = -\sigma_{12} \cdot F \cdot n_1 \cdot dx \cdot dS \cdot dt$$

$$dN_{\phi} / dS \cdot dt = -\sigma_{12} \cdot F \cdot n_1 \cdot dx$$



$$dF = -\sigma_{12} \cdot F \cdot n_1 \cdot dx$$

$$dI_{\omega} = -\sigma_{12} \cdot I_{\omega} \cdot n_1 \cdot dx$$

Контрольные вопросы

1. Лазер на окиси углерода излучает на колебательно-вращательных переходах $\nu = n \rightarrow \nu = n - 1$. Длина волны излучения составляет 5 мкм. Оценить частоту нулевых колебаний молекулы CO.
2. Эрбиевый лазер на фосфатном стекле излучает на переходе ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ с длиной волны 1.5 мкм. Время жизни верхнего лазерного уровня составляет $8.2 \cdot 10^{-3}$ с. Оценить сечение генерационного перехода.
3. A_{31} – вероятность перехода $3 \rightarrow 1$, A_{32} – вероятность перехода $3 \rightarrow 2$. Вычислить время жизни уровня 3.

Список использованных источников

1. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: Учебное пособие для вузов / С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 253 с.
2. Погорельский С.Л. Прикладная оптика: учебное пособие для вузов. Ч I /С.Л. Погорельский; ТулГУ; Фак. Механики и систем управления; каф. «Приборы управления». – Тула: Гриф и К, 2005. – 186 с.
3. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой.— М. : Техносфера, 2008 .— 440 с.
4. Вейко В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко [и др.] ; под ред. В. И. Конова .— М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008 .— 312 с.

Практическое занятие № 2

Изучение зависимости потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду.

1. Цель и задачи работы

Цель работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

Задачи работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

2. Общие положения (теоретические сведения)

На основе анализа экспериментальных данных Стефан в 1879, а в 1884 году Больцман теоретически с помощью термодинамических соображений получили закономерность для энергетической светимости АЧТ, называемую законом Стефана-Больцмана:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega} d\omega = \sigma T^4$$

Вин в 1893 году, рассматривая адиабатическое сжатие равновесного излучения в полости с зеркальными стенками и учитывая изменение частоты при отражении от движущегося зеркала (эффект Доплера), получил

$$U_{\omega}(T) = \omega^3 \cdot f(\omega/T),$$

где f – некоторая функция, конкретный вид которой в рамках электромагнитной теории и термодинамики установить невозможно.

Закон Вина включает в себя как следствие закон Стефана-Больцмана:

$$\int_0^{\infty} U_{\omega}(T) d\omega = T^4 \int_0^{\infty} x^3 f(x) dx$$

и, наблюдаемый экспериментально, закон смещения: с увеличением температуры максимум спектра АЧТ смещается область более коротких длин волн, причем $\lambda_{\max} \cdot T = \text{const}$.

В 1896 году для описания экспериментальных результатов в коротковолновой области спектра Вин предложил конкретный вид функции $f(\omega/T)$:

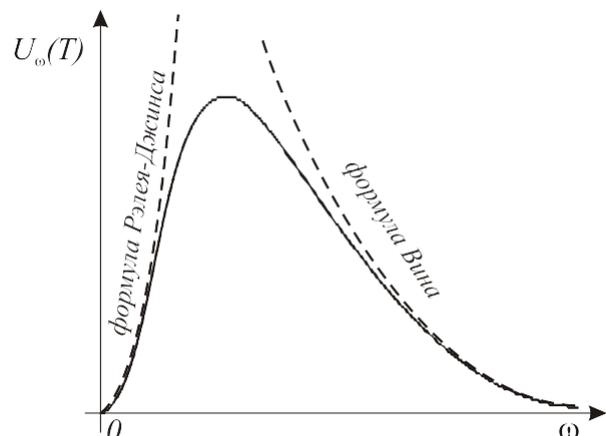
$$U_{\omega}(T) = \omega^3 \cdot C_1 \cdot e^{-\frac{c}{\omega T}} \quad - \text{формула Вина.}$$

Строгий классический вывод спектра АЧТ был проведен для равновесного состояния электромагнитного излучения и осцилляторов в полости АЧТ. Он дает соотношение известное под названием формулы Рэля-Джинса:

$$U_{\omega}(T) = \frac{\omega^2 kT}{\pi^2 c^3}$$

Это соотношение согласуется с законом Вина. В длинноволновой области, т.е. при малых ω , формула Рэля-Джинса хорошо согласуется и с экспериментальными результатами. Но при дальнейшем увеличении частоты обнаруживается резкое расхождение с экспериментом, так как () предсказывает рост спектральной плотности вплоть до бесконечно больших частот (ультрафиолетовых и рентгеновских лучей). Такое положение П. Эрнферст назвал «ультрафиолетовой катастрофой». Уравнения классической физики оказались неспособными полностью объяснить закономерности спектра АЧТ.

М. Планк полуэмпирическим путем, стараясь улучшить согласие с экспериментом, получил для АЧТ



$$U_{\omega}(T) = \frac{\hbar \omega}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1}$$

Для этого пришлось предположить, что осцилляторы (вещество) в полости АЧТ имеют дискретную энергию $E_0, E_1, E_2, \dots, E_n$ и уровни энергии эквидистантны

$$E_n = n \cdot E_0, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Чтобы не было противоречия с законом Вина, необходимо было принять

$$E_0 = \hbar \cdot \omega$$

где $\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка ($\hbar = h/2\pi$, $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Формула Планка прекрасно согласуется с экспериментом при всех частотах и температурах.

14 декабря 1900 года Планк сделал доклад о полном решении задачи АЧТ. Эту дату можно считать днем рождения квантовой теории.

Контрольные вопросы

1. В лазере на $YAG : Nd^{3+}$ обычно для генерации используют два сильных перехода: ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ с длиной волны 1.33 мкм или ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ с длиной волны 1.06 мкм. Соотношение интенсивности соответствующих линий люминисценции 1 : 5. Время жизни верхнего лазерного уровня $2.5 \cdot 10^{-4}$ с. Оценить сечения генерационных переходов.
2. Для трехуровневой схемы с нижним генерационным переходом показать, что зависимость $\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + P/P_s}$ имеет место в общем случае (без учета приближения $A_{32} \gg B_p U_p$), вычислить α_0 и P_s .
3. Для четырехуровневой схемы показать, что зависимость $\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + P/P_s}$ имеет место в

общем случае (не пользуясь приближениями быстрой релаксации по каналам $4 \rightarrow 3$ и $2 \rightarrow 1$), вычислить α_0 и P_s .

Список использованных источников

1. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: Учебное пособие для вузов / С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 253 с.
2. Погорельский С.Л. Прикладная оптика: учебное пособие для вузов. Ч I /С.Л. Погорельский; ТулГУ; Фак. Механики и систем управления; каф. «Приборы управления». – Тула: Гриф и К, 2005. – 186 с.
3. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой.— М. : Техносфера, 2008 .— 440 с.
4. Вейко В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко [и др.] ; под ред. В. И. Конова .— М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008 .— 312 с.

Практическое занятие № 3

Расчет эксплуатационных параметров лазеров

1. **Цель и задачи работы**Цель работы: получение практических навыков расчета эксплуатационных параметров лазеров.

Задачи работы: получение практических навыков расчета эксплуатационных параметров лазеров.

2. Общие положения (теоретические сведения)

Попробуем вычислить равновесное распределение излучения в системе атомов, поглощающих излучение и испускающих излучение спонтанно, т.е. на основе двух рассмотренных выше процессов.

В равновесной системе для любой пары уровней должно выполняться следующее

$$dN_{21} = dN_{12} \quad \text{или} \quad A_{21}N_2dt = B_{12}U_\omega N_1dt$$

$$U_\omega = \frac{A_{21}}{B_{12}} \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

и далее

Равновесная заселенность по энергетическим уровням строго выводится в статистической физике и результат следующий (распределение Больцмана)

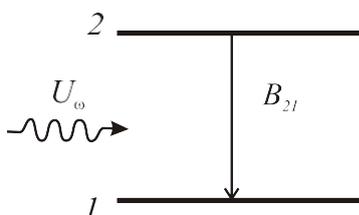
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2 \cdot e^{-\frac{E_2}{kT}}}{g_1 \cdot e^{-\frac{E_1}{kT}}} = \frac{g_2}{g_1} \cdot e^{-\frac{\Delta\epsilon}{kT}}$$

здесь g_1, g_2 – степень вырождения уровня

Подставив в получим

$$U_\omega = \frac{A_{21}}{B_{12}} \cdot \frac{g_2}{g_1} \cdot e^{-\frac{\Delta\epsilon}{kT}}$$

формулу Вина, а не формулу Планка.



А.Эйнштейн ввел еще один процесс взаимодействия – вынужденное излучение. Это переход $2 \rightarrow 1$ под действием электромагнитного поля с плотностью энергии U_ω и с вероятностью перехода в

единицу времени $B_{21} \cdot U_\omega$ (размерность $[1/c]$), аналогично поглощению.

С учетом вынужденного излучения число переходов $2 \rightarrow 1$ теперь должно включать два слагаемых

$$dN_{21} = N_2 \cdot A_{21} \cdot dt + N_2 \cdot B_{21} \cdot U_\omega \cdot dt .$$

И если снова попытаться получить равновесное распределение излучения получим вместо () следующее соотношение

$$N_2 \cdot A_{21} \cdot dt + N_2 \cdot B_{21} \cdot U_\omega \cdot dt = B_{12} U_\omega N_1 dt .$$

Собрав слагаемые при U_ω ,

$$\frac{N_2}{N} A_{21} = \left(B_{12} - \frac{N_2}{N} B_{21} \right) \cdot U_\omega$$

1 (

а с учетом ()

$$\frac{g_2}{g_1} \cdot e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}} \cdot A_{21} = \left(B_{12} - \frac{g_2}{g_1} \cdot e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}} \cdot B_{21} \right) \cdot U_\omega$$

Здесь можно сделать некоторое заключение о соотношении коэффициентов Эйнштейна B_{12} и B_{21} . При увеличении температуры $T \rightarrow \infty$, $U_\omega \rightarrow \infty$, что ясно из физических соображений, а $\exp(-\hbar\omega/kT) \rightarrow 1$.

Тогда выражение в скобке должно стремиться к нулю

$$B_{12} - \frac{g_2}{g_1} \cdot B_{21} = 0 \quad \text{или} \quad g_1 B_{12} = g_2 B_{21},$$

иначе полученное соотношение теряет физический смысл.

С учетом () соотношение () преобразуется следующим образом

$$e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}} \cdot A_{21} = B_{21} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}} \right) \cdot U_\omega,$$

и в результате получается формула Планка

$$U_\omega(T) = \frac{A_{21}/B_{21}}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

Сравнивая с формулой Планка получается следующее

$$A_{21}/B_{21} = \frac{\hbar\omega}{\pi^2 c^3}$$

И окончательно для коэффициентов Эйнштейна

$$A_{21} = B_{21} \cdot \frac{\hbar\omega}{\pi^2 c^3}, \quad g_1 B_{12} = g_2 B_{21}.$$

И для сечений

$$A_{21} = \sigma_{21} \cdot \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}, \quad g_1 \sigma_{12} = g_2 \sigma_{21}.$$

Таким образом все три коэффициента Эйнштейна связаны между собой.

Уравнения которыми пользовались - кинетические уравнения, они описывают процессы в точке (малом объеме) и широко используются для описания процессов в лазерах, как первое (простое) приближение.

Контрольные вопросы

1. Для трехуровневой схемы с верхним генерационным переходом выяснить вид зависимости P_{out} от P_p при высоком уровне накачки, оценить мощность излучения P_{max} и населенности всех уровней.
2. Для четырехуровневой схемы выяснить вид зависимости P_{out} от P_p при высоком уровне накачки, оценить мощность излучения P_{max} и населенности всех уровней.
3. Найти рекуррентную последовательность A_n – высота луча на зеркале после n – ого обхода резонатора.

Список использованных источников

1. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: Учебное пособие для вузов / С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 253 с.
2. Погорельский С.Л. Прикладная оптика: учебное пособие для вузов. Ч I /С.Л. Погорельский; ТулГУ; Фак. Механики и систем управления; каф. «Приборы управления». – Тула: Гриф и К, 2005. – 186 с.
3. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой.— М. : Техносфера, 2008 .— 440 с.
4. Вейко В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко [и др.] ; под ред. В. И. Конова .— М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008 .— 312 с.

Практическое занятие № 4

Расчет энергетических, пространственных и временных характеристик излучения лазеров.

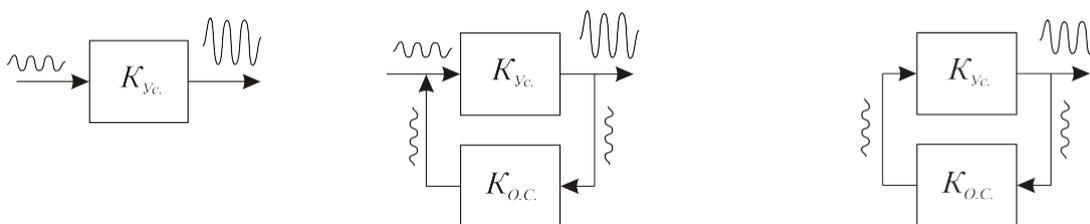
1. Цель и задачи работы

Цель работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

Задачи работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

2. Общие положения (теоретические сведения)

1. Если усилитель охватить петлей положительной обратной связи, можно получить генератор. Эта идея была развита радиофизиками и реализована затем в оптической области спектра в мазерах и лазерах.

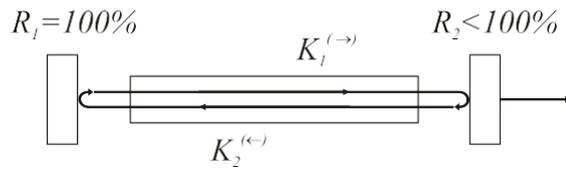


$K_{yc} \cdot K_{oc} \geq 1$ – амплитудное условие генерации

$\Delta\varphi = 2\pi n$ $n = 0, 1, 2, \dots$ - фазовое условие генерации

$K_{yc} \cdot K_{oc} = 1$ – условие стационарной генерации, это возможно, поскольку $K_{yc} = K_{oc}^{-1}$

Положительная обратная связь в оптическом диапазоне реализуется, например в интерферометре Фабри-Перо. ...парой зеркал... Шум – это спонтанное излучение.

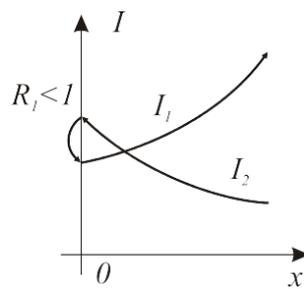
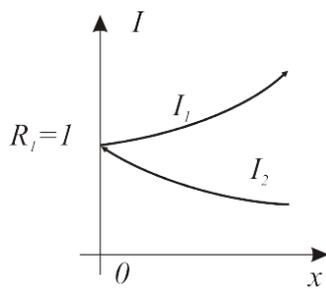
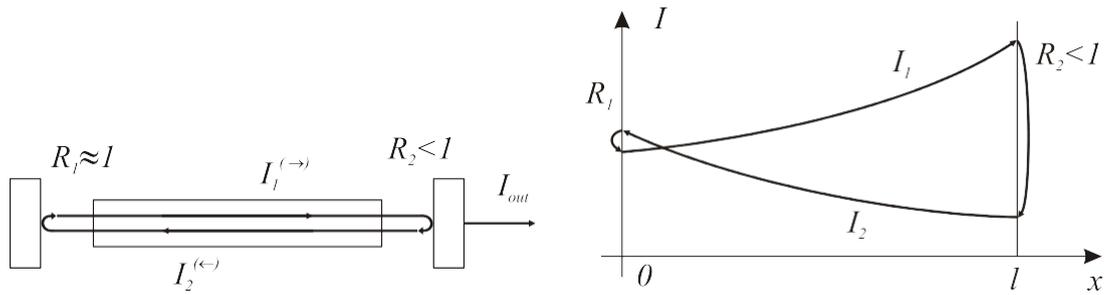


$$K_2 \cdot R_1 \cdot K_1 \cdot R_2 = 1 \quad K_2 \cdot K_1 \cdot R_2 = 1 / R_1 \cdot R_2$$

2. (постановка задачи)

Рассмотрим стационарную ситуацию, все $d.../dt = 0$.

$$I = I_1 + I_2 \quad I = I(x) \quad \alpha = \alpha(x) = \frac{\alpha_0}{1 + I(x)/I_s}$$

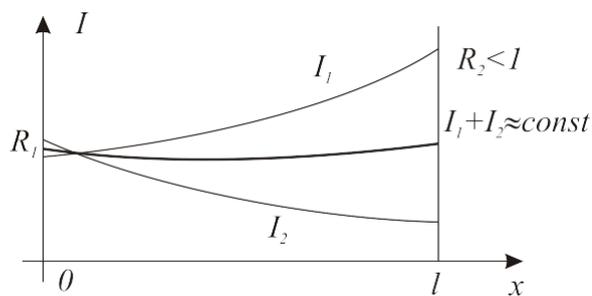


$$\begin{cases} \frac{dI_1}{dx} = \left(\frac{\alpha_0}{1 + \frac{I_1 + I_2}{I_s}} - \beta \right) \cdot I_1 \\ \frac{dI_2}{dx} = - \left(\frac{\alpha_0}{1 + \frac{I_1 + I_2}{I_s}} - \beta \right) \cdot I_2 \\ I_1(0) = R_1 \cdot I_2(0) \\ I_2(l) = R_2 \cdot I_1(l) \end{cases}$$

$$I_{out} = (1 - R_1) \cdot I_1(l)$$

3. Численное решение, результаты...обсуждение

4. Приближение $I_1 + I_2 = \text{const}$..., вывод формулы Ригрода. Сравнение с численными результатами.



$$I_1 + I_2 = \text{const} \Rightarrow \alpha(x) = \alpha = \text{const}$$

$$\begin{cases} \frac{dI_1}{dx} = (\alpha - \beta) \cdot I_1 \\ \frac{dI_2}{dx} = -(\alpha - \beta) \cdot I_2 \\ I_1(0) = R_1 \cdot I_2(0) \\ I_2(l) = R_2 \cdot I_1(l) \end{cases} \quad \begin{cases} I_1(l) = I_1(0) \cdot e^{(\alpha - \beta) \cdot l} \\ I_2(l) = I_2(0) \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot l} \\ I_1(0) = R_1 \cdot I_2(0) \\ I_2(l) = R_2 \cdot I_1(l) \end{cases}$$

$$I_2(l) = R_2 \cdot I_1(l) \quad I_2(l) = R_2 \cdot e^{(\alpha - \beta) \cdot l} \cdot I_1(0)$$

$$I_2(l) = R_2 \cdot e^{(\alpha - \beta) \cdot l} \cdot R_1 \cdot I_2(0) \quad I_2(l) = R_2 \cdot e^{(\alpha - \beta) \cdot l} \cdot R_1 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot l} \cdot I_2(0)$$

$$R_2 \cdot e^{(\alpha - \beta) \cdot l} \cdot R_1 \cdot e^{-(\alpha - \beta) \cdot l} = 1$$

$$R_2 R_1 \cdot e^{(\alpha - \beta) \cdot 2l} = 1$$

$$R_2 R_1 \cdot e^{(\alpha - \beta) \cdot 2l} \geq 1$$

$$e^{(\alpha-\beta)2l} = \frac{1}{R_2 R_1} \quad \alpha - \beta = \frac{1}{2l} \left(\ln \frac{1}{R_2} + \ln \frac{1}{R_1} \right)$$

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_2} + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1} + \beta$$

$$\eta_1 = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1} + \beta \quad \eta_2 = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_2}$$

$$\alpha = \eta_1 + \eta_2$$

Таким образом, при стационарной генерации

$$\begin{cases} \alpha = \eta_1 + \eta_2 \\ \alpha = \frac{\alpha_0 + I}{1 + \frac{I_1 + I_2}{I_s}} \end{cases} \quad \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I_1 + I_2}{I_s}} = \eta_1 + \eta_2$$

$$I_1 + I_2 = I_s \cdot \left(\frac{\alpha_0}{\eta_1 + \eta_2} - 1 \right)$$

$$\begin{cases} I_1(l) + I_2(l) = I_s \cdot \left(\frac{\alpha}{\eta_1 + \eta_2} - 1 \right) \\ I(l) = R_2 \cdot I(l) \end{cases} \quad I_1(l) = \frac{1}{1 + R_2} \cdot I_s \cdot \left(\frac{\alpha}{\eta_1 + \eta_2} - 1 \right)$$

$$I_{out} = \frac{1 - R_2}{1 + R_2} \cdot I_s \cdot \left(\frac{\alpha_0}{\eta_1 + \eta_2} - 1 \right)$$

$$P_{out} = I_s \cdot S \cdot \frac{1 - R_2}{1 + R_2} \cdot \frac{\alpha_0 - (\eta_1 + \eta_2)}{\eta_1 + \eta_2}$$

$$\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \dots$$

$$\eta_2 = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_2} = -\frac{1}{2l} \ln [1 - (1-R_2)] = \frac{1}{l} \cdot \left[\frac{1-R_2}{2} + \frac{(1-R_2)^2}{4} + \frac{(1-R_2)^3}{6} + \dots \right]$$

$$\frac{1-R_2}{1+R_2} = \frac{1-R_2}{2-(1-R_2)} = \frac{1-R_2}{2} \cdot \frac{1}{1-\frac{1-R_2}{2}} = \frac{1-R_2}{2} \cdot \frac{1}{1-\frac{1-R_2}{2}} = \frac{1-R_2}{2} \cdot \left(1 + \frac{\frac{1-R_2}{2}}{1-\frac{1-R_2}{2}} \right) = \dots$$

$$\dots = \frac{1-R_2}{2} \cdot \left(1 + \frac{1-R_2}{2} \cdot \left(1 + \frac{\frac{1-R_2}{2}}{1-\frac{1-R_2}{2}} \right) \right) = \frac{1-R_2}{2} \cdot \left(1 + \frac{1-R_2}{2} \cdot \left(1 + \frac{1-R_2}{2} \cdot \left(1 + \frac{\frac{1-R_2}{2}}{1-\frac{1-R_2}{2}} \right) \right) \right) = \dots$$

$$\dots = \frac{1-R_2}{2} + \frac{(1-R_2)^2}{4} + \frac{(1-R_2)^3}{8} + \dots$$

R_2	$\frac{1-R_2}{1+R_2}$	$\frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_2}$	$\Delta, \%$
0.9	0.053	0.053	0.1
0.8	0.111	0.112	0.4
0.7	0.176	0.178	1
0.6	0.250	0.255	2
0.5	0.333	0.347	4
0.4	0.429	0.458	7
0.3	0.538	0.602	12
0.2	0.667	0.805	21
0.1	0.818	1.151	41

$$\frac{1-R_2}{1+R_2} \approx l \cdot \eta_2$$

с точностью до третьего порядка малости $(1-R_2)$

$$P_{out} = I_s \cdot S \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot [\alpha_0 - (\eta_1 + \eta_2)] \cdot l$$

- формула Ригрода

$$P_{out} = P_s \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot [\alpha_0 - (\eta_1 + \eta_2)] \cdot l$$

... обсуждение...

1) $P_{out} \sim I_s$

$$2) P_{out} \sim S \cdot I$$

$$3) P_{out} \sim [\alpha_0 - (\eta_1 + \eta_2)] \quad \dots \quad \alpha_0 \geq \eta_1 + \eta_2 - \text{условие возникновения генерации}$$

$$4) P_{out} \sim \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} - \text{доля полезных потерь}$$

Контрольные вопросы

1. Для трехуровневой схемы с верхним генерационным переходом выяснить вид зависимости P_{out} от P_p при высоком уровне накачки, оценить мощность излучения P_{max} и населенности всех уровней.
2. Для четырехуровневой схемы выяснить вид зависимости P_{out} от P_p при высоком уровне накачки, оценить мощность излучения P_{max} и населенности всех уровней.
3. Найти рекуррентную последовательность A_n – высота луча на зеркале после n – ого обхода резонатора.

Список использованных источников

1. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: Учебное пособие для вузов / С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 253 с.
2. Погорельский С.Л. Прикладная оптика: учебное пособие для вузов. Ч I /С.Л. Погорельский; ТулГУ; Фак. Механики и систем управления; каф. «Приборы управления». – Тула: Гриф и К, 2005. – 186 с.
3. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой.— М. : Техносфера, 2008 .— 440 с.
4. Вейко В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко [и др.] ; под ред. В. И. Конова .— М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008 .— 312 с.

Практическое занятие № 5

Ослабление лазерного излучения в атмосфере.

1. Цель и задачи работы

Цель работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

Задачи работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

2. Общие положения (теоретические сведения)

Некоторые применения, которые сразу приходят в голову: а) что-нибудь разрезать в технологии, медицине - луч стерильный; б) использовать высокую направленность пучка для связи телеуправления; в) монохроматичность - в спектроскопии, селективном воздействии на атомы и молекулы.

... полупроводниковый лазер... наиболее широко применяется (китайские указки, чтение компакт дисков... в лаз принтерах) ...немного про устройство (кусочек кристалла) и изготовление (подложка режется на куски...)

Ниже приведен краткий перечень применений лазеров в различных областях науки и техники, где уникальные свойства лазерного излучения обеспечили значительный прогресс или привели к совершенно новым научным и техническим решениям.

Высокая монохроматичность и когерентность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в спектроскопии, иницировании химических реакций, в разделении изотопов, в системах измерения линейных и угловых скоростей, во всех приложениях, основанных на использовании интерференции, в системах связи и светолокации. Особо следует, очевидно, выделить применение лазеров в голографии.

Высокая плотность энергии и мощность лазерных пучков, возможность фокусировки лазерного излучения в пятно малых размеров используются в таких технологических процессах, как лазерная резка, сварка, сверление, поверхностное закаливание и размерная обработка различных деталей. ... в лазерных системах термоядерного синтеза.

Эти же свойства и направленность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в военной технике (?).

Направленность лазерного излучения, его малая расходимость применяются при провешивании направлений (в строительстве, геодезии, картографии), для целенаведения и целеуказания в военной технике, в локации и дальнометрии, в том числе и для измерения расстояний до искусственных спутников Земли, в системах связи через космос и подводной связи.

С созданием лазеров произошел колоссальный прогресс в развитии нелинейной оптики, исследовании и использовании таких явлений, как генерация гармоник, самофокусировка световых пучков, многофотонного поглощения, различных типов рассеивания света, вызванных полем лазерного излучения.

Лазеры успешно используются в медицине: в хирургии (в том числе хирургии глаза) и терапии различных заболеваний, в биологии, где фокусировка в малое пятно позволяет действовать на отдельные клетки или даже на их части.

Большинство из перечисленных выше областей применения лазеров представляет собой самостоятельные и обширные разделы науки или техники. Цель приведенного здесь краткого и неполного перечня применений лазеров - проиллюстрировать то громадное влияние, которое оказало появление лазеров на развитие науки и техники, на жизнь современного общества.

Влияние лазера на жизнь современного общества, конечно, переоценивается, обычно самими лазерщиками (... полупроводниковый лазер... наиболее широко применяется (китайские указки, чтение компакт дисков... в лаз принтерах) ...немного про устройство (кусочек кристалла) и изготовление (подложка режется на куски...). Тем не менее, современный инженер, работающий в области оптоэлектроники, не может обойтись без базовых знаний об устройстве и работе лазера. Сегодня это основной источник излучения в оптоэлектронике.

Контрольные вопросы

1. Для трехуровневой схемы с верхним генерационным переходом выяснить вид зависимости P_{out} от P_p при высоком уровне накачки, оценить мощность излучения P_{max} и населенности всех уровней.
2. Для четырехуровневой схемы выяснить вид зависимости P_{out} от P_p при высоком уровне накачки, оценить мощность излучения P_{max} и населенности всех уровней.
3. Найти рекуррентную последовательность A_n – высота луча на зеркале после n – ого обхода резонатора.

Список использованных источников

1. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: Учебное пособие для вузов / С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 253 с.
2. Погорельский С.Л. Прикладная оптика: учебное пособие для вузов. Ч I /С.Л. Погорельский; ТулГУ; Фак. Механики и систем управления; каф. «Приборы управления». – Тула: Гриф и К, 2005. – 186 с.
3. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой.— М. : Техносфера, 2008 .— 440 с.
4. Вейко В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко [и др.] ; под ред. В. И. Конова .— М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008 .— 312 с.

Практическое занятие № 6

Влияние атмосферной турбулентности и рефракции на лазерное излучение.

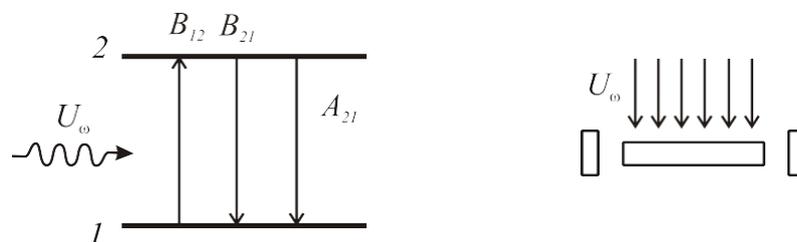
1. Цель и задачи работы

Цель работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

Задачи работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

2. Общие положения (теоретические сведения)

1. Рассмотрим более подробно процесс накачки, введенной ранее обобщенной величиной w_p . Обратимся сначала к оптической накачке, характерной для твердотельных и жидкостных лазеров.



Накачка создает в объеме активной среды плотность энергии электромагнитного поля на частоте перехода U_ω . Тогда система балансных уравнений для двухуровневой системы имеет следующий вид.

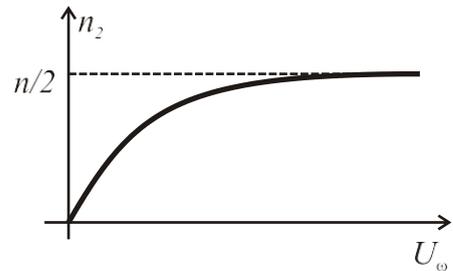
$$\begin{cases} \frac{dn_2}{dt} = B_{12} U_\omega n_1 - B_{21} U_\omega n_2 - A_{21} n_2 \\ n_1 + n_2 = n \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \frac{dn_2}{dt} = B_{12} U_\omega (n - n_2) - A_{21} n_2 \\ n_1 = n - n_2 \end{cases}$$

Рассмотрим стационарную ситуацию, $\frac{dn_2}{dt} = 0$, подставим в первое уравнение n_1 и найдем n_2 .

$$0 = B_{12} U_\omega (n - 2n_2) - A_{21} n_2, \quad n_2 (2B_{12} U_\omega + A_{21}) = B_{12} U_\omega n,$$

$$n_2 = n \cdot \frac{B_{12} U_\omega}{2B_{12} U_\omega + A_{21}},$$

$$n_2 = \frac{n}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{A_{21}}{2B_{12} U_\omega}}.$$



Видно, что $n_2 \leq n/2$, $n_2 \rightarrow n/2$ при $U_\omega \rightarrow \infty$ и инверсия не достигается.

Аналогичная ситуация для двухуровневой схемы возникает при рассмотрении накачки электронным ударом в газовом разряде.

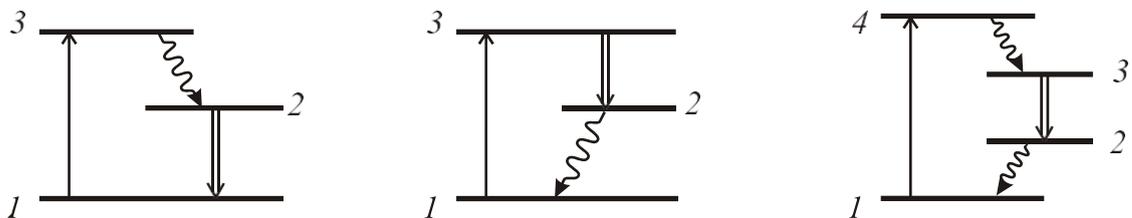
$A + e^- = A^* + e^-$ – неупругий удар первого рода (e^- – быстрый электрон, A^* – возбужденный атом).

Но есть еще неупругие столкновения второго рода, $A^* + e^- = A + e^-$, и схема переходов должна быть дополнена. Причем опять сечения столкновений равны $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ и инверсия недостижима.

Таким образом, в двухуровневой системе получить инверсную населенность невозможно!

Проблема двухуровневой схемы состоит в том, что канал накачки и канал генерации совпадают. При увеличении населенности верхнего уровня накачка сбрасывает оттуда частицы, причем тем интенсивнее, чем их там больше.

Проблема может быть решена разделением каналов. Простейшими вариантами являются трехуровневые и четырехуровневые схемы. Трехуровневая схема может быть с нижним или с верхним генерационным переходом.



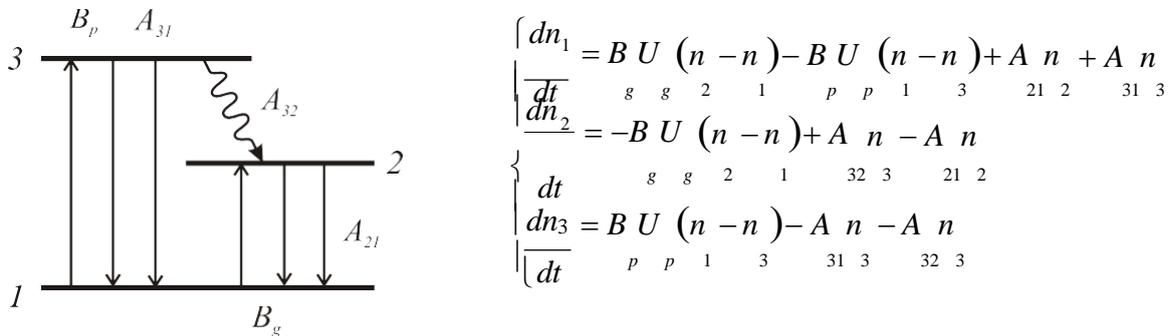
В первом случае накачка производится в переходе $1 \rightarrow 3$, затем релаксация с уровня 3 на уровень 2, где частицы накапливаются, и возникает инверсия населенности для перехода $2 \rightarrow 1$. Для эффективной работы, очевидно, желательна высокая скорость релаксации $3 \rightarrow 2$, тогда частицы быстро уходят с уровня 3 и не сбрасываются накачкой по каналу $3 \rightarrow 2$ как в двухуровневой схеме.

Во втором варианте частицы накапливаются на уровне 3, а с уровня 2 идет быстрая релаксация. В этом случае населенность уровня 2 низкая как до порога, так и на стадии генерации и инверсия перехода $3 \rightarrow 2$ возможна даже при не очень сильной заселенности уровня 3.

Четырехуровневый вариант объединяет преимущества обеих трехуровневых схем, быструю релаксацию из канала накачки и быстрое расселение нижнего генерационного уровня и является наиболее эффективным.

2. Исследуем количественно работу сначала трехуровневой схемы с нижним генерационным переходом.

Введем обозначения $B_{13} = B_{31} \equiv B_p$, $B_{12} = B_{21} \equiv B_g$, $U_{13} \equiv U_p$, $U_{12} \equiv U_g$. Система балансных уравнений, учитывающая все процессы, приведена ниже.



Это система содержит 3 уравнения для трех неизвестных и может быть дополнена еще одним уравнением, $n_1 + n_2 + n_3 = n$, которым можно заменить любое из трех.

Рассмотрим стационарный режим $d.../dt = 0$.

$$\begin{cases} 0 = B_p U_p (n_2 - n_1) - B_g U_g (n_1 - n_3) + A_{21} n_2 + A_{31} n_3 \\ 0 = -B_g U_g (n_2 - n_1) + A_{32} n_3 - A_{21} n_2 \\ 0 = B_g U_g (n_1 - n_3) - A_{31} n_3 - A_{32} n_3 \end{cases}$$

Из третьего уравнения системы можно получить

$$n_3 = \frac{B_p U_p}{B_p U_p + A_{31} + A_{32}} \cdot n_1$$

$$B_p U_p n_1 = (B_p U_p + A_{31} + A_{32}) \cdot n_3$$

Рассмотрим далее случай накачки слабой по сравнению со скоростью релаксации $A_{32} \gg B_p U_p$ (относительно A_{31} , здесь никаких предположений можно не делать).

При слабой накачке

$$n_3 \approx \frac{B_p U_p}{A_{32} + A_{31}} n_1, \quad n_3 \ll n_1, \quad n_1 + n_2 \approx n.$$

Подставив $A_{32} n_3$ во второе уравнение системы, получим

$$\begin{cases} B_g U_g (n_2 - n_1) \approx \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} B_p U_p n_1 - A_{21} n_2 \\ n_1 + n_2 \approx n \end{cases}$$

Это точно совпадает с уравнениями для двухуровневой системы (см. Лекцию 3),

$$w_p = \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} \cdot B_p U_p$$

если принять

и тогда

$$\alpha_0 = \sigma_{gn} \cdot \frac{\left(\frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} B_p U_p \right) - A_{21}}{\left(\frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} B_p U_p \right) + A_{21}}$$

- начальный коэффициент усиления,

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{P}{P_s}} \quad - \text{ насыщенный коэффициент усиления,}$$

$$P_s = S \omega_g \frac{A_{32} B_p U_p + A_{21}}{2 \sigma_g} \quad - \text{ мощность насыщения.}$$

Далее работает формула Ригрода (см. Лекцию 5).

$$\frac{\alpha_0}{1 + \frac{P}{P_s}} = \eta_1 + \eta_2$$

$$\alpha = \eta_1 + \eta_2, \quad \Rightarrow \quad P_{\text{out}} = \eta_2 \cdot I \cdot P.$$

Таким образом, в рассмотренной ситуации все формулы построенные для двухуровневой схемы работают!

Из приведенных соотношений видно, что для достижения инверсии необходимо,

$$A_{32} B_p U_p > A_{21}$$

чтобы

В случае релаксации, быстрой по сравнению с потерями в канале накачки, т.е. когда $A_{32} \gg A_{31}$, должно быть $B_p U_p > A_{21}$. Это естественный результат, скорость накачки должна быть выше скорости распада верхнего лазерного уровня. Скорость накачки при этом равна $w_p = B_p U_p$.

3. Вычислим теперь мощность генерации для рассмотренной схемы несколько иначе, чем в Лекции 5.

При стационарной генерации $\alpha = \eta_1 + \eta_2$ и тогда

$$\begin{cases} B U (n - n_1) = \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} B U n - A_{21} n \\ n_1 + n_2 = n \\ \sigma (n - n_1) = \eta_1 + \eta_2 \end{cases}$$

Из последних двух уравнений легко получить

$$\begin{cases} n_1 = \frac{n - (\eta_1 + \eta_2) / \sigma_g}{2} \\ n_2 = \frac{n + (\eta_1 + \eta_2) / \sigma_g}{2} \end{cases},$$

т.е. при заданных параметрах резонатора η_1 и η_2 имеют фиксированные значения.

$$B_g U_g \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} = \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} B U n - A_{21} n$$

$$\frac{B_g U_g}{\sigma_g} = \frac{1}{\eta_1 + \eta_2} \cdot \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} \cdot \left[B_p U_p n - A_{21} \frac{A_{32} + A_{31}}{A_{32}} n_2 \right]$$

Ранее (см. Лекцию 3) было получено $B_g U_g = \sigma_g F_g$,

Контрольные вопросы

1. Лазер на окиси углерода излучает на колебательно-вращательных переходах $\nu = n \rightarrow \nu = n - 1$. Длина волны излучения составляет 5 мкм. Оценить частоту нулевых колебаний молекулы CO.
2. Эрбиевый лазер на фосфатном стекле излучает на переходе $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ с длиной волны 1.5 мкм. Время жизни верхнего лазерного уровня составляет $8.2 \cdot 10^{-3}$ с. Оценить сечение генерационного перехода.
3. A_{31} – вероятность перехода $3 \rightarrow 1$, A_{32} – вероятность перехода $3 \rightarrow 2$. Вычислить время жизни уровня 3.

Список использованных источников

1. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: Учебное пособие для вузов / С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 253 с.
2. Погорельский С.Л. Прикладная оптика: учебное пособие для вузов. Ч I / С.Л. Погорельский; ТулГУ; Фак. Механики и систем управления; каф. «Приборы управления». – Тула: Гриф и К, 2005. – 186 с.
3. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой. — М. : Техносфера, 2008. — 440 с.
4. Вейко В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко [и др.]; под ред. В. И. Конова. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 312 с.

Практическое занятие № 7

Ослабление излучения лазеров в воде и космосе

1. Цель и задачи работы

Цель работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

Задачи работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

2. Общие положения (теоретические сведения)

Учтем это и домножим обе части уравнения на $\omega_g S$ и $\eta_2 \cdot l$.

$$F_g \omega_g S \cdot \eta_2 l = \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} \cdot \omega_g S l \cdot \left[B_p U_p n - A_{21} \frac{A_{32} + A_{31}}{A_{32}} n_2 \right]$$

Поскольку $F_g \omega_g S \cdot \eta_2 l = P \cdot \eta_2 l = P_{out}$ (см. Лекцию 5),

$$P_{out} = \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot \frac{\omega_g}{\omega_p} \cdot \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} \cdot \left[B_p U_p n \cdot \omega_g S l - A_{21} \frac{A_{32} + A_{31}}{A_{32}} n_2 \cdot \omega_g S l \right]$$

Далее, $B_p U_p n_1$ – число поглощений квантов накачки в единице объема в единицу времени, т.е. $B_p U_p n_1 \cdot \omega_p S l = P_p$ – поглощаемая мощность накачки.

$$P_{th} \equiv A_{21} \frac{A_{32} + A_{31}}{A_{32}} n_2 \cdot \omega_p S l = A_{21} \frac{A_{32} + A_{31}}{A_{32}} \cdot \frac{n + (\eta_1 + \eta_2) / \sigma_g}{2} \cdot \omega_p S l$$

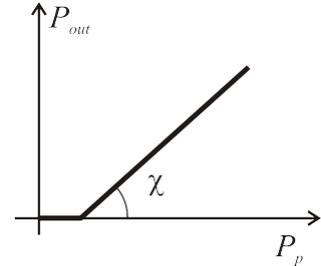
Обозначим

- пороговая мощность накачки.

Таким образом,

$$P_{out} = \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot \frac{\omega_g}{\omega_p} \cdot \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} \cdot (P_p - P_{th})$$

$$P_{out} = \chi \cdot (P_p - P_{th})$$



Зависимость P_{out} от P_p линейная, χ - коэффициент наклона.

Полученная формула описывает лазер как преобразователь энергии. Поглощаемая в канале накачки мощность частично расходуется на поддержание пороговой инверсии, это P_{th} , эта мощность компенсирует спонтанные распады со скоростью A_{21} в канале генерации. Оставшаяся часть с коэффициентом $\frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}}$ переходит из канала накачки в канал генерации, при релаксации квант накачки разменивается на квант меньшей энергии

с коэффициентом $\frac{\omega_g}{\omega_p}$ и излученная в канале генерации мощность с коэффициентом $\frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2}$ выводится из резонатора.

Для перечисленных величин приняты следующие термины:

$\frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}}$ - квантовый выход в канал генерации (из канала накачки),

$\frac{\omega_g}{\omega_p}$ - стоксов сдвиг (стоксовы потери),

$\frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2}$ - эффективность вывода излучения из резонатора,

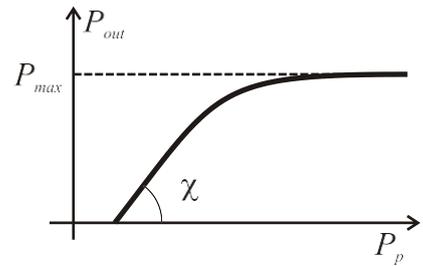
$\chi = \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot \frac{\omega_g}{\omega_p} \cdot \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}}$ - дифференциальный КПД лазера по поглощенной мощности.

Очевидно, линейная зависимость P_{out} от P_p должна нарушиться при сильной накачке, когда перестанет работать приближение $A_{32} \gg B_p U_p$.

Режим сильной накачки требует отдельного рассмотрения.

$$\begin{cases} 0 = B_g U_g (n_2 - n_1) - B_p U_p (n_1 - n_3) + A_{21} n_2 + A_{31} n_3 \\ 0 = -B U (n - n) + A n - A n \\ 0 = B U (n - n) - A n - A n \end{cases}$$

и дополнительно $n_1 + n_2 + n_3 = n$.



При сильной накачке $B_p U_p \gg A_{31}, A_{32}$, и из третьего уравнения можно получить

$$0 = B U (n - n) - A n + A n \quad (n_1 - n_3) = \frac{A_{31}}{B U} n_3 + \frac{A_{21}}{B U} n_2 \approx 0, \quad n_3 \approx n_1.$$

В отсутствии генерации $U_g = 0$ (например в усилителе)

$$\begin{cases} A_{32} n_3 = A_{21} n_2 \\ n_3 = n_1 \\ n_1 + n_2 + n_3 = n \end{cases}, \text{ система легко решается} \quad \begin{cases} n_1 = n_3 = \frac{A_{21}}{A_{21} + A_{32}} n \\ n_2 = \frac{A_{32}}{A_{21} + A_{32}} n \end{cases}.$$

Разность населенностей верхнего и нижнего лазерного уровней

$$n_2 - n_1 = \frac{A_{32} - A_{21}}{A_{32} + A_{21}} n.$$

Для инверсии необходимо $A_{32} > A_{21}$, - физически понятный результат, скорость выхода в канал генерации должна быть выше скорости сброса на нижний уровень.

Если скорость релаксации высока, $A_{32} \gg A_{21}$,

$$\frac{A_{32} - A_{21}}{A_{32} + A_{21}} \approx 1, \quad n_2 - n_1 \approx n,$$

т.е. все частицы заселяются на верхний лазерный уровень.

На стадии генерации $U_g \neq 0$

$$\begin{cases} B_g U_g (n_2 - n_1) = A_{32} n_3 - A_{21} n_2 \\ n_1 = n_3 \\ n_1 + n_2 + n_3 = n \\ \sigma (n_2 - n_1) = \eta + \eta \end{cases} \quad \begin{aligned} n_1 = n_3 &= \frac{n}{3} - \frac{\eta + \eta}{3\sigma_g} \\ n_2 &= \frac{n}{3} - \frac{2}{3} \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \end{aligned}$$

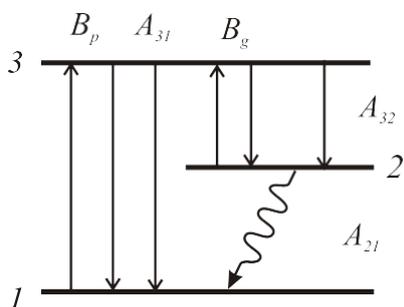
из последних трех уравнений

и для мощности генерации

$$B_g U_g \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} = A_{32} \left[\frac{n}{3} - \frac{\eta_1 + \eta_2}{3\sigma_g} \right] - A_{21} \left[\frac{n}{3} - \frac{2}{3} \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \right],$$

$$P_{\max} = \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot \omega \cdot S_l \cdot \left[(A_{32} - A_{21}) \cdot n - \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} (A_{32} + 2A_{21}) \right] \frac{1}{3}.$$

4. Для трехуровневой схемы с верхним генерационным переходом верна следующая система балансных уравнений.



$$\begin{cases} \frac{dn_1}{dt} = -B_p U_p (n_1 - n_3) + A_{31} n_3 + A_{21} n_2 \\ \frac{dn_2}{dt} = B_g U_g (n_1 - n_2) + A_{32} n_3 - A_{21} n_2 \\ \frac{dn_3}{dt} = B_p U_p (n_1 - n_3) - B_g U_g (n_1 - n_2) - A_{31} n_3 - A_{32} n_3 \end{cases}$$

и дополнительно $n_1 + n_2 + n_3 = n$.

В стационарном режиме генерации $d.../dt = 0$

$$\begin{cases} B_p U_p (n_1 - n_3) = A_{21} n_2 + A_{31} n_3 \\ B_g U_g (n_1 - n_2) = A_{21} n_2 - A_{32} n_3 \\ B_p U_p (n_1 - n_3) = B_g U_g (n_1 - n_2) - A_{31} n_3 - A_{32} n_3 \\ n_1 + n_2 + n_3 = n \end{cases}$$

Из второго уравнения

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{c} B_g U_g + A_{32} \\ B_g U_g + A_{21} \end{array} \right) \cdot n_3 &= \left(\begin{array}{c} B_g U_g + A_{32} \\ B_g U_g + A_{21} \end{array} \right) \cdot n_2, & n_2 &= \frac{B_g U_g + A_{32}}{B_g U_g + A_{21}} \cdot n_3 \\ n_3 - n_2 &= n_3 \cdot \left(1 - \frac{B_g U_g + A_{32}}{B_g U_g + A_{21}} \right) = n_3 \cdot \frac{A_{21} - A_{32}}{B_g U_g + A_{21}} \end{aligned}$$

Инверсия

Из следующей подсистемы трех уравнений можно найти n_3 , и далее вычислить коэффициент усиления.

Контрольные вопросы

1. В лазере на YAG : Nd^{3+} обычно для генерации используют два сильных перехода: ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ с длиной волны 1.33 мкм или ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ с длиной волны 1.06 мкм. Соотношение интенсивности соответствующих линий люминисценции 1 : 5. Время жизни верхнего лазерного уровня $2.5 \cdot 10^{-4}$ с. Оценить сечения генерационных переходов.
2. Для трехуровневой схемы с нижним генерационным переходом показать, что зависимость $\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + P/P_s}$ имеет место в общем случае (без учета приближения $A_{32} \gg B_p U_p$), вычислить α_0 и P_s .
3. Для четырехуровневой схемы показать, что зависимость $\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + P/P_s}$ имеет место в общем случае (не пользуясь приближениями быстрой релаксации по каналам $4 \rightarrow 3$ и $2 \rightarrow 1$), вычислить α_0 и P_s .

Список использованных источников

1. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: Учебное пособие для вузов / С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 253 с.
2. Погорельский С.Л. Прикладная оптика: учебное пособие для вузов. Ч I /С.Л. Погорельский; ТулГУ; Фак. Механики и систем управления; каф. «Приборы управления». – Тула: Гриф и К, 2005. – 186 с.
3. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой.— М. : Техносфера, 2008 .— 440 с.
4. Вейко В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко [и др.] ; под ред. В. И. Конова .— М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008 .— 312 с.

Практическое занятие № 8

Особенности прохождения лазерного излучения в оптическом волокне.

1. Цель и задачи работы

Цель работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

Задачи работы: Изучить зависимость потока излучения от пути в усиливающей среде. Сужение спектра при прохождении излучения через усиливающую среду

2. Общие положения (теоретические сведения)

Заметим, что эти соотношения, показывающие применимость формулы Ригрода, получены в общем случае, приближение высокой скорости релаксации нижнего лазерного уровня нигде не использованы.

При высокой скорости релаксации нижнего лазерного уровня, $A_{21} \gg A_{31}, A_{32}, B_p U_p$, обе формулы упрощаются

$$\alpha_0 = \sigma_g n_g \cdot \frac{B_p U_p}{2B_p U_p + A_{31} + A_{32}}, \quad P = \frac{S \omega_g}{\sigma_g} \cdot \left(2B_p U_p + A_{31} + A_{32} \right)$$

а населенность нижнего лазерного уровня $n_2 \approx 0$, действительно,

$$n_2 = \frac{B_g U_g + A_{32}}{B_g U_g + A_{21}} \cdot \frac{B_p U_p n}{(B_p U_p + A_{21}) \cdot \frac{B_g U_g + A_{32}}{B_g U_g + A_{21}} + (2B_p U_p + A_{31})} \xrightarrow{A_{21} \rightarrow \infty} 0$$

Для рассматриваемой схемы при быстрой релаксации нижнего лазерного уровня и слабой накачке снова можно получить линейную зависимость P_{out} от P_p .

$$\begin{cases} B_g U_g (n_3 - n_2) = B_p U_p (n_1 - n_3) - (A_{31} + A_{32}) \cdot n_3 \\ n_2 = \frac{B_g U_g + A_{32}}{B_g U_g + A_{21}} n_3 \\ n_3 - n_2 = \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \\ n_1 + n_2 + n_3 = n \end{cases}$$

сделав приближения $A_{21} \gg A_{32}, B_g U_g,$

$$\begin{cases} B U_g \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} = B U_p (n_1 - n_3) - (A_{31} + A_{32}) \cdot n \\ n_2 \approx 0 \\ n_3 \approx \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \\ n_1 + n_3 \approx n \end{cases}$$

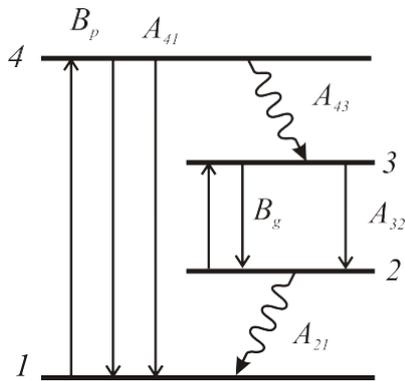
Получим

$$B U_g \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} = B U_p (n_1 - n_3) - (A_{31} + A_{32}) \cdot \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g}, \quad n_1 - n_3 = n - 2 \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g}.$$

Окончательно

$$P_{out} = \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot \frac{\omega_g}{\omega_p} \cdot (P_p - P_{th}), \quad P_{th} = (A_{31} + A_{32}) \cdot \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \cdot \square \omega_p S l.$$

Для четырехуровневой схемы рассмотрим следующую систему балансных уравнений.



$$\begin{cases} \frac{dn_1}{dt} = -B U_p (n_1 - n_4) + A_{21} n_2 + A_{41} n_4 \\ \frac{dn_2}{dt} = B U_g (n_3 - n_2) + A_{32} n_3 - A_{21} n_2 \\ \frac{dn_3}{dt} = -B U_g (n_3 - n_2) + A_{43} n_4 - A_{32} n_3 \\ \frac{dn_4}{dt} = B U_p (n_1 - n_4) - A_{41} n_4 - A_{43} n_4 \end{cases}$$

и дополнительно $n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = n.$

В стационарном режиме генерации $d.../dt = 0$

$$\begin{cases} B_p U_p (n_1 - n_4) = A_{21} n_2 + A_{41} n_4 \\ B U_g (n_3 - n_2) = A_{21} n_2 - A_{32} n_3 \\ B U_g (n_3 - n_2) = A_{43} n_4 - A_{32} n_3 \\ B U_p (n_1 - n_4) = (A_{41} + A_{43}) \cdot n_4 \end{cases} \quad \begin{cases} n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = n \\ n_3 - n_2 = \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \end{cases}$$

При быстрой релаксации по каналам $4 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 1$ и слабой накачке, можно получить для системы следующие приближения

$$\left\{ \begin{array}{l} B_p U_p n_1 \approx A_{21} n_2 + A_{41} n_4 \\ B U + A \quad B U + A \\ n_2 = \frac{B_g U_g + A_{21}}{B U + A} \cdot n_3 \approx \frac{B_g U_g + A_{21}}{A_{21}} \cdot n_3 \quad (n_2 \ll n_3) \\ B U (n_3 - n_2) = A_{21} n_2 - A_{32} n_3 \\ \left. \begin{array}{l} B_p U_p \\ B_p U_p + A_{41} + A_{43} \end{array} \right\} n_4 = \frac{B_p U_p}{B_p U_p + A_{41} + A_{43}} n_1 \approx \frac{B_p U_p}{A_{41} + A_{43}} n_1 \quad (n_4 \ll n_1) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} n_1 + n_3 \approx n \\ n_3 - n_2 = \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \end{array}$$

Вычисления для коэффициента усиления аналогичны тем, что проведены для

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + P/P_s}$$

трехуровневых схем, снова приводят к зависимости вида

$$n_3 - n_2 = n_3 \cdot \left(1 - \frac{B_g U_g + A_{32}}{B U + A} \right) = n_3 \cdot \frac{A_{21} - A_{32}}{B U + A} \approx n_3 \cdot \frac{A_{21} - A_{32}}{A}$$

Инверсия

$$B U_p n = A_{21} n + \frac{A_{41}}{A_{41} + A_{43}} \cdot B U_p n$$

Из 1-го и 4-го уравнения

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B U_p n = A_{21} n \\ n_2 = \frac{B_g U_g + A_{32}}{A_{21}} n_3 \\ n_1 + n_3 = n \end{array} \right. \Rightarrow \left(\frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p + A_{32} + B_g U_g \right) \cdot n_3 = \frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p \cdot n$$

Насыщенный коэффициент усиления

$$\alpha = \sigma_g \frac{n_3 - n_2}{n_3} = \sigma_g \frac{A_{21} - A_{32}}{A_{21}} = \sigma_g \frac{A_{21} - A_{32}}{A_{21}} \cdot \frac{\frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p}{\frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p + A_{32} + B_g U_g}$$

$$\alpha = \sigma_g \frac{A_{21} - A_{32}}{A_{21}} \cdot \frac{\frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p}{\frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p + A_{32} + B_g U_g} \cdot \frac{1}{1 + \frac{B_g U_g}{\frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p + A_{32}}}$$

Ненасыщенный коэффициент усиления

$$\alpha_0 = \sigma_g \frac{A_{21} - A_{32}}{A_{21}} \cdot \frac{B_p U_p}{B_p U_p + \frac{A_{41} + A_{43}}{A_{43}} A_{32}}$$

мощность насыщения

$$P_s = S \square \omega_g \frac{\frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p + A_{32}}{\sigma_g}$$

При сделанных приближениях можно снова получить линейную зависимость P_{out} от P_p .

Из 3-го и 4-го уравнения приближенной системы

$$B_g U_g (n_3 - n_2) = \frac{A_{43}}{(A_{41} + A_{43})} B_p U_p n_1 - A_{32} n_3, \quad \text{кроме того} \quad n_3 - n_2 = \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \approx n_3,$$

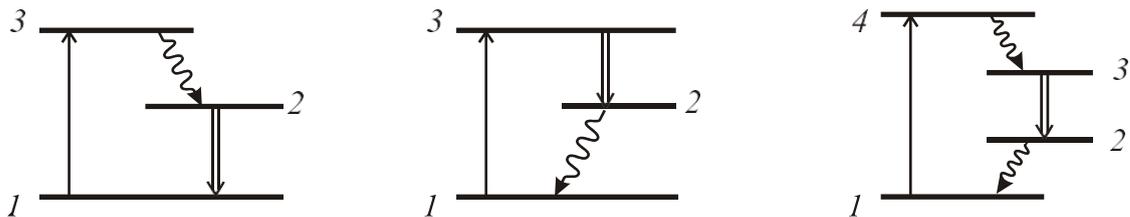
тогда
$$B_g U_g \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} = \frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} B_p U_p n_1 - A_{32} \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g}$$

$$P_{out} = \frac{\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \cdot \frac{\omega_g}{\omega_p} \cdot \frac{A_{43}}{A_{41} + A_{43}} \cdot (P_p - P_{th})$$

$$P_{th} = A_{32} \frac{A_{41} + A_{43}}{A_{43}} \cdot \frac{\eta_1 + \eta_2}{\sigma_g} \cdot \omega_p S_l$$

В заключение обсудим полученные результаты.

Двухуровневые схемы в лазерах не работают! Рассмотрены три схемы, работающие в лазерах.



Для всех трех схем верна, полученная ранее для двухуровневой модели, зависимость коэффициента усиления от мощности и, следовательно, применима формула Ригрода. Причем формула Ригрода справедлива в общем случае, без каких-либо предположений относительно соотношения скорости накачки и скоростей релаксации.

Контрольные вопросы

1. Для трехуровневой схемы с верхним генерационным переходом выяснить вид зависимости P_{out} от P_p при высоком уровне накачки, оценить мощность излучения P_{max} и населенности всех уровней.
2. Для четырехуровневой схемы выяснить вид зависимости P_{out} от P_p при высоком уровне накачки, оценить мощность излучения P_{max} и населенности всех уровней.
3. Найти рекуррентную последовательность A_n – высота луча на зеркале после n – ого обхода резонатора.

Список использованных источников

1. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: Учебное пособие для вузов / С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 253 с.
2. Погорельский С.Л. Прикладная оптика: учебное пособие для вузов. Ч I /С.Л. Погорельский; ТулГУ; Фак. Механики и систем управления; каф. «Приборы управления». – Тула: Гриф и К, 2005. – 186 с.

3. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой.— М. : Техносфера, 2008 .— 440 с.
4. Вейко В.П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко [и др.] ; под ред. В. И. Конова .— М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008 .— 312 с.