

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Волоконный лазер

Лабораторная работа по курсу
фотоника

Выполнили: студенты 654гр.
Нехаев А.С.
Суманова Е.Д.
Тихонов С.С.

г. Долгопрудный
2018 год

Содержание

1. Цели и задачи исследования	2
2. Теоретическая часть	3
2.1. Введение	3
2.2. Инверсия активной среды как необходимое условие генерации лазера	3
2.3. Получение инверсной населенности с помощью когерентной оптической накачки	4
2.4. Режим работы волоконного лазера – режим свободной генерации	4
2.5. Динамика генерации лазера в различных режимах работы	4
2.5.1. Система уравнений, описывающая динамику генерации лазера	4

1. Цели и задачи исследования

- 1) Изучить генерацию в волоконном лазере в режиме свободной генерации и физические основы появления релаксационных колебаний.
- 2) Изучить методы создания инверсии, управления режимами генерации и формирования модовой структуры излучения в лазере.
- 3) Определить влияние параметров генерации на частоту и затухание релаксационных колебаний.
- 4) Решить задачи.

2. Теоретическая часть

2.1. Введение

Волоконные лазеры являются выдающимся достижением квантовой электроники с момента создания первого лазера на кристалле рубина в 1960 г.

Поскольку в кварцевом волокне энергия фононов составляет $400-1100 \text{ см}^{-1}$, то в качестве активных ионов могут быть использованы только те, у которых энергетический зазор между уровнями с оптическими переходами превышает эту величину, поскольку иначе безизлучательная релаксация приведет к ухудшению люминесценции. Наиболее часто используемые активные ионы это:

- неодим Nd^{3+} (0.92 – 0.94 мкм, 1.05 – 1.1 мкм, 1.34 мкм),
- гольмий Ho^{3+} (1.9 – 2.1 мкм),
- эрбий Er^{3+} (1.53 – 1.6 мкм),
- тулий Tm^{3+} (1.7 – 1.9 мкм),
- иттербий Yb^{3+} (0.98 – 1.16 мкм).

Преимущества волоконных активных сред по сравнению с объемными активными лазерными средами:

- низкие оптические потери;
- большая длина взаимодействия и малый размер световедущей сердцевины, что обеспечивает эффективную накачку полупроводниковым лазером;
- большое отношение площади поверхности волокна к объему, что улучшает теплоотвод;
- высокое качество поперечной структуры пучка;
- использование внутриволоконных брегговских решеток в качестве распределенных зеркал обеспечивает компактность и стабильность лазера.

2.2. Инверсия активной среды как необходимое условие генерации лазера

Излучение лазера рождается на переходах между определенными энергетическими уровнями активных центров; их называют **рабочими уровнями**. Отнесенные к единице объема активной среды заселённости рабочих уровней будем обозначать через n_1 (нижний рабочий уровень) и n_2 (верхний рабочий уровень). Разность

$$N = n_2 - (g_1/g_2)n_1 \quad (1)$$

называют плотностью инверсной заселённости рабочих уровней. Здесь g_1 и g_2 – кратности вырожденных соответствующих уровней; для простоты будем, как правило, полагать, что $g_1 = g_2$.

Если выполняется условие

$$N > 0 \quad (2)$$

то говорят, что имеет место инверсия активной среды.

Для создания инверсии необходимо перевести активную среду в неравновесное состояние. Обеспечение инверсии активной среды является необходимой предпосылкой для реализации в лазере режима генерации. Коэффициенты усиления χ_1 пространственно-однородной среды описывается выражением

$$\chi_1 = \sigma N \quad (3)$$

где σ - сечение вынужденных переходов между рабочими уровнями.

Для создания и поддержания инверсии применяют тот или иной способ возбуждения (или, как говорят, способ накачки) активной среды. Активная среда лазера представляет собой некий термостат (сердцевина волокна из стекла), в котором имеются активные центры – квантовые системы, способные в результате возбуждения переходить в состояние с отрицательной температурой, отвечающей инверсной заселенности уровней.

В твердотельных волоконных лазерах активными центрами чаще всего служат ионы с незаполненными внутренними оболочками.

Реальные активные центры обычно имеют богатую систему энергетических уровней. Однако для работы лазера существенную роль играют лишь некоторые из них, в связи с чем при расчетах систему уровней упрощают, рассматривая только необходимые. Чаще всего используют 3-х и 4-х уровневые модели лазера, реже - многоуровневые.

2.3. Получение инверсной населенности с помощью когерентной оптической накачки

В волоконных лазерах активное волокно имеет сердцевину, легированную ионами редкоземельных металлов, внутреннюю оболочку, образующую с сердцевиной волновод, и внешнюю оболочку, образующую волновод с внутренней оболочкой по которому распространяется излучение накачки, введенное в эту область от полупроводникового лазера. Для излучения накачки волновод является многомодовым, в то же время сердцевина активной области образует одномодовый волновод для генерируемого излучения. Для ввода излучения накачки используется несколько методов:

- 1) торцевой
- 2) набор V-образных канавок, распределенных по боковой поверхности световода;
- 3) два световода размещаемых в общей оболочке, один из которых - активный, а в другой вводится излучение накачки, которое в месте их контакта проходит в активную область и осуществляет накачку. Таким образом, осуществляется распределенная накачка активной области.

2.4. Режим работы волоконного лазера – режим свободной генерации

Режим свободной генерации фактически означает отсутствие какого-либо специально-го управления генерацией или какого-либо воздействия на нее извне. В частности, отсутствует какая-либо модуляция (как активная, так и пассивная) добротности резонатора. Свободная генерация может иметь место как в случае импульсной, так и в случае непрерывной накачки. Свободное излучение волоконного лазера представляет собой, как правило, последовательность относительно коротких импульсов или, как принято говорить, пачек. Длительность отдельного пика равна $10^{-7} - 10^{-6}$ (0.1 - 1 мкс); мощность достигает значений $10^4 - 10^5$ Вт. Временной интервал между пачками составляет примерно 1-10 мкс.

2.5. Динамика генерации лазера в различных режимах работы

2.5.1. Система уравнений, описывающая динамику генерации лазера

Считая, что переходы между уровнями 4 и 3 и уровнями 2 и 1 являются быстрыми, можно положить $n_4 \approx n_3 \approx 0$. В этом случае скоростные уравнения можно записать

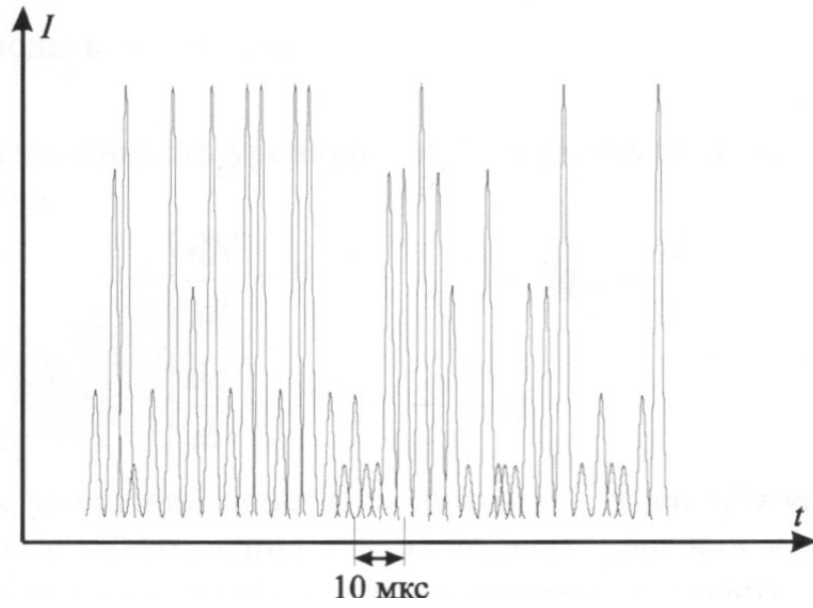


Рис. 1: Осциллограмма излучения твердотельного лазера, работающего в режиме свободной генерации

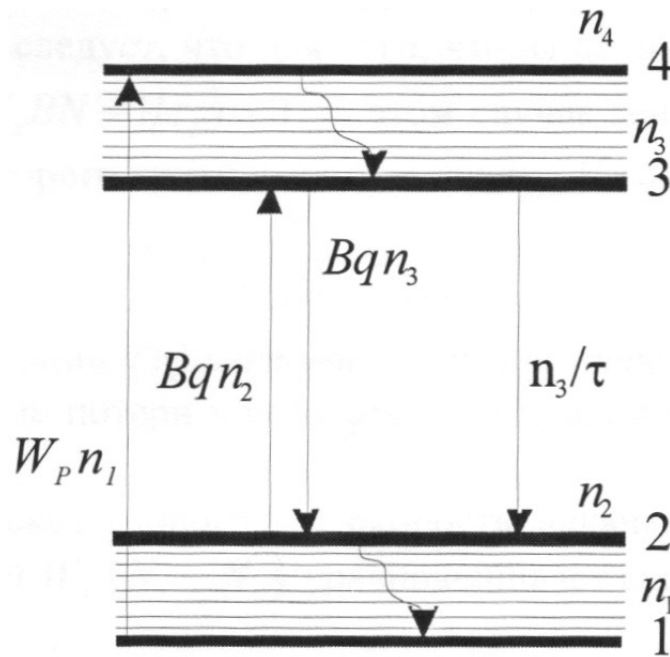


Рис. 2: Энергетическая схема квази-четырёхуровневого лазера

следующий образом

$$\begin{cases} \frac{dn_3}{dt} = W_p n_1 - Bq n_3 - \frac{n_3}{\tau} \\ \frac{dq}{dt} = V_a Bq n_3 - \frac{q}{\tau_c} \end{cases} \quad (4)$$

$$n_1 + n_3 = N_t$$

где:

- $N_t = 8 \cdot 10^{19}$ ионов/см³ — плотность ионов иттербия Yb³⁺
- n_1 — населенность основного состояния
- n_3 — населенность рабочего уровня
- q — полное число фотонов в резонаторе

- W_p – скорость накачки
- $\lambda = 1.064$ мкм – длина волны генерации
- γ – потери в резонаторе за проход в одном направлении
- $V_a = \pi\omega_0^2 l/4$ – объем моды в активной среде
- B – скорость индуцированных переходов на один фотон в моде
- ω_0 – размер перетяжки моды в резонаторе
- L – длина резонатора
- l – длина активной зоны
- $L' = L + (n_0 - 1)l$ – оптическая длина резонатора
- n_0 – показатель преломления активной среды
- $V = \pi\omega_0^2 L'/4$ – объем моды в резонаторе
- $c = 2,99792458 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света

Выражения для введенных величин B и τ_c через известные параметры лазера можно получить следующем виде:

$$B = \frac{\sigma l c}{V_a L'} = \frac{\sigma c}{V} \quad \tau = \frac{L'}{c\gamma}$$

Вводя инверсную заселенность уровней 3 и 2 по формуле $N = n_3 - n_2 \approx n_3$ систему уравнений (4) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} \frac{dn_3}{dt} = W_p (N_\tau - N) - BqN - \frac{N}{\tau} \\ \frac{dq}{dt} = \left(V_a B N - \frac{1}{\tau_c} \right) q \end{cases} \quad (5)$$

Полученная система уравнений описывает динамику изменения количества фотонов в резонаторе и инверсии населенности.

Рассмотрим работу лазера при стационарной накачке (то есть когда скорость накачки W_p не зависит от времени).

Определим пороговое условие генерации лазера. Предположим, что в момент времени $t = 0$ в резонаторе, вследствие спонтанного испускания, присутствует некоторое небольшое число фотонов q . При этом из уравнения (5) следует, что для того, чтобы величина $\frac{dq}{dt}$ была положительной, должно выполняться условие $(V_a B N - 1/\tau_c)$. В этом случае генерация возникнет, если инверсия населенности N достигнет критического значения N_c , определяемого выражением

$$N_c = \frac{1}{V_a B \tau_c} = \frac{\gamma}{\sigma l} \quad (6)$$

где:

- σ – сечение перехода генерации (*эффективное сечение перехода генерации для ионов Yb^{3+}* $\sigma = 2.5 \cdot 10^{-20}$ см²)
- γ – суммарные потери в резонаторе за проход в одном направлении, определяемые ниже

Таким образом, критическая (пороговая) скорость накачки соответствует ситуации, когда полная скорость накачки уровней $W_{cp} (N_t - N_c)$ уравнивается скоростью N_c/τ спонтанных переходов с рабочего уровня:

$$W_{cp} = \frac{N_c}{(N_t - N_c)\tau} \quad (7)$$

Пороговую скорость накачки уровней можно получить

$$W_{cp} = \frac{1}{(\tau_c V_a B N_t - 1)\tau} \quad (8)$$

Если $W_p > W_{cp}$, то число фотонов q будет возрастать от начального значения, определяемого спонтанным излучением, и если W_p не зависит от времени, то, в конце концов, достигнет некоторого постоянного значения q_0 . Это стационарное значение и соответствующее ему значение инверсии N_0 получаются из уравнений (5), если в них положить $\dot{N} = \dot{q} = 0$.

$$N_0 = \frac{1}{V_a B \tau_c} = N_c, \quad q_0 = V_a \tau_c \left[W_p (N_t - N_c) - \frac{N_0}{\tau} \right]. \quad (9)$$

Полученные уравнения описывают непрерывный режим работы четырехуровневого лазера. При $W_p = W_{cp}$ имеем $N = N_c$ и $q_0 = 0$. Заметим, что при накачке ниже пороговой $q = 0$, и получаем $N_0 = W_p \frac{N_t \tau}{1 + W_p \tau}$. Но поскольку обычно выполняется условие $N_0 = N_c \ll N_t$, из формулы (8) находим, что $W_{cp} \tau \ll 1$, то есть $W_p \tau \ll 1$ и N увеличивается с W_p практически линейно. Число фотонов, определяемое в (9), можно записать в эквивалентном виде:

$$q_0 = (V_a N_c) (\tau_c / \tau) (x - 1) \quad (10)$$

где:

$$x = W_p / W_{cp} \quad (11)$$

и где x – относительное превышение скорости накачки над пороговой. Как для оптической, так и для электрической накачки, можно записать:

$$x = P_p / P_{пор}, \quad (12)$$

где

- P_p – мощность электрической накачки (приложенная к лампе или к разряду),
- $P_{пор}$ – ее пороговое значение.

Таким образом, если выбрать $P_p / P_{пор} = 1.1$, то количество фотонов в резонаторе будет около 10^{10}