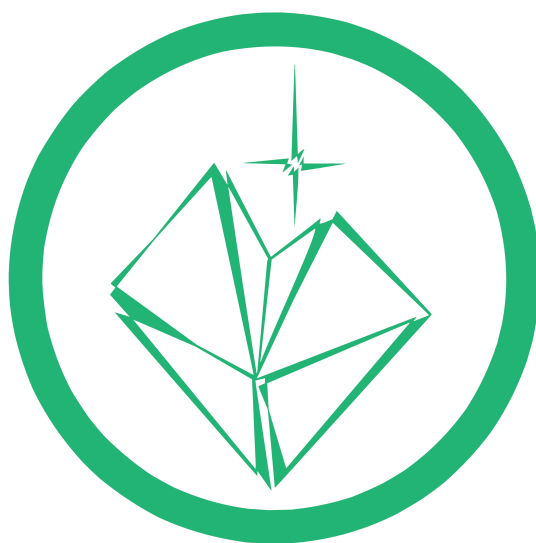


МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НИУ)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## Волконный лазер



выполнили студенты III-ого курса ФФКЭ, группа 852

Андреев Георгий  
Анисимов Михаил  
Бурков Александр  
Водзяновский Яромир

преподаватель

Юрий Юрьевич Брославец

Долгопрудный, 2020 г.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Решение задач</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Теоретические основы работы</b>	<b>3</b>
3.1	Инверсия активной среды как необходимое условие генерации . . . . .	3
3.2	Получение инверсной населенности с помощью когерентной оптической накачки . . . . .	3
3.3	Динамика генерации лазера . . . . .	4
3.4	Релаксационные колебания . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Экспериментальная часть</b>	<b>6</b>
4.1	Схема установки . . . . .	6
4.2	Зависимость мощности излучения от мощности накачки . . . . .	6
4.3	Зависимость частоты релаксационных колебаний от превышения над порогом . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Выводы</b>	<b>8</b>

## 1 Цель работы

- рассмотреть теоретические вопросы, связанные с работой волоконных лазеров, а именно: процесс генерации в волоконном лазере, методы создания инверсной заселенности, формирование модовой структуры лазерного излучения, физические основы появления релаксационных колебаний;
- Экспериментально получить энергетические параметры выходного излучения, определить влияние параметров генерации на частоту и затухание релаксационных колебаний.

## 2 Решение задач

1. **Рассчитать частоту релаксационных колебаний для волоконного лазера, используемого в работе.** Частота  $\omega$  релаксационных колебаний лазера находится по формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{x-1}{\tau_0\tau}},$$

где  $x$  - превышение скорости накачки над пороговой,  $\tau$  - время жизни рабочего уровня,  $\tau_0$  - время жизни фотонов:

$$x = \frac{W_p}{W_{cp}} \quad \tau_0 = -\frac{2L}{c \cdot \ln(1-T)} = \frac{L'}{c\gamma},$$

где  $W_p$  - скорость накачки,  $W_{cp}$  - критическая скорость накачки,  $L$  - длина резонатора,  $c$  - скорость света,  $T$  - коэффициент пропускания выходного зеркала,  $L'$  - оптическая длина резонатора,  $\gamma$  - потери в резонаторе за проход в одном направлении.

Данные:  $x = 1,5$ ;  $\tau = 1400 \mu\text{sec}$ ;  $\tau_0 = 278 \text{sec}$ ;

Ответ:  $\omega \approx 3,58 \cdot 10^4 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$

2. **Определить время затухания фотонов в резонаторе волоконного лазера**

Формула:  $\tau_0 = \frac{L'}{c\gamma}$

Данные:  $L' = 10 \text{metres}$ ,  $\gamma = 0,12$ ;

Ответ:  $\tau_0 \approx 278 \text{ns}$

3. **Определить температуру, при которой работа иттербиевого лазера будет происходить по трехуровневой схеме, если штарковское расщепление уровней рабочего перехода  $\approx 500 \text{cm}^{-1}$**

В научной литературе энергию измеряют в обратных сантиметрах, которые характеризуют энергию электромагнитных квантов с соответствующей длиной волны.

Формула:  $E = \frac{hc}{\lambda}$ ,  $E \approx kT$ . Следовательно,  $T \approx \frac{hc}{k\lambda}$

Ответ:  $T \approx 720 \text{K}$ .

4. **Назовите условие генерации в любом лазере** Генерация в лазере возможна только при условии преобладания накачки энергии над ее потерями.
5. **Возможна ли инверсная заселенность в двухуровневой системе?** Нет, невозможна. Если записать для двухуровневой системы скоростные уравнения и решить ее, то в результате получим  $N < 0$  - плотность инверсной заселенности меньше нуля, что соответствует обычному, неинверсному состоянию активной среды.
6. **Приведите сравнительную характеристику волоконных и твердотельных лазеров**

Хар-ка / лазер	Волоконный лазер	Твердотельный лазер
Активная среда	Сверхчистый плавленый кварц (основной материал оптоволокна), легированный ионами редкоземельных металлов-лантаноидов ( $Nd^{3+}, Yb^{3+}$ )	Диэлектрический кристалл (н-р, $Y_3Al_5O_{12}$ ), стекло. Центры – примесные ионы переходных металлов (н-р $Cr^{3+}, Nd^{3+}, Er^{3+}$ )
Система накачки	Широкополосные светодиоды, лазерные диоды	Оптическая, лазерные диоды
Резонатор	Р-р типа Фабри–Перо (на основе диэлектрических зеркал, брэгговских решеток), кольцевые р-ры	Растворы на основе диэлектрических зеркал (разные типы)
Спектр излучения	$Nd^{3+}$ : 0,92-0,94; 1,05-1,1; 1,34 $\mu m$	$Ho^{3+}$ : 1.9-2.1 $\mu m$
	$Er^{3+}$ : 1.53-1.6 $\mu m$	$Tm^{3+}$ : 1.7-1.9 $\mu m$
	$Yb^{3+}$ : 0.98-1.16 $\mu m$	-
		$CaF_2 \sim Sm^{2+}$ : 2.36 $\mu m$ (в общем, частота меньше, чем у волоконных)

### 3 Теоретические основы работы

#### 3.1 Инверсия активной среды как необходимое условие генерации

Излучение лазера рождается на переходах между определёнными энергетическими уровнями активных центров – рабочими уровнями. Отнесённые к единице объема активной среды заселённости рабочих уровней будем обозначать как  $n_1$  (нижний рабочий уровень) и  $n_2$  (верхний рабочий уровень). Разность

$$N = n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1$$

Называют плотностью инверсной заселённости рабочих уровней. Где  $g_1$  и  $g_2$  - кратности вырождения соответствующих уровней (будем полагать  $g_1 = g_2$ ).

Если выполняется  $N > 0$ , имеет место инверсия активной среды. Понятие инверсии может относиться к определённым промежуткам времени и областям активной среды. В термодинамически равновесной среде величина  $N$  отрицательна. Обеспечение инверсии среды является необходимой предпосылкой для реализации режима генерации.

Коэффициент усиления активной среды описывается выражением:

$$\chi_1 = \sigma N$$

где  $\sigma$  - сечение вынужденных переходов между рабочими уровнями.

Активная среда так же характеризуется линейным коэффициентом поглощения на неактивных центрах и рассеяния  $\chi_2$ . Справедлив закон Бугера:

$$dS_\omega = [\chi_1(z) - \chi_2(z)] S_\omega(z) dz$$

#### 3.2 Получение инверсной населенность с помощью когерентной оптической накачки

Когерентная оптическая накачка предполагает возбуждение активных центров при поглощении активной средой излучения от специального источника.

Для ввода излучения накачки используется несколько методов:

1. Торцевой
2. Размещение V-образных канавок по боковой поверхности светодиода

3. Два светодиода, размещенных в общей оболочке

### 3.3 Динамика генерации лазера

Рассмотрим четырехуровневую схему генерации лазерного излучения, показанную на рис. 1

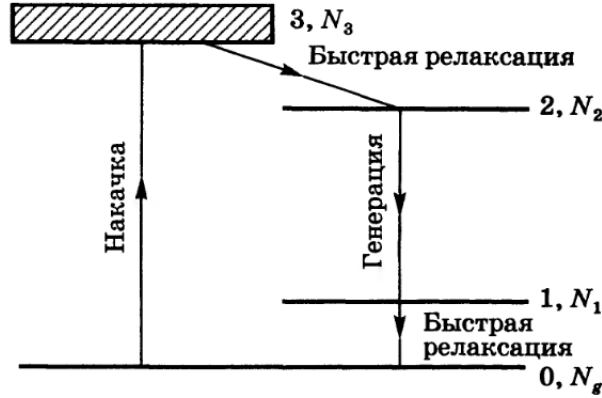


Рис. 7.1

Рис. 1: Четырехуровневая схема

Считая, что переходы между 3 и 2, 1 и 0 являются быстрыми, положим  $n_3 = n_1 \approx 0$ . В этом случае скоростные уравнения можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dn_2}{dt} = W_p n_g - Bq n_2 - \frac{n_2}{\tau} \\ \frac{dq}{dt} = V_a Bq n_2 - \frac{q}{\tau_c} \\ n_g + n_2 = N_t \end{cases}$$

Где  $q$  - полное число фотонов в резонаторе,  $W_p$  - скорость накачки.  $\tau = 1400$  мкс - время жизни рабочего уровня.  $\tau_c = \frac{L'}{c\gamma}$  - время жизни фотонов в резонаторе;  $\gamma$  - потери в резонаторе за переход в одном направлении;  $V_a = \frac{\pi\omega_0^2 l}{4}$  - объём моды в активной среде;  $L' = L + (n_0 - 1)l$ .

Вводя инверсную заселенность уровней ( $N = n_2 - n_g \approx n_2$ ) представим систему в виде:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = W_p(n_2 - N) - BqN - \frac{N}{\tau} \\ \frac{dq}{dt} = V_a BqN - \frac{q}{\tau_c} \end{cases}$$

Определим пороговое условие генерации. Пусть в момент времени  $t = 0$  в резонаторе присутствует некоторое число фотонов  $q$ . Чтобы величина  $\frac{dq}{dt}$  была положительной, должно выполняться  $V_a B N - \frac{q}{\tau_c} > 0$ . В этом случае генерация возникнет если  $N$  достигает некоторого граничного значения, определяемого как:

$$N_C = \frac{1}{V_a B \tau_c} = \frac{\gamma}{\sigma l'}$$

Критическая (пороговая) скорость накачки соответствует ситуации, когда полная скорость накачки уровней уравновешивает скорость спонтанных переходов с рабочего уровня.

### 3.4 Релаксационные колебания

Рассмотрим работу лазера при нестационарной накачке. Для данной временной зависимости скорости накачки  $W_p(t)$  можно найти временную зависимость  $q(t)$  и  $N(t)$ , если заданы начальные условия.

В случае, когда скорость накачки описывается ступенчатой функцией, будем считать, что скорость накачки имеет следующую временную зависимость:  $W_p(t) = 0$  при  $t < 0$  и  $W_p(t) = W_p$  с независимой от времени

величиной  $W_p$  при  $t > 0$ . При небольших колебаниях инверсии и количества фотонов около стационарных значений  $N_0$  и  $q_0$  можно записать:

$$\begin{cases} N(t) = N_0 + \delta N \\ q(t) = q_0 + \delta q, \end{cases}$$

где  $\delta q \ll N_0$  и  $\delta q \ll q_0$ . Тогда можно получить систему:

$$\begin{cases} \delta \dot{N} = -\delta N(W_p + \frac{1}{\tau}) - B(q_0 \delta N + N_0 \delta q) \\ \delta \dot{q} = Bq_0 V_a \delta N \end{cases}$$

С учетом  $BV_a N = \frac{1}{\tau_c}$ , имеем уравнение колебаний:

$$\delta \ddot{q} + [W_p + \frac{1}{\tau} + Bq_0] \delta \dot{q} + (B^2 N_0 q_0 V_a) \delta q = 0$$

Решение имеет вид:  $\delta q = \delta q_0 \exp(st)$  В этом случае получаем уравнение на параметр  $s$ :

$$s^2 + (2/t_0)s + \omega^2 = 0$$

где  $\omega^2 = B^2 N_0 q_0 V_a$ ,  $\frac{1}{t_0} = \frac{1}{2}(W_p + \frac{1}{\tau} + Bq_0)$ . Для случая  $\frac{1}{t_0} \ll \omega$  получаем

$$s = -\frac{1}{t_0} \pm i\omega'$$

$$\omega'^2 = \omega^2 - \frac{1}{\tau_0^2}$$

В этом случае решение будет представлять собой затухающее гармоническое колебание

$$\delta q = C \exp(-t/t_0) \sin(w't + \phi),$$

где константы  $C, \phi$  определяются начальными условиями. Для изменения инверсии в случае  $1/t_0 \ll \omega'$  имеем:

$$\delta N = \frac{\omega' C}{Bq_0 V_a} \exp(-t/t_0) \sin(w't + \phi),$$

Выражения для  $t_0$  и  $\omega$  можно записать в более простом виде:

$$t_0 = \frac{2\tau}{x}, \quad \omega = \sqrt{\frac{x-1}{\tau_c \tau}},$$

где  $x = W_p/W_{cp}$  - превышение скорости накачки над пороговой. Таким образом, при ступенчатом включении накачки при генерации лазера происходят затухающие релаксационные колебания количества фотонов в резонаторе и, следовательно, выходной мощности с частотой  $\omega'$ .

## 4 Экспериментальная часть

### 4.1 Схема установки

Схема установки представлена на рисунке 2

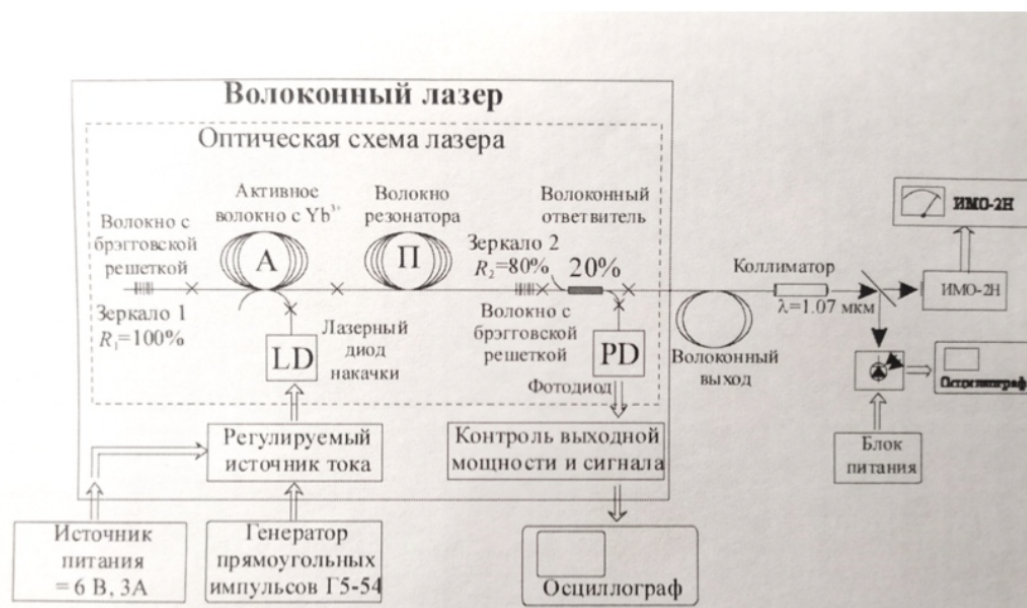


Рис. 2: Блок-схема экспериментальной установки

На схеме изображены:

- Волоконный лазер;
- Источник питания;
- Генератор Г5-54;
- Измеритель энергии ИМО-2н;
- Делительная пластинка;
- Фотодетектор ФД-24К;
- Осциллограф;
- Источник питания фотодетектора.

### 4.2 Зависимость мощности излучения от мощности накачки

С помощью заранее прокалиброванного калориметра, амперметра и вольтметра снимем график зависимости мощности излучения от мощности накачки, представленный на рис. 3

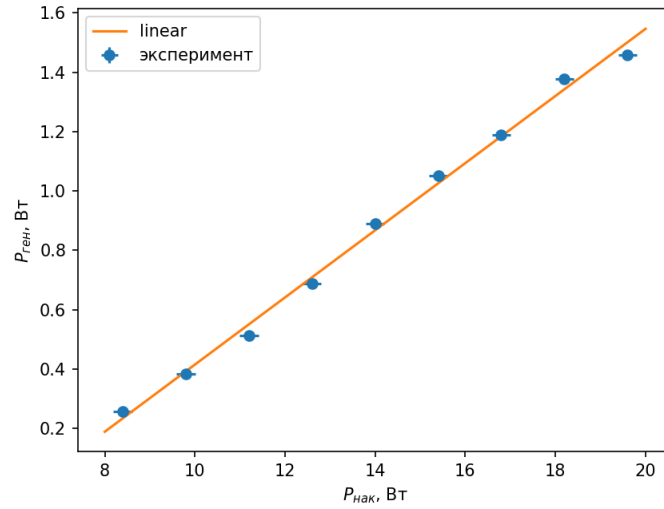


Рис. 3: график мощности излучения от мощности накачки

По графику получаем значение для кпд  $\nu = 11.31 \pm 0.03 \%$

И пороговую мощность:  $P_{\text{порог}} = 6.33 \pm 0.01$  Вт

#### 4.3 Зависимость частоты релаксационных колебаний от превышения над порогом

Используя цифровой осциллограф найдем период релаксационных колебаний и замеряем мощность накачки.

В данной эксперименте ожидаем зависимость:

$$\omega = \sqrt{\frac{x-1}{\tau_c \tau}} \quad (1)$$

где  $x = P/P_{\text{порог}}$

Построим график в единицах  $(x-1)^{1/2}$ ,  $f$  представленный на рис 4

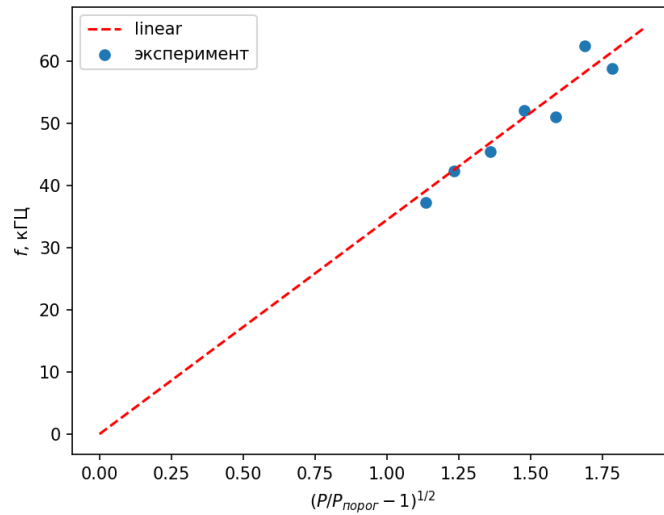


Рис. 4: график зависимости частоты релаксационных колебаний

Из коэффициента наклона, при  $\tau_c = 27$  нс получаем:  $\tau = 0.070 \pm 0.007$  мс.

Т.е. характерное время затухания релаксационных колебаний для известной мощности ступенчатой накачки определяется как  $t_0 = 0.14/x$  мс



## 5 Выводы

- Познакомились с основами теории волоконных лазеров: процессом генерации, методом создания инверсной заселенности и явлением релаксационных колебаний
- Измерили кпд и пороговую мощность волоконного лазера
- Проверили зависимость частоты релаксационных колебаний от мощности накачки. Нашли коэффициент связывающий время затухание и превышение над порогом мощности.