

Отчет по лабораторной работе

**Низкочастотные процессы в многомодовом твердотельном
лазере**

Работу выполнили студенты

Поляков Андрей, Козлов Александр

Нижний Новгород, 15 апреля 2022 г.

Содержание

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Основные элементы теории | 3 |
| 2 | Схема установки | 3 |
| 3 | Протокол измерений | 4 |
| 4 | Результаты эксперимента с оценкой погрешности и их сравнение с теорией | 4 |
| 4.1 | Определение пороговой мощности | 4 |
| 4.2 | Расчёт параметра G | 4 |
| 4.3 | Графики зависимости мощности излучения и релаксационной частоты от параметра накачки | 6 |
| 4.4 | Оценка полосы резонатора лазера | 7 |
| 4.5 | Сравнение оценочной величины полосы резонатора с теоретической | 7 |

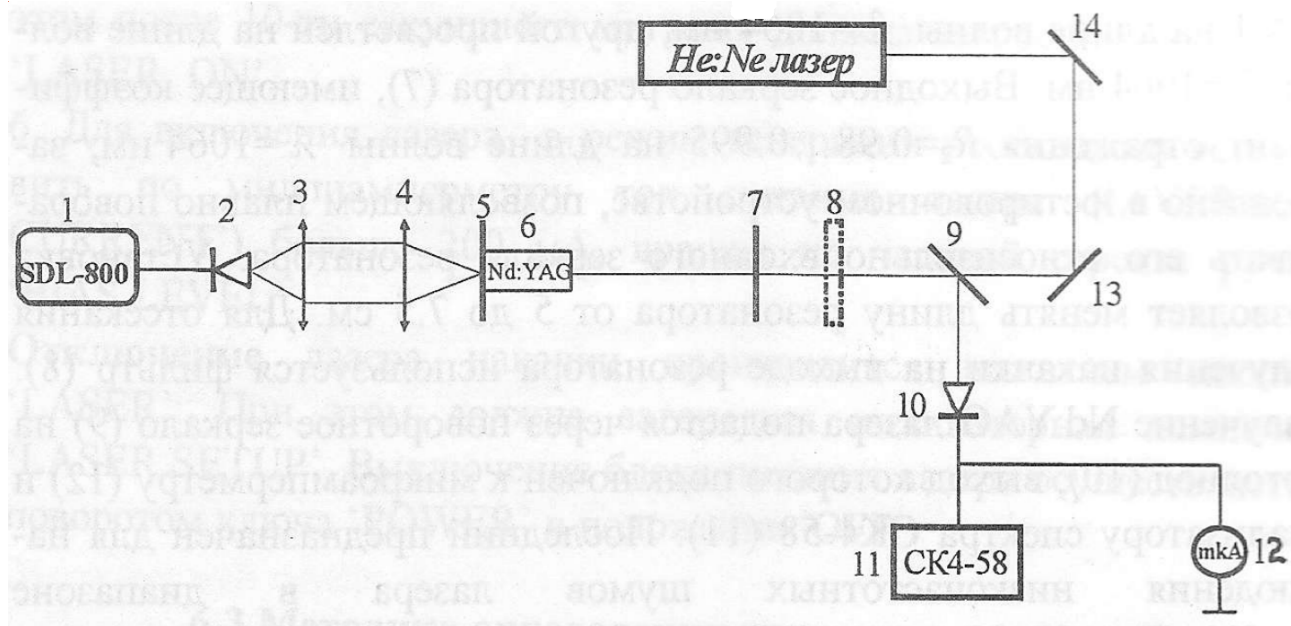


Рис. 1: Схема установки.

1 Основные элементы теории

2 Схема установки

Схема экспериментальной установки представлена на Рис. 1. В качестве источника накачки используется полупроводниковый лазер (2) со следующими характеристиками

1. длина волны генерации 810 нм;
2. пороговый ток питания 200 мА;
3. максимальная мощность излучения 0.5 Вт;
4. поляризация излучения линейная, вектор электрического поля лежит в вертикальной плоскости.

Короткофокусная линза (3) используется для формирования параллельного пучка из сильно расходящегося у торца лазера излучения накачки. Линза (4) закреплена в поворотном устройстве, позволяющем перемещать луч накачки в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Резонатор твердотельного лазера (5–7) установлен на платформе, передвигающейся в продольном и поперечном направлениях. В качестве активной среды лазера используется кристалл алюмоиттриевого граната YAG, легированный ионами Nd^{3+} с концентрацией 1%. Кристалл Nd:YAG (6) имеет форму цилиндра длиной 1 см и диаметром 0.6 см. Он закреплён в юстировочном устройстве, позволяющем плавно изменять положение оси кристалла относительно оси резонатора. Торцы кристалла имеют дихроичное покрытие. Один формирует входное зеркало резонатора (5), обеспечивая пропускание света $T \approx 1$ на длине волны $\lambda = 810$ нм и отражение

$R_1 \approx 1$ на длине волны $\lambda = 1064$ нм, другой просветлен на длине волны $\lambda = 1064$ нм. Выходное зеркало резонатора (7), имеющее коэффициент отражения $R_2 = 0.98 \dots 0.995$ на длине волны $\lambda = 1064$ нм, закреплено в юстировочном устройстве, позволяющем плавно поворачивать его относительно входного зеркала резонатора. Установка позволяет менять длину резонатора от 5 до 7.5 см. Для отсекаания излучения накачки на выходе резонатора используется фильтр (8). Излучение Nd:YAG лазера подается через поворотное зеркало (9) на фотодиод (10), выход которого подключен к микроамперметру (12) и анализатору спектра СК4-58 (11). Последний предназначен для наблюдения низкочастотных шумов лазера в диапазоне $0 \dots 600$ кГц. He-Ne лазер (15) используется для юстировки резонатора. Для визуального наблюдения генерации Nd:YAG лазера используется карточка-визуализатор инфракрасного диапазона.

3 Протокол измерений

Измерили зависимость релаксационной частоты $f_{\text{рел}}$ и мощности излучения $P_{\text{изл}}$ от мощности накачки $P_{\text{нак}}$. Результаты измерений приведены в Табл. 1.

4 Результаты эксперимента с оценкой погрешности и их сравнение с теорией

4.1 Определение пороговой мощности

Для дальнейшей работы важно определить пороговую мощность $P_{\text{пор}}$, ведь ниже будет часто использоваться параметр накачки A , который определяется как $P_{\text{нак}}/P_{\text{пор}}$ ($P_{\text{нак}}$ измеряется напрямую). Чтобы определить пороговую мощность $P_{\text{пор}}$, надо найти такую мощность накачки, что при мощностях накачки меньше данной мощность излучения равна нулю, а при больших мощностях накачки мощность излучения отлична от нуля.

На Рис. 2 показана снятая зависимость мощности излучения от мощности накачки с учётом фоновой засветки. Видно, что при $P_{\text{нак}} < 210$ мВт излучения нет. Снятые данные дискретны и поэтому точно определить порог нам не удастся, мы лишь знаем, что при $P_{\text{нак}} = 210 \pm 5$ мВт излучение есть, а при $P_{\text{нак}} = 205 \pm 5$ мВт излучения нет. Порог находится где-то между 200 мВт и 210 мВт. Значит, $P_{\text{пор}} = 205 \pm 5$ мВт.

4.2 Расчёт параметра G

Расчёт параметра G проводился для каждого из экспериментальных значений параметра накачки A . Связь параметра накачки A и параметра G с измеренными значениями мощности накачки $P_{\text{нак}}$ и релаксационной частоты $f_{\text{рел}}$ даётся выражениями

$$A = \frac{P_{\text{нак}}}{P_{\text{пор}}}, \quad \Omega = 2\pi f_{\text{рел}} T_1, \quad \Omega^2 = G(A - 1), \quad (1)$$

| | | $P_{\text{нак}}, \text{ мВт}$ | $P_{\text{изл}}, \text{ мВт}$ |
|--|--|-------------------------------|-------------------------------|
| | | 420 | 9 |
| | | 410 | 8.37 |
| | | 400 | 7.85 |
| | | 391 | 7.6 |
| | | 381 | 7.3 |
| | | 371 | 6.8 |
| | | 361 | 6.1 |
| | | 350 | 5.5 |
| | | 340 | 4.6 |
| | | 330 | 4 |
| | | 320 | 3.76 |
| | | 290 | 3.3 |
| | | 280 | 2.9 |
| | | 270 | 2.5 |
| | | 260 | 2.1 |
| | | 250 | 1.7 |
| | | 239 | 1.2 |
| | | 230 | 0.9 |
| | | 220 | 0.5 |
| | | 210 | 0.19 |
| | | 200 | 0.14 |

| $P_{\text{нак}}, \text{ мВт}$ | $f_{\text{рел}}, \text{ кГц}$ |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 216 | 112 |
| 225 | 212 |
| 235 | 276 |
| 245 | 336 |
| 255 | 392 |
| 265 | 432 |
| 270 | 448 |
| 275 | 458 |
| 280 | 476 |
| 285 | 491 |
| 296 | 508 |
| 304 | 532 |
| 345 | 551 |
| 385 | 600 |
| 390 | 616 |
| 395 | 627 |
| 405 | 639 |
| 420 | 672 |

Таблица 1: Результаты измерений.

где $T_1 = 0.23 \text{ мс}$ — время релаксации насыщения.

Конечная формула для G и погрешности ΔG

$$G = \frac{(2\pi f_{\text{рел}} T_1)^2}{A - 1}, \quad \Delta_{\text{изм}} G = \frac{2(2\pi T_1)^2 f_{\text{рел}} \Delta_{\text{изм}} f_{\text{рел}}}{A - 1} + \frac{(2\pi f_{\text{рел}} T_1)^2}{(A - 1)^2} \Delta_{\text{изм}} A, \quad (2)$$

$$\Delta_{\text{изм}} A = \frac{\Delta_{\text{изм}} P_{\text{нак}}}{P_{\text{пор}}} + P_{\text{нак}} \frac{\Delta_{\text{изм}} P_{\text{пор}}}{P_{\text{пор}}^2},$$

где $\Delta_{\text{изм}} f_{\text{рел}} = 10 \text{ кГц}$ — измерительная погрешность измерения релаксационной частоты.

На Рис. 3 представлена зависимость параметра G от параметра накачки A . Среднее значение $\langle G \rangle = 1.07 \times 10^6$. Найдём погрешность для параметра G

$$\Delta G = \sqrt{(\Delta_{\text{изм}} G)^2 + (\Delta_{\text{случ}} G)^2}, \quad (3)$$

где случайная погрешность считается как стандартное отклонение. Тогда можно записать для среднего значения параметра G

$$\langle G \rangle = (1.07 \pm 0.35) \times 10^6. \quad (4)$$

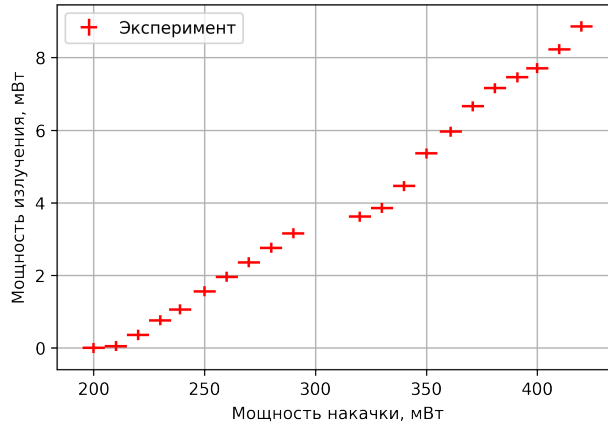


Рис. 2: Зависимость мощности излучения от мощности накачки. Фоновая засветка учтена и вычтена из мощности излучения.

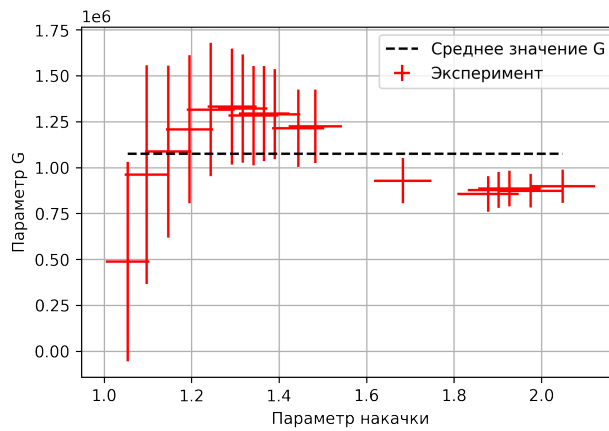
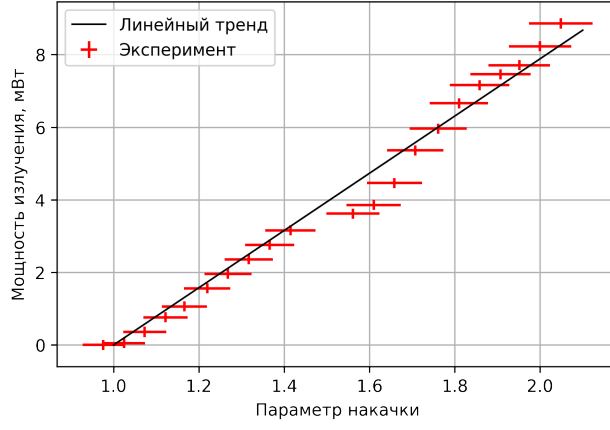


Рис. 3: Зависимость параметра G от параметра накачки.

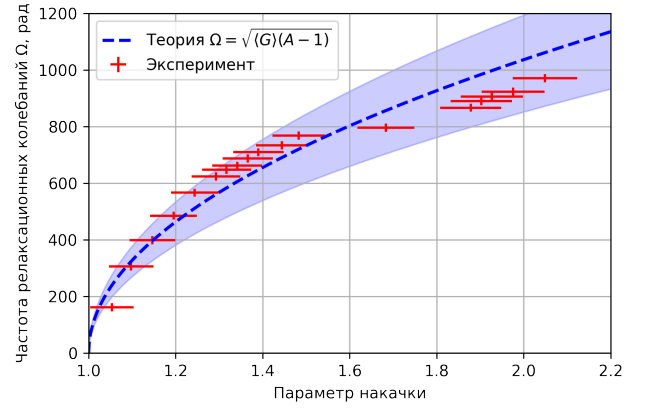
4.3 Графики зависимости мощности излучения и релаксационной частоты от параметра накачки

На Рис. 4а представлена зависимость мощности излучения $P_{\text{изл}}$ от параметра накачки A . Линейный тренд находился в виде $p \cdot (A - 1)$, где p — параметр, то есть линейный тренд проходит при $A = 1$ через 0.

На Рис. 4б представлена зависимость мощности излучения $P_{\text{изл}}$ от параметра накачки A . Экспериментальные данные сопоставляются с результатами теоретическими, которые были построены по формуле $\Omega = \sqrt{\langle G \rangle (A - 1)}$. Ошибки вычисления среднего значения $\langle G \rangle$ учтены синей областью на графике. Видно, что с учётом ошибок определения среднего значения $\langle G \rangle$ экспериментальные данные сходятся с теоретическими результатами.



(a)



(b)

Рис. 4: (a) Зависимость мощности излучения $P_{\text{изл}}$ от параметра накачки A . (b) Зависимость частоты релаксационных колебаний Ω от параметра накачки A . Теоретическая кривая построена для среднего значения $\langle G \rangle$. Синяя область около теоретической кривой учитывает ошибку вычисления среднего значения $\langle G \rangle$.

4.4 Оценка полосы резонатора лазера

Оценим по среднему значению $\langle G \rangle$ полосу резонатора лазера $\delta f_{\text{эксп}} = 1/(2\pi T_c)$. По определению $G = T_1/T_c$, тогда для $\delta f_{\text{эксп}}$ получаем выражение

$$\delta f_{\text{эксп}} = \frac{\langle G \rangle}{2\pi T_1}. \quad (5)$$

Подставляем числа и с учетом погрешности получаем $\delta f_{\text{эксп}} = (7.44 \pm 2.43) \times 10^8$ Гц.

4.5 Сравнение оценочной величины полосы резонатора с теоретической

Теоретическое значение

$$\delta f_{\text{теор}} = -\frac{c \ln \sqrt{R_1 R_2}}{2\pi L} \approx -3 \times 10^8 \ln \sqrt{1 \times 0.98} / (6.28 \times 0.01) = 4.83 \times 10^8 \text{ Гц}$$

. Взяли $L = 1$ мм. Теоретическое значение не совпадает в оценочной величиной даже с учётом погрешности. Стоит отметить, что если взять один из коэффициентов отражения хоть на одну сотую поменьше, то теоретическое значение будет совпадать с оценочным.