

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

**Отчёт о выполнении лабораторной работы 4.5.1..
«Интерференция лазерного излучения»**

Работу выполнил:

Студент группы Б01-304

Лепин Владислав Дмитриевич

Преподаватель:

Тимирханов Ринат Асхатович

Долгопрудный, 2024

Содержание

1	Введение	3
1.1	Цель работы	3
1.2	Используемые приборы	3
1.3	Теоретическая часть	3
1.3.1	Кратко об устройстве лазера и его модах	3
1.3.2	Видность интерференционной картины	4
1.3.3	Определение ширины спектра лазерного излучения и числа генерируемых мод.	5
1.3.4	Экспериментальная установка	6
1.3.5	Методика измерений	7
2	Ход работы	8
2.1	Измерение видности при нулевой разности хода ($\mathcal{V}_2 = 1$) . .	8
2.1.1	Измерение видности при постоянном угле поляризации	10
3	Выводы и обсуждение результатов	13
4	Справочные данные	14

1 Введение

1.1 Цель работы

- исследование видности интерференционной картины излучения гелий-неонового лазера и определение длины когерентности излучения.

1.2 Используемые приборы

- He–Ne-лазер;
- интерферометр Майкельсона с подвижным зеркалом;
- фотодиод с усилителем;
- осциллограф;
- поляроид;
- линейка.

1.3 Теоретическая часть

1.3.1 Кратко об устройстве лазера и его модах

Лазер состоит из двух зеркал, составляющих лазерный резонатор, и расположенной между ними газообразной усиливающей среды, состоящей из смеси гелия и неона. Типичное расстояние между зеркалами $0,2 \div 1$ м.

В лазере излучение распространяется по резонатору туда и обратно. При этом максимальным усилением обладают волны, для которых набег фазы при полном обходе резонатора кратен 2. Это приводит к условию на разрешённые частоты и длины волн:

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2L = 2\pi m, \quad L = \frac{m\lambda}{2}, \quad \nu_m = \frac{mc}{2L}, \quad \Delta\nu_m = \nu_{m+1} - \nu_m = \frac{c}{2L}, \quad (1)$$

где L - длина резонатора, m - целое число. Поэтому лазер генерирует отдельные типы колебаний, называемые модами, которые удовлетворяют условию ??.

1.3.2 Видность интерференционной картины

Уменьшение видимости интерференционной картины зависит по большей части от трех независимых факторов: неравенство амплитуд, разная оптическая задержка между интерферирующими пучками и несовпадение поляризаций. Результирующая видность определяется произведением:

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_1 \cdot \mathcal{V}_2 \cdot \mathcal{V}_3 \quad (2)$$

Неравенство амплитуд даёт первый множитель:

$$\mathcal{V}_1 = \frac{2\sqrt{\delta}}{1 + \delta}, \quad (3)$$

где $\delta = B_m^2/A_m^2$, A_m, B_m — амплитуды волн одной моды

Разная оптическая задержка между интерферирующими пучками даёт второй множитель (выводится из сложения всех мод и усреднения):

$$\mathcal{V}_2 = \left| \frac{1}{n} \frac{\sin \frac{\pi l}{2L} n}{\sin \frac{\pi l}{2L}} \right| \quad (4)$$

Наконец, третий множитель обусловлен несовпадением поляризаций.

В случае линейно поляризованных волн:

$$\mathcal{V}_3 = \cos \beta \quad (5)$$

Несколько сложнее случай, когда источник света генерирует излучение с линейной поляризацией, но направление поляризации хаотически меняется в пределах от 0 до π . Если такое излучение разделить на два пучка и на пути каждого поставить по поляроиду с углом между направлениями разрешённой поляризации этих поляроидов β , то опять получим две волны с углом между плоскостями их поляризаций β , но амплитуды этих волн будут флуктуировать. Можно показать, что в этом случае:

$$\mathcal{V}_3 = \cos^2 \beta \quad (6)$$

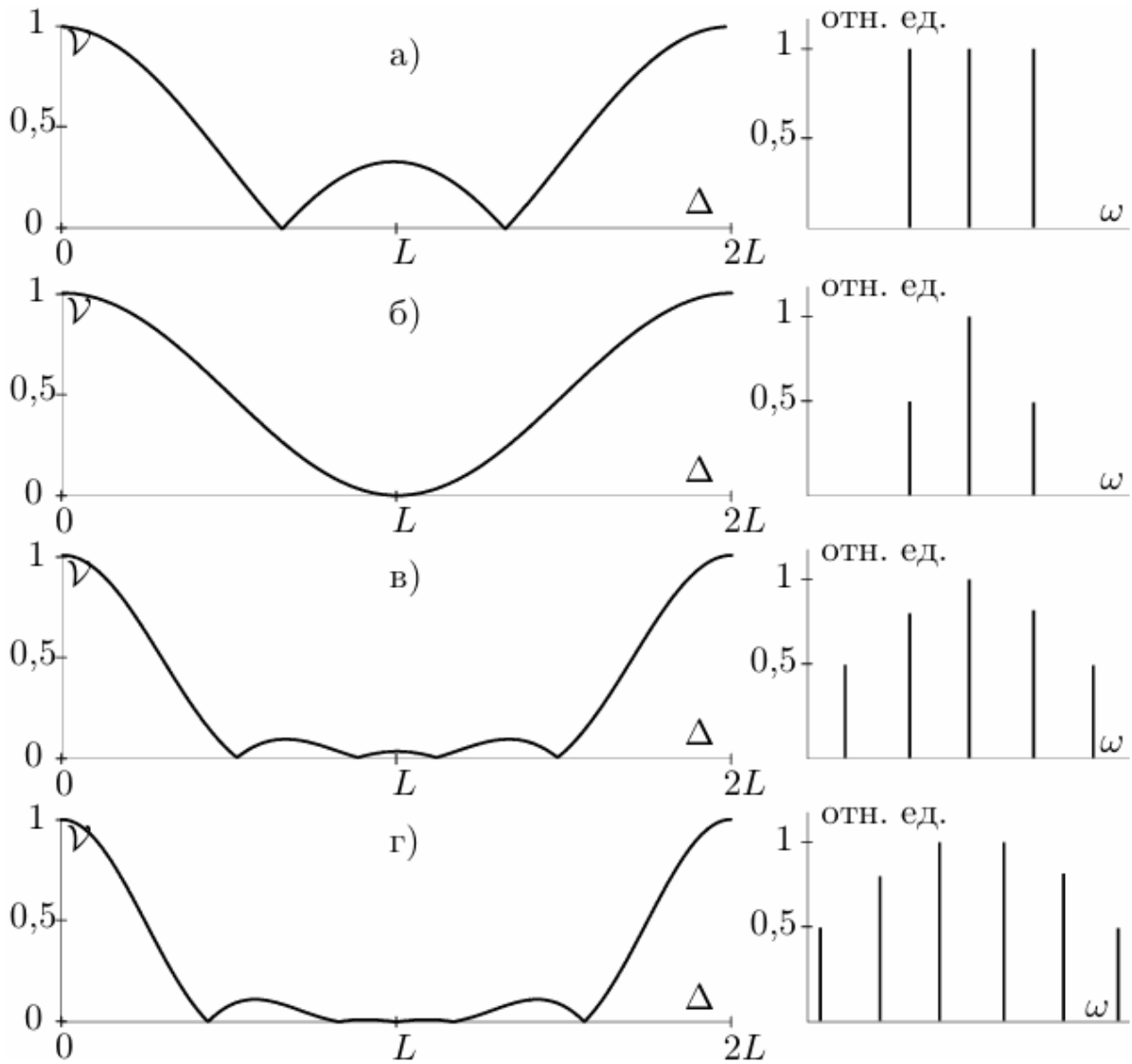


Рис. 1: Зависимость видности от задержки для разного количества генерируемых мод: а) и б) 3 моды, в) 5 мод, г) 6 мод. Справа приведены соотношения интенсивностей мод

1.3.3 Определение ширины спектра лазерного излучения и числа генерируемых мод.

Из расчётных кривых, показанных на рис. 1 можно показать, что полная ширина спектра связана с геометрической задержкой $l_{1/2}$, при которой видность падает вдвое, приблизительным соотношением:

$$\Delta\nu_{\text{полн}} \approx 0.6 \frac{c}{l_{1/2}}, \quad (7)$$

а число мод равно

$$n \approx 1 + 1.2 \frac{L}{l_{1/2}} \quad (8)$$

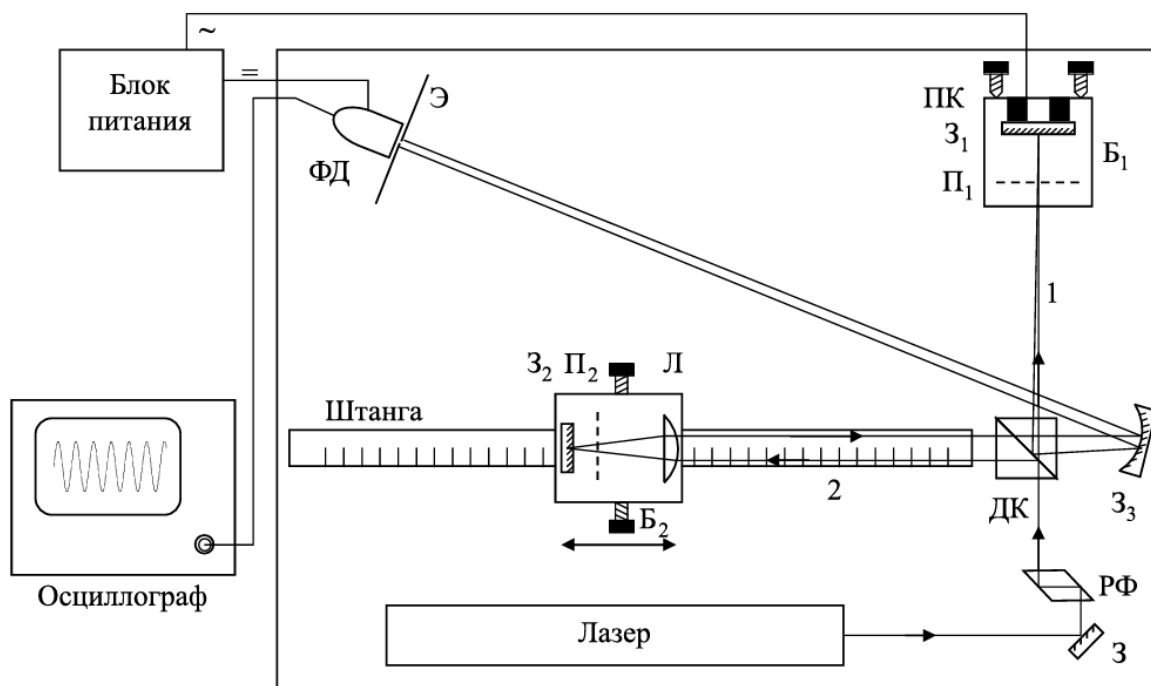


Рис. 2: Схема установки. З, З1, З2, З3 - зеркала. П1 и П2 - поляроиды. Б1 и Б2 - блоки №1 и 2. ДК - делительный кубик, РФ - ромб Френеля. ФД - фотодиод, Э - экран, ПК - пьезокерамика, Л - линза

1.3.4 Экспериментальная установка

Для получения интерференционной картины используется интерферометр Майкельсона. Схема установки приведена на рис. 2.

Установка основана на интерференции лазерного излучения, создаваемой двухплечевым интерферометром. В качестве источника света используется гелий-неоновый лазер ($\lambda = 632,8 \text{ нм}$). Луч лазера проходит через ромб Френеля (при необходимости), который преобразует линейную поляризацию в круговую. Затем делительный кубик разделяет лазерное излучение на два пучка.

Первый пучок (П1) проходит через поляроид, отражается от зеркала З1, установленного на пьезокерамику, и частично отражается от делительного кубика. Второй пучок (П2) проходит через линзу, поляроид, отражается от зеркала З2, снова проходит через линзу и объединяется с первым пучком. Оба пучка интерферируют, создавая интерференционные полосы.

Сферическое зеркало З3 увеличивает интерференционную картину, которая фиксируется фотодиодом через узкую щель. Сигнал с фотодиода усиливается и передаётся на осциллограф. Пьезокерамика, управляемая блоком питания, изменяет положение зеркала З1, вызывая смещение интерференционных полос. Это позволяет измерять фазовые изменения и

анализировать колебания с высокой точностью.

1.3.5 Методика измерений

Типичная осциллограмма сигнала фотодиода приведена на рис. 3.

Измеряются следующие параметры:

1. Фоновая засветка — уровень сигнала при полном перекрытии обоих пучков (h_0).

2. Интенсивность каждого пучка — уровни сигнала при перекрытии одного из пучков (h_1 и h_2).

3. Максимальная и минимальная интенсивность интерференционной картины — уровни сигнала при открытых обоих пучках (h_3 и h_4).

На основе измерений рассчитываются: - Параметр

$$\delta = \frac{h_1}{h_2} \quad (9)$$

где h_1 и h_2 — уровни интенсивности отдельных пучков. Он необходим для расчёта \mathcal{V}_1

- Видность интерференционной картины

$$\mathcal{V} = \frac{h_4 - h_3}{h_4 + h_3} \quad (10)$$

где h_4 — максимум, h_3 — минимум интенсивности при интерференции.

Для определения зависимости видности от разности хода ℓ при фиксированном угле поляризации $\beta = 0$ вычисляется:

$$\mathcal{V}_2(\ell) = \frac{\mathcal{V}}{\mathcal{V}_1} \quad (11)$$

где \mathcal{V}_1 — видность при полной когерентности пучков.

При фиксированной разности хода $\ell = 0$ и изменяемом угле поляризации β видность определяется как:

$$\mathcal{V}_3 = \frac{\mathcal{V}}{\mathcal{V}_1} \quad (12)$$

что позволяет исследовать влияние угла поляризации на интерференционную картину.

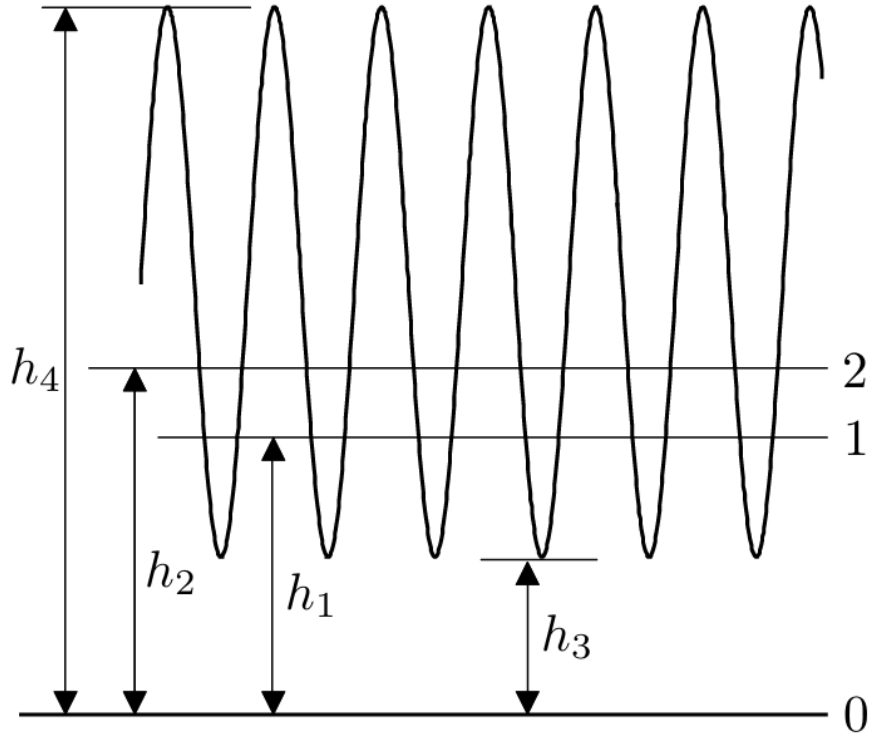


Рис. 3: Осциллограмма сигналов с фотодиода

2 Ход работы

2.1 Измерение видности при нулевой разности хода ($\mathcal{V}_2 = 1$)

Выставим нулевую разность хода. На нашей установке она получается при плече $L = 16$ см. Измерим величины h_1 , h_2 , h_3 и h_4 на экране осциллографа при изменении угла поляризации от $\beta = 0^\circ$ до $\beta = 180^\circ$. Результаты занесем в таблицу 1.

Таблица 1: Измерение видности при нулевой разности хода

Угол ($^\circ$)	0	30	50	70	90	110	130	150	180
h_1	1	1.5	1.5	1.6	1.2	0.7	0.5	1.1	1.2
h_2	1.6	1.6	1.7	3.4	3.2	3.2	3.2	3.2	2.6
h_3	0.9	1	1.4	3.4	3.5	2.8	3.2	2.7	1
h_4	4.2	5.1	4.8	6.2	5.7	5.1	4.4	6	4.7

Рассчитаем \mathcal{V}_3 для каждого случая, после чего построим график зависимости от β , сравнив с теоретическими зависимостями $\mathcal{V}_3 = \cos \beta$ и $\mathcal{V}_3 = \cos^2 \beta$.

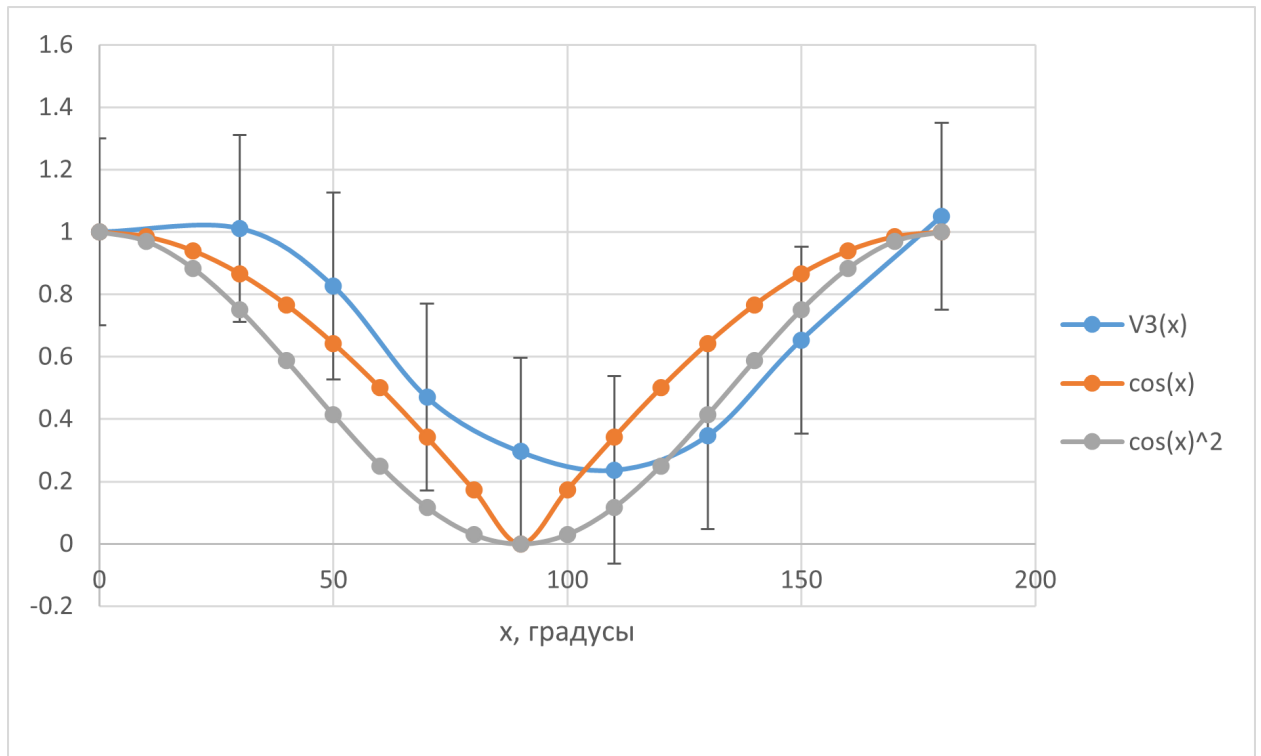


Рис. 4: Зависимость \mathcal{V}_3 от β

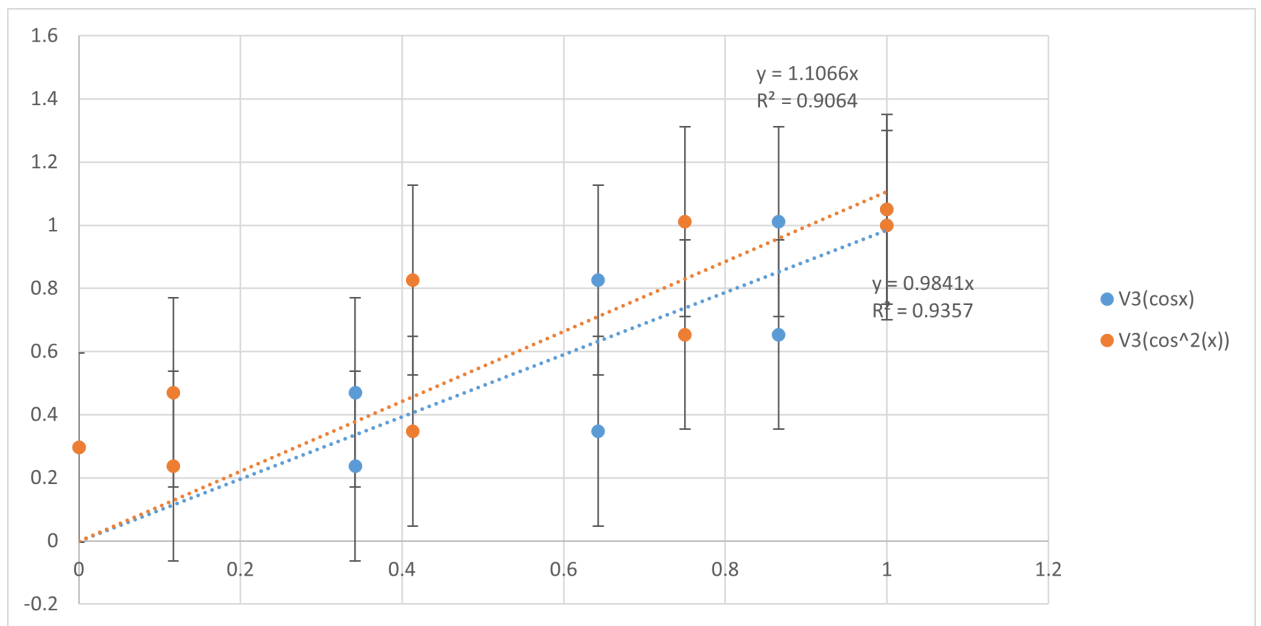


Рис. 5: Зависимость \mathcal{V}_3 от $\cos \beta$ и $\cos^2 \beta$

Из графика 5 можно сделать вывод, что \mathcal{V}_3 описывается зависимостью, которая больше подходит для $\cos \beta$, чем $\cos^2 \beta$. К сожалению, можно лишь предположить это, поскольку погрешности измерений слишком велики ($\sigma = 0.2$ для каждого из измерений).

Поэтому можно сделать вывод о том, что поляризация обеих волн линейная.

2.1.1 Измерение видности при постоянном угле поляризации

Установим поляроид П1 в положение, в котором интерференционная картина видна наиболее чётко ($\beta = 0^\circ$, $\mathcal{V}_3 = 1$). Передвигая по штанге блок Б2, найдем положение, где видность максимальна ($L = 16$ см) и подстроим ещё раз угол поворота поляроида: теперь $\beta = 25^\circ$.

Проведем измерение параметров h_i и запишем их в таблицу 2.

Таблица 2: Измерение видности при постоянном угле поляризации

L (см)	h_1	h_2	h_3	h_4	\mathcal{V}	δ	\mathcal{V}_1	\mathcal{V}_2
89	0.8	0.6	1	2	0.33	1.33	0.99	0.34
78.5	1	1.2	0.9	3.6	0.60	0.83	1.00	0.60
84	0.8	1	0.8	3	0.58	0.80	0.99	0.58
82	0.8	1	0.6	3	0.67	0.80	0.99	0.67
81	0.8	1.2	0.7	3.5	0.67	0.67	0.98	0.68
80	0.8	1.4	0.8	3.8	0.65	0.57	0.96	0.68
79	0.8	1.2	0.7	3.2	0.64	0.67	0.98	0.65
78	0.8	0.8	0.6	2.8	0.65	1.00	1.00	0.65
76	0.8	0.6	0.6	2.4	0.60	1.33	0.99	0.61
73	0.4	0.3	0.4	1.2	0.50	1.33	0.99	0.51
70	0.4	0.5	0.7	1.4	0.33	0.80	0.99	0.34
65	0.4	0.4	0.8	1	0.11	1.00	1.00	0.11
58	1	1	1.8	2.1	0.08	1.00	1.00	0.08
51	1	1.4	2	2.9	0.18	0.71	0.99	0.19
45	1	1.4	1.8	3	0.25	0.71	0.99	0.25
40	1	0.7	1.6	1.8	0.06	1.43	0.98	0.06
35	1	1.3	2	2.2	0.05	0.77	0.99	0.05
30	1	1	1.8	2.4	0.14	1.00	1.00	0.14
25	1	0.9	1.2	2.6	0.37	1.11	1.00	0.37
20	1	1	0.7	2.2	0.52	1.00	1.00	0.52
18	1	0.2	0.6	1.8	0.50	5.00	0.75	0.67
17	1	0.4	0.4	1.2	0.50	2.50	0.90	0.55
16	1	0.4	0.5	1.2	0.41	2.50	0.90	0.46
15	1	0.2	0.5	1.9	0.58	5.00	0.75	0.78
13	1	0.3	0.6	1.2	0.33	3.33	0.84	0.40
10	1	0.4	0.7	1	0.18	2.50	0.90	0.20
8	1	0.2	0.8	1.6	0.33	5.00	0.75	0.45

Построим график зависимости \mathcal{V}_2 от L .

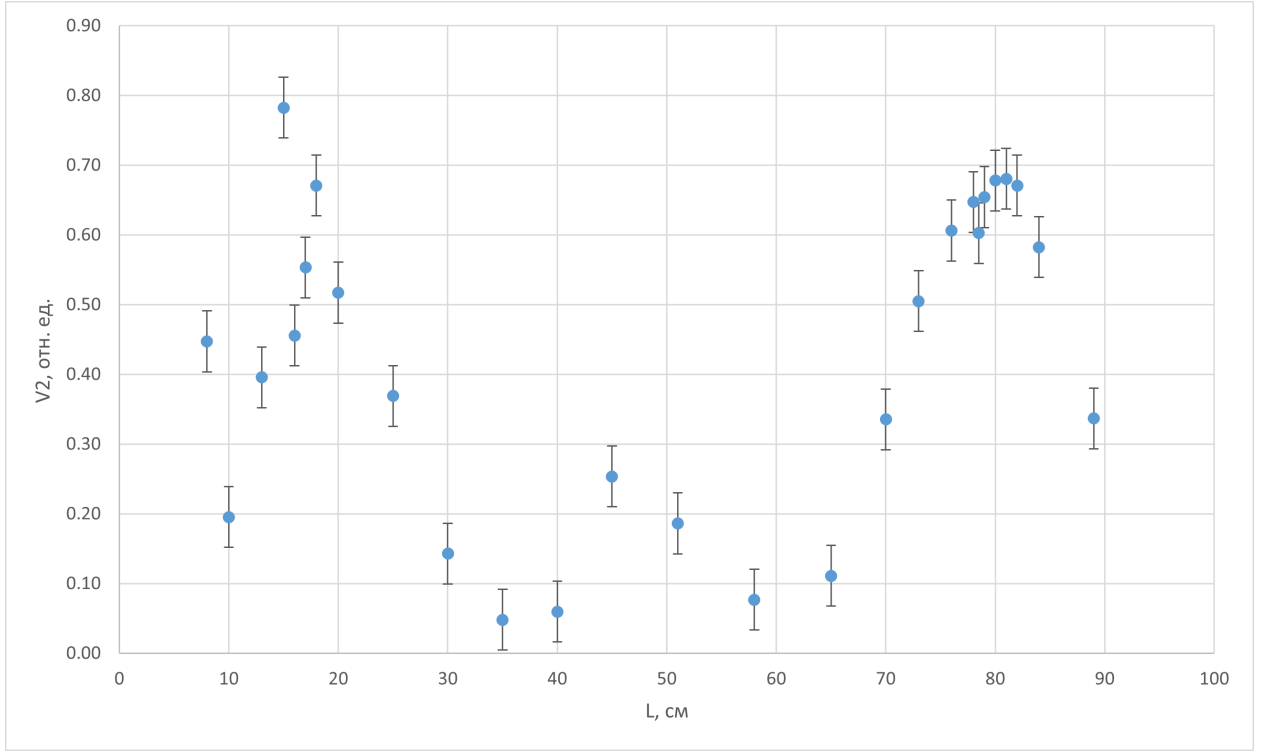


Рис. 6: Зависимость \mathcal{V}_2 от L

Сопоставляя наш график с эталонными на рис. 1, приходим к выводу, что в теории наш лазер имеет три моды одинаковой амплитуды.

На графике выделяются два максимума:

$$L_1 = (15 \pm 3) \text{ см}, \quad L_2 = (81 \pm 3) \text{ см}.$$

Переведем их в разности хода:

$$\Delta_1 = 2(L_1 - 16) = (-2 \pm 6) \text{ см}, \quad \Delta_2 = 2(L_2 - 16) = (130 \pm 6) \text{ см}.$$

Согласно теории, разница

$$\Delta_2 - \Delta_1 = 2L_0,$$

где L_0 — расстояние между зеркалами оптического резонатора лазера. Таким образом,

$$L_0 = (66 \pm 4) \text{ см}, \quad \varepsilon = 7\%.$$

Межмодовое расстояние по формуле (1):

$$\Delta\nu_m = \frac{c}{2L} = (2.27 \pm 0.14) \cdot 10^8 \text{ Гц}, \quad \varepsilon = 7\%.$$

Полуширина кривой из графика:

$$l_{1/2} = (10 \pm 3) \text{ см}.$$

Соответствующая ей разность хода:

$$\Delta_{l_{1/2}} = 2l_{1/2} = (20 \pm 6) \text{ см}, \quad \varepsilon = 30\%.$$

Наконец, рассчитаем диапазон частот ΔF , в котором происходит генерация мод (формула (7)):

$$\Delta F = (9.0 \pm 2.7) \cdot 10^8 \text{ Гц}, \quad \varepsilon = 30\%.$$

А также оценим число генерируемых лазером мод по формуле (8):

$$n = (5 \pm 2), \quad \varepsilon = 40\%.$$

3 Выводы и обсуждение результатов

В ходе работы был исследован режим генерации лазера и определены его основные характеристики. Построен график зависимости \mathcal{V}_2 от L , на основе которого были выделены два максимума и вычислены соответствующие разности хода. Это позволило определить расстояние между зеркалами оптического резонатора лазера:

$$L_0 = (66 \pm 4) \text{ см}, \quad \varepsilon = 7\%.$$

Рассчитано межмодовое расстояние $\Delta\nu_m$, определяющее разницу частот между соседними продольными модами:

$$\Delta\nu_m = (2.27 \pm 0.14) \cdot 10^8 \text{ Гц}, \quad \varepsilon = 7\%.$$

Проанализирована ширина модового спектра лазера. Определена полуширина кривой $l_{1/2}$ и соответствующая ей разность хода, а также рассчитан диапазон частот ΔF , в котором происходит генерация мод:

$$\Delta F = (9.0 \pm 2.7) \cdot 10^8 \text{ Гц}, \quad \varepsilon = 30\%.$$

На основе этих данных вычислено число генерируемых лазером мод:

$$n = (5 \pm 2), \quad \varepsilon = 40\%.$$

Таким образом, в ходе работы были успешно достигнуты поставленные цели: экспериментально исследованы параметры работы лазера, определены его ключевые характеристики, проведён их анализ и сопоставление с теоретическими ожиданиями.

4 Справочные данные

Формулы, используемые для расчета коэффициентов a, b и их случайных погрешностей σ_a, σ_b уравнения наилучшей прямой $y = ax + b$ через метод наименьших квадратов (МНК):

$$a = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$$

$$\sigma_a \approx \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - a^2}$$

$$b = \langle y \rangle - a \langle x \rangle$$

$$\sigma_b = \sigma_a \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$$

Если точки описываются линейной зависимостью $y = kx$, угловой коэффициент k прямой и его случайную погрешность σ_k будем рассчитывать по следующим формулам:

$$k = \frac{\langle xy \rangle}{\langle x^2 \rangle}$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle} - k^2},$$

Полные погрешности косвенно измеренных величин будем считать по формулам, приведенным в таблице 3.

Таблица 3: Расчёт погрешностей косвенно измеренных величин

Формула для величины	Полная погрешность
$A = B \pm C$	$\sigma_A^2 = \sigma_B^2 + \sigma_C^2$
$A = B \cdot C$	$\varepsilon_A^2 = \varepsilon_B^2 + \varepsilon_C^2$
$A = B/C$	$\varepsilon_A^2 = \varepsilon_B^2 + \varepsilon_C^2$
$A = B^\beta \cdot C^\gamma$	$\varepsilon_A^2 = (\beta \cdot \varepsilon_B)^2 + (\gamma \cdot \varepsilon_C)^2$

И, наконец, приведем формулу для оценки случайной погрешности измеряемой величины:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2},$$

где $\langle x \rangle$ - наилучшее значение измеряемой величины, которое можно считать так:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$