

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

# Отчёт о выполнении лабораторной работы №4.5.2

## Интерференция лазерного излучения

Авторы:  
Сенокосов Арсений Олегович  
Сафин Дим Рустемович  
Б02-012

Долгопрудный  
11 августа 2022 г.

# 1 Введение

**Цель работы:** исследование видности интерференционной картины излучения гелий-неонового лазера и определение длины когерентности излучения.

**Оборудование:** He-Ne-лазер, интерферометр Майкельсона с подвижным зеркалом, фотодиод с усилителем, осциллограф, поляриод, линейка.

## 2 Теоретическое введение

Важный параметр интерференционной картины — ее видность:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1)$$

Удобно представлять видимость в виде произведения функций различных параметров установки/системы:

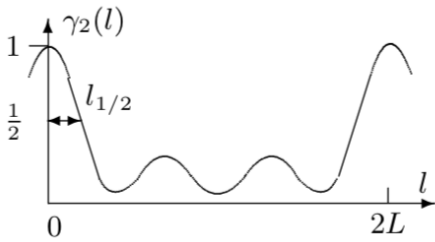
$$V = V_1 V_2 V_3 \quad (2)$$

Рассмотрим эти функции подробнее. Первая из них отвечает за отношение интенсивностей интерферирующих волн:

$$V_1 = \frac{2\sqrt{\delta}}{1 + \delta}, \quad \delta = \frac{B_m^2}{A_m^2} \quad (3)$$

Здесь  $A_m, B_m$  — амплитуды волн. Вторая функция учитывает влияние разности хода и спектрального состава волн:

$$\gamma_2 = \frac{\sum_n A_n^2 \cos \frac{2\pi \Delta \nu n l}{c}}{\sum_n A_n^2} \sim e^{-(\pi \Delta F l / c^2)} \quad (4)$$



Здесь  $l$  — разность хода,  $\Delta \nu$  — спектральный состав излучения,  $A_n^2$  — интенсивность мод. Оценка приведена из перехода к непрерывному пределу. На графике (рис.1) показан вид  $V_2(l)$ , позволяющий получить расстояние  $L$  между зеркалами резонатора и межмодовое расстояние  $\Delta \nu$ . Величина  $l_{1/2}$  позволяет оценить диапазон частот  $\Delta F$ . Формулы связи межмодового расстояния и длины  $L$ , а также  $l_{1/2}$  и  $\Delta F$  таковы:

Рис. 1: Качественный график  $V_2$

$$\Delta \nu = \frac{c}{2L}, \quad l_{1/2} \approx \frac{0,26c}{\Delta F} \quad (5)$$

Последняя функция — зависимость от угла поляризации  $\alpha$ :

$$V_3 = |\cos \alpha| \quad (6)$$

## 3 Экспериментальная установка

### 3.1 Описание установки

Для получения интерференционной картины используется интерферометр Майкельсона, смонтированный на вертикально стоящей массивной металлической плите. Схема установки приведена на рисунке.

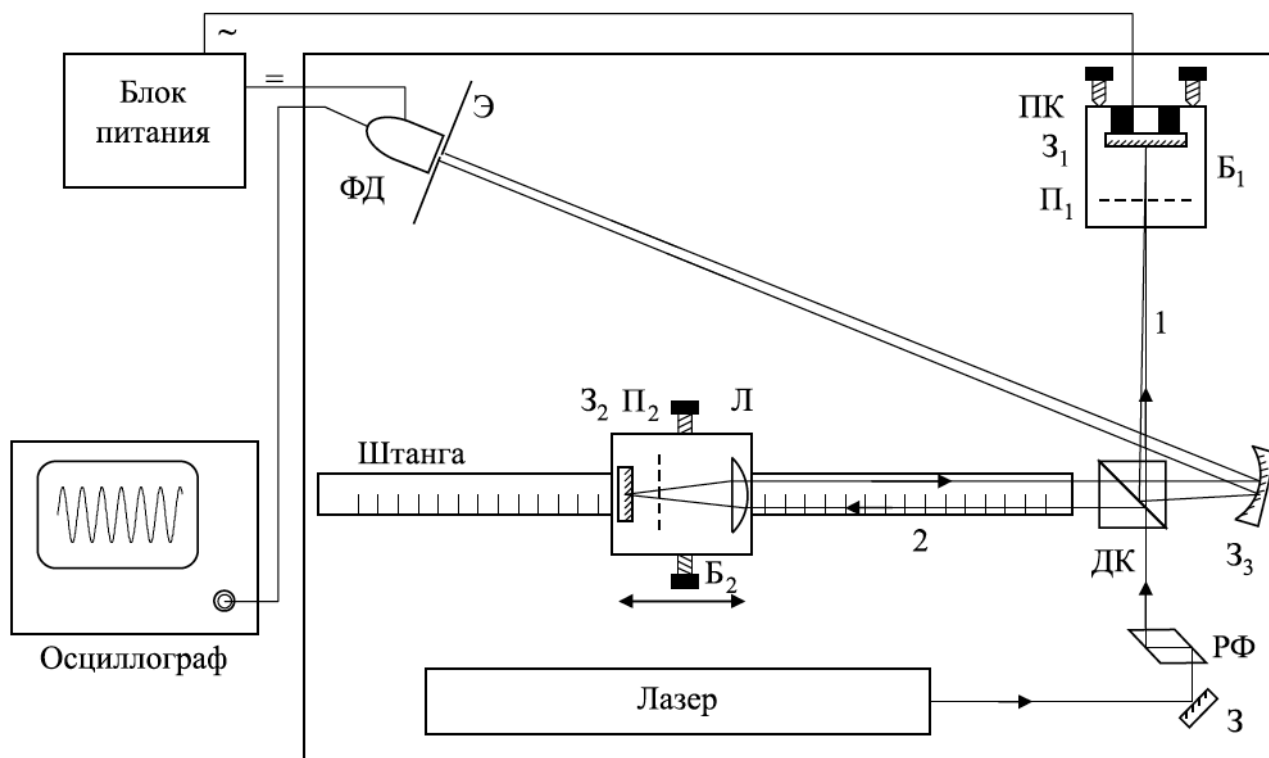


Схема установки. З, З<sub>1</sub>, З<sub>2</sub>, З<sub>3</sub> — зеркала. П<sub>1</sub> и П<sub>2</sub> — поляроиды. Б<sub>1</sub> и Б<sub>2</sub> — блоки № 1 и 2. ДК — делительный кубик, РФ — ромб Френеля. ФД — фотодиод, Э — экран, ПК — пьезокерамика, Л — линза

Источником света служит гелий-неоновый лазер (средняя длина волны  $\lambda_0 = 632,8$  нм). Пучок лазерного излучения отражается от зеркала З и проходит призму полного внутреннего отражения РФ (ромб Френеля), которая превращает линейную поляризацию излучения в круговую. Если в установке используется лазер, излучающий неполяризованный свет, то ромб Френеля не нужен, но он и не мешает выполнению работы. Далее лазерное излучение делится диагональной плоскостью делительного кубика ДК на два пучка.

Пучок 1 проходит поляроид П<sub>1</sub>, отражается под небольшим углом от зеркала З<sub>1</sub>, снова проходит поляроид П<sub>1</sub> и, частично отражаясь от диагональной плоскости делительного кубика, выходит из интерферометра, попадает на зеркало З<sub>3</sub> и далее на фотодиод ФД. Зеркало З<sub>1</sub> наклеено на пьезокерамику ПК, которая может осуществлять малые колебания зеркала вдоль направления распространения падающего пучка. Поляроид и зеркало с пьезокерамикой собраны в единый блок Б<sub>1</sub>, который крепится к вертикально стоящей плите. В блоке Б<sub>1</sub> имеются юстировочные винты, которые позволяют регулировать угол наклона зеркала З<sub>1</sub>. В установке предусмотрена возможность вращения поляроида П<sub>1</sub>. Угол поворота отсчитывается по шкале, нанесённой на оправу поляроида. Пучок 2 проходит линзу Л, поляроид П<sub>2</sub>, отражается от зеркала З<sub>2</sub>, снова проходит поляроид П<sub>2</sub>, линзу Л и делительный кубик, выходит из интерферометра, попадает на зеркало З<sub>3</sub> и далее на фотодиод ФД. Таким образом, от зеркала З<sub>3</sub> под небольшим углом друг к другу идут на фотодиод два пучка, прошедшие разные плечи интерферометра. Между ними происходит интерференция и образуются интерференционные полосы. Линза Л, поляроид П<sub>2</sub> и зеркало З<sub>2</sub> собраны в единый блок Б<sub>2</sub>.

Зеркало З<sub>2</sub> установлено в фокальной плоскости линзы Л. Это сделано для того, чтобы падающий и выходящий из блока Б<sub>2</sub> пучки всегда были параллельны друг другу. Блок Б<sub>2</sub> может перемещаться вдоль пучка 2 по штанге, жёстко связанной с плитой интерферометра. Длина штанги 90 см. В установке предусмотрена возможность небольшого поперечного перемещения блока Б<sub>2</sub>, что позволяет регулировать расстояние между падающим и выходящим из блока

пучками. При измерениях блок Б2 крепится к штанге при помощи двух винтов. Вдоль штанги нанесены деления через один сантиметр. При перемещении блока Б<sub>2</sub> вдоль штанги на величину  $x_1$  геометрическая разность хода между пучками 1 и 2 изменяется на величину  $l = 2x_1$ .

Сферическое зеркало З<sub>3</sub> с небольшим фокусным расстоянием увеличивает картину интерференционных полос и позволяет наблюдать её на экране Э, расположенном в плоскости входного окна фотодиода. Свет попадает на фотодиод ФД через узкую щель в центре экрана. Щель ориентируется параллельно интерференционным полосам. Ширина щели меньше расстояния между полосами. Сигнал фотодиода усиливается и подаётся на вход осциллографа. Для питания усилителя сигнала фотодиода и управления пьезокерамикой используется блок питания БП.

На пьезокерамику подаётся напряжение с частотой 50 Гц. При этом её длина изменяется с частотой 100 Гц. Величина удлинения зависит от приложенного напряжения и регулируется ручкой «Качание» на блоке питания. Обычно удлинение составляет несколько длин волн света. На эту величину перемещается вдоль пучка 1 зеркало З<sub>1</sub>. Интерференционная картина смещается на ширину полосы (одно колебание на экране осциллографа), если зеркало З<sub>1</sub> смещается на  $\lambda_0/2 \sim 0,3$  мкм. При измерениях через входную щель фотодиода последовательно проходит несколько полос интерференционной картины, а на экране осциллографа наблюдаются колебания с изменяющимся периодом.

### 3.2 Методика измерения

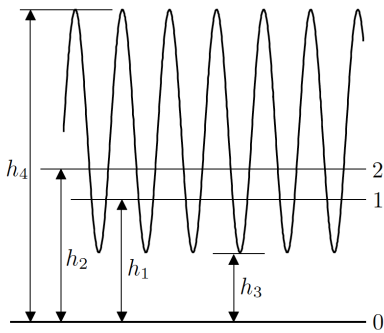


Рис. 2: Сигнал фотодиода на осциллографе

Осциллограф мы используем для нахождения следующих величин: фоновой засветки (линия 0 — перекрыты оба пучка 1 и 2); интенсивность света каждого из пучков (линии 1 или 2 — перекрыт пучок 2 или 1); максимума и минимума интенсивности интерференционной картины (открыты оба пучка). При этом параметр  $\delta$  из (3), определяется отношением

$$\delta = \frac{h_1}{h_2} \quad (7)$$

Понятно, что из физического смысла, наша видимость рассчитывается очевидным образом, согласно формуле (1), так:

$$V = \frac{h_4 - h_3}{h_4 + h_3} \quad (8)$$

Отсюда, используя (2), мы можем получить наши функции из (8), фиксируя одну из них (т.е. беря равной единице). Так, при  $\alpha = 0 \Rightarrow V_3 = 1$ ,

$$V_2(l) = \frac{V}{V_1} = \frac{h_4 - h_3}{h_4 + h_3} \cdot \frac{h_2}{h_1} \quad (9)$$

А приняв разность хода  $l = 0 \Rightarrow V_2 = 0$ , можно найти

$$V_3(\alpha) = \frac{V}{V_1} = \frac{h_4 - h_3}{h_4 + h_3} \cdot \frac{h_2}{h_1} \quad (10)$$

## 4 Ход работы

### 4.1 Изучение поляризации

Поворотами поляризатора П<sub>1</sub> убедимся, что свет от лазера — поляризованный. Настроив поляроид на минимальную видимость и введя дополнительный поляроид, мы вновь получаем

интерференционную картину при его поворотах. Интенсивность излучения при вращении поляроида меняется, что говорит о его **не хаотической** поляризации. При вращении также изменяется интерференционная картина, что говорит о **линейной или круговой** поляризации, а не хаотической.

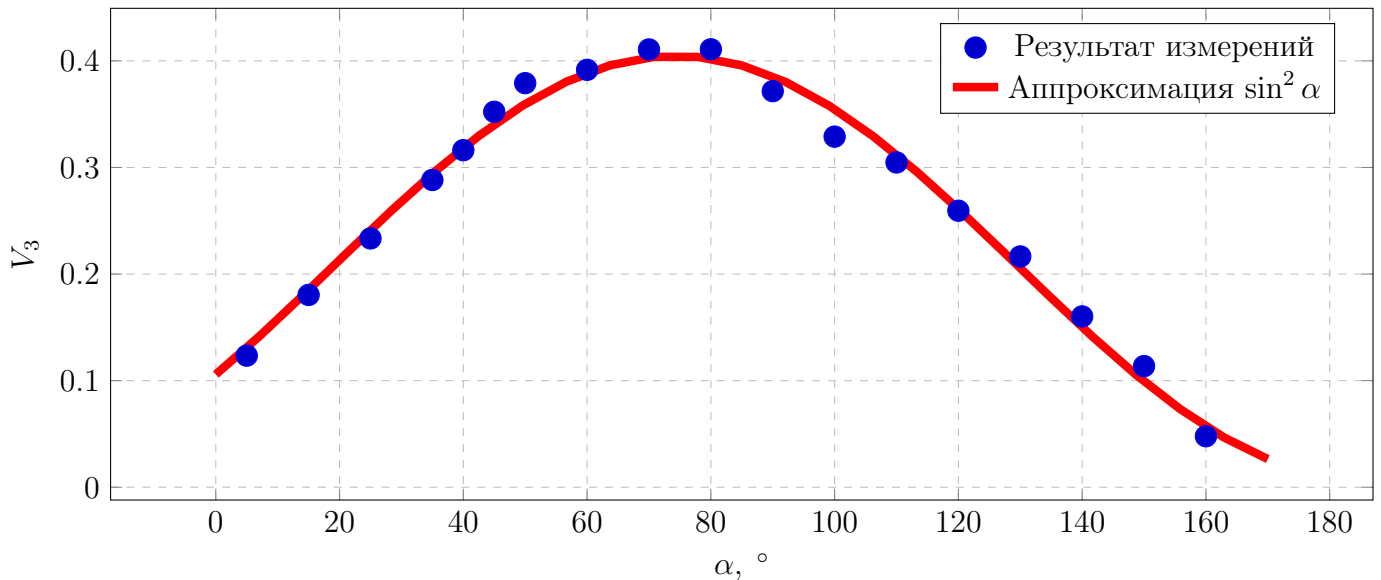
| $\alpha$ | $h_4$ | $h_3$ | $h_2$ | $h_1$ | $V$  | $\delta$ | $V_1$ | $V_3$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|----------|-------|-------|
| 5        | 32    | 25    | 16    | 13    | 0.12 | 0.81     | 0.99  | 0.12  |
| 15       | 33    | 23    | 16    | 12    | 0.18 | 0.75     | 0.99  | 0.18  |
| 25       | 37    | 23    | 16    | 15    | 0.23 | 0.94     | 1.00  | 0.23  |
| 35       | 38    | 21    | 16    | 15    | 0.29 | 0.94     | 1.00  | 0.29  |
| 40       | 34    | 18    | 16    | 10    | 0.31 | 0.63     | 0.97  | 0.32  |
| 45       | 35    | 17    | 16    | 11    | 0.35 | 0.69     | 0.98  | 0.35  |
| 50       | 35    | 16    | 16    | 11    | 0.37 | 0.69     | 0.98  | 0.38  |
| 60       | 29    | 14    | 16    | 6     | 0.35 | 0.38     | 0.89  | 0.39  |
| 70       | 28    | 13    | 16    | 6     | 0.37 | 0.38     | 0.89  | 0.41  |
| 80       | 27    | 13    | 16    | 5     | 0.35 | 0.31     | 0.85  | 0.41  |
| 90       | 24    | 13    | 16    | 4     | 0.30 | 0.25     | 0.80  | 0.37  |
| 100      | 24    | 14    | 16    | 4     | 0.26 | 0.25     | 0.80  | 0.33  |
| 110      | 22    | 14    | 16    | 3     | 0.22 | 0.19     | 0.73  | 0.30  |
| 120      | 22    | 15    | 16    | 3     | 0.19 | 0.19     | 0.73  | 0.26  |
| 130      | 22    | 16    | 16    | 3     | 0.16 | 0.19     | 0.73  | 0.22  |
| 140      | 22    | 17    | 16    | 4     | 0.13 | 0.25     | 0.80  | 0.16  |
| 150      | 23    | 19    | 17    | 5     | 0.10 | 0.29     | 0.84  | 0.11  |
| 160      | 24    | 22    | 17    | 7     | 0.04 | 0.41     | 0.91  | 0.05  |

Таблица 1: Измерение зависимости видности от угла

## 4.2 Измерение зависимости видности от угла

Исследуем зависимость видности интерференционной картины от угла  $\alpha$  поворота поляроида  $\Pi_1$  при нулевой разности хода ( $V_2 = 1$ ). Для этого измерим величины  $h_1, h_2, h_3$  и  $h_4$  на экране осциллографа. Результаты занесем в таблицу 1 и построим график согласно формуле (10). Значения для  $\delta, V, V_1$  получим из формул выше.

График 1 Измерение зависимости видности  $V_3$  от угла поляризации  $\alpha$



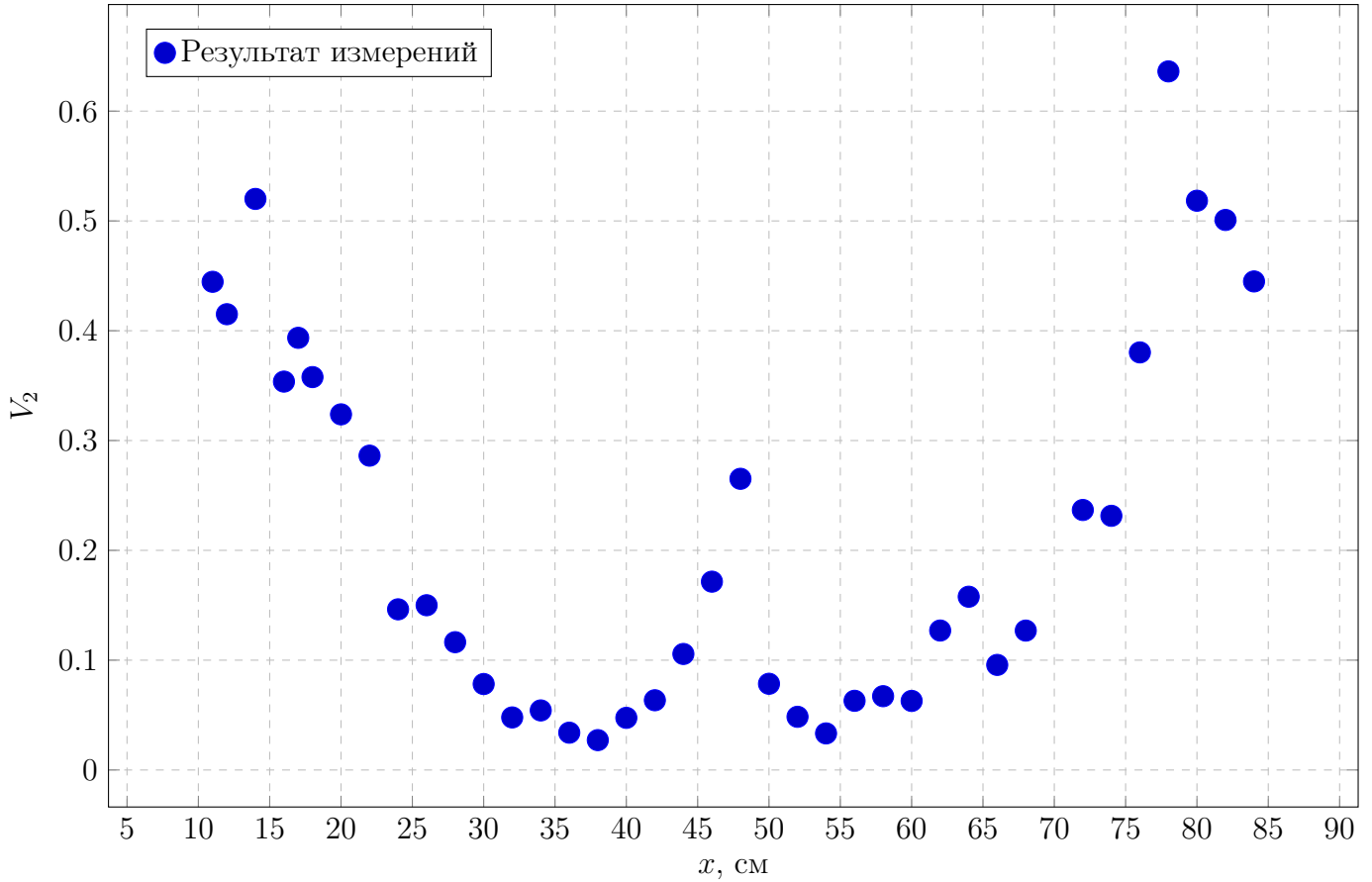
Из графика следует, что он приближается функцией  $\cos^2 \alpha$ . Это значит, что **поляризация — линейная**. Выполняется **закон Малюса**:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha$$

### 4.3 Измерение зависимости видности от дальности хода

Теперь установим  $\alpha$  на максимальную видность и будем перемещать блок  $B_2$ , тем самым изменяя дальность хода  $x$ . Аналогично предыдущему пункту измерим величины  $h_1, h_2, h_3$  и  $h_4$  на экране осциллографа. Результаты занесем в таблицу 2 и построим график согласно формуле (9). Значения для  $\delta, V, V_1$  получим из формул выше.

График 2 Измерение зависимости видности  $V_2$  от разности хода  $x$



Видно, что у нас наблюдается 2 максимума по краям области измерения и некоторые колебания в промежуточной области. А именно, максимумы в области  $x_1 \approx (14 \pm 2)$  см и в области  $x_2 \approx (78 \pm 2)$  см, откуда получаем следующий результат:

$$L = \frac{1}{2}(x_2 - x_1) = (32,0 \pm 1,4) \text{ см} \quad (11)$$

Отсюда нетрудно получить и значение  $\Delta\nu$  из формулы (5):

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \approx (4,7 \pm 0,2) \cdot 10^8 \text{ Гц} \quad (12)$$

Оценим  $l_{1/2} \approx (22 - 14) \text{ см} = (8 \pm 2) \text{ см}$ , откуда по формуле (5) получаем

$$2\Delta F = 2 \cdot \frac{0,26c}{l_{1/2}} \approx (19,5 \pm 4,9) \cdot 10^8 \text{ Гц} \quad (13)$$

| $x$ | $h_4$ | $h_3$ | $h_2$ | $h_1$ | $V$  | $\delta$ | $V_1$ | $V_2$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|----------|-------|-------|
| 11  | 18    | 7     | 6     | 8     | 0.44 | 1.33     | 0.99  | 0.44  |
| 12  | 16    | 7     | 4     | 8     | 0.39 | 2.00     | 0.94  | 0.42  |
| 14  | 28    | 9     | 11    | 8     | 0.51 | 0.73     | 0.99  | 0.52  |
| 16  | 37    | 18    | 17    | 11    | 0.35 | 0.65     | 0.98  | 0.35  |
| 17  | 39    | 17    | 18    | 16    | 0.39 | 0.89     | 1.00  | 0.39  |
| 18  | 39    | 19    | 19    | 11    | 0.34 | 0.58     | 0.96  | 0.36  |
| 20  | 33    | 17    | 15    | 11    | 0.32 | 0.73     | 0.99  | 0.32  |
| 22  | 37    | 21    | 19    | 11    | 0.28 | 0.58     | 0.96  | 0.29  |
| 24  | 33    | 25    | 22    | 11    | 0.14 | 0.50     | 0.94  | 0.15  |
| 26  | 27    | 20    | 14    | 11    | 0.15 | 0.79     | 0.99  | 0.15  |
| 28  | 24    | 19    | 12    | 11    | 0.12 | 0.92     | 1.00  | 0.12  |
| 30  | 28    | 24    | 16    | 11    | 0.08 | 0.69     | 0.98  | 0.08  |
| 32  | 35    | 32    | 23    | 11    | 0.04 | 0.48     | 0.94  | 0.05  |
| 34  | 30    | 27    | 18    | 11    | 0.05 | 0.61     | 0.97  | 0.05  |
| 36  | 32    | 30    | 21    | 11    | 0.03 | 0.52     | 0.95  | 0.03  |
| 38  | 19    | 18    | 8     | 10    | 0.03 | 1.25     | 0.99  | 0.03  |
| 40  | 13    | 12    | 3     | 10    | 0.04 | 3.33     | 0.84  | 0.05  |
| 42  | 17    | 15    | 7     | 10    | 0.06 | 1.43     | 0.98  | 0.06  |
| 44  | 27    | 22    | 17    | 10    | 0.10 | 0.59     | 0.97  | 0.11  |
| 46  | 29    | 21    | 17    | 8     | 0.16 | 0.47     | 0.93  | 0.17  |
| 48  | 30    | 18    | 16    | 8     | 0.25 | 0.50     | 0.94  | 0.27  |
| 50  | 21    | 18    | 12    | 8     | 0.08 | 0.67     | 0.98  | 0.08  |
| 52  | 22    | 20    | 13    | 9     | 0.05 | 0.69     | 0.98  | 0.05  |
| 54  | 16    | 15    | 6     | 10    | 0.03 | 1.67     | 0.97  | 0.03  |
| 56  | 17    | 15    | 9     | 7     | 0.06 | 0.78     | 0.99  | 0.06  |
| 58  | 16    | 14    | 9     | 7     | 0.07 | 0.78     | 0.99  | 0.07  |
| 60  | 17    | 15    | 10    | 8     | 0.06 | 0.80     | 0.99  | 0.06  |
| 62  | 18    | 14    | 10    | 7     | 0.13 | 0.70     | 0.98  | 0.13  |
| 64  | 15    | 11    | 11    | 7     | 0.15 | 0.64     | 0.97  | 0.16  |
| 66  | 19    | 16    | 13    | 5     | 0.09 | 0.38     | 0.90  | 0.10  |
| 68  | 36    | 29    | 26    | 8     | 0.11 | 0.31     | 0.85  | 0.13  |
| 72  | 21    | 13    | 10    | 8     | 0.24 | 0.80     | 0.99  | 0.24  |
| 74  | 16    | 10    | 6     | 7     | 0.23 | 1.17     | 1.00  | 0.23  |
| 76  | 28    | 13    | 14    | 8     | 0.37 | 0.57     | 0.96  | 0.38  |
| 78  | 22    | 5     | 8     | 6     | 0.63 | 0.75     | 0.99  | 0.64  |
| 80  | 22    | 7     | 7     | 8     | 0.52 | 1.14     | 1.00  | 0.52  |
| 82  | 24    | 8     | 9     | 8     | 0.50 | 0.89     | 1.00  | 0.50  |
| 84  | 28    | 11    | 12    | 8     | 0.44 | 0.67     | 0.98  | 0.44  |

Таблица 2: Измерение зависимости видности от разности хода

Тогда для числа одновременно генерируемых лазером продольных волн можно провести оценку:

$$N \approx 1 + \frac{2\Delta F}{\Delta\nu} \approx 5 \pm 1 \quad (14)$$

## 5 Вывод

- В ходе выполнения лабораторной работы была изучена поляризация излучения лазера. При этом было установлено, что при вращении поляроида интенсивность излучения меняется, что говорит о его не хаотической поляризации. При этом изменяется и интерференционная картина. По этим результатам можно предположить, что поляризация **линейная** или **круговая**.
- Затем была исследована зависимость видности интерференционной картины от угла поляроида  $\Pi_1$ . Из результатов измерений и аппроксимации следует, что зависимость приближается функцией  $\cos^2 \alpha$ . Это значит, что поляризация излучения — **линейная** согласно закону Малюса.
- В заключительной части работы была исследована зависимости видности интерференционной картины от разности хода. По полученным данным было оценено расстояние между максимумами, расстояние  $L$  между зеркалами оптического резонатора лазера, а также межмодовое расстояние  $\Delta\nu$ . Для этих величин были получены следующие результаты:

$$L = (32,0 \pm 1,4) \text{ см}$$

$$\Delta\nu = (4,7 \pm 0,2) \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

- Также по графику также было оценена полуширина  $l_{1/2}$ . При помощи этих данных было получен диапазон частот  $2\Delta F$ , в котором происходит генерация продольных мод, и приблизительное число мод. Были получены следующие результаты:

$$l_{1/2} = (8 \pm 2) \text{ см}$$

$$2\Delta F = (19,5 \pm 4,9) \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

$$N = 5 \pm 1$$

- Основной вклад в погрешность в ходе выполнения работы могла внести ошибка при определении продольного сдвига второго зеркального блока. Также не всегда было реальным точное измерение максимумов напряжений по показаниям осциллографа в силу их изменения во времени.