

## 4.5.2. Интерференция лазерного излучения

Балдин Виктор

Группа Б01-303

**Цель работы:** исследовать зависимость видности интерференционной картины от разности хода интерферирующих лучей и от их поляризации.

**В работе используются:** He-Ne лазер, интерферометр Майкельсона с подвижным зеркалом, фотодиод с усилителем, осциллограф С1-76, поляроид, линейка.

### Теория

#### Гелий-неоновый лазер

Лазер представляет собой интерферометр Фабри-Перо – газовую трубку с двумя параллельными зеркалами по обе стороны. В лазере длиной  $L$  для излучения вдоль оси для резонансных частот выполняется

$$f_m = \frac{c}{\lambda_m} = \frac{mc}{2L}. \quad (1)$$

Условие генерации может выполняться для сразу нескольких колебаний с частотами  $f_m$ , расположенными в диапазоне генерации  $2\Delta F$ . В этом случае генерируется несколько волн – мод – межмодовое расстояние для которых

$$\Delta\nu = f_{m+1} - f_m = \frac{c}{2L}. \quad (2)$$

Число мод можно оценить как

$$N \approx 1 + \frac{2\Delta F}{\Delta\nu}. \quad (3)$$

#### Видимость

Видимость интерференционной картины – параметр, определяемый формулой

$$\gamma = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (4)$$

где  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  – максимальная и минимальная интенсивности света интерференционной картины вблизи выбранной точки. Разобьём его на произведение функций параметров установки

$$\gamma = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3.$$

Здесь  $\gamma_1$  отвечает за соотношение интенсивности интерферирующих волн:

$$\gamma_1 = \frac{2\sqrt{\delta}}{1 + \delta}, \quad (5)$$

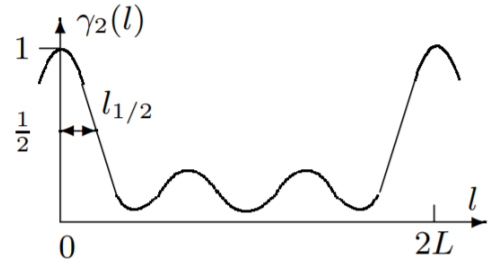
где  $\delta = \frac{B_m^2}{A_m^2}$ ,  $A_m$  и  $B_m$  – амплитуды волн. Параметр  $\delta$  определяется устройством разделения волн.

Функция  $\gamma_2$  отвечает за влияние разности хода и спектрального состава волн,

$$\gamma_2 = \frac{\sum_n A_n^2 \cos \frac{2\pi\Delta\nu n l}{c}}{\sum_n A_n^2},$$

где  $l$  – разность хода,  $\Delta\nu$  – спектральный состав излучения,  $A_n^2$  – интенсивности мод. В непрерывном пределе получим

$$\gamma_2 = e^{-\left(\frac{\pi\Delta F l}{c}\right)^2}$$



– для гауссова линии излучения с полушириной  $\Delta F$  получили гауссову зависимость  $\gamma_2 = \gamma_2(l)$  с полушириной

$$l_{1/2} = \frac{c}{\pi\Delta F} \sqrt{\ln 2} \approx \frac{0.26c}{\Delta F}. \quad (6)$$

Последняя функция  $\gamma_3$  отвечает за разность в поляризации. Если  $\alpha$  – угол между плоскостями поляризаций волн, то

$$\gamma_3 = |\cos \alpha|. \quad (7)$$

## Установка

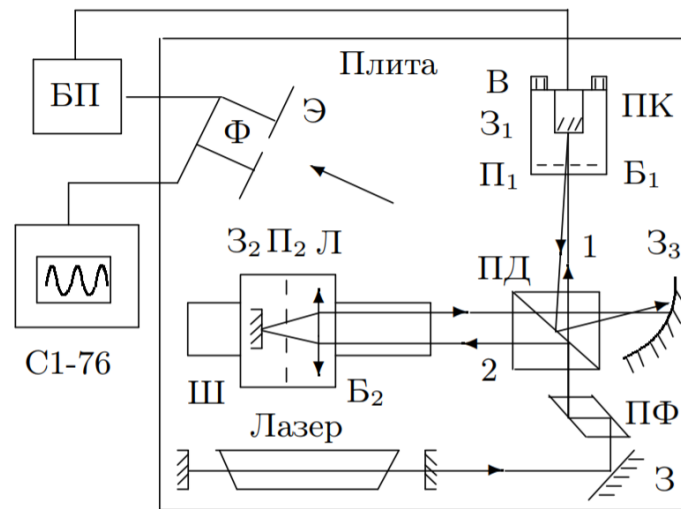


Рис. 2: Схема установки.

В работе используется интерферометр Майкельсона (Рис. 2). Луч лазера, отражённый от зеркала 3 и прошедший через параллелепипед Френеля (ПФ), делится делительной призмой ДП на два луча. Первый проходит блок  $B_1$  с поляризатором  $P_1$  и зеркалом  $Z_1$ , приклеенным к пьезокерамике, которая может совершать малые колебания вдоль луча, с возможностью изменения угла наклона зеркала. Второй проходит блок  $B_2$  с линзой  $L$ , поляризатором  $P_2$  и зеркалом  $Z_2$  в фокальной плоскости линзы, чтобы выходящий луч, в отличие от первого, был параллелен входящему. Оба луча, проходя ДП, попадают на

сферическое зеркало  $Z_3$  и интерферируют на экране. Интенсивность света считывается фотодиодом на осциллограф через щель, параллельную интерференционным полосам, в центре экрана. На экране осциллографа наблюдаются колебания с изменяющимся периодом, так как на пьезокерамику подаются напряжение, из-за чего её длина колеблется.

По картине на экране осциллографа можно определить параметры видимости по следующим формулам:

$$\delta = \frac{h_1}{h_2}, \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{h_4 - h_3}{h_4 + h_3}, \quad (9)$$

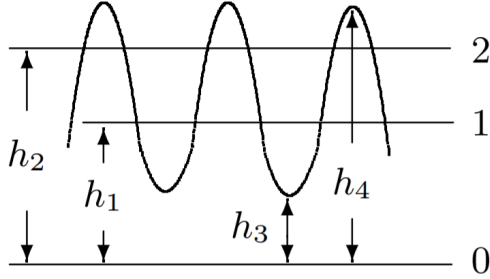


Рис. 3: Осциллограмма сигналов фотодиода.

Здесь 0 – уровень при отсутствии лучей, 1 и 2 – при закрытии одного из них. Используя  $\delta$ , можно рассчитать  $\gamma_1$  по формуле (5).

При условии одинаковой поляризации лучей ( $\alpha = 0$ ),

$$\gamma_2 = \frac{\gamma}{\gamma_1}. \quad (10)$$

Если же разность хода отсутствует ( $l = 0$ ), то

$$\gamma_3 = \frac{\gamma}{\gamma_1}. \quad (11)$$

## Ход работы

Пронаблюдаем интерференционную картину на экране. Поставим дополнительный поляроид между лазером и ПФ, вращая его, наблюдаем, что поляризация линейная. Перенесём поляроид и поставим его на пути луча, выходящего из ПФ. Наблюдаем, что теперь у луча круговая поляризация. Установим минимальную чёткость интерференционной картину вращением  $\Pi_1$ . Внесём дополнительный поляроид на пути луча, идущего на экран, – интерференционная картина вновь возникает из-за поляризованности света, так как после прохождения второго поляроида два луча будут иметь одну поляризацию, задаваемую поляроидом.

Исследуем зависимость видности интерференционной картина от угла  $\alpha$  между плоскостями поляризации интерферирующих лучей. В нашем случае  $\alpha$  – угол поворота поляроида  $\Pi_1$ . Результаты измерений представлены в Таблице 1. При подсчётах были использованы формулы (8), (5), (9) и (11). Погрешность измерения угла приборная  $\sigma_\alpha = 1^\circ$ , погрешность измерения всех  $h$  – половина цены деления  $\sigma_{h_i} = 0.1$  дел. Для  $\gamma_3$  погрешность вычисляется по формуле

$$\sigma_{\gamma_3} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial \gamma_3}{\partial h_i} \right)^2 \sigma_{h_i}^2}.$$

Представим результаты на графике  $\gamma_3 = \gamma_3(\cos \alpha)$  (Рис. 4), убеждаемся в верности теоретической зависимости (7). На графике для  $\alpha = 0$  значение  $\gamma_3$  было принято за 1, а все остальные  $\gamma_3$  поделены на полученное для  $\alpha = 0$ , чтобы исключить влияние  $\gamma_2$  на результат.

| $\alpha$ | $h_1$ , дел | $h_2$ , дел | $h_3$ , дел | $h_4$ , дел | $\gamma_3$ | $\sigma_{\gamma_3}$ |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|---------------------|
| 0        | 2.6         | 1.8         | 0.6         | 3.8         | 0.74       | 0.18                |
| 10       | 2.8         | 1.5         | 0.6         | 3.7         | 0.76       | 0.18                |
| 20       | 3.0         | 1.6         | 0.8         | 3.9         | 0.69       | 0.18                |
| 30       | 3.0         | 1.5         | 0.9         | 3.6         | 0.64       | 0.18                |
| 40       | 2.4         | 1.4         | 0.8         | 3.0         | 0.60       | 0.17                |
| 50       | 2.0         | 1.4         | 0.8         | 2.6         | 0.54       | 0.16                |
| 60       | 1.2         | 1.4         | 0.8         | 1.8         | 0.39       | 0.15                |
| 70       | 0.6         | 1.2         | 0.8         | 1.3         | 0.25       | 0.15                |
| 80       | 1.1         | 3.1         | 3.8         | 4.8         | 0.13       | 0.16                |
| 90       | 1.0         | 3.0         | 3.6         | 4.2         | 0.09       | 0.16                |
| 100      | 1.2         | 3.0         | 3.0         | 4.2         | 0.18       | 0.16                |
| 110      | 1.7         | 2.7         | 1.2         | 2.0         | 0.26       | 0.15                |
| 120      | 2.6         | 2.8         | 1.5         | 2.8         | 0.30       | 0.15                |
| 130      | 3.4         | 2.8         | 1.7         | 3.4         | 0.33       | 0.15                |
| 140      | 3.2         | 2.8         | 1.4         | 3.4         | 0.42       | 0.15                |

Таблица 1: Результаты измерений для  $\gamma_3 = \gamma_3(\alpha)$ .

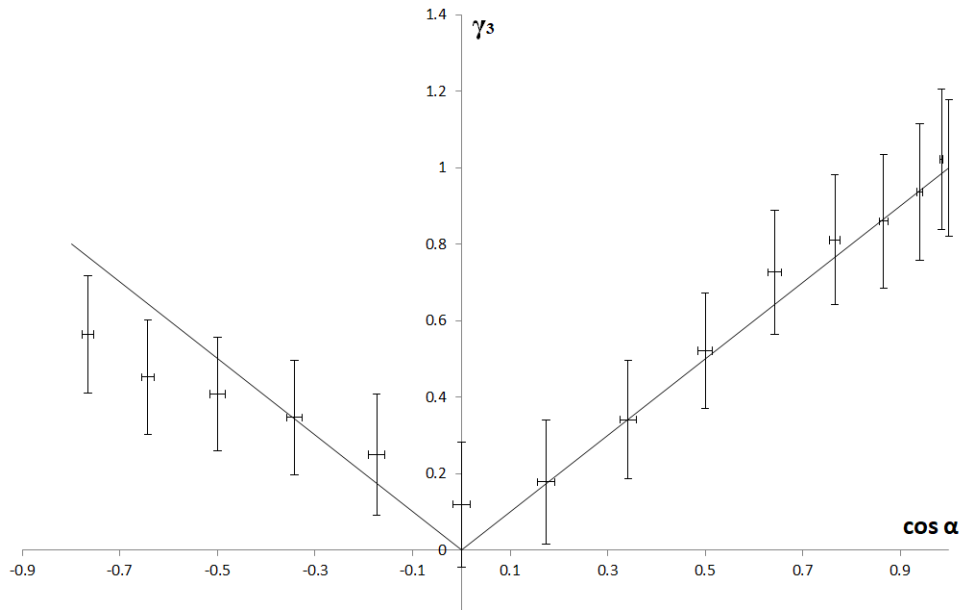


Рис. 4: Зависимость  $\gamma_3 = \gamma_3(\cos \alpha)$ .

Теперь исследуем зависимость видимости интерференционной картины от разности хода между лучами. Для этого будем перемещать блок Б<sub>2</sub> вдоль направления распространения луча, координата блока  $x$  будет определять разность хода. Значения измерений представлены в Таблице 2, а так же на графике (Рис. 5).

На графике явно видны два максимума – на  $x_1 = 14 \pm 2$  см и на  $x_2 = 76 \pm 2$  см. Тогда  $L = \frac{1}{2}(x_2 - x_1) = 31.0 \pm 1.4$  см. Отсюда из формулы (2)

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} = (48 \pm 2) \cdot 10^7 \text{ Гц.}$$

Погрешность считается из соотношения  $\varepsilon_{\Delta\nu} = \varepsilon_L$ . Полуширина кривой из графика

$$l_{1/2} \approx 10 \pm 2 \text{ см,}$$

откуда по формуле (6)

$$\Delta F = \frac{0.26c}{l_{1/2}} = (78 \pm 16) \cdot 10^7 \text{ Гц.}$$

Погрешность считается аналогично  $\Delta\nu$ . Тогда по формуле (3) число мод

$$N = 1 + \frac{2\Delta F}{\Delta\nu} = 4 \pm 1,$$

погрешность рассчитана по формуле

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial \Delta F}\right)^2 \sigma_{\Delta F}^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial \Delta \nu}\right)^2 \sigma_{\Delta \nu}^2}$$

с округлением до целых.

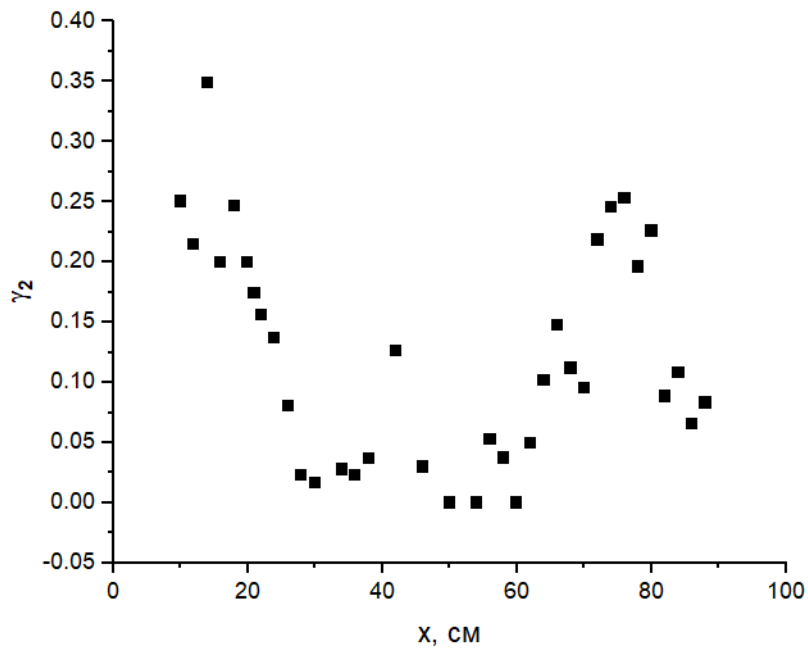


Рис. 5: Зависимость  $\gamma_2 = \gamma_2(x)$ .

| $x$ , см | $h_1$ , дел | $h_2$ , дел | $h_3$ , дел | $h_4$ , дел | $\gamma_2$ |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 10       | 2.2         | 2.4         | 2.4         | 4.0         | 0.25       |
| 12       | 2.3         | 0.8         | 2.6         | 3.8         | 0.21       |
| 14       | 2.2         | 1.2         | 2.3         | 4.6         | 0.35       |
| 16       | 2.2         | 3.2         | 4.7         | 7.0         | 0.20       |
| 18       | 2.2         | 1.2         | 2.6         | 4.2         | 0.25       |
| 20       | 2.2         | 2.2         | 3.6         | 5.4         | 0.20       |
| 21       | 2.2         | 2.2         | 3.8         | 5.4         | 0.17       |
| 22       | 2.2         | 2.2         | 3.8         | 5.2         | 0.16       |
| 24       | 2.2         | 2.0         | 3.8         | 5.0         | 0.14       |
| 26       | 2.2         | 3.9         | 4.8         | 5.6         | 0.08       |
| 28       | 2.2         | 2.0         | 4.2         | 4.4         | 0.02       |
| 30       | 2.2         | 1.0         | 3.2         | 3.3         | 0.02       |
| 34       | 2.2         | 1.4         | 3.6         | 3.8         | 0.03       |
| 36       | 2.2         | 2.0         | 4.2         | 4.4         | 0.02       |
| 38       | 2.2         | 0.8         | 3.0         | 3.2         | 0.04       |
| 42       | 2.2         | 0.6         | 2.6         | 3.2         | 0.13       |
| 46       | 2.2         | 1.2         | 3.4         | 3.6         | 0.03       |
| 50       | 2.2         | 0.8         | 3.0         | 3.0         | 0.00       |
| 54       | 2.4         | 0.2         | 2.4         | 2.4         | 0.00       |
| 56       | 2.4         | 0.4         | 2.6         | 2.8         | 0.05       |
| 58       | 2.4         | 0.8         | 3.0         | 3.2         | 0.04       |
| 60       | 2.4         | 0.6         | 3.0         | 3.0         | 0.00       |
| 62       | 2.4         | 0.4         | 2.8         | 3.0         | 0.05       |
| 64       | 2.4         | 0.4         | 2.6         | 3.0         | 0.10       |
| 66       | 2.4         | 0.4         | 2.6         | 3.2         | 0.15       |
| 68       | 2.4         | 0.8         | 2.8         | 3.4         | 0.11       |
| 70       | 2.4         | 0.4         | 2.8         | 3.2         | 0.10       |
| 72       | 2.4         | 0.6         | 2.6         | 3.7         | 0.22       |
| 74       | 2.4         | 0.8         | 2.6         | 4.0         | 0.24       |
| 76       | 2.5         | 1.0         | 2.7         | 4.3         | 0.25       |
| 78       | 2.8         | 1.2         | 3.2         | 4.6         | 0.20       |
| 80       | 2.4         | 2.4         | 3.6         | 5.7         | 0.23       |
| 82       | 3.2         | 1.6         | 4.4         | 5.2         | 0.09       |
| 84       | 3.4         | 1.0         | 4.0         | 4.8         | 0.11       |
| 86       | 3.4         | 1.6         | 4.6         | 5.2         | 0.07       |
| 88       | 3.4         | 2.2         | 3.4         | 4.0         | 0.08       |

Таблица 2: Результаты измерений для  $\gamma_2 = \gamma_2(x)$ .