

## 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:

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

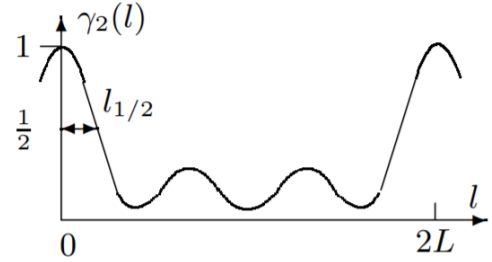
где  $\delta = \frac{B_m^2}{A_m^2}$ ,  $A_m$  и  $B_m$  – амплитуды волн. Параметр  $\delta$  определяется устройством разделения волн.

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

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

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

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



– 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

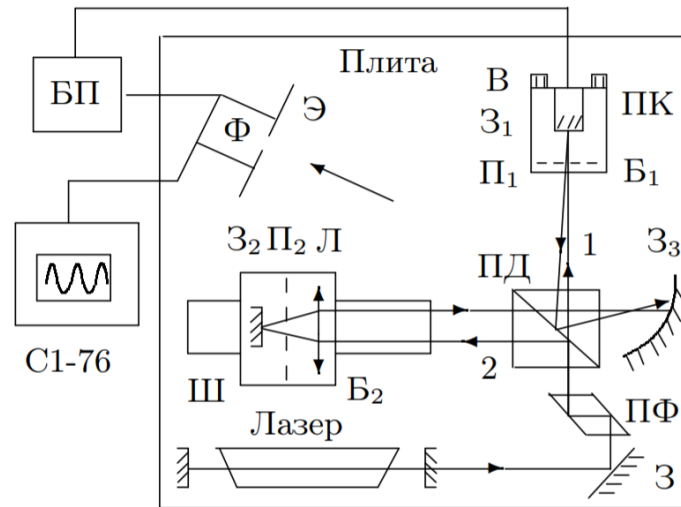


Рис. 2: Схема установки.

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 поляридом  $P_1$  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  $L$ , поляридом  $P_2$  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:

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

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

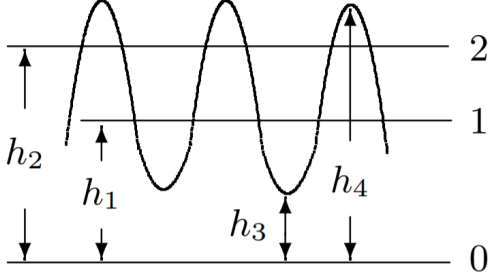


Рис. 3: Осциллограмма сигналов фотодиода.

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  $\gamma_3 = \gamma_3(\alpha)$ .

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.

## Выводы

Точки графика  $\gamma_3(\cos^2 \alpha)$  намного лучше ложатся на прямую, чем точки графика  $\gamma_3(\cos \alpha)$ . Это связано с хаотически меняющимся направлением линейной поляризации источника. Действительное значение расстояния между зеркалами составляет 65 см, что в два раза больше полученного нами. По рис. 3 можно предположить, что число мод равно 3.

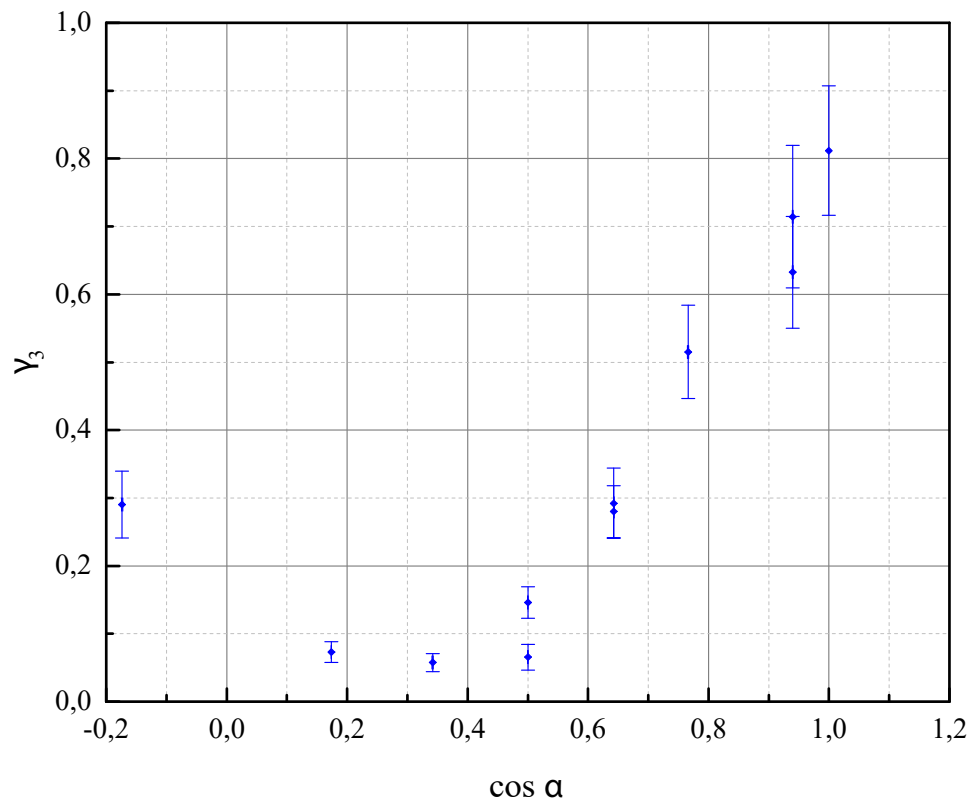


Рис. 4: Зависимость  $\gamma_3 = \gamma_3(\cos \alpha)$ .

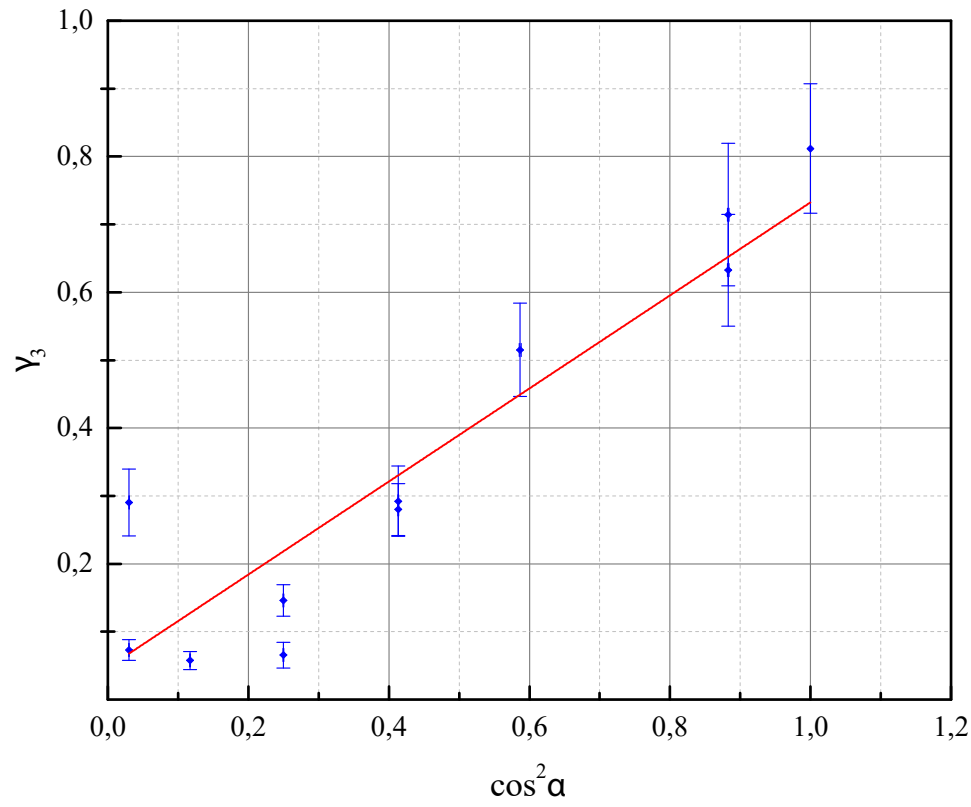


Рис. 5: Зависимость  $\gamma_3 = \gamma_3(\cos^2 \alpha)$ .

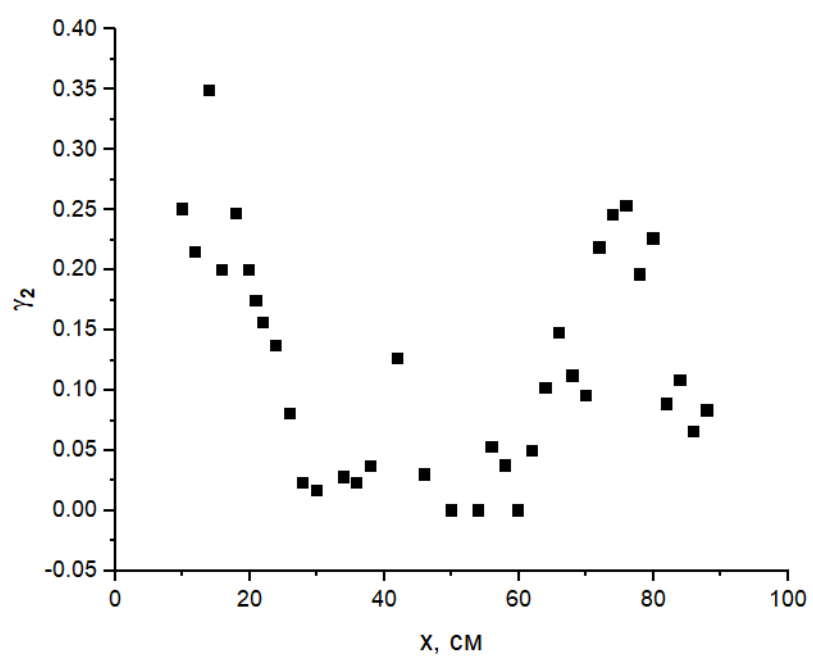


Рис. 6: Зависимость  $\gamma_2 = \gamma_2(x)$ .

$x$ , 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  $\gamma_2 = \gamma_2(x)$ .