

## ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ОПЫТЕ С БИПРИЗМОЙ ФРЕНЕЛЯ

**Цель работы** – изучение интерференции света в опыте с бипризмой Френеля. Оценка длины волны лазерного излучения и преломляющего угла бипризмы.

### 1. Теоретические основы работы

*Интерференцией* называют явление перераспределения энергии световых волн в пространстве, возникающее при наложении двух или более *когерентных*<sup>1</sup> волн. В результате интерференции возникает картина, представляющая собой чередование максимумов и минимумов интенсивности света.

Две когерентные волны можно получить двумя способами – *делением фронта* исходной волны и *делением* ее *амплитуды*. И в том и в другом случае исходную волну разделяют на две (которые являются когерентными) и затем сводят их в месте в некоторой области пространства. В результате в этой области возникает интерференционная картина.

Одним из устройств, с помощью которого осуществляется деление фронта волны на две части, является бипризма Френеля. Оптическая схема наблюдения интерференционной картины при помощи бипризмы Френеля показана на рис. 1. Бипризма Френеля представляет собой изготовленные из одного куска стекла две симметричные призмы  $I$ , имеющие общее основание и малый преломляющий угол. На расстоянии  $L_1$  от бипризмы располагается либо ярко освещенная щель, устанавливаемая параллельно ребру бипризмы, либо точечный источник света  $S$  (см. рис. 1).

Можно показать<sup>2</sup>, что в случае, когда преломляющий угол призмы мал и лучи падают на призму под малыми углами, все лучи отклоняются призмой практически на одинаковый угол  $\varphi$

$$\varphi = (n - 1) \theta, \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма;  $\theta$  – преломляющий угол призмы.

Каждая половина бипризмы отклоняет проходящие через нее лучи на угол  $\varphi$  в направлении к оптической оси, в результате чего образуются две когерентные расходящиеся волны. Эти волны накладываются друг на друга и в области их наложения, которая называется полем интерференции, возникает интерференция. Лучи, преломленные каждой из половинок бипризмы, кажутся выходящими из двух источников  $S_1$  и  $S_2$  (на самом деле – это мнимые изображения источника  $S$ ), которые находятся в одной плоскости с реальным источником света  $S$ . Как видно на рис. 1, расстояние  $d$  между мнимыми источниками:

$$d = 2L_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi \approx 2L_1 \cdot \sin\varphi \quad (2)$$

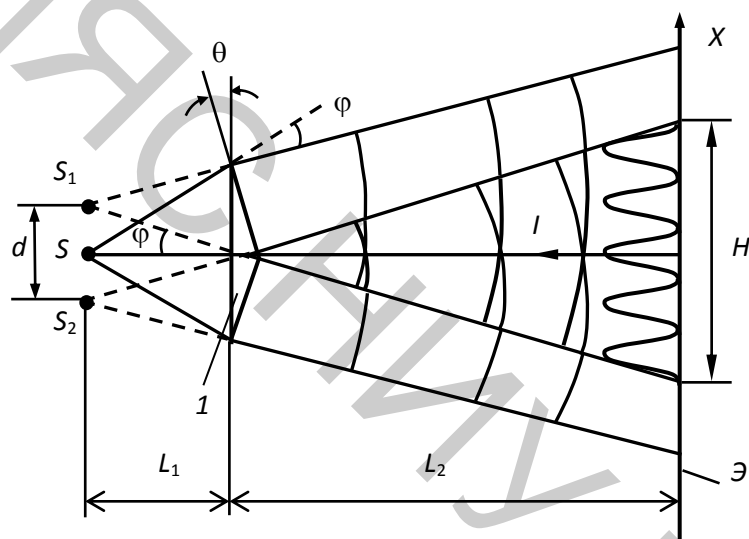


Рис. 1. Схема наблюдения интерференции с помощью бипризмы Френеля

Интерференционную картину наблюдают на экране  $\mathcal{E}$ , расположенном параллельно ребру бипризмы на некотором удалении от нее. Интерференционная картина имеет вид чередующихся параллельных светлых и темных полос. На рис. 1 интерференционная картина представлена графиком зависимости интенсивности света  $I$  от координаты  $x$  на экране. Интенсивность максимальна в центре светлой полосы и минимальна в центре темной полосы. Ширина интерференционной картины  $H$  зависит от расстояния между бипризмой и экраном.

Рассчитаем интерференционную картину, полученную с помощью бипризмы Френеля. Для определения *оптической разности хода*<sup>3</sup> рассмотрим рис. 2. Здесь  $r_1$  и  $r_2$  – длины геометрических путей волн от соответствующих мнимых источников в точку наблюдения. В силу  $d \ll L$  точка наблюдения видна из  $S_1$  и  $S_2$  почти под одним и тем же углом  $\alpha$ . Оптическая разность хода

$$\Delta = r_2 - r_1 \approx d \cdot \sin \alpha \approx d \cdot \operatorname{tg} \alpha = d \frac{x}{L}. \quad (3)$$

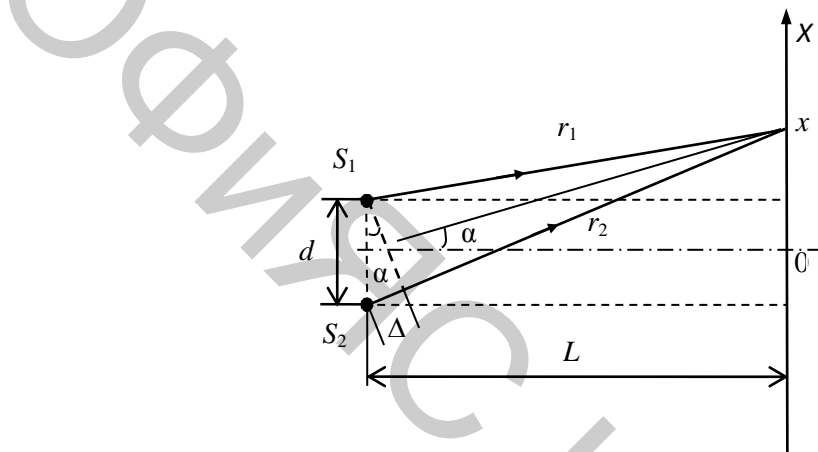


Рис. 2. К расчету координат интерференционных минимумов и максимумов

Условием интерференционных **максимумов** является соотношение:

$$\Delta = m\lambda, \quad (4)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  и называется *порядком максимума*, а  $\lambda$  – длина световой волны. Из соотношений (3) и (4) получим координаты максимумов интенсивности:

$$x_m = m \frac{L}{d} \lambda; \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (5)$$

Аналогично, условие минимума

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} + m\lambda \quad (6)$$

даёт координаты минимумов интенсивности на экране

$$x_m = \left( m + \frac{1}{2} \right) \frac{L}{d} \lambda; \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (7)$$

Назовем расстояние между двумя соседними минимумами интенсивности шириной интерференционной полосы, а расстояние между двумя соседними максимумами интенсивности расстоянием между интерференционными полосами  $\Delta x$ . Из формул (5) и (7) следует, что и ширина полосы и расстояние между полосами одинаковы и равны

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \lambda \frac{L}{d}. \quad (8)$$

Из формулы (8) можно определить длину световой волны  $\lambda$ , если измерить расстояние между интерференционными полосами (либо ширину интерференционной полосы)  $\Delta x$ , расстояние  $d$  между мнимыми источниками  $S_1$  и  $S_2$  и расстояние  $L$  от мнимых источников до плоскости формирования интерференционной картины (экрана):

$$\lambda = \frac{\Delta x d}{L}. \quad (9)$$

Используя экспериментальные данные, можно определить также преломляющий угол бипризмы  $\theta$ . Из (1) и (2) с учетом того, что при малых углах преломления  $\sin \varphi \approx \varphi$ , получаем

$$\theta = \frac{d}{2L_1(n-1)}, \quad (10)$$

где  $d$  – расстояние между мнимыми источниками;  $L_1$  – расстояние от плоскости, в которой расположены мнимые источники, до бипризмы;  $n$  – показатель преломления стекла бипризмы.

Для определения расстояния  $d$  между мнимыми источниками, можно с помощью собирающей линзы (рис. 3) получить на экране изображения мнимых источников  $S'_1$  и  $S'_2$  (это два действительных изображения источника  $S$ ). Далее можно измерить расстояние  $d'$  между ними и с учетом увеличения линзы получить, что

$$d = \frac{d' a}{b}. \quad (11)$$

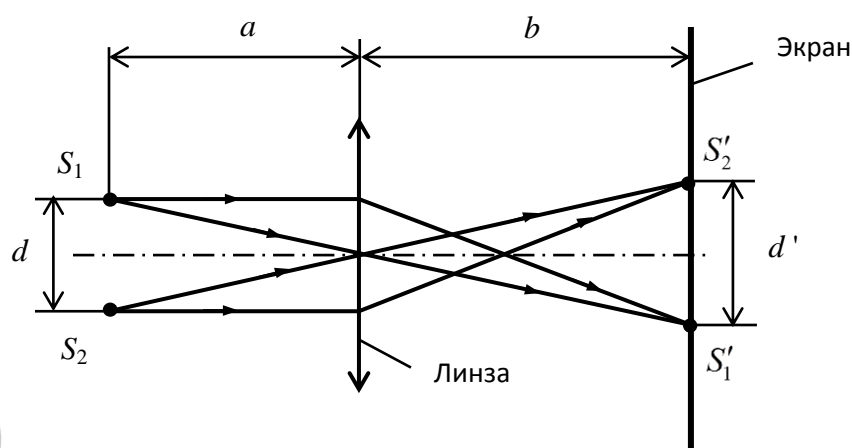


Рис. 3. К расчету расстояния между мнимыми источниками

Расстояния  $a$  и  $b$  измеряются при помощи линейки, закрепленной на оптическом рельсе стенда; расстояние  $d'$  – с помощью шкалы, нанесенной на экран.

## 2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка собрана на базе лабораторного оптического комплекса ЛОК–1М. Схемы опытов по определению ширины интерференционной полосы и расстояния между мнимыми источниками приведены соответственно на рис. 4 и рис. 5. Пучок света, выходящий из лазера 1 (рис. 4), линзой 2 собирается в ее фокусе, расположенном в плоскости экрана с отверстием 3. Линза 2 и экран 3 с отверстием закреплены в общем держателе. Бипризма 4, установленная в кассете держателя, преломляет световой пучок и разделяет фронт волны на две части. Интерференционная картина 5 наблюдается на экране 6.

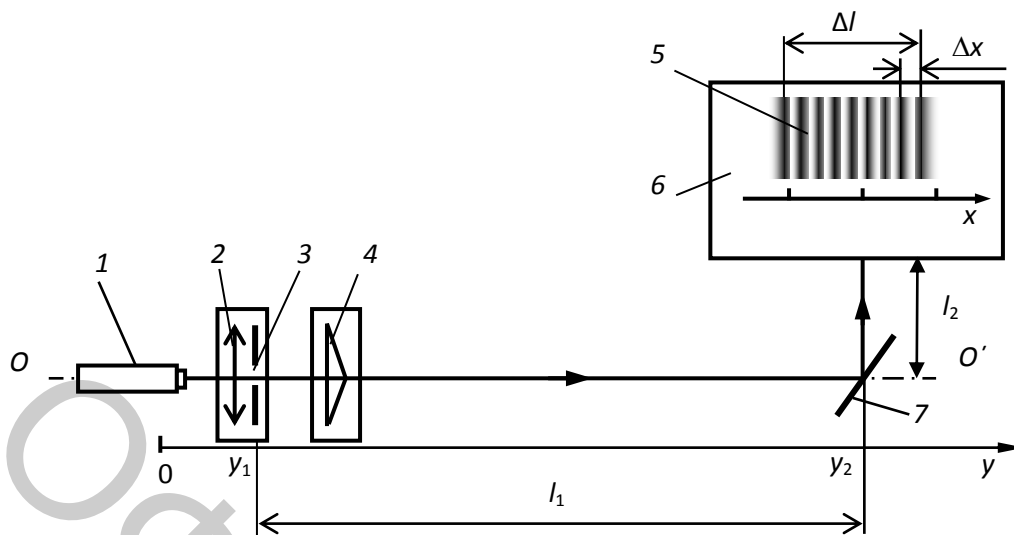


Рис.4. Схема опыта по определению ширины интерференционной полосы

Для удобства наблюдения интерференционной картины используют поворотное зеркало 7, а экран 6 располагают параллельно оптической оси  $OO'$  установки.

В опыте по определению расстояния между мнимыми источниками на оптическом рельсе устанавливается линза 8 (рис. 5) и ослабитель интенсивности излучения 9, который необходим для устранения «ореола» вокруг изображения мнимых источников на экране.

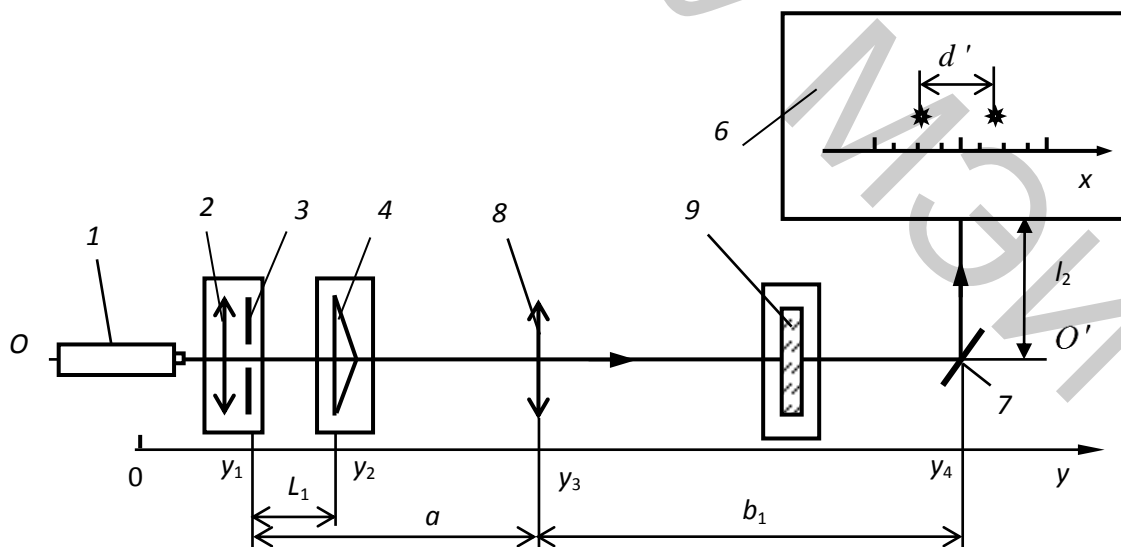


Рис. 5. Схема опыта по определению расстояния между мнимыми источниками

### 3. Порядок выполнения работы

Заполните таблицу спецификации измерительных приборов:

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов

Название прибора и его тип	Пределы измерения	Цена деления	Инструментальная погрешность

#### *Задание 1. Определение ширины интерференционных полос*

Определение ширины интерференционных полос производится в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.

1. Включите лазер 1. С помощью юстировочных винтов на держателе зеркала 7 добейтесь, чтобы луч лазера после отражения от зеркала попадал в центр экрана 6.

2. На оптический рельс на расстоянии 4 – 5 см от лазера 1 установите держатель с линзой 2 и экраном 3. Справа от экрана 3 на расстоянии 3 – 4 см установите держатель с бипризмой 4. Перемещая линзу 2 в держателе в горизонтальной плоскости поперек оптической оси, выведите центр общего основания двух призм (ребро бипризмы) на середину интенсивной части светового пучка и получите на экране 6 интерференционную картину.

3. Передвигая бипризму вдоль рельса, получите отчетливую интерференционную картину на экране 6. При расстоянии  $L_1$  между плоскостью экрана 3 и бипризмой 4 около 3 см на экране должно быть не менее 7 полос на отрезке длиной 10 мм.

4. Измерьте расстояние  $L$  между плоскостью расположения мнимых источников и экраном 6 (рис. 4). Расстояние  $L = l_1 + l_2$ , где  $l_1$  – расстояние от метки на держателе линзы 4 до метки на держателе зеркала 7;  $l_2$  – расстояние от зеркала 7 до экрана 6.

5. Определите ширину интерференционных полос  $\Delta x$ . Для этого на экране  $b$ , посчитайте количество  $m$  светлых полос, уместяющихся на нескольких отрезках  $\Delta l$  (рекомендуемые значения  $\Delta l = 10; 15; \text{ и } 20$  мм). Результаты измерений запишите в табл. 2.

Определите значения ширины интерференционных полос по формуле  $\Delta x = \Delta l / (m - 1)$ .

Найдите среднее значение  $\Delta x$ .

Табл. 2. Измерение расстояния между интерференционными полосами

$\Delta l$ , мм	Число светлых полос $m$	$\Delta x$ , мм
10		
15		
20		
Среднее значение $\Delta x_{\text{ср}}$		

*Задание 2. Определение расстояния между изображениями мнимых источников*

Определение расстояния между изображениями мнимых источников производится в соответствии со схемой, представленной на рис. 5.

1. Измерьте расстояние  $L_1 = y_2 - y_1$  между плоскостью расположения мнимых источников и бипризмой.

2. Не изменяя расстояния  $L_1$  между экраном 3 и бипризмой, 4 установите линзу 8 и ослабитель 9 на оптический рельс.

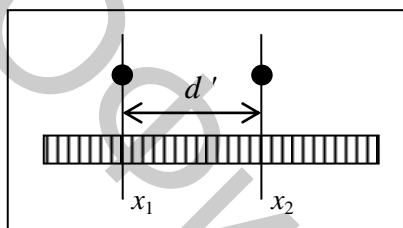
3. Перемещая линзу 8 вдоль оптического рельса, получите четкое увеличенное изображение мнимых источников на экране 6 и измерьте координаты  $x_2$  и  $x_1$ . Результаты измерений запишите в табл. 3.

4. Измерьте расстояние  $a$  между экраном 3 и линзой 8 и расстояние  $b$  между линзой 8 и экраном 6 ( $b = b_1 + l_2$ ). Расстояние  $l_2$  между зеркалом 7 и экраном 6 задано.



5. Незначительным смещением линзы 8 вдоль оптической оси вправо или влево расфокусируйте изображения мнимых источников. Затем вновь восстановите их четкие изображения и повторите измерения.

Табл. 3. Измерение координат изображений мнимых источников



$x_2$ , мм	$x_1$ , мм	$d'$ , мм
Среднее значение $d'_{\text{ср}}$		

#### 4. Обработка результатов измерений

1. Используя данные табл. 3 рассчитайте расстояния между изображениями мнимых источников  $d' = x_2 - x_1$  и определите среднее значение.
2. По формуле (11) рассчитайте расстояние  $d$  между мнимыми источниками.
3. По формуле (9) рассчитайте длину волны лазерного излучения.
4. Рассчитайте погрешность определения длины волны лазерного излучения и запишите результат в стандартной форме.
5. Принимая показатель преломления стекла бипризмы  $n = 1,51$ , определите по формуле (10) преломляющий угол бипризмы  $\theta$ .

## 5. Контрольные вопросы и задачи

1. Постройте ход лучей в опыте с бипризмой Френеля. Объясните происхождение минимумов и максимумов.
2. Постройте ход лучей в опыте с бипризмой Френеля. Поясните, чем определяется ширина интерференционной полосы.
3. Постройте ход лучей в опыте с бипризмой Френеля. Поясните, как образуются два когерентных источника.
4. Условия минимумов и максимумов интерференции двух волн. Оптическая длина пути, оптическая разность хода.
5. Какие источники света называют монохроматическими? Связь между разностью фаз и разностью хода двух световых волн.
6. Что такое интерференция света? Условия наблюдения интерференции. Какие источники излучения называют когерентными?
7. Оптическая разность хода двух интерферирующих лучей монохроматического света  $\Delta = \lambda/3$ . Определите разность фаз колебаний.
8. Два когерентных источника испускают свет с длиной волны  $\lambda = 400$  нм. Какой будет результат интерференции, если разность хода  $\Delta = 2$  мкм?
9. Два когерентных источника, расположенных на одинаковом расстоянии  $L = 4$  м от экрана испускают монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 400$  нм. Расстояние между источниками  $d = 1$  мм. Найдите расстояние между соседними максимумами освещенности.

## 7. Примечания

<sup>1</sup> **Когерентностью** называется согласованное протекание волновых или колебательных процессов. Так, две монохроматические волны когерентны, если их частоты совпадают, а разность фаз не зависит от времени. Для наблюдения интерференционной картины необходимы когерентные волны. Действительно, пусть в некоторой точке экрана накладываются два колебания электрического поля, создаваемые двумя монохроматическими волнами частоты  $\omega$  с одинаковой плоской поляризацией:

$$E_1 + E_2 = E_{01} \cos(\omega t + \varphi_1) + E_{02} \cos(\omega t + \varphi_2).$$

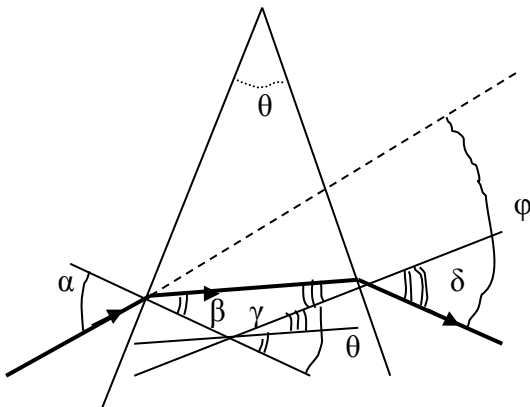
Легко показать, что

$$(E_1 + E_2)^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Производя усреднение по времени, имеем для результирующей интенсивности:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \rangle.$$

Для некогерентных волн среднее значение косинуса равно нулю, и  $I = I_1 + I_2$ , поэтому интерференционная картина отсутствует. Для когерентных волн  $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$  результирующая интенсивность  $I \neq I_1 + I_2$ , и наблюдается интерференция.



<sup>2</sup> Это можно показать так (см рис.). В приближении малых углов  $\alpha = n\beta$ ;  $\gamma = n\delta$ . Далее,  $\theta = \beta + \gamma$ . Наконец,  $\varphi = (\alpha - \beta) + (\delta - \gamma) = (n - 1)(\beta + \gamma) = (n - 1)\theta$ .

<sup>3</sup>**Оптическая разность хода** отличается от обычной геометрической при наличии среды с показателем преломления  $n \neq 1$ . Дело в том, что оптическую разность хода измеряют в длинах волн, а последние в среде составляют  $\lambda/n$ , где  $\lambda$  – длина волны в вакууме. Соответственно отрезок  $l$  пути, пройденной волной в среде составляет  $l/(\lambda/n) = nl/\lambda$  длин волн. Величину  $nl$  называют оптической длиной, а разность оптических длин для разных волн – оптической разностью хода. В данной лабораторной работе оптическая разность хода совпадает с геометрической, т.к.  $n$  воздуха очень близок к единице.