

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Цель работы: определение ширины интерференционной полосы в картине, полученной с помощью бипризмы Френеля, и длины волны источника света.

Приборы и принадлежности: газовый гелий-неоновый (*He-Ne*) лазер, коллиматор, собирающие линзы, оптическая скамья, экран с миллиметровой шкалой, снабженной нониусом, линейка.

Объект измерений: интерференционная картина.

Средства измерений: линейка, линейная шкала на экране.

1. Теоретическая часть

Интерференция света – явление ослабления или усиления интенсивности света в зависимости от разности фаз и направления колебаний (поляризации) складываемых волн. Необходимым условием возникновения стационарной интерференционной картины (не меняющейся существенно за время наблюдения) является *когерентность волн* – согласованное протекание во времени и пространстве волновых процессов.

Идеальные монохроматические волны строго когерентны. Однако ни один реальный источник не дает идеально монохроматического света, поэтому волны, излучаемые независимыми источниками света, будут когерентны лишь в течение малого промежутка времени $\tau_{\text{ког}}$. **Время когерентности** $\tau_{\text{ког}}$ определяется как время, за которое случайное изменение фазы волны достигает величины порядка π . Так, время когерентности волн, спонтанно излучаемых атомами, $\tau_{\text{ког}} \approx 10^{-8}$ с. За это время волны распространяются на расстояние $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$, называемое *длиной когерентности* или *длиной цуга волны*, где c – скорость света. Наблюдение интерференции света возможно лишь при условии, что оптическая разность хода лучей меньше длины когерентности используемого света. Чем ближе волна к монохроматической, тем больше ее временная когерентность.

Если световые волны излучаются пространственно распределенными источниками (например, разными точками на светящейся поверхности), то для описания когерентных свойств волн вводится понятие *пространственной когерентности*, определяемой радиусом когерентности $r_{\text{ког}}$. Это максимальное расстояние между точками светящейся поверхности, для которых случайное изменение разности фаз достигает значения порядка π . Можно показать, что

$$r_{\text{ког}} = \frac{\lambda}{\varphi},$$

где λ – длина волны, φ – угловой размер источника.

Для получения когерентных световых волн, имеющих необходимую временную и пространственную когерентность, применяют метод разделения светового потока от одного источника. В данной работе рассматривается один из таких методов, основанный на использовании бипризмы Френеля (рис. 1).

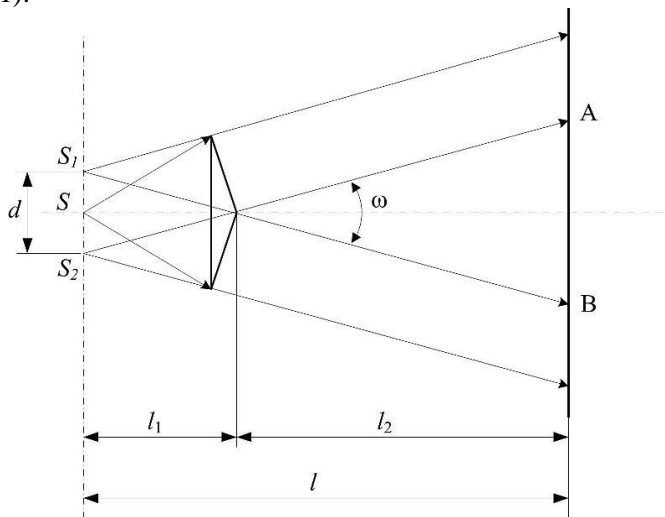


Рис. 1. Схема разделения светового потока бипризмой Френеля от одного источника S

Бипризма Френеля – оптический элемент, который образуется двумя одинаковыми призмами с небольшим преломляющим углом, имеющими общее основание.

Пучок расходящихся лучей от линейного источника света S (рис. 1), проходя верхнюю призму, преломляется к ее основанию (вниз) и распространяется дальше как бы от точки S_1 – мнимого изображения S . Другой пучок, падающий на нижнюю призму, преломляясь, отклоняется вверх. Точкой, от которой расходятся лучи в этом пучке, служит точка S_2 – тоже мнимое изображение источника S .

Поскольку колебания, соответствующие S_1 и S_2 , полностью идентичны, пучки, идущие от этих мнимых источников, являются когерентными и при наложении дают на экране интерференционную картину в виде интерференционных полос – максимумов и минимумов освещенности.

Шириной интерференционной полосы называется расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами (или минимумами). Для ее нахождения рассмотрим общий случай интерференции волн, исходящих из двух когерентных источников S_1 и S_2 , расположенных на расстоянии d друг от друга (рис. 2).

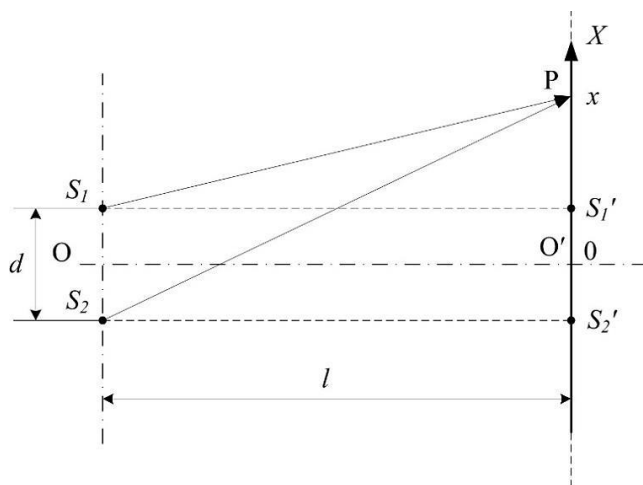


Рис. 2. Лучи от двух когерентных источников S_1 и S_2 , приходящие в точку $P(x)$ на экране

Результат сложения двух волновых процессов в каждой точке P экрана зависит от разности хода волн, пришедших в эту точку. Если разность хода будет равна:

$$S_2P - S_1P = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где m – целое число, λ – длина волны, то в точке P будет наибольшее усиление света (максимум освещенности), так как к точке P волны придут в одинаковых фазах.

При разности хода, равной:

$$S_2P - S_1P = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

в точке P будет максимальное ослабление света (минимум освещенности), так как волны в этом случае придут к точке P в противоположных фазах.

Определить разность хода волн, приходящих в точку P , то есть величину $S_2P - S_1P$, можно из треугольников $S_1S_1'P$ и $S_2S_2'P$. Имеем, соответственно:

$$(S_1P)^2 = l_2^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$(S_2P)^2 = l_2^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2.$$

Вычитая из второго выражения первое, получим:

$$(S_2P)^2 - (S_1P)^2 = 2xd.$$

Последнее соотношение может быть представлено в виде:

$$S_2P - S_1P = \frac{2xd}{S_2P + S_1P}.$$

При условии, что расстояние d мало по сравнению с расстоянием от источников до экрана наблюдения l , можно приближенно положить $S_2P + S_1P \approx 2l$, тогда для разности хода волн можно записать:

$$S_2P - S_1P = \frac{xd}{l}.$$

Для получения **светлых полос** на экране, согласно (1), эта разность хода должна быть равна четному числу полуволин:

$$\frac{xd}{l} = 2m \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Для получения **темных полос** на экране, согласно (2), эта разность хода должна быть равна нечетному числу полуволин:

$$\frac{xd}{l} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

Соотношения (3) и (4) дают возможность определить расстояние между двумя светлыми или двумя темными полосами, то есть определить ширину интерференционной полосы Δx . Определим, например, расстояние между двумя соседними светлыми полосами, имеющими порядок m и $(m + 1)$. Пользуясь формулой (3), получим расстояния x_m и x_{m+1} до этих полос от середины экрана:

$$x_m = m \frac{\lambda l}{d}, \quad x_{m+1} = (m + 1) \frac{\lambda l}{d}.$$

Тогда расстояние Δx между соседними светлыми полосами окажется равным:

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \lambda \frac{l}{d}. \quad (5)$$

Последнее соотношение используется для определения длины волны λ по известным Δx , l и d :

$$\lambda = d \frac{\Delta x}{l}. \quad (6)$$

Расстояние d между мнимыми источниками может быть косвенным образом измерено с помощью собирающей линзы, установленной перед экраном так, чтобы на нем получилось действительное изображение источников S_1 и S_2 (рис. 3). В этом случае по формуле увеличения линзы:

$$d = \frac{a}{b} d', \quad (7)$$

где d' – расстояние на экране между изображениями источников S_1 и S_2 , a и b – расстояния от источников до линзы и от линзы до экрана соответственно.

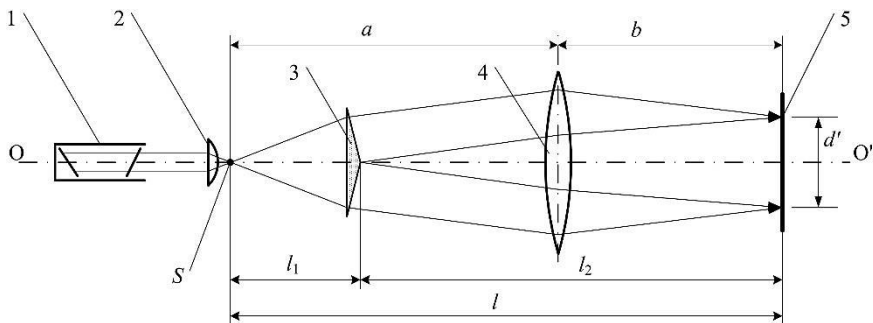


Рис. 3. Схема установки и ход лучей:

1 – лазер, 2 – фокусирующая линза, 3 – бипризма Френеля, 4 – собирающая линза, 5 – экран

Так как преломляющий угол бипризмы мал (порядка долей градуса), мнимые источники S_1 и S_2 расположены в одной плоскости с источником S , то все лучи при преломлении отклоняются на одинаковый угол $\omega/2$. Величина ω называется **угловой шириной зоны интерференции**. Экспериментально угол ω может быть определен путем измерения протяженности поля интерференции (на рис. 1 это область АВ) и расстояния l_2 между бипризмой и экраном, а также расстояния d между мнимыми источниками и расстояния l_1 от источников до бипризмы:

$$\omega = 2 \arctg \left(\frac{AB}{2l_2} \right), \quad (8)$$

$$\omega = 2 \arctg \left(\frac{d}{2l_1} \right). \quad (9)$$

Эти формулы легко получаются из геометрических соображений на рис. 1. Исходя из подобия треугольников (для малых углов) можно, также, записать следующее:

$$\frac{AB}{2l_2} = \frac{\omega}{2} = \frac{d}{2l_1},$$

$$d = \frac{AB l_1}{l_2}.$$

2. Методика проведения измерений и описание установки

Схема установки представлена на рис. 3, а ее фотография на рис. 4. Источником монохроматического света служит газовый (He-Ne) лазер **1** с длиной волны 0,63 мкм. Цилиндрическая собирающая линза **2** фокусирует лазерный пучок на щелевую диафрагму, образующую линейный источник света S , параллельный ребру бипризмы **3**. Интерференционная картина наблюдается на подвижном экране **5**, снабженном вертикальной риской и миллиметровой шкалой с нониусом, предназначенной для измерения ширины интерференционных полос. Экран может перемещаться вдоль оптической скамьи. Для измерения расстояния d' между изображениями мнимых источников S_1 и S_2 перед экраном устанавливается собирающая линза **4**.

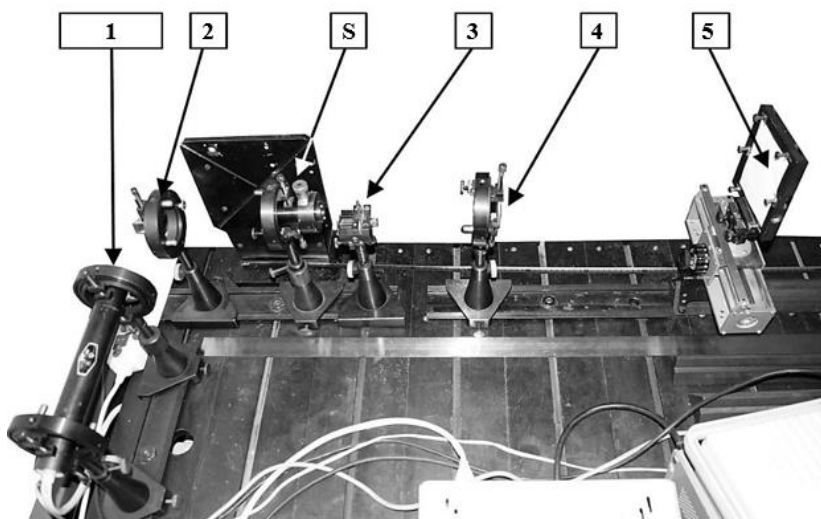


Рис. 4. Фотография установки:

1 – лазер, **2** – фокусирующая линза, **3** – бипризма Френеля, **4** – собирающая линза, **5** – экран, S – линейный источник света, образованный на щелевой диафрагме

3. Порядок выполнения работы

а) проведение измерений в лаборатории.

Определение ширины интерференционной полосы

1. Включить блок питания лазера.
2. Вывести линзу **4** (рис. 4) из зоны перекрытия волн. Проверить, чтобы интерференционные полосы на экране **5** были параллельны вертикальной риске экрана.
3. Не меняя положения экрана на оптической скамье, получить изображение интерференционных полос. Измерить расстояние h между центрами 3-5 красных полос и определить число N светлых полос между ними. Результаты измерений занести в таблицу 1.
4. Установить собирающую линзу **4** между бипризмой **3** и экраном **5** (рис. 4).
5. Перемещая линзу **4** вдоль оптической скамьи, добиться четкого изображения на экране двух параллельных линий (в действительности ярко выраженных пятен, образующих «гантель» – рис. 5) – действительных изображений источников S_1 и S_2 . Измерить расстояние d' между ними, а также расстояние a между источником S и линзой и расстояние b – между линзой и экраном. Результаты занести в таблицу 1.
6. Покажите таблицу с измерениями преподавателю.



Рис. 5. Действительные изображения источников S_1 и S_2

Таблица 1

Результаты измерений для определения
ширины интерференционной полосы

$d' \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$a \cdot 10^{-2}, \text{ м}$	$b \cdot 10^{-2}, \text{ м}$	$h \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	N

б) обработка результатов измерений.

1. Определить ширину интерференционной полосы:

$$\Delta_x = \frac{h}{N}.$$

2. Оценить относительную погрешность измерения ширины интерференционной полосы:

$$\delta\Delta_x = \frac{\Delta(\Delta_x)}{\Delta_x} = \frac{\Delta h}{h}.$$

3. Оценить абсолютную погрешность измерения ширины полосы:

$$\Delta(\Delta_x) = \Delta_x \cdot \delta\Delta_x.$$

4. По формулам (6) и (7) определить длину световой волны:

$$\langle \lambda \rangle = \Delta_x \frac{a}{b} \frac{d'}{l} = \Delta_x \frac{a}{b} \frac{d'}{(l_1 + l_2)}. \quad (10)$$

5. Оценить относительную погрешность определения λ :

$$\delta\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta(\Delta_x)}{\Delta_x} + \frac{\Delta d'}{d'} + \frac{\Delta l}{l},$$

где $\Delta\lambda$, Δa , Δb , $\Delta(\Delta_x)$, $\Delta d'$, Δl – абсолютные погрешности для полученных величин λ , a , b , Δ_x , d' и l .

6. Определить абсолютные погрешности измерения λ :

$$\Delta\lambda = \langle \lambda \rangle \cdot \delta\lambda.$$

7. Записать окончательный результат в виде:

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta\lambda.$$

8. Сравнить рассчитанную длину волны с теоретической для известного источника излучения: $\lambda_{\text{лаз}} = 0,63 \text{ мкм}$. Сделать выводы по результатам сравнения.

Контрольные вопросы

1. Что называется интерференцией света?
2. Какие источники называются когерентными?
3. Почему невозможно получить интерференционную картину от двух произвольных монохроматических источников света?
4. Как можно получить когерентные источники света?
5. В чем состоит метод получения когерентных источников света с помощью бипризмы Френеля?
6. Каковы условия максимального усиления и ослабления освещенности при интерференции света?
7. Рассмотрите общий случай интерференции волн, исходящих из двух точечных когерентных источников, и выведите формулу для определения длины волны света.
8. Что такое угловая ширина зоны интерференции и ширина интерференционной полосы?
9. Как определяется в данной работе расстояние между мнимыми источниками S_1 и S_2 ?
10. Каким образом можно уменьшить относительную погрешность измерения длины волны света λ на данной установке?

Рекомендуемая литература

В качестве литературы по интерференции можно рекомендовать [1, §§ 4.1–4.3; 2, §§ 171–173]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 263 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Изд-во «Академия», 2020. 557 с.