

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 251

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Цель и содержание работы

Целью работы является ознакомление с явлением интерференции света. Содержание работы состоит в получении интерференционной картины при помощи бипризмы Френеля и определении эффективной длины волны света, пропускаемого светофильтром.

Краткая теория

Интерференция света

Интерференцией называется явление усиления или ослабления амплитуды результирующей волны, образующейся при сложении в пространстве двух (или нескольких) волн с одинаковыми частотами колебаний. Интерференция может наблюдаться для любых волн, независимо от их природы.

Рассмотрим сложение волн. Найдем интенсивность света в какой-либо точке пространства, где перекрываются две световые волны. В соответствии с принципом суперпозиции напряженность электрического поля результирующей волны равна: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, где $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ – напряженности электрического поля накладываются волн.

Если векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ совершают колебания в одной плоскости и частоты их колебаний равны, то квадрат амплитуды результирующего колебания в некоторый момент времени равен (см. [1]):

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \Delta\varphi, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз колебаний в данной точке; E_{01} , E_{02} – амплитуды складывающихся колебаний.

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды напряженности: $I \sim E_0^2$, поэтому соотношение (1) можно записать так:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \Delta\varphi \rangle \quad (2)$$

где $\langle \cos \Delta\varphi \rangle$ – среднее значение косинуса разности фаз.

Из этого уравнения видно, что мгновенная интенсивность света I в данной точке зависит от разности фаз колебаний. Если $\langle \cos \Delta\varphi \rangle > 0$, то интенсивность $I > I_1 + I_2$, и

произойдет усиление света; при $\langle \cos \Delta\varphi \rangle < 0$, интенсивность $I < I_1 + I_2$ и будет наблюдаться ослабление света; при $\langle \cos \Delta\varphi \rangle = 0$ интенсивность равна $I = I_1 + I_2$.

Время пребывания атома, излучающего световую волну, в возбужденном состоянии составляет $\sim 10^{-8}$ с. Если атомы излучают световые волны независимо друг от друга, то разность фаз колебаний, приходящих в данную точку пространства, меняется примерно с таким же интервалом времени. Глаз не способен видеть мигания света, меняющиеся за столь короткое время. Его инерционность равна $\sim 0,1$ с. В течение этого времени глаз усредняет все световые сигналы, попадающие в него и реагирует на среднее за время τ значение интенсивности, которое определяется выражением (2). Среднее значение косинуса $\langle \cos \Delta\varphi \rangle$ за время τ равно:

$$\langle \cos \Delta\varphi \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos \Delta\varphi dt \quad (3)$$

Если разность фаз $\Delta\varphi$ за время τ меняется беспорядочно, она будет принимать любые значения от 0 до 2π , $\cos \Delta\varphi$ – значения от -1 до $+1$, а интеграл (3) – равняться 0. Тогда $I = I_1 + I_2$, и в любой точке пространства интенсивности света от двух источников складываются независимо, волны не усиливают и не ослабляют друг друга, то есть интерференции не наблюдается. Именно с таким случаем мы встречаемся в повседневной практике.

Для того чтобы интерференционная картина была устойчива и ее можно было бы наблюдать глазом или с помощью окуляра, разность фаз колебаний $\Delta\varphi$ в данной точке должна сохраняться постоянной в течение времени инерции глаза τ .

Волны, имеющие одинаковые частоты колебаний и постоянную во времени разность фаз, называются *когерентными*. Когерентные волны, накладываясь друг на друга, дают устойчивую интерференционную картину, представляющую собой чередующиеся светлые и темные полосы. Если складываются пучки монохроматического света, например, красного, полосы будут иметь красную и черную окраску. Если складываются пучки белого света, полосы будут иметь радужную окраску.

Выясним, от чего зависит разность фаз колебаний двух волн, приходящих в данную точку. Уравнения накладывающихся плоских волн имеют вид:

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 s_1)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 s_2)$$

где E_0 – амплитуда; λ_0 – длина световой волны в вакууме; n_1 и n_2 – показатели преломления тех сред, по которым распространяются волны; s_1 и s_2 – пути, пройденные волнами от когерентных источников.

Вычтя выражения, стоящие под символом косинуса, получим разность фаз колебаний в данной точке:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_2 s_2 - n_1 s_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta \quad (4)$$

Величина $\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1$ называется *оптической разностью* хода волн, а произведение $n \cdot s$ – *оптической длиной пути* световой волны.

Если при наложении двух волн в данной точке разность фаз колебаний окажется равной четному числу π , то есть $\Delta\varphi = 2m\pi$ (а оптическая разность хода волн, соответственно, равна четному числу полуволен $\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$), где $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$, то $E_0 = E_{01} + E_{02}$, и в данной точке будет наблюдаться наибольшее усиление света, то есть максимум интенсивности света:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

Если разность фаз будет равна нечетному числу π , то есть $\Delta\varphi = (2m+1)\pi$, что соответствует оптической разности хода, равной нечетному числу полуволен $\Delta = (2m+1) \frac{\lambda}{2}$, то будут наблюдаться минимум интенсивности света. В этом случае $E_0 = E_{01} - E_{02}$ и

$$I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

От двух обычных источников света, например, ламп накаливания, интерференция не наблюдается, так как атомы нитей ламп излучают свет независимо друг от друга и разность фаз колебаний в данной точке не будет постоянной. Две когерентные волны (которые могут интерферировать) можно получить, если световую волну, идущую от данного источника света, разделить на две, а затем их вновь соединить. Это можно сделать с помощью, например:

- двух параллельных щелей, освещаемых источником света (опыт Юнга);
- двух зеркал, установленных друг к другу под углом, близким к 180° (бизеркала Френеля);

- двух призм с очень малым углом преломления, соединенных своими основаниями (бипризма Френеля) и др.

В этих случаях мы получим два пучка когерентных волн, идущих, соответственно, от двух щелей; отраженных от двух зеркал; преломленных в двух призмах, то есть в каждом из случаев мы получим два когерентных источника света и сможем наблюдать устойчивые интерференционные картины.

Найдем положение полос и расстояние между ними в интерференционной картине, полученной от двух когерентных источников. На рис. 1 C и C' – два когерентных источника света, например, две параллельные щели.

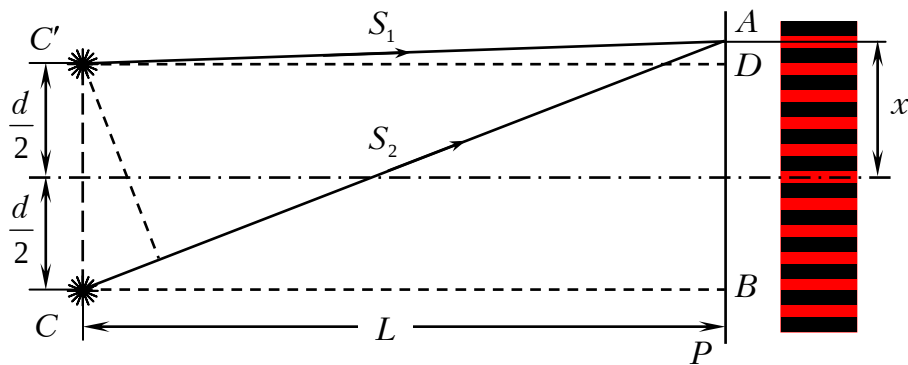


Рис. 1. Интерференционная картина от двух когерентных источников C и C' .

На экране P наблюдается интерференционная картина в виде множества параллельных светлых и темных полос. Пусть d – расстояние между источниками, L – расстояние от источников до экрана P , x – расстояние от центра картины до некоторой интерференционной полосы, проходящей через точку A . Величина x определяет положение полосы. Из рисунка видно, что

$$S_2^2 = L^2 + (x + d/2)^2 \text{ (из треугольника ABC),}$$

$$S_1^2 = L^2 - (x + d/2)^2 \text{ (из треугольника ADC).}$$

Вычитая второе уравнение из первого, находим:

$$S_2^2 - S_1^2 = (S_2 + S_1)(S_2 - S_1) = 2xd. \quad (5)$$

Если $d \ll L$ и $x \ll L$, что соответствует обычным условиям наблюдения, то можно считать приближенно, что $S_2 + S_1 = 2L$. Разность $(S_2 - S_1) = \Delta$ (разность хода волн). Считаем, что свет распространяется в вакууме. Тогда из уравнения (5) получим:

$$x = \frac{\Delta \cdot L}{d} \quad (6)$$

Используя условия максимумов и минимумов света при интерференции и выражение (6), можно найти положения светлых (максимумы) и темных (минимумы) полос:

$$x_{\max} = \frac{m\lambda L}{d}, \quad x_{\min} = \frac{(2m+1)\lambda L}{d}, \quad (7)$$

где $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$

Из формул (7) можно определить расстояние между соседними светлыми (или темными) полосами:

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d}. \quad (8)$$

Устойчивые интерференционные картины получаются также при отражении света от тонких прозрачных слоев, например, от пленки бензина на воде, от мыльных пленок, от воздушного слоя между стеклянной линзой и пластиной, на которой установлены линза (кольца Ньютона).

При интерференции двух волн, отраженных от верхней и нижней границ тонкого слоя (рис. 2), оптическая разность хода волн равна (см. [1]):

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2}, \quad (9)$$

где d – толщина слоя, n – показатель преломления пленки (слоя); i – угол падения световых лучей, λ_0 – длина световой волны в вакууме.

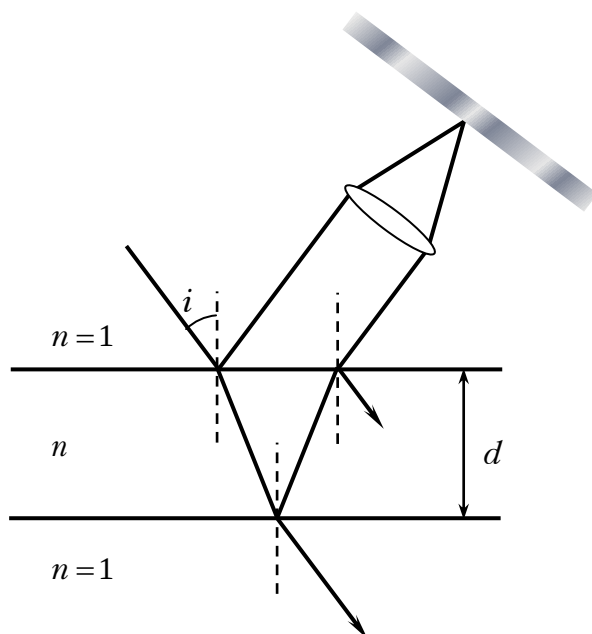


Рис. 2. Интерференция в тонких пленках

Второй член в правой части уравнения (9) обусловлен тем, что при отражении света от оптически более плотной среды вектор $\vec{E}$ скачком меняет свое направление на про-

типоволожное, или, как говорят, происходит "потеря полволны". Поэтому к оптической разности хода добавляется (или отнимается) $\frac{\lambda_0}{2}$.

Приборы и принадлежности, необходимые для выполнения работы

Схема установки, используемой в работе, приведена на рис. 3. Свет от лампы нака-
ливания 1 с помощью линзы 2 фокусируется на щели 4, которая таким образом служит как
бы источником света. На пути светового пучка устанавливается стеклянный светофильтр
3 (зеленый и красный, поочередно). За щелью расположена бипризма 5.

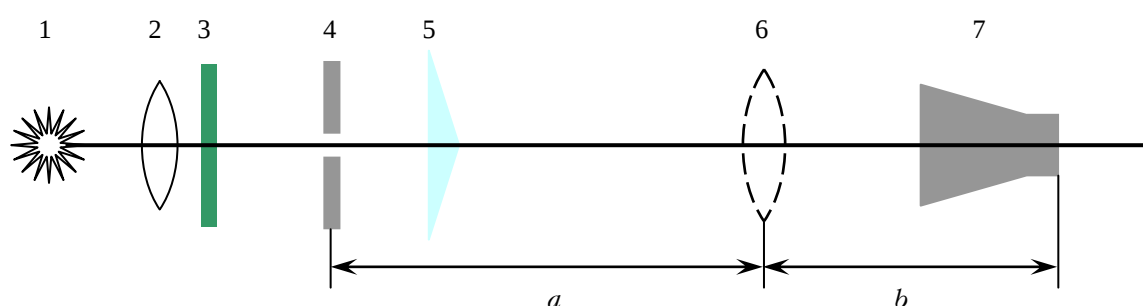


Рис. 3. Схема установки.

Бипризма Френеля представляет собой две призмы с очень малыми углами преломления, сложенные своими основаниями. Ход лучей в бипризме и образование интерференционной картины показаны на рис. 4.

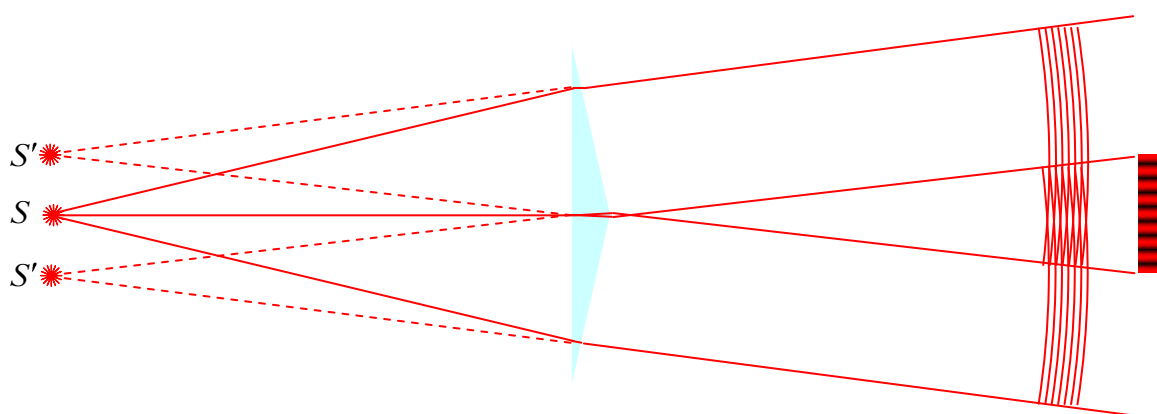


Рис. 4. Ход лучей в бипризме Френеля.

Интерференционная картина, образующаяся после прохождения света через би-призму, наблюдается с помощью окулярного микрометра 7 (см. рис. 3 и 6). Он состоит из микрометрического винта (8) и окуляра (9), в поле зрения которого имеется неподвижная

оцифрованная шкала (в миллиметрах) и указатель в виде двух штрихов и перекрестия. Штрихи и перекрестие одновременно перемещаются с помощью микрометрического винта. Горизонтальная линия на барабане микрометрического винта служит индексом, по которому производится отсчет по круговой шкале. Цена деления круговой шкалы 0,01 мм. Все перечисленные выше принадлежности установлены на оптической скамье.

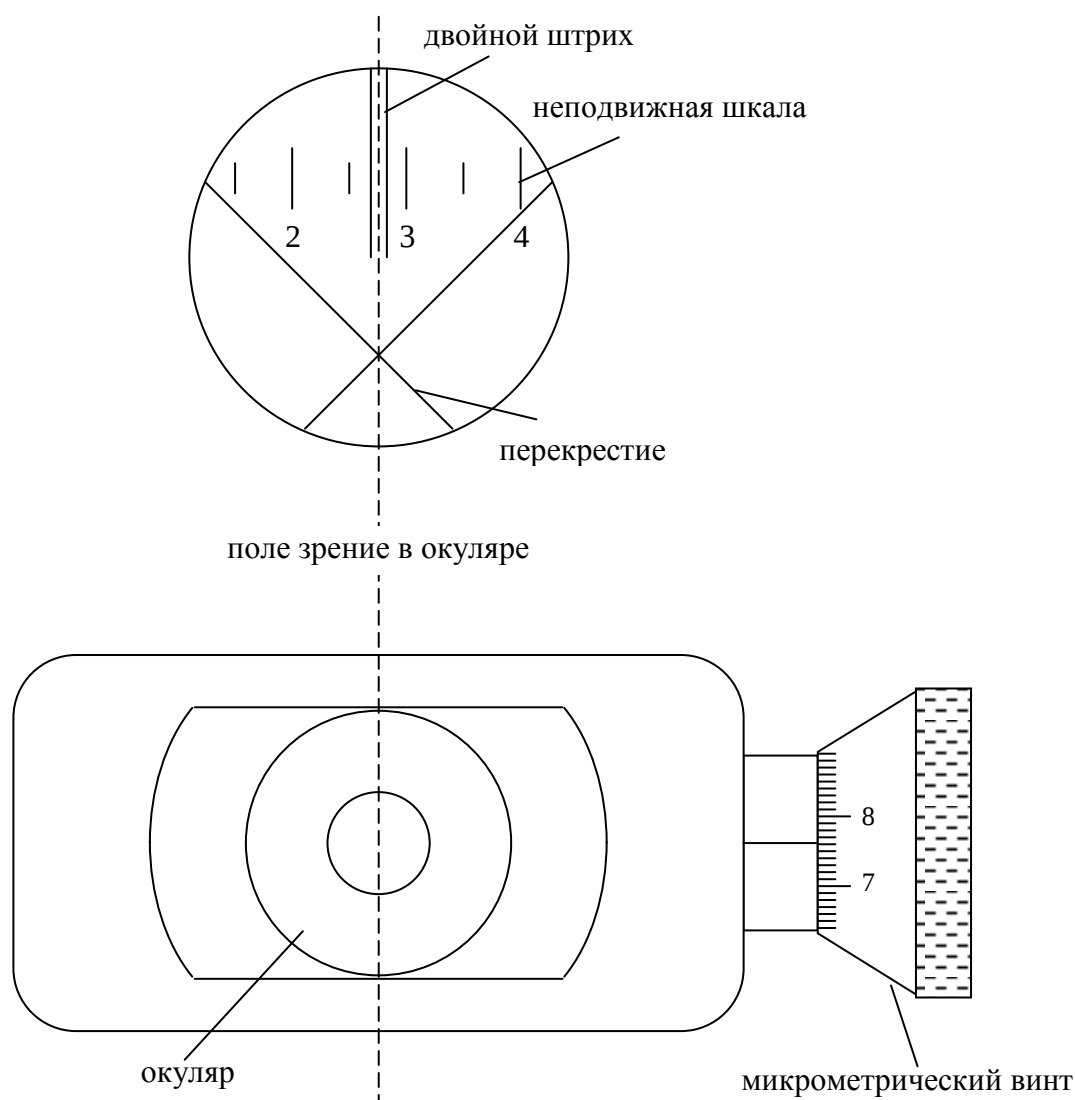


Рис. 5. Окулярный микрометр.

Получающаяся с помощью бипризмы Френеля интерференционная картина представляет собой ряд параллельных вертикальных полос, светлых и темных. Положение интерференционных полос определяется по показаниям неподвижной шкалы в поле зрения окуляра (в миллиметрах) и показаниям круговой шкалы микрометрического винта (десятые и сотые доли миллиметра). Пусть, например, перекрестие наведено на одну из интерференционных полос (см. рис. 5). Штрихи при этом оказались между делениями 2 и 3 (мм). Следовательно, целое число миллиметров будет равно 2. При этом горизонтальная

линия шкалы микрометра совпала с делением 76 на круглой шкале. Следовательно, доли миллиметра составляют 0,76 мм. Полный отсчет, таким образом, будет равен 2,76 мм.

Линза 6, показанная на рис. 3 пунктиром, при наблюдении интерференционных полос не используется, ее необходимо при этом снять со скамьи. Эта линза устанавливается на скамье только после того, как произведены измерения положений интерференционных полос с данным светофильтром. С помощью линзы 6 в поле зрения окулярного микрометра можно получить изображение мнимых источников S и S' (см. рис. 4) в виде двух узких вертикальных полосок.

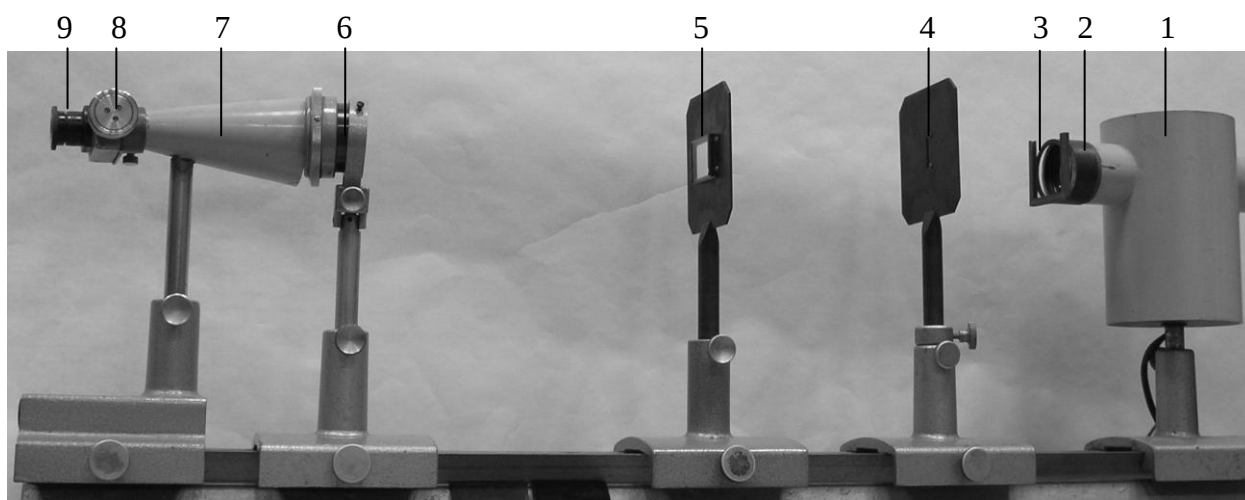


Рис. 6. Общий вид установки.

Порядок выполнения работы

1. Убрать со скамьи линзу 6 (см. рис. 3, 6), если она там установлена.
2. Включить осветительную лампу.
3. Установить зеленый светофильтр.
4. Измерить расстояние между соседними темными интерференционными полосами Δx . Для большей точности следует определить расстояние между несколькими полосами, а затем разделить полученный результат на число интервалов между полосами. Для этого необходимо:

а) совместить центр перекрестия с одной из крайних темных интерференционных полос в левой части поля зрения окуляра. Считать условно эту линию нулевой. Произвести отсчет ее положения x_0 по шкале в поле зрения окуляра и круговой шкале микрометра. Результат записать в таблицу 1.

б) плавно перемещая микрометрический винт и отсчитывая при этом число интервалов между темными полосами, совместить перекрестие с другой темной полосой в правой части поля зрения. Произвести отсчет положения этой линии – x_m , где m – номер этой линии, который равен также числу интервалов между нулевой и данной линией. Результат записать в таблицу 1.

Для большей точности измерений и для удобства расчетов рекомендуется брать $m = 6 \div 10$.

5. Произвести аналогичные измерения ещё два раза для той же пары интерференционных полос. Данные записать в таблицу 1.

6. Измерить расстояние между мнимыми источниками света, наблюдаемыми в поле зрения окуляра в виде двух узких светлых полосок. Для этого необходимо:

а) не меняя положения принадлежностей на скамье, установить линзу 6 (см. рис. 3). Перемещая эту линзу по скамье, добиться четкого изображения двух светлых полосок. При этом интерференционная картина уже не будет видна;

б) совместить центр перекрестия с левой линией и произвести отсчет ее положения d'_1 . Затем совместить перекрестие с правой линией и также произвести отсчет ее положения d'_2 . Данные записать в таблицу 1;

в) измерения повторить ещё два раза. Результаты записать в таблицу 1.

Таблица 1

Светофильтр	m	№ п/п	Положения выбранных полос		Расстояние между соседними полосами Δx , мм	Положение мнимых источников в окуляре	
			слева x_0 , мм	справа x_m , мм		левый d'_1 , мм	правый d'_2 , мм
Зеленый		1					
		2					
		3					
		среднее					
Красный		1					
		2					
		3					
		среднее					

7. Измерить с помощью линейки расстояние a от плоскости щели до линзы 6 (см. рис. 3, 6) и расстояние b от линзы 6 до линзы окуляра 9. Результаты записать в таблицу 2.

8. Снять линзу 6 со скамьи. Заменить зеленый светофильтр на красный и произвести аналогичные измерения (см. пп. 4–7). Результаты записать в таблицы 1 и 2.

Таблица 2

Светофильтр	Расстояние между соседними полосами $\Delta\bar{x}$, мм	Расстояния между мнимыми источниками в окуляре $\bar{d}'$, мм	a , м	b , м	L , м	Расстояния между мнимыми источниками $\bar{d}$, мм	Длина световой волны λ , нм
Зеленый							
Красный							

Обработка полученных данных

1. Найти средние значения $\bar{x}_0$ и $\bar{x}_m$ для опытов с зеленым и красным светофильтрами.

2. Найти средние значения расстояний между соседними интерференционными полосами по формуле

$$\Delta\bar{x} = \frac{\bar{x}_m - \bar{x}_0}{m}$$

для опытов с зеленым и красным светофильтрами. Данные записать в таблицы 1 и 2.

3. Вычислить средние значения $\bar{d}'_1$ и $\bar{d}'_2$. Данные записать в таблицу 1.

4. Вычислить расстояния между мнимыми источниками, наблюдаемыми в поле зрения окуляра, для зеленого и красного светофильтров по формуле

$$\bar{d}' = \bar{d}'_2 - \bar{d}'_1$$

и записать в таблицу 2.

5. Вычислить действительные расстояния d между мнимыми источниками (то есть с учетом увеличения, даваемого линзой 6) по формуле

$$\bar{d} = \bar{d}' \frac{a}{b}.$$

Результат записать в таблицу 2.

6. Вычислить величину $L = a + b$. Результат записать в таблицу 2.

7. Найти длину световой волны по формуле (8) для каждого светофильтра:

$$\lambda = \frac{\Delta\bar{x}\bar{d}}{L}$$

$\Delta\bar{x}$, и $\bar{d}$ выразить в метрах. Длину волны выразить в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$).

Так как стеклянные светофильтры пропускают свет в широком интервале длин волн (примерно 20–60 нм), найденная длина волны является некоторой средней величиной и носит название эффективной.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление интерференции света? Какие волны называются когерентными?
2. Напишите уравнение плоской бегущей монохроматической волны. Получите выражение для интенсивности при сложении двух волн.
3. Объясните, почему в повседневных условиях не наблюдается устойчивых интерференционных картин.
4. Что называется оптической длиной пути световой волны? оптической разностью хода волн? Как связана оптическая разность хода с разностью фаз колебаний?
5. Напишите условия максимумов и минимумов при интерференции двух волн.
6. Получите формулы для положения полос и расстояния между соседними полосами в случае интерференции от двух когерентных источников. Дайте анализ этих формул.
7. Что собой представляет бипризма Френеля? Нарисуйте ход лучей в бипризме Френеля.
8. Нарисуйте схему расположения принадлежностей, используемых в данной работе. Объясните их назначение.
9. Напишите формулу, связывающую расстояние между когерентными источниками, измеренной с помощью окулярного микрометра d' и действительным расстоянием d . Почему $d \neq d'$?
10. Напишите формулу, по которой рассчитывается длина волны света, пропускаемого светофильтром. Почему эта длина волны носит название эффективной?

Литература

Савельев И.В. Курс физики. т. 2.