

2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные теоретические положения, закономерности явления интерференции света, особенности экспериментальных методов наблюдения этого явления подробно изложены в учебниках [1 – 5]. В данном разделе настоящего учебного пособия кратко приводятся общие теоретические сведения и методические описания лабораторных работ по интерференции света физического практикума кафедры физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Интерференция света – перераспределение светового потока в пространстве при наложении двух или более когерентных световых волн, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности света [4].

Когерентность означает согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов. *Когерентными* называются волны, для которых разность фаз колебаний сохраняется неизменной за время, достаточное для наблюдения [1]. В частности, монохроматические волны (имеющие одинаковую частоту или период колебаний) когерентны и могут интерферировать. Электромагнитные волны от обычных источников света некогерентны между собой.

В явлении интерференции света рассматриваются волновые свойства света при наложении световых волн в какой-то области пространства. Пусть в некоторой точке пространства происходит перекрытие двух световых (электромагнитных) волн с напряженностями E_1 и E_2 [3]. Согласно принципу суперпозиции напряженность результирующего поля в этой точке равна векторной сумме напряженностей полей E_1 и E_2 от, создаваемых обеими волнами в этой точке $E = E_1 + E_2$.

Все приемники света в силу своей инерционности не могут измерить мгновенное значение напряженности электрического или магнитного поля в световой волне, а регистрируют только величины, квадратичные по полю и усредненные за промежутки времени, не меньшие времени разрешения приемника. В качестве такой величины в явлении интерференции света рассматривается интенсивность света или интенсивность колебаний I , за которую принимается усредненное во времени значение квадрата напряженности электрического поля, т.е. $I \sim \overline{E^2}$. Тогда, возведя равенство $E = E_1 + E_2$ в квадрат и выполнив усреднение по времени, получим результирующую интенсивность в рассматриваемой точке пространства

$$I = I_1 + I_2 + I_{12},$$

где I_1 и I_2 – интенсивности света накладываются пучков, $I_{12} = 2(\overline{\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2})$ – интерференционный член, учитывающий взаимодействие световых волн.

В случае перекрывания двух плоских монохроматических волн:

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \mathbf{r}), E_2 = A_2 \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \mathbf{r}),$$

(A_1 и A_2 – амплитуды колебаний, $\mathbf{k}_1$ и $\mathbf{k}_2$ – волновые векторы, $\mathbf{r}$ – радиус-вектор), при условии, что векторы $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$ параллельны или антипараллельны друг другу, результирующая интенсивность, определяемая по методу векторных диаграмм, может быть рассчитана по формуле:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \varphi,$$

где I_1 и I_2 – интенсивности складываемых волн, $\delta \varphi = (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \mathbf{r}$ – разность фаз колебаний в точке наблюдения.

Если перекрываются две сферические волны от двух точечных источников света S_1 и S_2 (рис. 2.1), то разность фаз складываемых колебаний в точке M :

$$\delta \varphi = k(r_2 - r_1) = (2\pi / \lambda_0) \delta r.$$

Величина $\delta r = (r_2 - r_1)$ называется разностью хода интерферирующих волн, λ_0 – длина световой волны в вакууме.

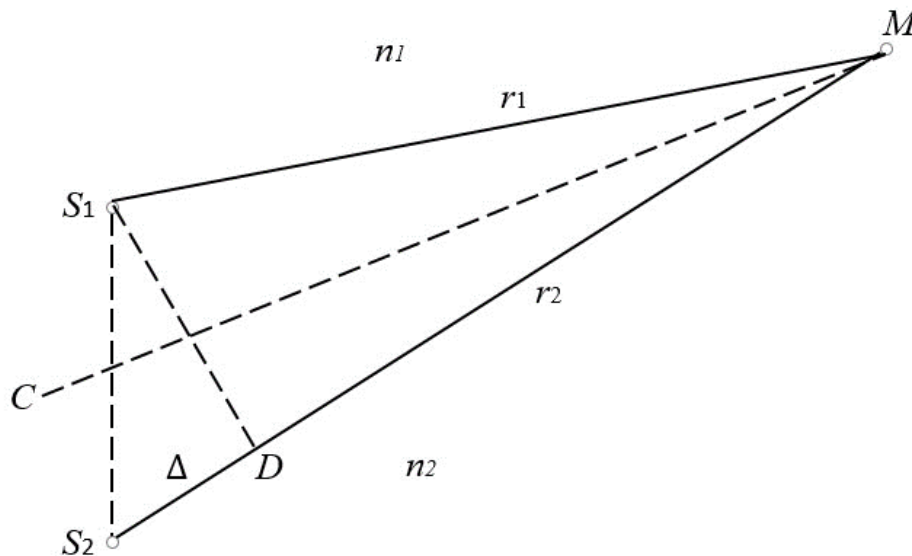


Рис.2.1. Схема к расчету разности хода интерферирующих волн

Если интерферирующие волны проходят через среды с разными показателями преломления n_2 и n_1 (рис. 2.1), то величину δr нужно заменить на оптическую разность хода $\Delta = (n_2 r_2 - n_1 r_1)$.

Если в точках перекрываемого пространства когерентные волны являются синфазными ($\delta \varphi = 2\pi t$, где $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), т.е. на оптической

разности хода укладывается *целое число длин волн* (или, что то же самое, *чётное число полуволн*)

$$\Delta = m\lambda_0 = 2m\left(\frac{\lambda_0}{2}\right), \quad |m| = 0, 1, 2, \dots,$$

то результирующее колебание имеет наибольшую (максимальную) интенсивность:

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

В точках пространства, для которых

$$\Delta = (2m + 1)\left(\frac{\lambda_0}{2}\right), \quad |m| = 0, 1, 2, \dots,$$

т.е. на оптической разности хода укладывается нечётное число полуволн, (складываемые в данной точке перекрытия волны находятся в противофазе), то наблюдается минимум интенсивности

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

Совокупность чередующихся максимумов и минимумов интенсивности образуют *интерференционную картину*.

Существуют несколько интерференционных схем получения когерентных пучков от одного источника света [3]: опыт Юнга, зеркала Френеля, бипризма Френеля, билинза Бийе, зеркало Ллойда и др.

Лабораторная работа 2.1

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Макет и первое описание данной лабораторной работы были разработаны на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [6].

Цель работы: измерение длины световой волны интерференционным методом бипризмы Френеля.

Приборы и принадлежности: в состав экспериментальной установки (рис. 2.2) входят источник света (лампа накаливания) и зелёный светофильтр, установленные в кожухе с вертикальной раздвижной щелью; оптическая скамья с миллиметровой шкалой; бипризма Френеля и окуляр со своей шкалой закрепленные в держателях, которые могут перемещаться вдоль оптической скамьи. Светофильтр пропускает определенную часть спектра излучения лампы, длину волны которой надо определить в лабораторной работе. Ширину щели можно изменять с помощью винта, находящегося в верхней части оправы пластин щели. Для получения отчетливых интерференционных полос необходимо, чтобы плоскости щели и основания бипризмы были параллельны. Это достигается соответствующим поворотом бипризмы и/или щели. Окуляр служит для наблюдения интерференционной картины. Для

измерения расстояния между полосами он снабжен шкалой, цена наименьшего деления которой составляет 1 мм.

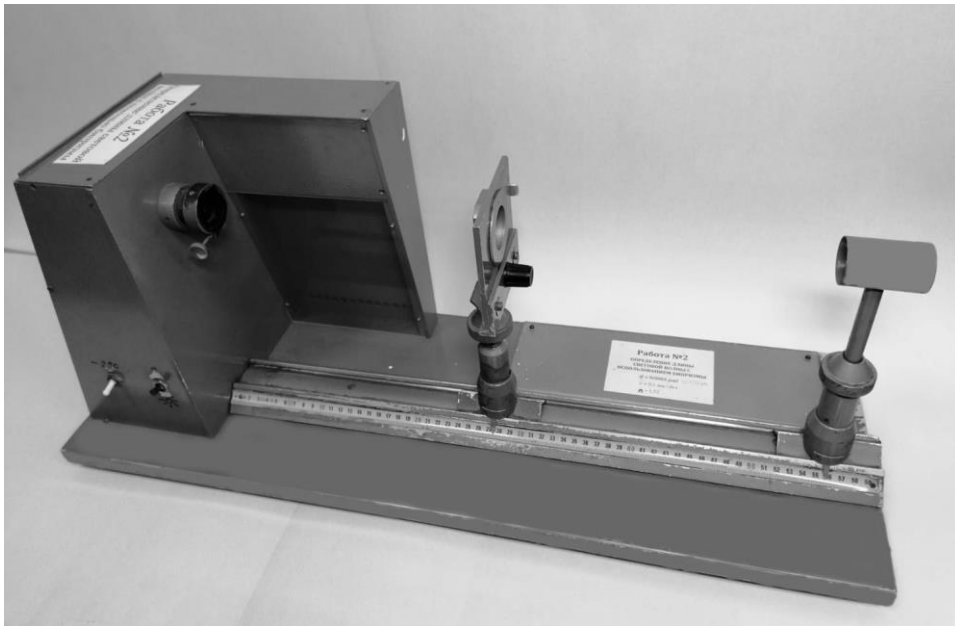


Рис.2.2. Экспериментальная установка с бипризмой Френеля

Исследуемые закономерности. Методика эксперимента

В данной работе в качестве интерференционного метода измерений используется метод бипризмы Френеля. *Бипризма Френеля* состоит из двух одинаковых призм с очень малым преломляющим углом θ , сложенных вместе основаниями и изготовленных как единое целое. Схема получения интерференционной картины с помощью бипризмы Френеля показана на рис. 2.3.

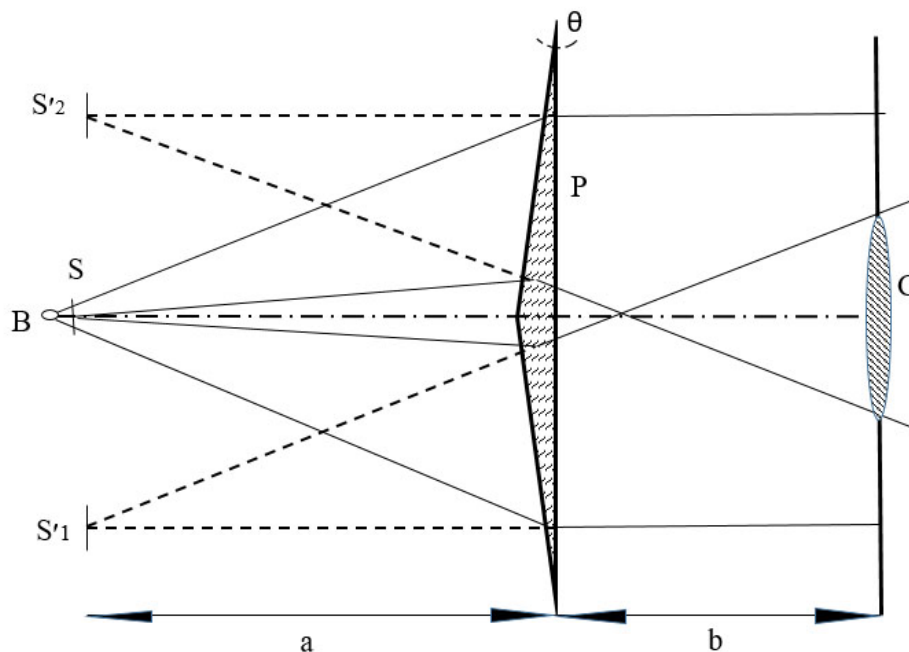


Рис. 2.3. Получение интерференционной картины с использованием бипризмы Френеля

Пучок лучей от источника света B через щель S падает на обе половины бипризмы P , преломляется в них, и за призмой свет распространяется в виде двух когерентных пучков волн с вершинами в мнимых изображениях S_1' и S_2' щели S . В области C экрана пучки перекрываются и создают систему параллельных светлых и темных интерференционных полос.

Светлые полосы находятся в тех местах экрана, где лучи, приходящие от источников S_1' и S_2' , имеют разность хода, равную целому числу длин волн или четному числу полуволн, а темные – в тех местах, куда приходят лучи с разностью хода, равной нечетному числу полуволн. Ширина интерференционной полосы

$$\Delta x = \frac{(a+b)\lambda_0}{d}, \quad (2.1)$$

где a и b – соответственно расстояния от щели до бипризмы и от бипризмы до экрана; d – расстояние между мнимыми изображениями источника света.

Для определения расстояния d рассмотрим ход луча, проходящего в верхней половине бипризмы при угле наименьшего отклонения параллельно основанию призмы, т.е. луча SOM (рис. 2.4). В связи с малостью преломляющего угла θ , угол отклонения луча $\delta = \angle S_2'OS$ тоже мал. Следовательно,

$$d/2 = S_2'S = a \tan \delta \approx a \cdot \delta. \quad (2.2)$$

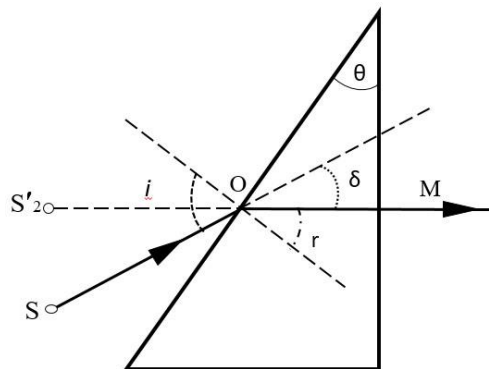


Рис. 2.4. Ход лучей через верхнюю половину бипризмы

Для точки O (рис. 2.4) в соответствии с *законом преломления света* $\sin i / \sin r = n$, где n – показатель преломления материала призмы (стекла); i и r – углы падения и преломления, соответственно. Вследствие малости углов справедливо соотношение $i = n \cdot r$. Из рис. 2.4 видно, что $r = \theta$ и $i = \delta + r = \delta + \theta$. Тогда $n = i / r = (\delta + \theta) / \theta$, откуда угол отклонения луча $\delta = \theta (n - 1)$.

Подставляя δ в формулу (2.2), получим

$$d = 2a \cdot \delta = 2a \cdot \theta (n - 1). \quad (2.3)$$

Формула (2.3) остается справедливой и при других углах отклонения δ .

Из формул (2.1) и (2.2) получим:

$$\Delta x = (a + b)\lambda_0 / 2a\theta(n - 1),$$

откуда

$$\lambda_0 = 2a\theta(n - 1)\Delta x / (a + b). \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) показывает, что для нахождения длины световой волны нужно знать расстояние от источника света до экрана $(a + b)$, расстояние от источника света до бипризмы a , показатель преломления стекла бипризмы n , преломляющий угол бипризмы θ и ширину интерференционной полосы Δx . Ширина интерференционной полосы соответствует расстоянию между двумя соседними интерференционными максимумами или минимумами в интерференционной картине распределения интенсивности света. В данной лабораторной работе это расстояние эквивалентно расстоянию Δx между наблюдаемыми соседними интерференционными полосами (рис. 2.5).

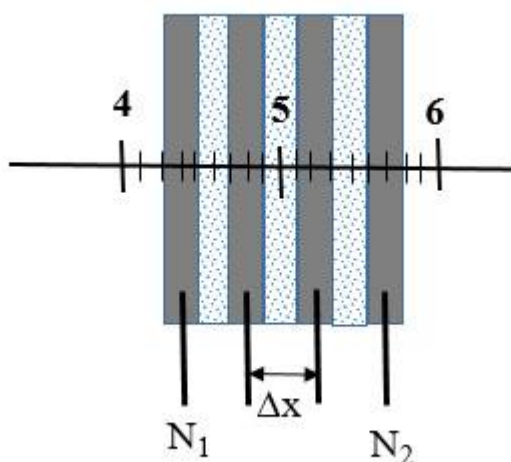


Рис. 2.5. К оценке ширины интерференционной полосы Δx

Оценка этого расстояния производится по формуле

$$\Delta x = (N_2 - N_1) \cdot 10 \text{ с} / (m - 1), \quad (2.5)$$

где N_2 и N_1 – отсчеты интерференционных полос на окулярной шкале, $\text{с} = 1 \text{ мм}$ – цена наименьшего деления окулярной шкалы, с поправочным коэффициентом 10, учитывающим разбиение отсчетов N в целых числах на 10 частей, m – число интерференционных полос между отсчетами N_2 и N_1 . В примере на рис. 2.5 $m = 4$.

Задание для подготовки к лабораторной работе

1. Изучить общие сведения о явлении интерференции, наблюдении интерференционной картины с помощью бипризмы Френеля.
2. Ознакомиться с методикой эксперимента.
3. Привести вывод формул для расчета длины световой волны в опыте с бипризмой Френеля.
4. Подготовить протокол наблюдений, таблицу, в которую будут заноситься результаты эксперимента.

Указания по выполнению эксперимента

1. Включить лампу и убедиться, что свет от нее падает симметрично на обе половины бипризмы. Для этого нужно расширить щель и приложить к бипризме кусок белой бумаги. Если свет падает на бипризму несимметрично относительно ее ребра, то следует переместить бипризму вправо или влево.

2. Поместить окуляр на максимальное расстояние от щели. Сузить щель, поставить ее параллельно ребру бипризмы и поместить бипризму на расстоянии a от щели (примерно посередине между щелью и окуляром). Положения щели, бипризмы и окуляра отмечены рисками на основаниях их держателей. Расстояния a и $(a + b)$ определяются по измерительной шкале на оптической скамье и задаются преподавателем.

3. Проверить, достаточно ли четко видны деления шкалы окуляра. Слегка перемещая трубку окуляра вперед и назад, добиться четкого изображения шкалы.

4. Рассмотреть интерференционные полосы через окуляр и небольшим вращением бипризмы вокруг вертикальной и горизонтальной осей, а также регулируя ширину щели, добиться наибольшей четкой интерференционной картины.

5. Ориентируясь на первую и последнюю наблюдаемые светлые или темные полосы интерференционной картины, определить по шкале окуляра положения N_1 и N_2 этих полос. Записать значения m , a , $(a + b)$, N_1 и N_2 в таблицу протокола наблюдений.

6. Выполнить эксперименты, аналогичные п. 5, еще 4 раза при одном и том же расстоянии $(a + b)$, изменяя расстояние a от щели до бипризмы (приближая или удаляя держатель бипризмы с шагом, задаваемым преподавателем, относительно среднего положения бипризмы). Записать результаты наблюдений по аналогии с п. 5 в таблицу для каждого значения a .

7. Записать в протокол наблюдений значение $c = 0.1$ мм – цены наименьшего деления шкалы окуляра, а также значения показателя преломления стекла n и преломляющего угла θ бипризмы, указанные на панели экспериментальной установки.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. Используя результаты наблюдений, значения c , m , N_2 и N_1 для каждого опыта, исходя из формулы (2.5), рассчитать расстояние Δx между двумя интерференционными полосами (светлыми или темными) для каждого из пяти наблюдений (пп 5-6).

2. По формуле (2.4) для каждого из пяти наблюдений (пп. 5-6) вычислить длину волны λ источника света после прохождения светофильтра.

3. Рассчитать среднее значение длины волны $\bar{\lambda}$ и погрешность измерений $\Delta \bar{\lambda}$. Представить результат измерения в округленном виде. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие волновые источники называются когерентными?
2. Что называется геометрической и оптической разностью хода волн?
3. Что такое время когерентности, длина когерентности?
4. Суть явления интерференции, способы наблюдения интерференции.
5. Сформулируйте и обоснуйте условия усиления и ослабления интенсивности результирующего колебания при интерференции.
6. Какую роль в экспериментальной установке выполняет бипризма?
7. Почему преломляющий угол бипризмы Френеля должен быть малым?
8. В чем различие и сходство методов зеркал Френеля и бипризмы Френеля?
9. Почему явление интерференции является доказательством волновой природы света?
10. Как можно создать условия, необходимые для возникновения интерференции световых волн?

Список литературы

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 928 с.
2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики: Учебник. В 3-х тт. Т. 3. Оптика. Атомная физика. – СПб.: Изд-во «Лань», 2009. – 656 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т.IV. Оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 792 с.

4. Савельев И.В. Курс общей физики: Учебное пособие. В 3-х т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. – 496 с.
5. Иродов И. В. Волновые процессы. Основные законы: Учеб. пособие для вузов/ И. Е. Иродов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 264 с.
6. Волновая и квантовая оптика. Руководство к выполнению лабораторных работ по физике. В 2-х частях. Ч. 2. Под ред. А. Г. Граммакова. – Л., Изд-во ЛЭТИ, 1975. – 58 с.