

Общий физический практикум

Лабораторная работа № 4.6

**Опыт Юнга.  
Изучение волновых свойств света.**

Составитель Т.П. Корнеева

2011 г.

**Опыт Юнга.  
Изучение волновых свойств света.**

***Цель работы:***

1. Получение на экране дифракционной картины от одной и двух щелей.
2. Измерение интенсивности света в области интерференции световых волн от двух щелей.
3. Измерение длины волны лазерного излучения.

***Приборы и оборудование:***

Лазер, оптическая скамья с установленными на ней линзами и кассетой для установки ширм с одной и двумя щелями, фотодатчик для измерения интенсивности света.

Теоретическое введение.

**1. Опыт Юнга.**

Английский ученый Томас Юнг (Thomas Young, 1773 – 1829 гг.), врач по профессии, был человеком с весьма разносторонними интересами. Он занимался исследованиями в области математики, физики, ботаники, ему принадлежит серьезная заслуга в изучении и расшифровке египетских иероглифов, а его диссертация по медицине была посвящена исследованиям человеческого голоса.

Занимаясь изучением звуковых волн и наблюдениями волн на воде, Юнг пришел к выводу, что и свет имеет волновую природу. Ему принадлежит мысль о том, что окрашивание тонких пленок может быть объяснено наложением света, отраженного от наружной поверхности пленки, и света, отраженного от внутренней поверхности.

Именно он ввел в физику понятие интерференции волн как явления наложения волн одинаковой частоты, в результате чего их совместное действие может усиливаться или ослабляться.

В 1802 г. Юнг провел свой классический опыт с двумя отверстиями: в непрозрачном экране булавкой были проделаны два очень близко расположенных друг к другу отверстия, которые освещались солнечным светом, прошедшим, в свою очередь, через небольшое отверстие в ширме, закрывающей окно. Свет, проходящий через отверстия в непрозрачном экране, расширяясь благодаря дифракции, образует два световых конуса, которые частично перекрываются. Тогда в области их перекрывания можно наблюдать на экране чередование темных и светлых полос.

Аналогичный опыт может быть проведен, если в качестве отверстий используются узкие длинные щели.

Заметим, что подобный опыт был проделан Гримальди еще в 1665г., но он использовал Солнце в качестве источника для непосредственного освещения отверстий в экране, так что интерференция не могла наблюдаться.

Используя результаты своего опыта, Юнг сумел измерить длины волн для различных цветов: он получил длину волны  $1/36000$  дюйма ( $0,7$  мкм) для красного цвета и  $1/60000$  дюйма ( $0,4$  мкм) для крайнего фиолетового. Это были первые в истории физики (и удивительно точные для своего времени) измерения длины волны света.

## 2. Физические принципы интерференции волн.

Пусть есть два источника когерентных волн  $S_1$  и  $S_2$ , которые находятся от точки наблюдения  $M$  на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  соответственно, и пусть колебания, вызываемые этими волнами в т.  $M$ , происходят вдоль одного направления. Тогда результирующее колебание в т.  $M$  представляет собой сумму двух колебаний:

$$U(t) = A_1 \cos(\omega t - kr_1) + A_2 \cos(\omega t - kr_2),$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число.

Пользуясь методом векторного сложения гармонических колебаний, получим для амплитуды результирующего колебания:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos k|r_2 - r_1|. \quad (1)$$

Таким образом, амплитуда результирующего колебания может принимать значения от минимального  $|A_1 - A_2|$  до максимального  $(A_1 + A_2)$ . Значение амплитуды колебаний в точке  $M$  определяется значением величины  $\Delta = |r_2 - r_1|$ , которую называют «разностью хода» двух волн в т.  $M$ .

В точке  $M$  наблюдается интерференционный максимум, т.е. амплитуда принимает максимальное значение, если

$$k\Delta = 2\pi n, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

и, соответственно, интерференционный минимум, если

$$k\Delta = \pi(2n + 1). \quad (3)$$

Поскольку  $k = 2\pi/\lambda$ , условию максимума (2) соответствует соотношение  $\Delta = n\lambda$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , т.е. на разности хода «укладывается» целое число длин волн.

Условие минимума (3) выполняется, если на разности хода «укладывается» ровно нечетное число полуволн:

$$\Delta = (2n + 1) \lambda/2.$$

При рассмотрении интерференции световых волн в опыте Юнга надо иметь в виду следующее. Когерентность волн, приходящих в точку наблюдения, обусловлена тем, что через близкие отверстия проходит свет от одного источника. При этом разность хода двух волн очень мала ( $\Delta \ll r_1, r_2$ ), и амплитуды колебаний в двух волнах мало отличаются друг от друга ( $A_1 \approx A_2$ ). Тогда, если  $I_0$  – интенсивность каждой из волн, приходящих в т.  $M$ , то в различных точках экрана интенсивность будет меняться от  $I_{\max} = 4I_0$  до  $I_{\min} = 0$ .

Если же две волны, приходящие в данную точку, не обладают когерентностью, то результирующая интенсивность будет везде одинакова и равна  $2I_0$ .

В оптике нередко реализуются случаи, когда свет проходит расстояние  $r_1$  в среде с показателем преломления  $n_1$ ,

а расстояние  $r_2$  – в среде с показателем преломления  $n_2$ . Если длина волны излучаемого света в вакууме равна  $\lambda_0$ , то в среде с показателем преломления  $n$  она равна  $\lambda_0/n$ , поэтому в общем случае *оптическая разность хода* двух световых волн определяется как

$$\Delta_{\text{опт}} = |n_1 r_1 - n_2 r_2|.$$

### 3. Дифракция Фраунгофера на щели

Дифракцией Фраунгофера называют тип дифракции, возникающей при падении плоской волны на препятствие или при прохождении плоской волны сквозь малое отверстие. При этом рассматривается дифракционная картина, образованная параллельными лучами.

Большое практическое значение имеет случай, когда плоская волна проходит сквозь щель, т.е. прямоугольное отверстие, ширина которого много меньше его длины. Анализ явления будет наиболее простым, если волна падает перпендикулярно к плоскости щели.

Когда на щель ширины  $b$  падает плоская световая волна, в соответствии с принципом Гюйгенса каждая точка волнового фронта может рассматриваться как источник вторичных волн. Вторичные волны интерферируют между собой, поэтому в разных направлениях интенсивность света, посылаемого щелью, оказывается различной.

Если на достаточно большом расстоянии от щели поставить экран, то в каждую точку экрана будет попадать свет, идущий от разных участков щели под одним и тем же углом  $\varphi$  к направлению распространения падающей на щель волны. При этом в направлении падающей волны ( $\varphi = 0$ ) волны от всех участков щели будут приходить в одной и той же фазе, и в середине экрана будет наблюдаться центральный максимум интенсивности света.

По мере удаления от середины экрана между волнами, приходящими от разных участков щели, возникает разность

хода, и интенсивность света начинает уменьшаться. *Первый минимум интенсивности* наблюдается в тех точках экрана, для которых выполняется соотношение

$$b \sin \varphi = \lambda \quad (4)$$

Положение первого минимума в направлении, определяемом соотношением  $\sin \varphi = \lambda/b$ , легко объяснить. Разность хода между лучами, идущими от крайних точек щели, равна длине волны:  $\Delta = \lambda$ .

При этом разность хода между лучами, идущими от соответствующих участков одной и другой половины щели, оказывается равной  $\lambda/2$ , и волны, посылаемые двумя половинами щели, гасят друг друга (рис.1), так что в данном направлении щель совсем не посылает света.

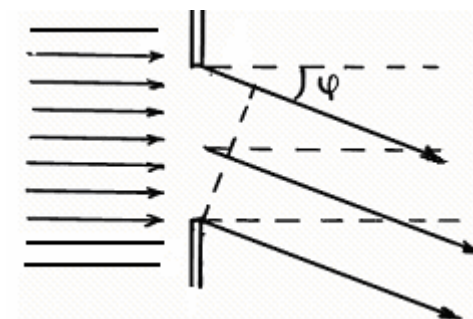


Рис.1

Таким образом, *угловая ширина центрального пятна на экране определяется шириной щели и длиной волны падающего света.*

При дальнейшем увеличении угла  $\varphi$  будет наблюдаться периодическое изменение интенсивности света, при этом положение следующих минимумов будет определяться условием

$$\sin \varphi = 2\lambda/b, \sin \varphi = 3\lambda/b, \dots \sin \varphi = n\lambda/b. \quad (5)$$

Между минимумами интенсивности будут располагаться максимумы, однако их величина быстро уменьшается при увеличении угла  $\varphi$ :

$$I_0 : I_1 : I_2 = 1 : 0,047 : 0,016$$

Примерный вид зависимости интенсивности света от направления в различные точки экрана приведен на рис.2.

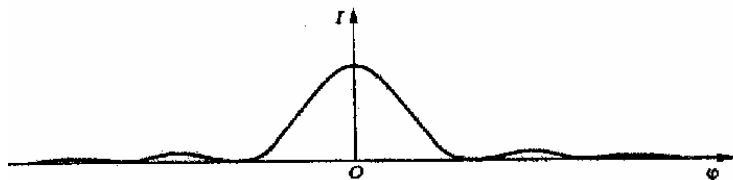


Рис.2

#### 4. Дифракция на двух щелях.

Если в непрозрачной перегородке проделаны две идентичные параллельные щели, то они дадут одинаковые накладывающиеся друг на друга дифракционные картины, поскольку положение максимумов определяется направлением, по которому идет большая часть испытывавшего дифракцию света. Очевидно, что и минимумы будут на прежних местах, ибо те направления, по которым ни одна из щелей не посылает света, не получают его и при двух щелях.

Кроме этого, однако, *существуют направления, в которых волны, посылаемые двумя щелями, будут взаимно уничтожаться*. Это будут, очевидно, направления, которым соответствует разность хода  $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$  для волн, идущих от *соответственных* точек обеих щелей. Если  $d$  – расстояние между щелями (т.е. между соответствующими

точками щелей), то такие направления, как легко видеть из рис.3, определяются условием:

$$d \sin \varphi = \lambda/2, 3\lambda/2, \dots (2n + 1)\lambda/2 \quad (6)$$

*В направлениях, определяемых условием*

$$d \sin \varphi = \lambda, 2\lambda, \dots n\lambda \quad (7)$$

*разность хода волн от двух щелей кратна длине волны, так что этим направлениям соответствуют максимумы.*

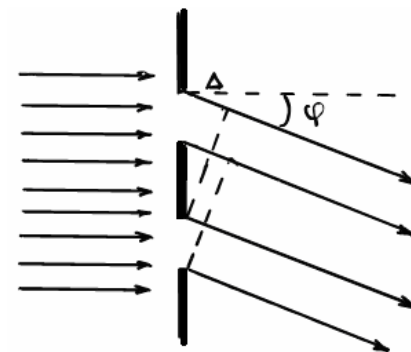


Рис.3

Таким образом, наблюдаемая на экране дифракционная картина от одной щели окажется «прорезанной» темными полосами, соответствующими **интерференционным минимумам**, между которыми расположены **интерференционные максимумы**, соответствующие условию (7).

Если ширина щели существенно меньше, чем расстояние между щелями, на фоне центрального пятна, даваемого одной щелью, образуется несколько ярких полос, разделенных темными промежутками.

Примерный вид распределения интенсивности на экране для этого случая дается на рис.4.

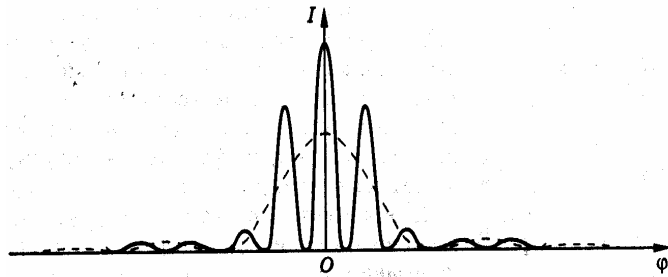


Рис.4

Сопоставляя (6) и (7), нетрудно увидеть, что угловое расстояние  $\delta\varphi$  между соседними минимумами (или максимумами) в центральной части экрана определяется (с учетом малости углов) соотношением

$$\delta\varphi = \lambda/d \quad (8)$$

### Экспериментальная часть.

#### 1. Описание установки.

Схема установки представлена на рисунке 5. На ней условно изображены:  $L_1$  – линза, дающая расходящийся пучок лазерного излучения;  $L_2$  – объектив;  $K$  – кассета для установки ширм со щелями;  $L_3$  – лупа, снабженная кассетой, и жестко связанная с экраном фотодатчика ( $\Phi$ ).

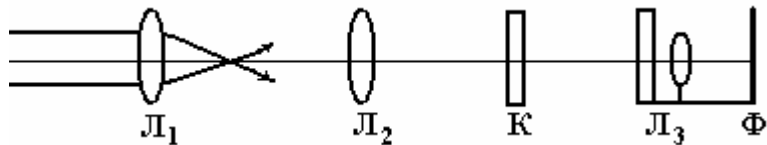


Рис.5

*При выполнении работы можно менять только положения линзы  $L_2$  и кассеты  $K$ .*

*Для измерения ширины щели ширму со щелью вставляют в кассету лупы  $L_3$ , расположенную в ее объектной плоскости (вблизи фокуса). При этом на экране фотодатчика возникает увеличенное в 20 раз изображение щели. Объектив  $L_2$  располагают так, чтобы щель была хорошо освещена.*

При наблюдении дифракции необходимо выполнение двух условий. Во-первых, поскольку лупа  $L_3$ , дающая изображение дифракционной картины на экране, имеет небольшие размеры, необходимо, чтобы через нее проходил весь свет, падающий на щель. Во-вторых, следует учесть, что при освещении двух щелей параллельным пучком света область пересечения расходящихся вследствие дифракции пучков (область интерференции) находится довольно далеко от щелей и вне пределов нашей установки. Эту трудность можно преодолеть, если освещать щели слабо сходящимся пучком света.

Оба условия окажутся выполненными, если *перед наблюдением дифракции сфокусировать пучок с помощью объектива  $L_2$  на плоскости лупы  $L_3$* . При этом на экране фотодатчика  $\Phi$  будет наблюдаться яркое пятно малого размера.

#### 2. Определение длины волны лазерного излучения по распределению интенсивности света на экране вследствие дифракции на одной и двух щелях.

В данной работе вы наблюдаете распределение интенсивности света на экране, образующееся в результате дифракции на щели.

Чтобы воспользоваться формулой (4), необходимо знать величину угла  $\varphi$ , определяющего направление на первый минимум.

При этом следует принимать во внимание следующее. Свет попадает на экран после прохождения линзы  $L_3$ .

Расстояние между линзой и экраном подобрано так, что наблюдаемая вами картина оказывается увеличенной в **20** раз по сравнению с той, которая существует в объектной плоскости линзы.

Пусть ширина центрального пятна на экране равна **A**, тогда ширина пятна в плоскости линзы равна **a = A/20**. При этом угол  $\varphi$  вследствие его малости может быть найден как отношение **a/2L**, где **L** - расстояние между щелью и линзой.

Ширину щели **b** можно измерить, поместив ее в объектную плоскость линзы, при этом на экране возникает увеличенное в **20** раз изображение щели.

Теперь длину волны можно вычислить, применив формулу (4) с учетом малости угла:

$$\lambda = \mathbf{ba/2L} \quad (9)$$

При наблюдении дифракции на двух щелях длина волны лазерного излучения определяется по расстоянию между ближайшими максимумами или минимумами интенсивности света согласно формуле (8) при выполнении соответствующих измерений.

### **ВНИМАНИЕ!**

1. Установка нуждается в специальной настройке. Поэтому **не трогайте элементы установки** без разрешения преподавателя!
2. Перед началом работы убедитесь, что **фотодатчик выключен**.

### **3. Порядок выполнения работы.**

1. Помещая ширмы со щелями в кассету в объектной плоскости лупы, измерьте:
  - а) ширину одиночной щели;
  - б) расстояние между щелями и ширину каждой щели в ширме с двумя щелями.

2. Получите на экране дифракционную картину от одной щели. Определите положения минимумов и максимумов освещенности.

3. Измерьте ширину центрального пятна и расстояние от щели до объектной плоскости лупы.

4. Рассчитайте длину волны лазерного излучения, используя формулу (9). Оцените ошибку.

5. Получите на экране дифракционную картину для двух щелей.

6. Включите фотодатчик. Переместите картинку на экране на щель фотодатчика. *При использовании стрелочного прибора убедитесь, что стрелка прибора отклоняется больше, чем на половину шкалы в области максимума освещенности. **Не допускайте «зашкаливания» прибора!***

7. Измерьте распределение интенсивности в области центрального пятна. Один оборот барабана фотодатчика соответствует перемещению чувствительного элемента на 1мм.

8. По полученным результатам найдите ширину интерференционной полосы и рассчитайте длину волны лазерного излучения по формуле (8), подставляя в нее результаты измерений. Оцените ошибку.

Сравните результат с полученным в п.4.

### **4. Обработка результатов.**

Результаты эксперимента в данной задаче следует представить в следующем виде.

1. Используя полученные в п.2 положения минимумов и максимумов, **нарисуйте** примерный вид распределения интенсивности света на экране при дифракции на одной щели.
2. Используя полученные в п.7 результаты, **постройте** распределение интенсивности света на экране при дифракции на двух щелях.
3. Представьте полученные двумя способами значения длины волны лазерного излучения. Сравните точность полученных результатов.
4. **Сделайте выводы о проделанной работе.**

#### **Контрольные вопросы для получения допуска к работе.**

1. Сформулируйте цель работы.
2. Какое назначение имеют элементы установки, расположенные на оптической скамье?
2. Какие измерения Вы будете выполнять в данной работе, в какой последовательности, и какие приборы будут Вами использованы для выполнения каждого из этих измерений?
3. В какой форме Вы представите результаты измерений?
4. Что называется интерференцией двух волн?
5. В чем состоит опыт Юнга?
6. Какое явление называют дифракцией волн?

#### **Контрольные вопросы для подготовки к защите работы.**

1. Какие выводы Вы сделали по результатам проделанной Вами работы?

2. Какие волны называют когерентными? Как можно получить когерентные световые волны?
3. Сформулируйте условия возникновения интерференционных максимумов и минимумов при наложении двух когерентных волн.
4. Рассмотрите схему опыта Юнга и найдите ширину интерференционной полосы на экране, если расстояние между отверстиями равно  $d$ , расстояние до экрана равно  $L$ , и отверстия освещаются монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda$ .
5. Что такое оптическая разность хода?
6. Почему в опыте Гримальди не наблюдалось явление интерференции?
7. Каковы условия наблюдения дифракции Фраунгофера?
8. В каких направлениях в результате дифракции на одной щели интенсивность света равна нулю?
9. Чем отличается дифракционная картина на одной щели от дифракционной картины для двух близких щелей?
10. Какие еще интерференционные схемы вы знаете?

#### **Рекомендуемая литература:**

.Г.Я. Мякишев, А.З. Сияков «**ФИЗИКА 11. Колебания и волны**» Глава 2. «Дрофа», 2002г.