

Задача № 11

Интерференция света. Опыт Юнга

При подготовке к выполнению этой задачи следует ознакомиться с теорией по учебным пособиям:

1. Глава 3 учебного пособия С.Н. Козлов, А.В. Зотеев. "[Колебания и волны. Волновая оптика](#)", М., изд. МГУ.

2. § 8 С.Н. Козлов, А.В. Зотеев, А.Н. Невзоров, «Задачи по курсу общей физики с решениями. ["Колебания и волны. Оптика"](#)», М., изд. МГУ.

1. Цель работы

Целью работы является изучение интерференции света на примере интерференционной схемы опыта Юнга.

В работе экспериментально определяется малое расстояние между щелями в схеме Юнга.

2. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

Лабораторная установка (рис. 11.1) включает оптическую скамью (1) со светозащитным сдвигающимся кожухом (2), подвижные рейтеры, источник света – полупроводниковый лазер (3), блок «щелей Юнга» (4), экран для визуализации интерференционной картины, смонтированный на одной стойке с видеокамерой для её регистрации с экрана (5).

К приборам и принадлежностям относятся также компьютер с необходимым программным обеспечением.

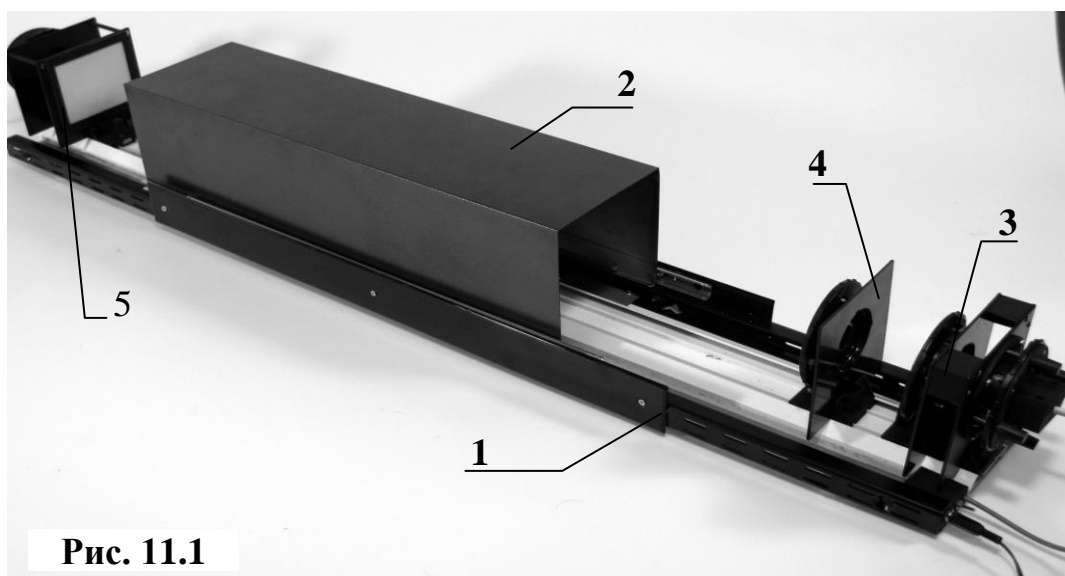


Рис. 11.1

3. Теоретическая часть

А. Развитие представлений о природе света

Вопрос о природе света интересовал человека с древних времен. Несколько модифицированная гипотеза Пифагора о том, что человек видит предметы за счет испущенных ими мельчайших частиц–“корпускул”, развивалась и в трудах И. Ньютона. Эта модель испускания и распространения света, была вполне механической. Корпускулярная теория Ньютона объясняла многие экспериментальные закономерности распространения света – отражение, преломление, прямолинейное распространение света в однородной прозрачной среде.

Однако новые экспериментальные наблюдения, в частности, самого Ньютона не могли быть объяснены корпускулярной теорией света. Например, знаменитые «кольца Ньютона» (и вообще радужная окраска тонких плёнок – интерференционные «полосы равной толщины»), были объяснены впоследствии только волновой теорией света. Эти представления о волновой природе света развивались ещё в работах современников Ньютона – Р. Гука и Г.Х. Гюйгенса – они также успешно объясняли отражение, преломление и прямолинейное распространение света.

Лишь после экспериментальных и теоретических работ Т. Юнга и О. Френеля уже в XIX в. волновая теория стала доминирующей в физике. А из сформулированной в наиболее законченном виде теории электромагнетизма Максвелла следовал вывод о том, что *свет – это электромагнитные волны определенного диапазона*. В ней также обосновывалась поперечность электромагнитных волн, и тот важный факт, что скорость их распространения определяется электрическими и магнитными свойствами среды. В 1887 г. Г. Герц экспериментально наблюдал и исследовал свойства электромагнитных волн.

Казалось, что вопрос о природе света был решен окончательно и бесповоротно. Но XX век внес свои коррективы! Изучение количественных закономерностей теплового излучения света, данные спектроскопии излучения и поглощения атомов, закономерности фотоэффекта – все это свидетельствовало, что световая (электромагнитная) энергия излучается и поглощается только строго определенными порциями – квантами. Пришлось вспомнить и о представлениях о свете, как о потоке особых частиц. Они были названы фотонами.

Таким образом, оказалось, что *природа света имеет двойственный характер. Свету присущи как волновые, так и квантовые (корпускулярные) свойства*. В разных явлениях в большей степени проявляют себя либо первые, либо вторые. Именно в этом смысле говорят о «корпускулярно–волновом дуализме» (двойственности природы) света.

Б. Свет как волна

Наиболее ярко волновые свойства света проявляются в явлениях интерференции, дифракции и поляризации.

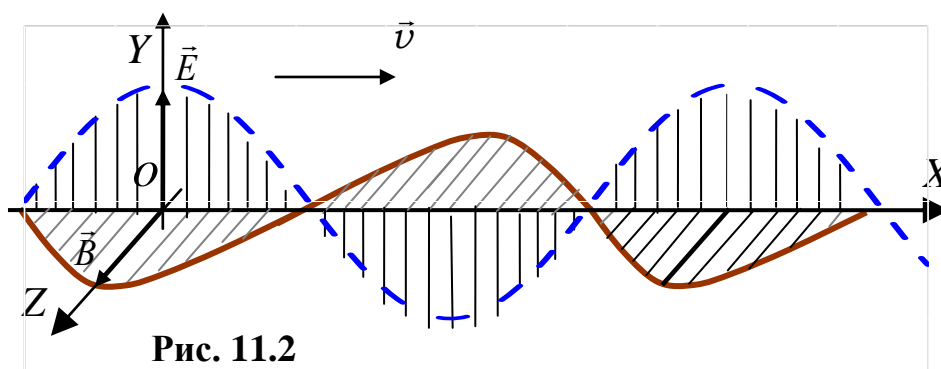
Итак, будем считать, что свет – это электромагнитная волна, распространяющаяся во всех направлениях от источника. В этом случае уравнению волны подчиняется напряжённость электрического поля \vec{E} (или индукция магнитного поля \vec{B}):

$$\vec{E}(x,t) = \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega t - kx)^*.$$
 (11.1)

На рис. 11.2 показана мгновенная "фотография" плоской электромагнитной волны, распространяющейся в направлении оси OX . С течением времени этот профиль волны движется по оси OX со скоростью $v = c/n$. Обратим внимание, что тройка векторов \vec{E} , \vec{B} и \vec{v} «жёстко закреплена» – это три взаимно перпендикулярных вектора, а максимумы напряжённости электрического поля в электромагнитной волне совпадают с максимумами индукции магнитного поля.

В. Интерференция волн

Интерференция – явление характерное для любых волн. Прежде



^{*)} Мы рассматриваем простейший случай гармонических световых волн.

чем анализировать интерференцию света рассмотрим профиль поверхности воды при сложении упругих волн распространяющихся от двух точечных источников – от укрепленных на колеблющейся пластине шариков, ударяющихся о поверхность воды. Частота колебаний шариков одинакова. **Колебания поверхности воды являются суммой колебаний, вызванных каждой волной в отдельности (принцип суперпозиции).** Если в какую-то точку пространства волны приходят в одинаковой фазе – например, одновременно гребни (или впадины) обеих волн, то в этой точке наблюдается усиленный подъем воды. Через половину периода гребни сменяются впадинами – поверхность воды сильно опускается. В этих точках амплитуда колебаний удваивается, а интенсивность учетверяется! В тех же точках пространства, куда волны приходят в противофазе – где гребни одной волны встречаются со впадинами другой – колебания взаимно ослабляются. В таких точках действие двух волн приводит к гашению колебаний – их амплитуда и интенсивность равны нулю!

Таким образом, в результате одновременного действия двух волн на поверхности воды обнаруживаются области, в которых колебания особенно сильны – **максимумы**, чередующиеся с почти не возмущёнными областями – **минимумы**. Как видим, наблюдается весьма характерное **перераспределение колебательной энергии в пространстве** (по сравнению со случаем одной волны) – это так называемая **«интерференционная картина»**.

Если же фазу колебаний одного из источников менять произвольным (случайным) образом по отношению к другому, то и соотношение фаз колебаний складывающихся в каждой точке пространства также будет разным в разные моменты времени –

расположение максимумов и минимумов не будет устойчивым. Интенсивность колебаний в каждой точке пространства окажется равной сумме интенсивностей складывающихся колебаний.

Интерференция не наблюдается!

Поэтому **интерференционная картина – это устойчивая** (не изменяющаяся со временем) **картина чередования максимумов и минимумов. Наблюдать интерференцию возможно, если колебания, возбуждаемые волнами в каждой точке пространства, имеют постоянную, не зависящую от времени^{*)}, разность фаз.** Для этого источники волн должны иметь *одинаковую частоту и постоянную разницу начальных фаз* (например, равную нулю). *Такие волны называются когерентными.*

Итак, *интерференцией волн называется сложение волн с образованием устойчивой во времени интерференционной картины (чередование максимумов и минимумов результирующих колебаний в различных точках пространства).*

Г. Интерференция света

Рассмотрим сначала простейший случай. Пусть в данную точку пространства P приходят только две волны с одинаковой интенсивностью I_0 каждая. Возможны два результата взаимодействия этих волн:

1. В точке регистрируется интенсивность света I_p , равная сумме интенсивностей каждого светового потока – $2I_0$.
2. Эта интенсивность I_p отличается от суммы интенсивностей $2I_0$ (а именно, величина I_p может изменяться от 0 до $4I_0$).

^{*)} Или медленно меняющуюся во времени (чтобы успеть зарегистрировать)

Только второй результат соответствует интерференции. Отличие интенсивности от $2I_0$ определяется фазовым соотношением складывающихся колебаний \vec{E} .

Почему же наблюдать интерференцию от двух источников света гораздо сложнее, чем в случае механических волн? *Световые волны от разных источников (даже от двух совершенно одинаковых лампочек или свечей) не являются когерентными.* Свет испускается возбужденными атомами или молекулами вещества. При этом волны каждого такого элементарного излучения между собой никак *не связаны по фазе (а также частоте и поляризации)*, следовательно, *они не когерентны.*

Как же реализовать интерференцию света?

Д. Схема Юнга

Рассмотрим подробнее результат сложения когерентных световых волн от двух точечных источников на примере классического опыта Юнга, впервые наблюдавшего интерференцию света в начале XIX века.

В схеме Юнга для получения для получения когерентных волн используется метод деления одной и той же исходной волны на две, затем эти две волны проходят разный путь и вновь собираются вместе (см. рис. 11.3). В качестве первичного источника излучения используется точечный монохроматический источник S . Между источником S и экраном \mathcal{E} , на котором наблюдается

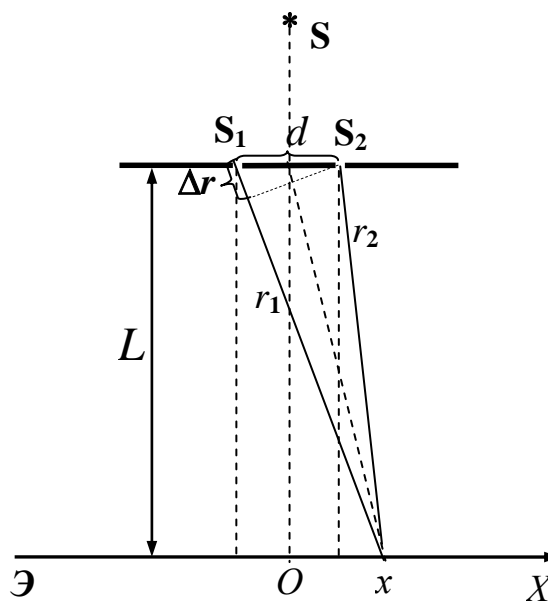


Рис. 11.3. Схема Юнга

интерференция, располагается преграда с двумя маленькими отверстиями (или узкими щелями). Поскольку отверстия находятся на одной волновой поверхности, они могут играть роль *двух точечных (или нитевидных) вторичных когерентных источников* S_1 и S_2 . Рассмотрим результат сложения волн от вторичных источников S_1 и S_2 :

$$E_1 = E_{01} \cdot \cos(\omega t - kr_1) \quad \text{и} \quad E_2 = E_{02} \cdot \cos(\omega t - kr_2).$$

При наблюдении интерференции в схеме Юнга расстояние до экрана много больше, чем расстояние между этими источниками S_1 и S_2 . Поэтому расстояния от источников до точек в центральной части экрана практически одинаковы, и можно считать, что амплитуды и интенсивности этих волн также одинаковы: $E_{01} = E_{02} = E_0$; $I_1 = I_2 = I_0$.

а) Максимумы интенсивности интерференционной картины ($I \approx 4I_0$) наблюдаются там, куда волны приходят в одной фазе – разность фаз равна чётному числу π , т.е. $\Delta\varphi = 2m\pi$. Это значит, что расстояния до максимумов от источников должны отличаться на целое число длин волн^{*)}:

$$\Delta r = \pm m\lambda, \quad \text{max} \quad (11.2,а)$$

где λ – длина волны *в данной среде*, а $m = 0, 1, 2, \dots$ – целое число.

б) В точки минимумов ($I_p = 0$) волны приходят в противофазе – разность фаз равна нечётному числу π , т.е. $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$. Расстояния до минимумов от источников должны отличаться на полуцелое число длин волн:

$$\Delta r = \pm(m + 1/2)\lambda. \quad \text{min} \quad (11.2,б)$$

Величина $\Delta r = r_1 - r_2$ называется разностью хода волн, а целое число m , позволяющее выразить разность хода двух волн через длину волны,

^{*)} Такой вывод следует из уравнения волны $E = E_0 \cdot \cos(\omega t - kr)$, т.к. $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

называется **порядком интерференции**. Иначе можно сказать, что максимумы наблюдаются тогда, когда разность хода равна чётному числу полуволен, а минимумы – нечётному числу полуволен.

Подчеркнём, что в условиях (11.2,а) и (11.2,б) величина λ – **длина волны в той среде, в которой распространяются волны**. Она может отличаться от длины волны в вакууме $\lambda_0 = n \cdot \lambda$ (n – показатель преломления среды). Величину $\Delta = n \cdot \Delta r$ называют **оптической разностью хода**. Поэтому условия максимумов и минимумов интерференции можно записать также в виде:

$$\text{max: } \Delta = \pm m \lambda_0, \quad \text{min: } \Delta = \pm (2m + 1) \cdot \lambda_0 / 2. \quad (11.2,в)$$

Распределение освещённости (интенсивности света I) в центральной части экрана в опыте Юнга представлено на рис. 11.4. Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) интерференционной картины $\Delta x = x_{m+1} - x_m$ называется шириной интерференционной полосы.

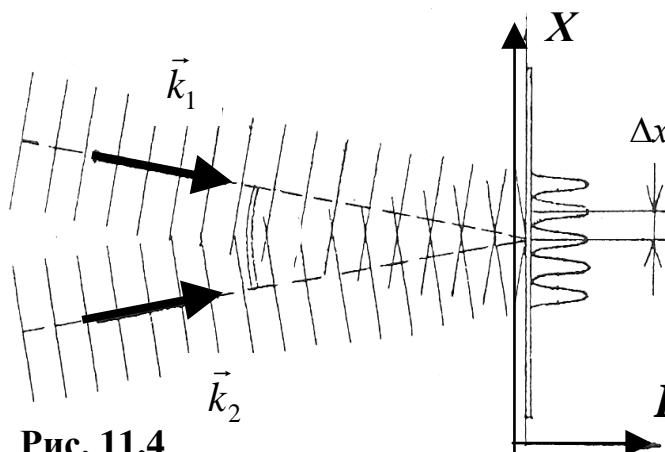


Рис. 11.4

Е. Расчёт интерференционной картины в схеме Юнга

Определим теперь, как разность хода вторичных когерентных волн от источников S_1 и S_2 до различных точек экрана связана с координатами x этих точек. Это позволит, в частности, найти положения максимумов и минимумов, ширину интерференционных полос, т.е. рассчитать интерференционную картину.

По теореме Пифагора (см. рис. 11.3):

$$r_1^2 = L^2 + (d/2 + x)^2, \quad r_2^2 = L^2 + (d/2 - x)^2$$

Вычитая из первого равенства второе, получим:

$$r_1^2 - r_2^2 = 2 d \cdot x \quad \text{или} \quad (r_1 + r_2) \cdot \Delta r = 2 d \cdot x.$$

Или, при условии $l \gg d$ и $L \approx r_1 \approx r_2$:

$$\Delta r \cdot L \cong d \cdot x. \quad (11.3)$$

(Это же соотношение можно получить также и из “подобия” треугольников на рис. 11.3)

Используя условия для максимумов интерференции (11.2) нетрудно найти сначала их координаты на экране:

$$x_{\max} \approx \pm \frac{Lm\lambda}{d}, \quad (11.4)$$

а затем и расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) интерференционной картины – ширину интерференционной полосы $\Delta x = x_{m+1} - x_m$:

$$\Delta x \approx \frac{L\lambda}{d}. \quad (11.5)$$

Как видим, Δx при малых m не зависит от порядка интерференции m и является постоянной величиной при заданных значениях λ , L и d . Поэтому, измеряя экспериментально Δx , L и, зная длину волны излучения лазера λ , можно определить расстояние между щелями в интерференционной схеме Юнга d :

$$d = \frac{\lambda \cdot L}{\Delta x}. \quad (11.6)$$

^{*)} Такой результат достаточно точен только вблизи центра интерференционной картины

4. Описание лабораторной установки

Источник света в лабораторной установке состоит из двух компонентов (рис. 11.5) – лазера (1) и собирающей линзы (2) в оправке, роль которой – коллимация (расширение) светового пучка до размеров

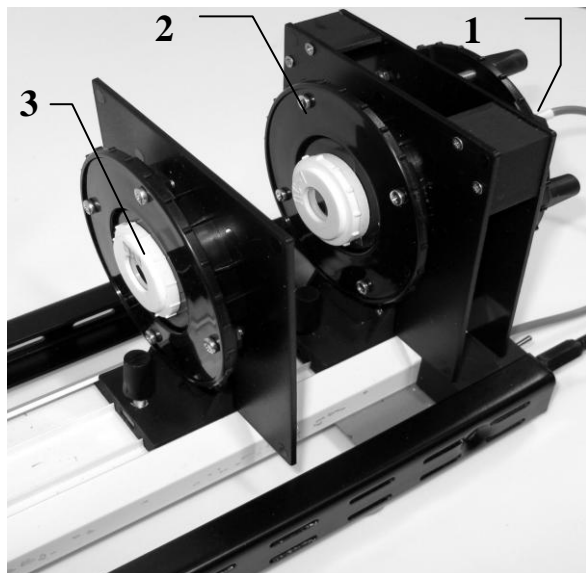


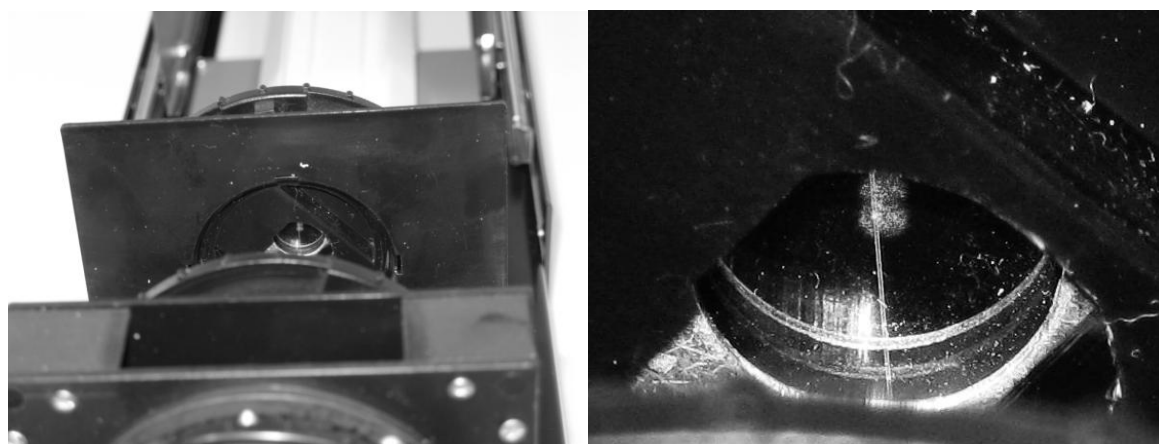
Рис. 11.5

оптического элемента (3) со «щелями Юнга» (рис. 11.6, *а* и *б*).

С тыльной стороны экрана расположена видеокамера для съёмки с фиксированного расстояния интерференционной картины на экране.

Элемент «щели Юнга» устанавливается в расходящемся пучке света (т.е. на пути сферической волны) за фокусом линзы. Приближение его к

фокусу линзы увеличивает яркость картины на экране, но может несколько затруднять процесс получения картины на экране, т.к. в этом случае объект устанавливается в световой луч меньшего диаметра (т.к. фокусное расстояние линзы равно $F = (50 \pm 5)$ мм, то элемент «щели Юнга» ставится на расстоянии > 50 мм от линзы).




а)

Рис. 11.6

б)

5. Порядок проведения работы

1. После включения компьютера запустить программу «Практикум по физике» и выбрать соответствующий «сценарий» проведения эксперимента (Alt+C). Для этого на панели устройств найти кнопку  (Выбрать сценарий проведения эксперимента) (Alt+C). В открывшемся окне в списке задач найти задачу «Интерференция света. Опыт Юнга» и дважды щёлкнуть по ней левой кнопкой мыши.
2. Замерить расстояние L между элементом «щели Юнга» и экраном (рис. 11.7). Стойка с элементом «щели Юнга» находится на отметке 141 мм (x_1). Определить отметку, на которой находится экран ($x_2 = \dots$ мм) и затем определить расстояние L как: $L = x_2 - x_1 = \dots \text{мм} - 141 \text{мм} = \dots \text{мм}$.

$$L = (\dots \pm 1) \text{ мм.}$$

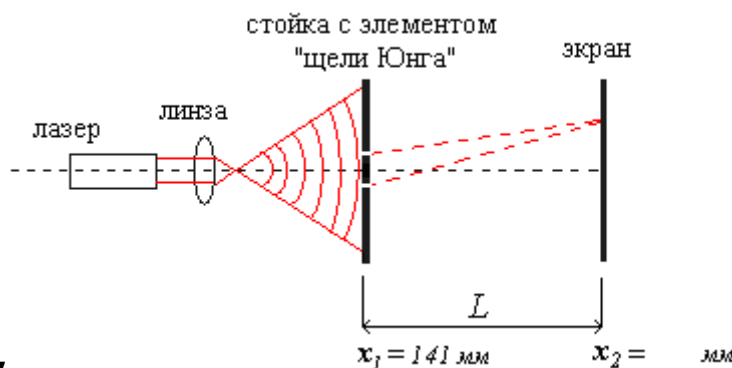





Рис. 11.7

3. Смещая находящийся на магнитном креплении элемент «щели Юнга» вверх-вниз и вправо-влево, получить четкую интерференционную картину в центре экрана.
4. Сфотографировать видеочамерой интерференционную картину и определить расстояние между интерференционными полосами. Для этого нужно:
 - выбрать на панели инструментов кнопку  (работа с камерой) (только в том случае, если окно с камерой само автоматически не открылось вместе с программой).
 - в рабочем окне «Камера» произвести запись изображения интерференционной картины, нажав кнопку  (запись данных с камеры в файл). Перед этим, для того, чтобы были видны П-образные выступы, светозащитный кожух необходимо немного отодвинуть от экрана, как показано на рис. 11.8 (расстояние между выступами 55

мм). Ввести имя файла и нажать «Сохранить», и после приблизительно 10 секунд (не менее) обратно отжать кнопку , при этом файл автоматически откроется уже в окне обработки.

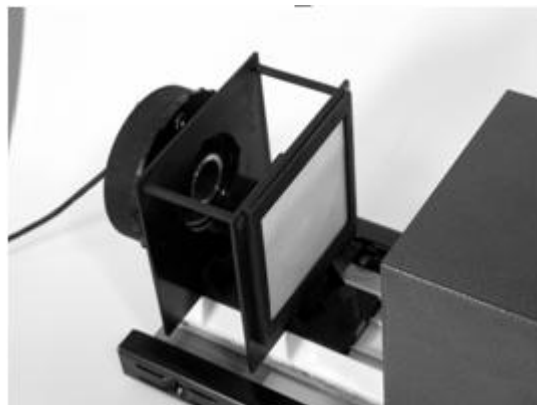


Рис. 11.8






- перемещая и растягивая мышью единичный отрезок , сопоставить его с расстоянием между П-образными выступами оправки на изображении.
 - нажать на кнопку  (установка длины масштабного отрезка) и ввести длину масштабного отрезка «55».
 - перемещая и растягивая мышью систему координат , поместить её центр в середину интерференционной картины.
 - в правом окне регистрации данных на панели инструментов нажать кнопку  (добавление отрезка к изображению) и зафиксировать выбранный инструмент кнопкой  (фиксация текущего инструмента).
 - зафиксировать расстояние между серединами крайних из «j» полос, определить из таблицы на экране длину этих отрезков h_j и записать эти данные в таблицу 1.
5. Выбирая различные интерференционные полосы, провести подобные измерения ещё 4 раза и записать все данные в таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	j , число полос	h_j , мм	Δx , мм	d , мм	Δd , мм
1					
2					
3					
4					
5					

После таблицы оставить место для записи расчётных результатов (примерно половину страницы).

6. Указания по обработке результатов измерений

Параметры установки:

$$L = (\dots \pm 1) \text{ мм}$$
$$\lambda = (655,0 \pm 0,1) \text{ нм}$$

1. По результатам каждого измерения рассчитать ширину интерференционных полос по формуле:

$$\Delta x = \frac{h_j}{j-1},$$

где j – число полос на экране. Результаты занести в таблицу 1.

2. Для каждого значения ширины интерференционной полосы, используя соотношение (11.6)

$$d = \frac{\lambda \cdot L}{\Delta x} \quad (11.6)$$

вычислить расстояние d между щелями в схеме Юнга. Результаты занести в таблицу 1.

3. Рассчитать среднее значение расстояния d между щелями:

$$\langle d \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_i = \dots \text{ мм.}$$

4. По полученным экспериментальным данным оценить **погрешность измерений** расстояния между щелями:

$$\Delta d^{\text{изм}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |d_i - \langle d \rangle| = \dots \text{ мм.}$$

Оценить **погрешность метода** и затем общую **погрешность эксперимента**.

Записать результат экспериментального определения расстояния между щелями Юнга в стандартной форме:

$$d = (\langle d \rangle \pm \Delta d) \text{ мм.}$$

Погрешность метода:

$$\varepsilon_d^{мет} = \dots$$

$$\Delta d^{мет} = \varepsilon_d^{мет} \cdot \langle d \rangle = \dots \text{ мм.}$$

Общая погрешность эксперимента: $\Delta d = \Delta d^{мет} + \Delta d^{изм} = \dots \text{ мм.}$

Окончательная запись результата: $d = (\dots \pm \dots) \text{ мм.}$

7. Контрольные вопросы

1. Как менялись представления на природу света в истории науки?
2. Что такое свет согласно теории электромагнетизма?
3. Что такое корпускулярно–волновой дуализм?
4. В каких явлениях можно обнаружить волновые свойства света?
5. Что такое интерференция волн?
6. Что такое когерентность?
7. В чем трудность реализации условий для интерференции света?
8. Опишите интерференционную схему Юнга.
9. Каковы условия образования максимумов и минимумов в интерференционной картине?
10. Как выглядела бы интерференционная картина в опыте Юнга, если в качестве источника использовать:
 - а) «ртутную» лампу с двумя основными спектральными линиями излучения 546 и 578 нм;
 - б) «белый» свет от лампы накаливания.
11. Как найти координаты максимумов и минимумов интерференционной картины в схеме Юнга?
12. Как определить ширину интерференционных полос в схеме Юнга?
13. Опишите интерференцию в тонкой плёнке. Чем ограничена толщина пленки, для которой ещё возможно наблюдать интерференцию?
14. Что такое полосы равной толщины? Что такое полосы равного наклона?
15. Что такое «просветление оптики»?
16. Что такое «кольца Ньютона»? Нарисуйте оптическую схему хода лучей при наблюдении колец Ньютона. Напишите условие наблюдения светлого интерференционного кольца Ньютона при наблюдении в отражённом свете.

8. Указания по технике безопасности

1. Перед выполнением работы получить инструктаж у лаборанта.
2. Запрещается трогать руками оптические поверхности линзы, источника и экран. Все перемещения вдоль оптической скамьи следует производить, двигая приборы за металлические рейтеры.
3. Соблюдать общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

9. Приложения

Приложение 1. Оценка погрешности измерений.

Приложение 2. Датчики, интерфейсы, программное обеспечение.