

Методические указания

Н.А. Задорожный, Ю.Ю. Инфимовский, С.Л. Тимченко

Лабораторная работа О-101

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ (МЕТОД ЮНГА)

2023 год

Измерение длины волны лазерного излучения интерференционным методом (Метод Юнга)

1. Цель работы

Цель работы состоит в изучении законов интерференции света и метода наблюдения интерференции с помощью опыта Юнга.

2. Задачи лабораторной работы

Задачей работы является экспериментальное определение длины волны излучения источника монохроматического света (лазера).

3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

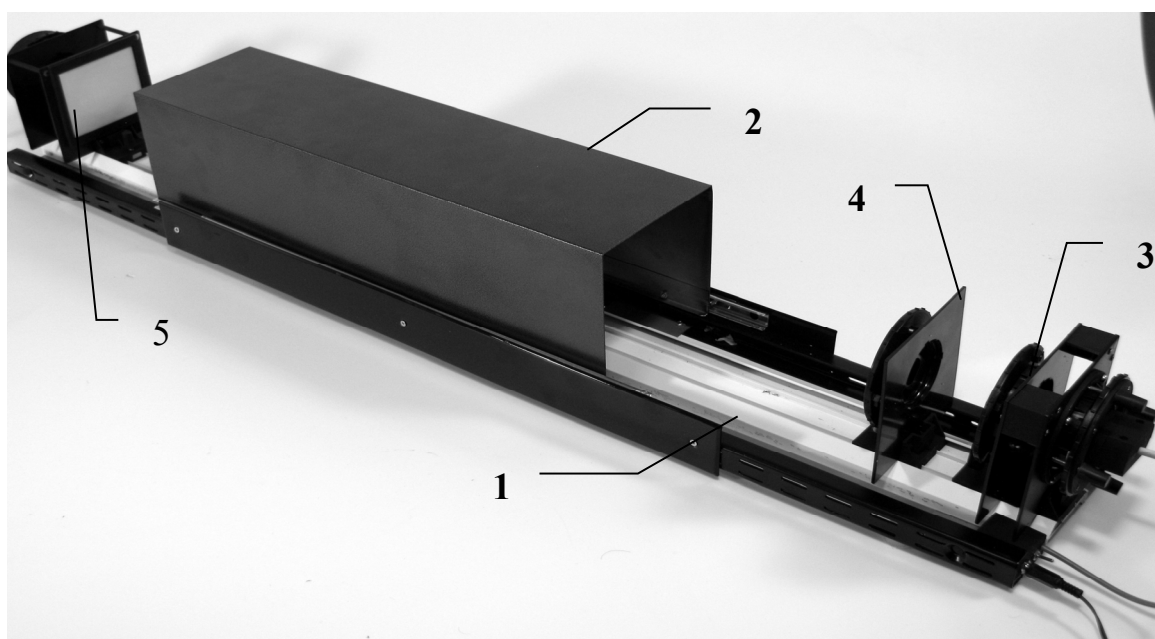


Рис. 1

Лабораторная установка (рис. 1) включает оптическую скамью 1 со светозащитным сдвигающимся кожухом 2, подвижные рейтеры, источник света 3, блок щелей Юнга 4, стойка подсветки, экран для визуализации интерференционной картины, смонтированный на одной стойке 4 с веб-камерой.

К приборам и принадлежностям относится компьютер с необходимым программным обеспечением.

4. Теоретическая часть

Свет представляет собой электромагнитные волны с частотами $4 \cdot 10^{14}$ – $7.5 \cdot 10^{14}$ Гц. Человеческий глаз не способен различать колебания, если они происходят чаще десяти раз в секунду, поэтому он фиксирует только средний поток энергии электромагнитной волны. Усредненная по времени плотность потока энергии волны называется интенсивностью. Согласно уравнениям Максвелла, интенсивность электромагнитной волны равна усредненному по времени вектору Пойнтинга и, следовательно, пропорциональна квадрату амплитуды электрического или магнитного поля в волне.

Свет в любом естественном источнике порождается излучением очень большого количества атомов среды, испускающих цуги электромагнитных волн независимо друг от друга. Атом источника света, перейдя в возбужденное состояние в результате теплового движения или взаимодействия с излучением, через некоторое время «высвечивается», испуская цуг электромагнитных волн за время порядка 10 нс, после чего прекращает излучать до следующего возбуждения. Из-за большого количества элементарных излучателей световая волна содержит излучение разных частот, а амплитуда, фаза результирующей волны и пространственная ориентация вектора электрического поля меняются хаотически.

Замечание. К исключениям можно отнести лазер – генератор волн оптического диапазона, в рабочей зоне которого созданы специальные условия, заставляющие атомы среды излучать согласованно.

Одно из явлений, которое трудно объяснить с точки зрения корпускулярной теории, но которое естественно следует из волновой природы света – *интерференция* (от лат. *inter* – между и *ferens* – переносящий) световых волн. Чтобы перейти к описанию этого явления необходимо дать понятие *когерентности* (от лат. *cohaerentia* – сцепление, связь).

Два и более волновых процесса называются *когерентными*, если разность фаз между ними сохраняется приблизительно постоянной в течение времени, достаточного для наблюдения.

Для двух приблизительно монохроматических источников (например, лазеров) условием когерентности является равенство частот излучения. Но для того, чтобы два источника естественного света были когерентны, они должны иметь общее происхождение: образованы участками фронта одного и того же источника (как, например, в опыте Юнга) или быть результатом деления амплитуды одного светового потока (как при интерференции в тонких пленках).

При наложении нескольких волновых процессов амплитуда результирующего поля зависит от разности фаз этих процессов, а разность фаз, в свою очередь, зависит от точки пространства. Таким образом,

амплитуда светового поля, а следовательно и интенсивность результирующей волны, зависит от точки пространства.

В случае наложения монохроматических источников глаз фиксирует череду максимумов и минимумов освещенности. В случае суперпозиции потоков естественного света интерференционные максимумы для различных длин волн не совпадают, и человек видит череду максимумов, отвечающих различным цветам спектра. Примеры таких явлений в обычной жизни довольно многочисленны: цвета побежалости на металле, радужные разводы на пленке нефтепродуктов на поверхности воды, цветные полосы, наблюдаемые при падении света на оптический диск и т.д.

Перераспределение энергии, возникающее при наложении когерентных волновых процессов, приводящее к образованию максимумов и минимумов интенсивности, называется *интерференцией*, а получившееся в результате распределение интенсивности – *интерференционной картиной*.

В схеме Юнга два когерентных источника получаются делением фронта волны одного источника. Интерференционная картина наблюдается на экране, расстояние до которого много больше расстояния между источниками.

В классическом опыте Юнга свет от источника (рис. 2) падает на узкую щель (1) (так мы увеличиваем радиус когерентности) а через нее – на две параллельные ей щели (2). Щели перпендикулярны плоскости рисунка. В области перекрытия полученных когерентных световых пучков на экране (Э) наблюдаются параллельные интерференционные полосы.

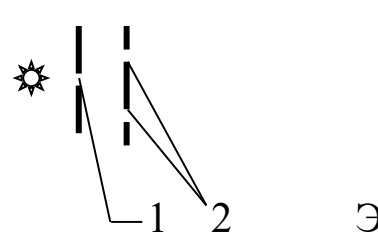


Рис. 2

Пусть складываются две волны одной частоты с однонаправленными колебаниями и разностью фаз δ :

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{10} \cos(\omega t), \\ E_2 &= E_{20} \cos(\omega t + \delta). \end{aligned}$$

Согласно принципу суперпозиции световых волн, напряженность электрического поля результирующей волны E_0 будет равна

$$E = E_1 + E_2 = (E_{01} + E_{02} \cos \delta) \cos \omega t - E_{02} \sin \delta \sin \omega t \quad (1)$$

Здесь использована известная из тригонометрии формула косинуса разности:

$$\cos(\omega t + \delta) = \cos(\omega t) \cos(\delta) - \sin(\omega t) \sin(\delta).$$

По формуле вспомогательного аргумента

$$A \cos \alpha + B \sin \alpha = \sqrt{A^2 + B^2} \cos \left(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{B}{A} \right), \quad (2)$$

откуда из (1) получаем

$$E = \sqrt{(E_{01} + E_{02} \cos \delta)^2 + (E_{02} \sin \delta)^2} \cos(\omega t - \varphi) = \\ \sqrt{E_{01}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \delta + E_{02}^2} \cos(\omega t - \varphi) \\ \varphi = \operatorname{arctg} \frac{E_{02} \sin \delta}{E_{01} + E_{02} \cos \delta}$$

Результирующее колебание будет гармоническим колебанием с той же частотой и амплитудой

$$E_0 = \sqrt{E_{01}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \delta + E_{02}^2}$$

Так как интенсивность (среднее по времени значение вектора Пойнтинга) электромагнитной волны I пропорциональна квадрату напряженности электрического поля

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu}} \frac{E_0^2}{2} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\varepsilon_0 \varepsilon}} \frac{H_0^2}{2},$$

то

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

где I – интенсивность результирующей волны; I_1 и I_2 – интенсивности двух интерферирующих волн. Величина $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$ называется интерференционным членом. От его значения зависит насколько и в какую сторону результирующая интенсивность будет отличаться от своего среднего значения $I_{\text{ср}} = I_1 + I_2$.

Если

$$\delta = 2m\pi, \quad (3a)$$

где m – целое число, то интенсивность максимальна, если

$$\delta = (2m+1)\pi, \quad (3б)$$

интенсивность – минимальна. Чередование минимумов и максимумов приводит к чередованию темных и светлых полос, называемых *интерференционной картиной*. Расстояние между соседними светлыми или соседними темными полосами (т.е. между соседними максимумами или соседними минимумами интенсивности) называют *шириной интерференционной полосы*.

Разность фаз δ связана с оптической разностью хода $\Delta\Theta$ и определяется соотношением:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\Theta, \quad \Delta\Theta = n(L_1 - L_2), \quad (4)$$

где L_1 и L_2 – оптические длины двух лучей, идущих от источника до точки наблюдения (отрезку длиной l в среде с показателем преломления n соответствует оптическая длина $\Theta = nl$), λ – длина волны излучения.

Из уравнений (3) и (4) получаем, что условия интерференционного максимумов имеет вид:

$$\Delta\Theta = m\lambda, \quad (5)$$

а минимумов

$$\Delta\Theta = (2m + 1)\lambda/2,$$

где m – целое число.

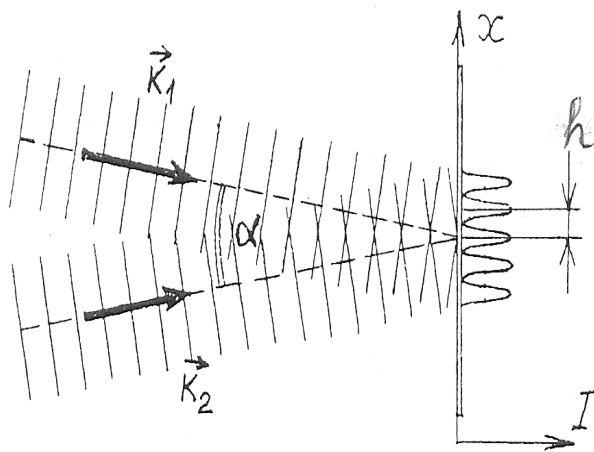


Рис. 3

Две плоские волны, порожденные длинными параллельными щелями, с малым углом α между направлениями распространения (рис. 3), на экране, перпендикулярном среднему направлению распространения, дают

интерференционную картинку в виде чередующихся темных и светлых полос. Ширину интерференционной полосы h можно найти из рассмотрения треугольников AS_2K и S_1NS_2 (рис. 3). Здесь d – расстояние между щелями, L – расстояние от щелей до экрана, на котором наблюдается интерференционная картина, N – точка на отрезке OS_2 , такая, что $AN = AS_2$. Тогда S_2N представляет собой геометрическую разность хода волн до точки наблюдения A . При этом будем пользоваться тем, что в реальных экспериментах

$$d \ll x_m \ll L. \quad (6)$$

Пусть на расстоянии x_m от центра экрана в точке A наблюдается максимум m -го порядка. Для простоты будем полагать, что $n = 1$ и $\Delta\Theta = S_2N$. Тогда, из (5):

$$S_2N = m\lambda \quad (7)$$

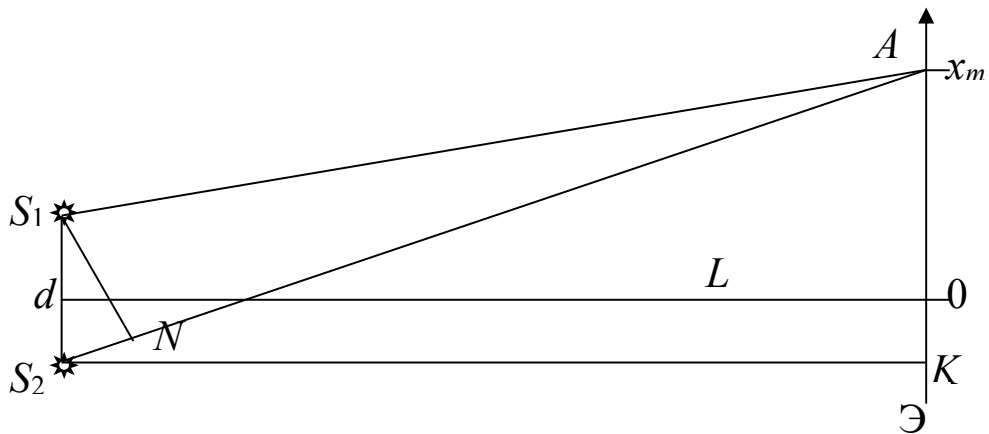


Рис. 4

Докажем, что в предположении (7) $\angle S_2S_1N = \angle AS_2K$.

Так как $d \ll L$, угол S_1NA очень мал. Треугольник S_1NA равнобедренный, поэтому

$$\angle NS_1A = \angle S_1NA = \frac{\pi - \angle S_1AN}{2} \approx \frac{\pi}{2}.$$

Следовательно

$$\angle S_1NS_2 = \pi - \angle S_1NA \approx \frac{\pi}{2},$$

и

$$\angle S_1 S_2 N = \frac{\pi}{2} - \angle S_2 S_1 N.$$

Очевидно, что $\angle AS_2 K$ также равен $\frac{\pi}{2} - \angle S_2 S_1 N$. Получаем, что

$$\angle S_2 S_1 N = \angle AS_2 K. \quad (8)$$

Поскольку для малых углов α : $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha \approx \sin \alpha$, из рис. 4

$$\angle S_1 S_2 N \approx \sin(\angle S_1 S_2 N) = \frac{S_2 N}{d} \quad (9)$$

$$\angle AS_2 K \approx \operatorname{tg}(\angle AS_2 K) = \frac{x_m + d/2}{L} \approx \frac{x_m}{L} \quad (10)$$

В последнем равенстве использовано (6). Объединяя (9) – (10) и используя (7), окончательно получаем

$$x_m = \frac{L}{d} \lambda m. \quad (11)$$

Рассматривая два соседних максимума или минимума, можно определить ширину интерференционной полосы h , как $x_{m+1} - x_m$

$$h = \lambda L/d.$$

При этом h при малых m не зависит от порядка интерференции m и является постоянным при заданных λ , L и d .

Сказанное позволяет предложить следующую методику определения длины волны. По фотографии определяются координаты интерференционных максимумов и строится зависимость координаты интерференционного максимума (x_m) от номера максимума (m), через точки графика проводится прямая, наилучшим образом аппроксимирующая эти точки. В рамках компьютерной обработки данных это означает расчет коэффициентов уравнения прямой на основе метода наименьших квадратов. Тангенс угла наклона данной прямой (иными словами, коэффициент при аргументе линейной зависимости A) на основании (11) равен $\lambda L/d$, и длина волны может быть вычислена по формуле:

$$\lambda = Ad/L \quad (12)$$

Координаты максимумов удобно отсчитывать от нулевого максимума (максимума, соответствующего $m=0$). Однако аппроксимировать данные следует зависимостью вида $Y = Ax + B$, поскольку при обработке

экспериментальной картины как установка точки начала отсчета координаты, так и определение координат остальных интерференционных максимумов осуществляется с определенной погрешностью. Построение прямой вида $Y=Ax+B$ делает все точки равноправными, что позволяет в максимальной степени компенсировать погрешность отдельного измерения координаты.

5. Описание лабораторной установки

Источник света в лабораторной установке смонтирован на первой стойке и состоит из двух компонентов (рис. 5) – полупроводникового лазера 1 и собирающей линзы 2 в оправке, роль которой состоит в преобразовании параллельного пучка света в расходящийся пучок, имитирующий излучение точечного источника света. Направление луча лазера изменяется при вращении юстировочных винтов, расположенных на наружной стороне источника света. Выбор положения линзы обеспечивается креплением ее на поверхности оправки с помощью магнитов.

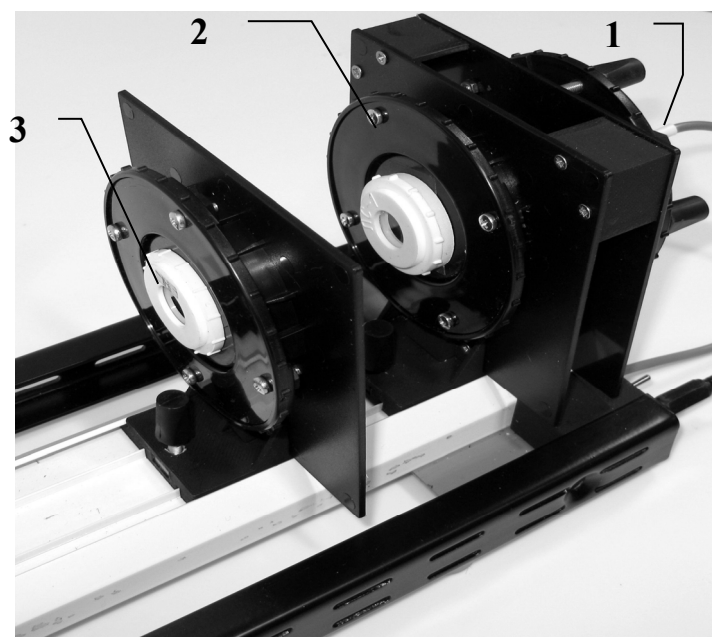








Рис.5

На следующей стойке размещается дифракционный объект «Щели Юнга», магнитное крепление которого позволяет перемещать объект в плоскости, перпендикулярной пучку света. Расстояние между щелями составляет 90 мкм, а ширина щелей равна 45 мкм.

На третьей стойке смонтирован экран, с тыльной стороны которого расположена веб-камера для съемки с фиксированного расстояния интерференционной картины на экране.

6. Порядок проведения лабораторной работы

1. Включите установку, подсоедините камеру к USB- порту компьютера.
2. После включения компьютера запустите программу «Практикум по общей физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt+C) .
3. Нажмите на панели инструментов кнопку «Работа с камерой» . После появления окна с изображением отрегулируйте угол наклона камеры таким образом, чтобы белый круг был виден полностью.
4. Закройте экран светозащитным кожухом, сдвинув его вплотную к черной рамке позади камеры. Включите питание подсветки. Для этого подключите блок питания (сетевой адаптер) к разъему в корпусе кнопочного выключателя, включите блок питания в сеть и нажмите кнопку включения подсветки. Дождитесь появления в окне с изображением ярко освещенного зеленого круга и сфотографируйте его (кнопка ). Согласитесь с предложенной программой папкой для записи изображений или укажите папку самостоятельно. Этот снимок потребуется для определения масштаба изображения интерференционной картины.
5. Используя цифровой инструмент «окружность» (кнопка  в строке над таблицей) постройте окружность, совпадающую с внешней границей освещенного круга на фотографии. Для этого сначала подведите указатель мыши к предполагаемому центру окружности и щелкните левой клавишей. После этого «растягивайте» радиус окружности, снова нажав на левую клавишу мыши. После построения окружности, примерно совпадающей с изображением границы освещенного круга, подстройте ее положение (захват мышью за любую точку окружности) и радиус (захват центра или точки, в которой оканчивается видимый на экране радиус окружности).
6. Захватите указателем мыши один из концов масштабного отрезка (небольшой отрезок зеленого цвета в левом верхнем углу окна с фотографией ) и поместите его на построенную окружность. Аналогичным образом поместите второй конец масштабного отрезка в диаметрально противоположную точку окружности, при этом, естественно, масштабный отрезок должен пройти через ее центр (рис. 6). Нажмите кнопку ввода масштаба , и в открывшемся диалоговом окне введите видимый диаметр освещенного круга, составляющий 46мм.

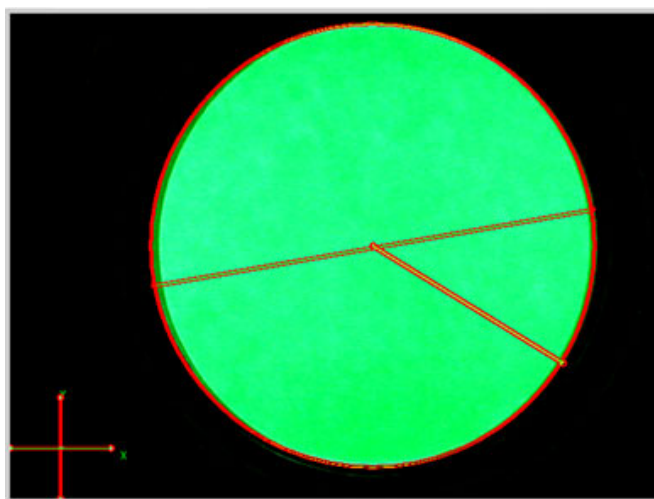






Рис. 6

7. Включите источник света. Для этого подключите блок питания (сетевой адаптер) к разъему в корпусе кнопочного выключателя, включите блок питания в сеть и нажмите кнопку включения лазера.
8. Снимите оправку с линзой и оправку с элементом «щели Юнга» со стоек и получите на экране яркую точку от лазерного луча. Вращая юстировочные винты на оправке лазера, установите луч в центр экрана. Вкручивая юстировочный винт по резьбе, обращайте внимание, чтобы диаметрально противоположный винт при этом не касался упорного кольца оправки.
9. Установите линзу на стойку и, передвигая ее на магнитном креплении вверх-вниз и вправо-влево, установите освещенное пятно в центральной части экрана. Освещенное пятно имеет вытянутую форму, что объясняется конструктивными особенностями полупроводниковых лазеров.
10. Установите на стойку элемент «щели Юнга» (он должен располагаться в 9-10 см от линзы) и получите интерференционную картину в центре экрана. Элемент «щели Юнга» устанавливается в расходящемся пучке света 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.
11. Пользуясь линейкой на оптической скамье, определите расстояние от экрана до щелей Юнга. Запишите его значение.
12. Перейдите на вкладку «Камера» и, закрыв экран светозащитным кожухом, в рабочем окне «Камера» сохраните изображение в файл с помощью экранной кнопки . На вопрос программы о сохранении положения осей координат и масштабного отрезка здесь и далее следует отвечать положительно.
13. Выключите питание лазера и приступите к обработке записанной информации в окне файла изображения.


14. Перенесите масштабный отрезок на край фотографии, свободный от изображения интерференционной картины. Для этого следует захватить его указателем мыши (левая кнопка) за любую внутреннюю точку. Нельзя захватывать концы масштабного отрезка, т.к. это приведет к изменению его длины и необходимости повторения процедуры ввода масштаба.

15. Совместите центр системы координат (небольшой зеленый крест в левом нижнем углу фотографии) с серединой центральной полосы интерференционной картины. Для этого захватите точку начала отсчета указателем мыши и поместите ее в выбранную точку. Увеличьте изображение системы координат, потянув одну из крайних точек креста по направлению от центра и, удерживая указателем мыши эту точку, поверните систему координат так, чтобы направление интерференционных полос совпадало с вертикальной осью системы координат.

16. Используя цифровой инструмент «точка» (кнопка  в строке над таблицей), внесите в таблицу x - координаты всех зарегистрированных интерференционных максимумов, включая нулевой. Запись появляется в таблице после фиксации указателя мыши на середине интерференционной полосы.


17. Нажмите кнопку с символом , тем самым вызвав на экран таблицу обработки данных. Поместите указатель (черный треугольник на синем поле в левом столбце) в строку с определенным значением m , например $m=-2$, выберите в исходной таблице строку, соответствующую данному порядку интерференции и нажмите символ . При этом x -координата выбранного максимума будет перенесена в таблицу обработки.

18. Действуя аналогичным образом, перенесите в таблицу координаты всех остальных интерференционных максимумов. При низкой яркости используйте только главный максимум и максимумы первого порядка.

19. Перейдите на вкладку График, в окне выбора аппроксимирующей зависимости выберите линейную функцию вида $Y=AX+B$ и постройте указанную прямую, нажав на кнопку .

20. Выпишите коэффициент при X и среднеквадратичное отклонение этого коэффициента. На основании формулы (12) определите длину волны излучения. Обратите внимание, что размерность коэффициента A соответствует единице измерения, использованной при вводе масштаба. Геометрические параметры щелей приведены в разделе 5.

21. Используя среднеквадратичное отклонение величины A , оцените погрешность измерений.

22. Включите в отчет (кнопка ) результаты, полученные в пунктах 11 - 12, 16 - 21.

7. Указания по технике безопасности

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
2. Запрещается трогать руками поверхности оптических элементов (линзу, источник излучения, элемент с двойной щелью и экран).
3. При перемещении стоек вдоль оптической скамьи следует прикладывать усилие только к их основанию, одновременно сжимая основание в поперечном направлении.
4. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

8. Контрольные вопросы

1. Дайте определение монохроматических и когерентных волн.
2. Дайте определение явления интерференции света.
3. Что называется интенсивностью излучения?
4. Как определяется интенсивность излучения двух складывающихся когерентных волн?
5. Напишите и объясните условия максимума и минимума интенсивности света при интерференции.
6. Выведите расчетную формулу для определения длины волны в данной работе.