

**Методические указания к лабораторной работе «Изучение
дифракции света на дифракционной решётке»**

**Москва
Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
2020**

УДК 53.536
ББК. 22.3

Рекомендовано Редакционно-издательским советом
МГТУ им. Н. Э. Баумана в качестве методических указаний.
Рецензент

Н. П. Полуэктов, И. И. Усатов, Е. П. Козловская

Методические указания к лабораторной работе
«Изучение дифракции света на дифракционной решётке»

Н. П. Полуэктов, И. И. Усатов, Е. П. Козловская, – Москва.
Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2020 – 21 с.

В работе рассмотрены основные сведения о дифракции света на дифракционной решетке, изложена методика определения длины волны полупроводниковых лазеров с разными длинами волн.

Рекомендована студентам всех технических специальностей студентов МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

(Мытищинский филиал) 2020

© Оформление. Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2020

ISBN

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, устанавливаемых техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ОГЛАВЛЕНИЕ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. Теоретическая часть	5
· Дифракция	5
Интерференция волн	5
· Дифракция на щели	9
· Дифракционная решетка	11
2. Экспериментальная часть	12
Экспериментальная установка	12
Методика измерений	13
3. Порядок выполнения работы	14
ЗАДАНИЕ 1.	14
ЗАДАНИЕ 2.	15
4. Форма отчета о работе	16
5. Контрольные вопросы	17
6. Используемая литература	17

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью данной работы является изучение дифракции света на дифракционной решетке.

Для выполнения лабораторной работы необходимо изучить следующий теоретический материал:

1. Исходные представления о когерентных и некогерентных волнах, интерференции и дифракции волн.
2. Особенности интерференции световых волн.
3. Вывод условий максимумов и минимумов при сложении двух когерентных волн.
4. Представление о принципах Гюйгенса-Френеля для нахождения максимумов и минимумов при прохождении света через малые препятствия.

Цель лабораторной работы:

5. Научить студента работе на экспериментальной установке.
6. Научить студента определять размеры микрообъектов.

Задачи лабораторной работы:

7. Создать у студентов навыки ведения лабораторного журнала, обработки экспериментальных результатов методами графического и аналитического анализа и оценки достоверности полученных результатов.
8. Научить составлять отчет по выполненной работе.
9. Закрепить теоретические знания по интерференции и дифракции света.

1. Теоретическая часть

Дифракцией называется *огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути, или в более широком смысле – любое отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики.* Благодаря дифракции волны могут попадать в область геометрической тени, огибать препятствия, проникать через небольшие отверстия в экранах и т.д. Например, звук слышен за углом дома, радиоволны могут распространяться далеко за пределы прямой видимости антенны передатчика, волны на воде огибают плавающее бревно.

*Явление дифракции, общее для всех волновых процессов, имеет особенности для света, а именно дифракция света наблюдается хорошо, если длина волны λ соизмерима с размерами d преград (или отверстий). Так, например, мы не можем *видеть*, что происходит за углом дома, но можем *слышать*, потому что длина волны *света* много меньше размеров препятствия ($\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ м} \ll d$), а длина волны звука – того же порядка. Дифракция света имеет место быть и на больших препятствиях, но наблюдать ее не просто. Тем не менее при расчете линз объективов оптических приборов ее учитывают.*

При дифракции (как и при интерференции) происходит перераспределение интенсивности в результате суперпозиции волн. В сущности, между дифракцией и интерференцией нет принципиальных различий: по историческим причинам суперпозицию конечного числа волн называют интерференцией, а суперпозицию бесконечного числа волн – дифракцией. Так как дифракция и интерференция имеют одну природу, рассмотрим интерференцию более подробно.

Интерференция волн – пространственное перераспределение энергии волн, которое происходит при наложении двух или нескольких когерентных волн. Волны когерентны, если их фазы согласованы (разность фаз остаётся постоянной во времени). **Когерентность** – согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов. Интерференция возможна

для волн любой природы: звуковые, волны на воде, электромагнитные (радиоволны, свет).

Рассмотрим две электромагнитные волны *одинаковой частоты* ω , которые накладываются друг на друга и возбуждают в некоторой точке пространства два колебания *одинакового направления*:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \cos \Phi_1 = E_{01} \cos(\omega t - k_1 r_1 + \phi_1), \\ E_2 &= E_{02} \cos \Phi_2 = E_{02} \cos(\omega t - k_2 r_2 + \phi_2) \end{aligned} \quad (1)$$

где E_{01} , E_{02} – амплитуды волн, Φ – фаза волны, ϕ_1 и ϕ_2 – начальные фазы колебаний, r – расстояния от источника, пройденными волнами до точки наложения, $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор, λ – длина волны.

Если разность фаз $\Phi_2 - \Phi_1$ не зависит от времени, то есть волны когерентны, то амплитуда результирующего колебания E_0 также остается постоянной во времени:

$$E_0 = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\Phi_1 - \Phi_2)} \quad (2)$$

Для когерентных волн $\cos(\Phi_1 - \Phi_2)$ имеет постоянное во времени значение (но свое для каждой точки пространства). Так как интенсивность света, наблюдаемая глазом, пропорциональна амплитуде колебаний вектора напряженности электромагнитного поля: $I \sim E_0^2$, то результирующая интенсивность света, как следует из (1) и (2), равна:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi_1 - \Phi_2) \quad (3)$$

Таким образом, при наложении когерентных световых волн происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы (если $\cos(\Phi_1 - \Phi_2) = 1$), а в других – минимумы интенсивности (если $\cos(\Phi_1 - \Phi_2) = -1$). Отсюда получаем условия максимума и минимума при интерференции: если сдвиг фаз волн в данной точке пространства

$$\Delta\Phi = (\Phi_1 - \Phi_2) = \pm 2\pi m; \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (4)$$

то наблюдается интерференционный **максимум**; если

$$\Delta\Phi = (\Phi_1 - \Phi_2) = \pm 2\pi(m - \frac{1}{2}); \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (5)$$

то наблюдается **минимум**.

Если накладываются некогерентные волны, то в данной точке пространства складываются колебания, разность фаз которых не постоянна во времени и, вообще говоря, принимает случайные значения. Поскольку в этом случае среднее значение $\langle \cos(\Phi_1 - \Phi_2) \rangle = 0$, то наблюдаемая интенсивность света во всех точках пространства представляется просто суммой интенсивностей двух волн: $I = I_1 + I_2$ (3). Таким образом, **необходимым условием наблюдения** интерференции волн является их когерентность.

Для анализа распространения света Гюйгенс предложил простой метод, названный впоследствии **принципом Гюйгенса: каждая точка волнового фронта является вторичным точечным источником сферических волн**. **Волновой фронт** – это совокупность точек пространства, до которых дошла волна к данному моменту времени (Рис.1). **Френель** вложил в принцип Гюйгенса физический смысл, дополнив его идеей интерференции вторичных волн.

1. Каждый элемент поверхности волнового фронта служит **источником вторичной сферической волны, и излучают в одной и той же фазе**.

2. Все **вторичные источники когерентны**, поэтому их волны интерферируют при наложении.

3. Амплитуду dE колебаний, возбуждаемых в точке M вторичным источником площадью dS , можно выразить формулой:

$$dE = \frac{f(\alpha) a dS}{r}, \quad (6)$$

где a – величина, пропорциональная амплитуде волны первичного

источника, r – расстояние от вторичного источника до точки M , коэффициент $f(\alpha)$ монотонно убывает от 1 при $\alpha = 0$ до 0 при $\alpha \geq \frac{\pi}{2}$.

Френель предложил разбить волновой фронт на кольцевые зоны такого размера, чтобы расстояния от краев зоны до точки наблюдения M отличались на $\lambda/2$. В этом случае волны от соседних зон приходят в точку M в противоположной фазе (сдвиг фаз π) и при наложении эти колебания будут взаимно ослаблять друг друга. Используя геометрию, можно определить внешний радиус m -ой зоны Френеля:

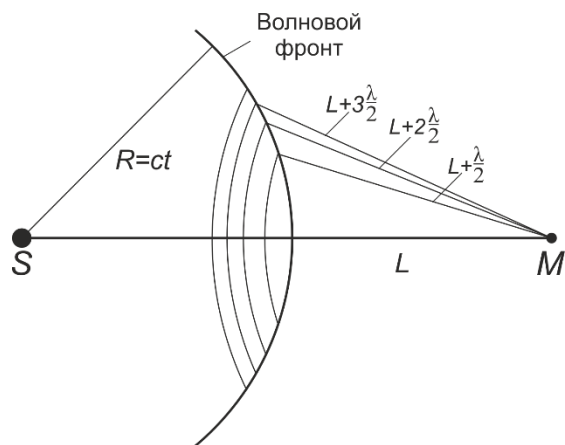


Рис.1.

$$r_m = \sqrt{\frac{RL}{R+L} m \lambda}, \quad (7)$$

Где R – расстояние от источника света S до волнового фронта, L – кратчайшее расстояние от точки M до волнового фронта, λ – длина волны света.

Площади зон Френеля равны между собой:

$$S = \frac{\pi R L \lambda}{R + L} \quad (8)$$

Когда расстояние от источника увеличивается (R), то формула (7) изменяется к виду:

$$r_m = \sqrt{m \lambda L}, \quad (9)$$

Различают два случая дифракции света - дифракцию Френеля, или дифракцию в сходящихся лучах, и дифракцию Фраунгофера, или дифракцию в параллельных лучах. В случае дифракции Френеля в пределах препятствия (отверстия или экрана) укладывается конечное число зон Френеля. Если

уменьшать размеры препятствия или удалять точку наблюдения от преграды, то приходим к случаю, когда в пределах препятствия будет укладываться менее одной зоны Френеля. Этот случай дифракции называется *дифракцией Фраунгофера*.

Характер дифракции зависит от значения безразмерного параметра:

$$\frac{b^2}{L\lambda} \begin{cases} \ll 1 & \text{– дифракция Фраунгофера} \\ \approx 1 & \text{– дифракция Френеля,} \\ \gg 1 & \text{– свет распространяется по законам} \\ & \text{геометрической оптики,} \end{cases} \quad (10)$$

где b - размер препятствия, λ - длина световой волны, L - расстояние от препятствия до экрана наблюдения.

Дифракция на щели

Пусть на бесконечно длинную щель падает плоская световая волна. В соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля освещенную щель можно рассматривать как множество точечных когерентных источников волн. Поместим за щелью экран, расстояние до которого достаточно велико по сравнению с шириной щели. Это условие означает, что в данную точку Р экрана попадет параллельный пучок лучей, отклонившийся на угол φ (рис. 2). Оптическая разность хода $AC = \Delta$ крайних лучей из этого пучка определяется из треугольника ABC ($\angle ABC = \varphi$):

$$\Delta = a \sin \varphi \quad (11)$$

где $a = AB$ – ширина щели. Разобьем щель на зоны Френеля, параллельные щели: оптическая разность хода лучей, идущих от соседних зон, равна половине длины волны, то есть колебания в них происходят в противофазе. Если при наблюдении из точки Р в щели помещается четное число зон Френеля:

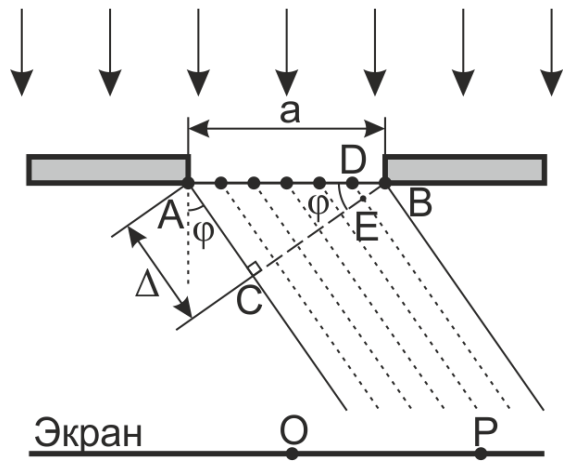


Рис.2

$$\Delta = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2} = \pm m\lambda, \quad (12)$$

то их вклады взаимно погасятся, и в точке P будет наблюдаться минимум интенсивности света. Таким образом, из (2) и (3) получим условие **дифракционных минимумов** при дифракции на щели:

$$a \sin \varphi_{\min, m} = \pm m\lambda, \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (13)$$

где угол $\varphi_{\min, m}$ – направление на минимум с номером m . Если разность хода крайних лучей равна нечетному числу полуволен:

$$\Delta = \pm (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad (14)$$

то при наблюдении из точки P в щели помещается нечетное число зон Френеля. Каждая зона гасит соседнюю, а оставшаяся последняя посылает свет в направлении $\varphi_{\max, m}$ и образует максимум. Поэтому **условие максимумов** имеет вид:

$$a \sin \varphi_{\max, m} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda; \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

Соображения, приводящие к выражениям (13) и (15), имеют, вообще говоря, приближенный характер, поскольку мы применили метод зон Френеля для бесконечно удаленных точек наблюдения, рассматривая дифракцию в параллельных лучах, однако условие минимумов (13) оказывается точным.

Что же касается «центральной» точки O экрана, расположенной против центра щели, то в нее попадает пучок не отклонённых лучей. Все они имеют одинаковую фазу, то есть должны усиливать друг друга. Поэтому в условии минимумов (13) исключено значение $m = 0$, соответствующее точке O.

Дифракционная решетка

Широкое распространение в научном эксперименте и технике получили дифракционные решетки, которые представляют собой множество параллельных, расположенных на равных расстояниях одинаковых «щелей», разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками. Дифракционные решетки изготавливаются с помощью делительной машины, наносящей штрихи (царапины) на стекле или другом прозрачном материале. Там, где проведена царапина, материал становится непрозрачным, а промежутки между ними остаются прозрачными и фактически играют роль щелей.

Рассмотрим сначала дифракцию света от решетки на примере двух щелей. Пусть a – ширина щели, а b – ширина непрозрачного промежутка (рис.3). Периодом решетки называется величина

$$d = a + b \quad (16)$$

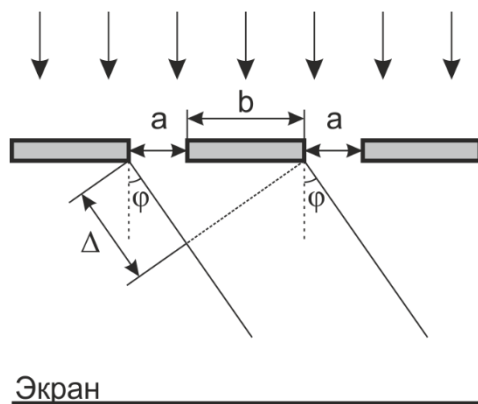


Рис. 3

Разность хода двух крайних лучей равна:

$$\Delta = d \cdot \sin \varphi. \quad (17)$$

Если разность хода равна целому числу длин волн:

$$\Delta = \pm m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (18)$$

то свет, посылаемый каждой щелью, будет взаимно усиливать друг друга.

Условие интерференционных максимумов с учетом (15) имеет вид:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (19)$$

Это формула для **главных максимумов при дифракции на дифракционной решетке**. Кроме того, в тех направлениях, в которых ни одна из щелей не распространяет свет, он не будет распространяться и при двух щелях, то есть **главные минимумы при дифракции на решетке** будут

наблюдаться в направлениях, определяемых условием (13) для одной щели:

$$a \sin \varphi = \pm m' \lambda; \quad (m' = 1, 2, 3, \dots) \quad (20)$$

Если дифракционная решетка состоит из N щелей, то условием главных максимумов является, как и в случае двух щелей, соотношение (19), условием главных минимумов – соотношение (20).

2. Экспериментальная часть

Приборы и оборудование: полупроводниковые лазеры (красного, зеленого и фиолетового цвета), дифракционные решетки, содержащие 300 и 600 штрихов/мм.

Экспериментальная установка

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис. 4, а фотография установки на рис. 5.

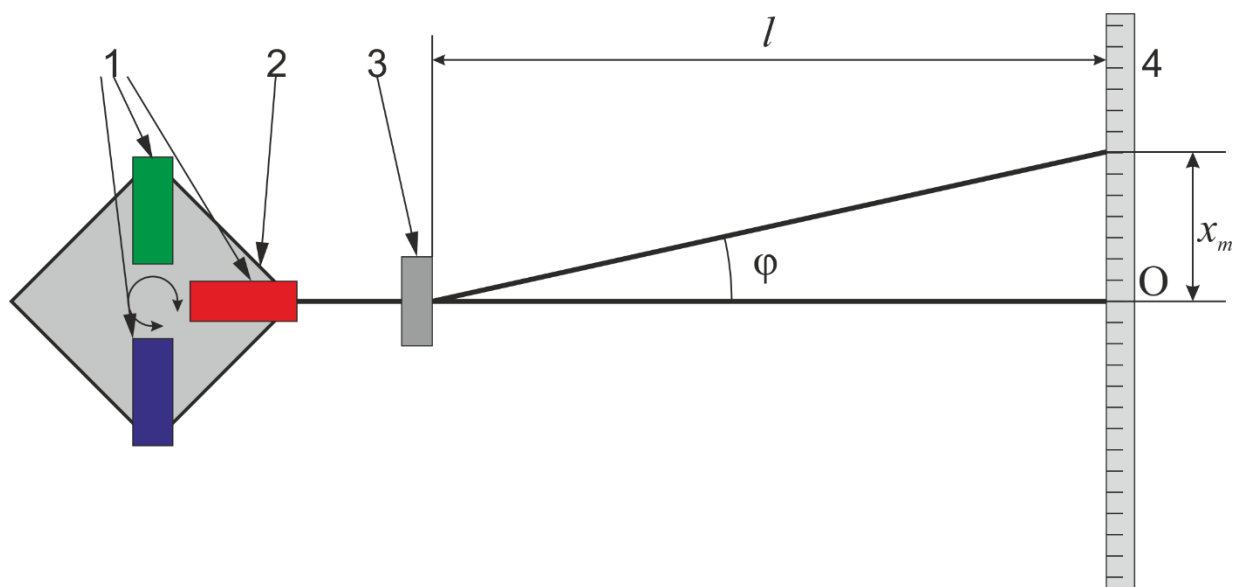


Рис. 4



Рис. 5

Лазеры 1 красного, зелёного и фиолетового цветов (см. рис. 4) располагаются на поворотном столике 2. Цвет лазера выбирается вращением стола. Лазер направленный в сторону дифракционной решётки 3 включается автоматически.

Луч выбранного для исследования лазера попадает на дифракционную решётку, а после неё на экран 4.

Методика измерений

Методика измерения длины волны монохроматического излучения, каковым является лазерное, состоит в исследовании картины, получаемой после прохождения излучения через дифракционную решетку. Определяя на дифракционной картине расстояние x между двумя симметричными главными максимумами разных порядков, и измеряя расстояние от дифракционной решетки до экрана, можно легко найти длину волны лазерного излучения. Для угла дифракции φ (рис.4) получим:

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{x_m}{l} \Rightarrow \varphi_m = \operatorname{arctg} \frac{x_m}{l}, \quad (21)$$

где l – расстояние от решетки до экрана, x_m – расстояние от центрального "нулевого" максимума (наиболее яркого пятна на экране) до максимума m -го порядка.

Из (19) получим:

$$\lambda = \frac{d}{m} \cdot \sin \varphi \quad (22)$$

3. Порядок выполнения работы

1. Включите блок питания лазеров.
2. Поворачивая столик с установленными лазерами, включите красный лазер.

Внимание!

Попадание лазерного излучения на сетчатку глаза опасно.

ЗАДАНИЕ 1. Определение длины волны лазеров при постоянном расстоянии решетки от экрана.

1. Установите выданную преподавателем дифракционную решетку перпендикулярно лучу лазера. Период дифракционной решётки 300 штр/мм $d=1/300$ мм, дифракционной решётки 600 штр/мм $d=1/600$ мм.
2. Измерьте расстояние l от дифракционной решетки до экрана.
3. Определите расстояние x от центрального "нулевого" максимума (наиболее яркого пятна на экране) до максимумов 1 – 5 порядков ($m = 1 - 5$).
4. Данные занесите в таблицу.
5. Вычислите $tg\varphi$ и угол дифракции φ по формуле (21).
6. Вычислите $\sin\varphi$, показание занесите в таблицу.
7. Определите длину волны лазерного излучения для каждого порядка по формуле (22); рассчитайте её среднее значение $\langle\lambda\rangle$ и погрешность $\Delta\lambda$ ($\Delta\lambda = \lambda - \langle\lambda\rangle$). Все результаты запишите в таблицу 1.
8. Поворачивая столик с установленными лазерами, включите зеленый лазер и проделайте п.п. 5 – 8.
9. Поверните столик, зажгите фиолетовый лазер и проделайте п.п. 5 – 8.

Таблица 1

$d = \text{_____}, 10^{-3} \text{ м};$		$l = \text{_____}, \text{ м}$			Цвет лазера: _____.			
m	$x_m, \text{ м}$	$\text{tg}\varphi$	$\varphi,$ град.	$\text{sin}\varphi$	$\lambda,$ 10^{-6} м	$\langle\lambda\rangle,$ 10^{-6} м	$\Delta\lambda$ 10^{-6} м	$\langle\Delta\lambda\rangle$ 10^{-6} м
1								
2								
3								
4								
5								
$\lambda = \langle\lambda\rangle \pm \langle\Delta\lambda\rangle$								

ЗАДАНИЕ 2. Определение длины волны лазеров при переменном расстоянии решетки от экрана.

- В этом задании используются решетки 100 штр/мм или 300 штр/мм.
- Установите выданную преподавателем дифракционную решетку перпендикулярно лучу лазера.
- Измерьте расстояние от решетки до экрана и занесите ее показание в таблицу 2.
- Определите расстояние L от центрального "нулевого" максимума (наиболее яркого пятна на экране) до 1-го максимума слева и справа x_1' и x_1'' . Данные занесите в таблицу 2. ($x_1 = (x_1' + x_1'')/2$).
- Проделайте п.4 для 5 – 7 различных расстояний.
- Для 1-го максимума угол отклонения мал и $\text{sin}\varphi$ в формуле (19) можно заменить на $\text{tg}\varphi = y_1/L$ и тогда (19) запишется, как

$$\frac{dx_1}{L} = \lambda \Rightarrow x_1 = \frac{\lambda}{d} L \quad (23)$$

- Представим (23) в виде уравнения прямой линии $Y = A + BX$, где $Y = x_1$, $X = L$, $B = \lambda/d$.

Постройте график зависимости x_1 от L . Из этого графика нужно определить тангенс угла наклона равный коэффициенту $B = \langle \lambda \rangle / d$.

Таблица 2

$d = \underline{\hspace{2cm}}, 10^{-3} \text{ м},$			Цвет лазера: $\underline{\hspace{2cm}}$.			
№	1	2	3	4	5	6
L, м						
$x_1', 10^{-3} \text{ м}$						
$x_1'', 10^{-3} \text{ м}$						
$x_1, 10^{-3} \text{ м}$						

8. Вычислите из этой формулы среднее значение длины волны $\langle \lambda \rangle$.

Для вычисления тангенса угла наклона B и среднеквадратичного отклонения S_B нужно использовать следующие формулы:

$$B = \frac{\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2}, \quad S_B = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\frac{\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} - B^2} \quad (24)$$

где n – число измерений.

9. Конечная формула $\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \frac{S_B}{B} \langle \lambda \rangle$.

4. Форма отчета о работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Титульный лист лабораторной работы согласно образцу.
2. Конспект теоретической части работы.
3. Методику эксперимента и краткое описание лабораторной установки.
4. Заполненные таблицы с экспериментальными данными.
5. Обработку экспериментальных данных согласно методическим указаниям в данной работе. В случае обработки данных эксперимента

в *Excel* – распечатку скриншота и файл с результатами обработки.

6. Выводы по выполненной работе.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое дифракция волн?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
3. При каких условиях возможно наблюдение дифракции?
4. Какой вид имеет дифракционная картина при дифракции на щели? Сформулируйте и докажите условия минимума (13) и максимума (15).
5. Что такое дифракционная решётка?
6. Сформулируйте и докажите условие главных максимумов при дифракции на решётке (15).
7. Сформулируйте условия главных минимумов при дифракции на решётке (20).
8. Как влияет период дифракционной решётки на дифракционную картину?
9. Как изменится дифракционная картина, если увеличить общее число штрихов N , не меняя её период d ?
10. Как определить наибольший порядок спектра дифракционной решётки?
11. Почему при использовании белого света только центральный максимум белый, а остальные радужно окрашены?

6. Используемая литература

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. шк. 2015. - 608с.: ил.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд. испр. – М.: Высш. шк. 2015. - 542 с.: ил.