

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Л.Ю. Немирович-Данченко
Н.П. Кондратьева

**ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЩЕЛИ**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы
для студентов всех специальностей

Томск
2024

УДК 535.42
ББК 22.3
Н503

Рецензент

Воеводина О. В., д-р физ.-мат. наук, профессор

Одобрено на заседании каф. физики, протокол 110 от 01.02.2024.

Немирович-Данченко, Любовь Юрьевна

Н503 Изучение дифракции лазерного излучения от щели: метод. указания по выполнению лабораторной работы / Л.Ю. Немирович-Данченко, Н.П. Кондратьева. – Томск: ТУСУР, 2024. – 18 с.

Представлена краткая теория дифракции световых волн. Описана экспериментальная установка для изучения дифракции лазерного излучения на щели, а также методика проведения измерений и обработки результатов.

Для студентов ТУСУРа, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям.

УДК 535.42
ББК 22.3

© Немирович-Данченко Л.Ю.,
Кондратьева Н.П., 2024

© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.....	5
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	10
3 ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	11
4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	17
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	18

ВВЕДЕНИЕ

К **дифракции** относится совокупность явлений, обусловленных волновой природой света и наблюдаемых при распространении света в средах с резкими неоднородностями, размеры которых сравнимы с длиной волны.

Дифракция волн – явление, при котором происходит отклонение от законов геометрической оптики, в частности, отклонение волн от их прямолинейного распространения и последующей интерференции отклоненных на одинаковый дифракционный угол лучей.

В зависимости от схемы наблюдения дифракционные явления условно разделяют на дифракцию Френеля и дифракцию Фраунгофера. Дифракция Френеля наблюдается в расходящихся (сходящихся) лучах, дифракция Фраунгофера – в параллельных лучах. Последний случай весьма важен для практики, поскольку он находит применение при рассмотрении многих вопросов, касающихся действия оптических приборов (дифракционной решетки, оптических инструментов и т.д.)

Условия, близкие к условиям Фраунгофера, можно осуществить, поместив точечный источник света в фокусе собирающей линзы, что обеспечит параллельность дальнейшего хода лучей, и собрав свет при помощи второй линзы в некоторой точке экрана, расположенного в её фокальной плоскости. Помещая между линзами препятствия с отверстиями различной величины и формы, можно наблюдать изменение дифракционной картины на экране.

Применение в качестве источника света оптического квантового генератора (лазера) позволяет обходиться без системы линз, поскольку излучение лазера обладает рядом свойств, существенно отличающих его от обычных источников света. Это высокая степень монохроматичности, направленность излучения, высокая интенсивность световых потоков, временная и пространственная когерентность.

Целью данной работы является изучение дифракции Фраунгофера на щели, определение длины волны падающего излучения и ширины щели дифракционным методом.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Пусть на бесконечно длинную щель падает плоская световая волна. В соответствии с **принципом Гюйгенса** каждая точка щели AB , до которой дошел фронт падающей волны, становится источником вторичных когерентных сферических волн. Вторичные сферические волны излучаются во все стороны, проникая в область геометрической тени.

Рассмотрим параллельные лучи, идущие под углом φ к направлению падающего света (рисунок 1.1) и собирающиеся затем в точке P экрана, на котором наблюдается дифракционная картина. Проведем фронт дифрагированных волн (плоскость AD).

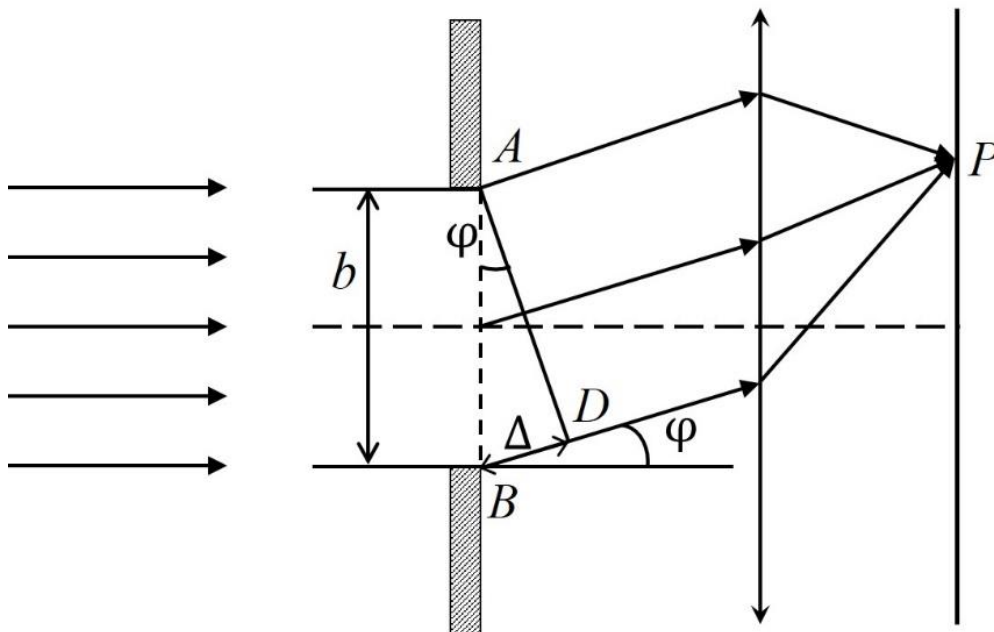


Рисунок 1.1 – Дифракция от щели в параллельных лучах:

b – ширина щели; φ – угол отклонения (дифракции), Δ – разность хода

Оптическая длина пути от фронта волны AD до точки P на экране одинакова для луча A и луча B . Тогда разность хода между лучами A и B , идущими от краев щели, $\Delta = BD$.

В треугольнике ABD угол D – прямой, угол A равен углу дифракции φ (углы со взаимно перпендикулярными сторонами).

При ширине щели AB , равной b , максимальная разность хода между лучом A и лучом B равна $BD = \Delta = b \sin \varphi$.

Принцип Гюйгенса-Френеля все дифракционные задачи сводит к нахождению результата интерференции бесчисленного множества вторичных волн, что приводит к необходимости вычисления довольно громоздких интегралов. Для упрощения таких вычислений Френелем был предложен изящный метод разделения фронта падающей волны на зоны.

В соответствии с методом зон Френеля, щель AB разбиваем на равные по ширине зоны так, чтобы разность хода от правого и левого края каждой зоны была равна $\lambda/2$ – половине длины волны падающего излучения (рисунок 1.2). Это и есть полуволновые зоны Френеля.

Поскольку площади каждой зоны Френеля одинаковы, следовательно, одинаковы и амплитуды колебаний, возбуждаемых действием каждой зоны Френеля в плоскости, где происходит наложение вторичных волн.

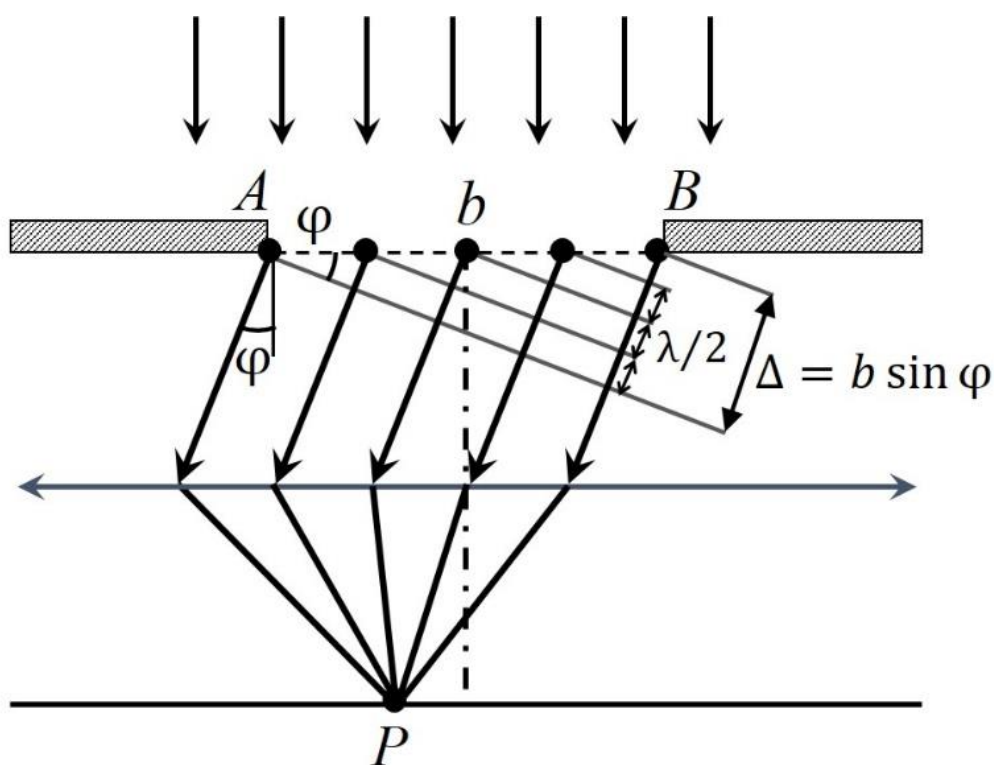


Рисунок 1.2 – Дифракция от щели. Метод зон Френеля

Фазы колебаний, возбуждаемых двумя соседними зонами, противоположны (положительный и отрицательный полупериоды синусоиды), т.к. разность хода составляет $\lambda/2$. В силу этого при интерференции света от каждой пары соседних зон амплитуда результирующих колебаний равна нулю, так как эти зоны вызывают

колебания с одинаковыми амплитудами, но противоположными фазами. Следовательно, если на ширине щели при некотором угле φ уложится четное число зон Френеля, то при наложении все вторичные волны погасят друг друга. В соответствующем направлении, определяемом углом дифракции φ , интенсивность света будет равна нулю.

Эти направления определяются соотношением:

$$b \sin \varphi = \pm 2m \lambda / 2, \quad (1.1)$$

где $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ – порядок минимума.

Если на ширине щели при некотором угле φ уложится нечетное число зон Френеля, то в этом направлении будет наблюдаться максимум света.

Условие максимумов задается приблизительным соотношением:

$$b \sin \varphi = \pm (2m + 1) \lambda / 2, \quad (1.2)$$

где $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ – порядок максимума.

Следует отметить, что выражение (1.2) не описывает центральный максимум.

В направлении, перпендикулярном плоскости щели AB , вторичные волны усиливают друг друга. При этом точка исследования на экране, где наблюдается дифракция, лежит на перпендикуляре к щели b (рисунок 1.2), следовательно, угол дифракции $\varphi = 0$, $\sin \varphi = 0$, разность хода $\Delta = 0$. Колебания от всех точек щели приходят в фазе. Амплитуда результирующего колебания A равна сумме колебаний от всех точек щели AB . Это **нулевой дифракционный максимум**.

Рассмотрим на экране точку которая не лежит на перпендикуляре к щели b (рисунок 1.2). При этом угол $\varphi \neq 0$ такой, что разность хода равна:

$$\Delta = b \sin \varphi = 2 \lambda / 2.$$

Колебания от левого A и правого B края щели приходят в рассматриваемую точку на экране с максимальной разностью хода,

равной длине волны λ . Это значит, что в рассматриваемой точке на экране сходятся колебания от двух полуволновых зон Френеля. В соответствующем направлении, определяемом условием:

$$\sin \varphi = \lambda/b,$$

интенсивность света будет равна нулю. Это **первый дифракционный минимум**.

Пусть направление на точку на экране еще больше отклоняется от нормали к щели b (разность хода *равна трем* полуволнам):

$$\Delta = b \sin \varphi = 3 \lambda/2.$$

Это **первый (после центрального) дифракционный максимум**.

С увеличением угла φ наблюдается чередование максимумов и минимумов света в соответствии с условиями (1.1) и (1.2), при этом интенсивность максимумов уменьшается по закону:

$$I_{\varphi} = I_0 (\sin U/U)^2, \quad (1.3)$$

где $U = \pi \frac{b}{\lambda} \sin \varphi$.

Из выражения (1.3) следует, что при $\varphi = 0$, $U = 0$ получаем интенсивность центрального максимума $I_{\varphi=0} = I_0$, так как $\lim_{U \rightarrow 0} \left(\frac{\sin U}{U} \right) = 1$. Отметим, что интенсивность I_0 центрального максимума наибольшая.

Если взять интенсивность центрального максимума за 100 и обозначить интенсивности первого, второго и третьего максимумов через I_1, I_2, I_3 , то формула (1.3) дает следующее отношение

$$I_0 : I_1 : I_2 : I_3 = 100 : 4,7 : 1,7 : 0,5 \quad (1.4)$$

На рисунке 1.3 приведена картина распределения интенсивности при дифракции от одной щели.

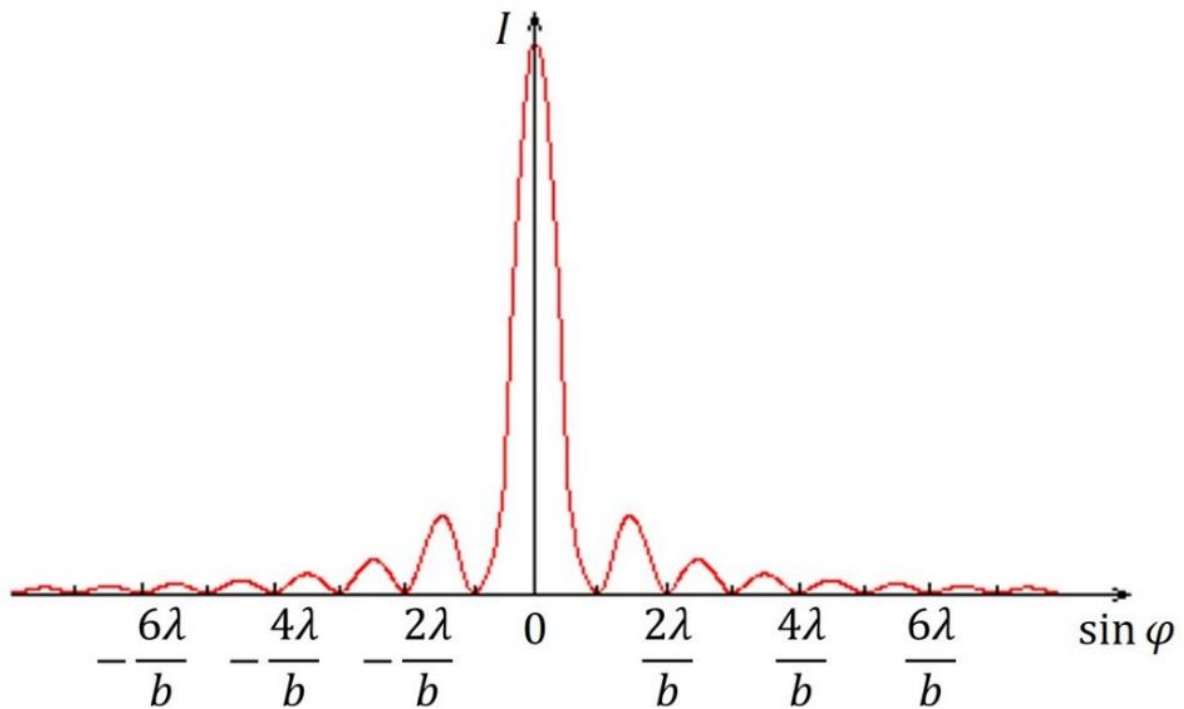


Рисунок 1.3 – Распределение интенсивности света при дифракции от одной щели

На практике довольно легко можно увидеть первые максимумы. Благодаря высокой плотности лазерного излучения удается наблюдать максимумы до десятого порядка.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Дифракция света на щели исследуется на экспериментальной установке, схематично изображенной на рисунке 2.1.

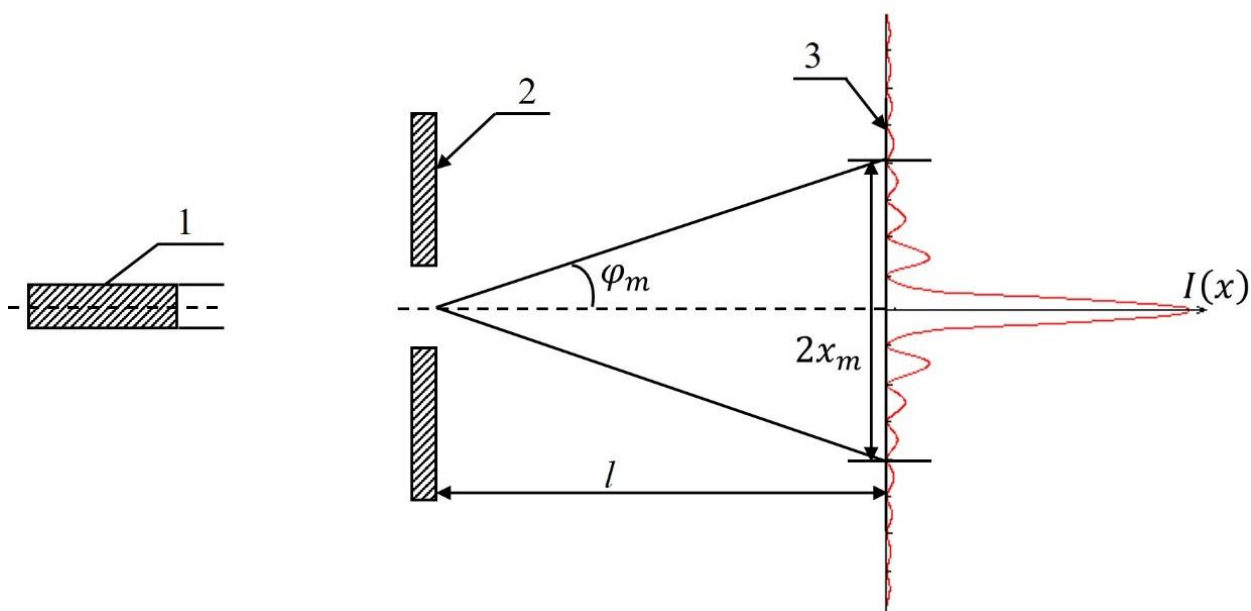


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема наблюдения дифракции Фраунгофера с использованием в качестве источника света лазера:

1 – лазер; 2 – щель; 3 – экран с миллиметровой шкалой;
 φ_m – угол дифракции; $2x_m$ – расстояние между минимумами m порядка; l – расстояние от щели до экрана; $I(x)$ – распределение интенсивности в дифракционной картине

Пучок когерентных параллельных лучей, испускаемых лазером 1, падает на щель 2. Регулируя щель микровинтом, можно ограничить фронт волны и вырезать лишь узкий плоский участок. В этом случае за щелью образуется поле вторичных волн, которые создают дифракционную картину, наблюдаемую на экране 3, отстоящем достаточно далеко от щели.

3 ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Проверить, чтобы все приборы были установлены в соответствии с рисунком 3.1. Экран должен быть установлен в конце оптической скамьи перпендикулярно оси светового пучка, выходящего из лазера, при этом пучок должен быть направлен точно в центр экрана.

Лазер и оправу с щелью перемещать нельзя!

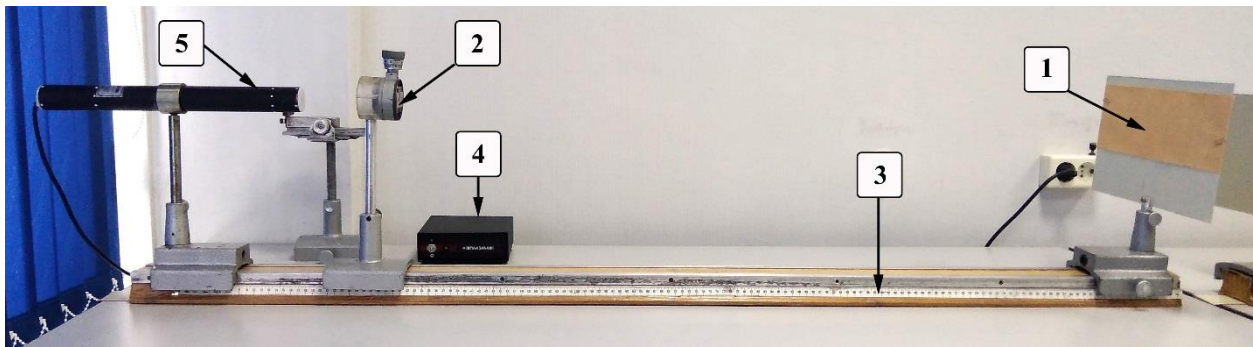


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка:

1 – экран с миллиметровой шкалой; 2 – щель;
3 – оптическая скамья; 4 – блок питания лазера; 5 – лазер

3.2. Включить лазер тумблером «СЕТЬ» на панели блока питания лазера.

3.3. Определить деление шкалы микровинта, соответствующее полностью закрытой щели. Закрывать щель полностью, медленно открывая и закрывая ее определить соответствующее деление b_0 . Данное задание выполнять по указанию преподавателя.

3.4 Регулируя микровинтом размер щели, получить дифракционную картину на экране (рисунок 3.2).

Поскольку поперечное сечение пучка падающих лучей невелико, дифракционные максимумы будут представлять собой горизонтальные черточки, разделенные минимумами.

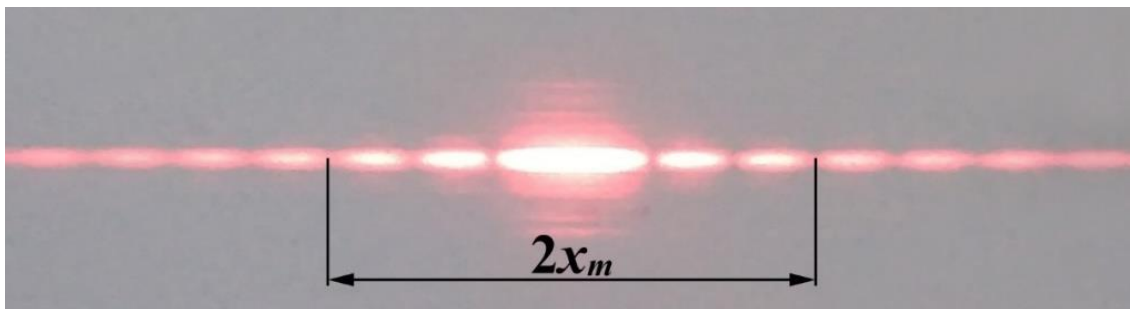


Рисунок 3.2 – Дифракционная картина:
 $2x_m$ – расстояние между левым и правым
дифракционными минимумами для порядка $m = 3$

3.5. Задание 1. Исследование зависимости угла дифракции от ширины щели ($m = \text{const}$, $l = \text{const}$).

3.5.1. Закрывать щель полностью и, медленно открывая ее, получить дифракционную картину, чтобы наблюдались дифракционные минимумы для выбранного порядка m . Не рекомендуется m брать равным единице, поскольку возрастает неточность измерений, обусловленная влиянием интенсивного центрального максимума. Определить ширину b_1 как разность показаний микровинта при открытой и полностью закрытой щели.

3.5.2. Измерить расстояние l от экрана 1 до оправы с щелью 2 по шкале оптической скамьи 3 (рисунок 3.1). Расстояние l примерно должно быть равно 1,0-1,10 м.

3.5.3. Измерить расстояние $2x_m$ между левым и правым дифракционными минимумами m порядка (рисунок 3.2). Под расстояниями между дифракционными минимумами следует понимать расстояние между серединами темных полосок.

3.5.4. Увеличить щель и снова измерить $2x_m$ и b_2 .

3.5.5. Пункт 3.5.4 повторить не менее 5-7 раз.

3.5.6. Результаты измерений записать в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Данные для зависимости угла дифракции от ширины щели

№ опыта	b , мм	$2x_m$, мм	l , мм	φ_m	$1/\varphi_m$	Примечание
1						Порядок минимума $m = \dots$ $b_0 = \dots$ мм
2						
3						
4						
5						
6						
7						

3.5.7. Вычислить углы дифракции φ_m .
Из рисунка 2.1 получим соотношение

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{2x_m}{2l}, \quad (3.1)$$

где $2x_m$ – расстояние между центрами темных полосок,
 l – расстояние от щели до экрана.

Поскольку углы дифракции малы, можно считать верным равенство

$$\operatorname{tg} \varphi_m \approx \sin \varphi_m \approx \varphi_m. \quad (3.2)$$

Тогда значения углов дифракции можно рассчитать по формуле:

$$\varphi_m = \frac{2x_m}{2l}. \quad (3.3)$$

3.5.8. Полученные значения углов дифракции записать в таблицу 3.1.

3.5.9. Сделать вывод о влиянии ширины щели на ширину дифракционной картины. При расширении щели центральный максимум и дифракционная картина в целом сжимаются или расширяются? Что происходит при уменьшении ширины щели до величины, равной длине волны $b \approx \lambda$?

3.6. Задание 2. Определение длины волны лазера.

3.6.1. По данным таблицы 3.1 построить график зависимости обратного значения угла дифракции от ширины щели $\frac{1}{\varphi_m} = f(b)$ в координатных осях $x = b$, $y = \frac{1}{\varphi_m}$.

3.6.2. Используя метод наименьших квадратов, определить коэффициенты в уравнении прямой $\frac{1}{\varphi_m} = f(b)$, а также погрешность углового коэффициента $\sigma(a_1)$.

3.6.3. Определить систематическую погрешность b_0 в определении ширины щели (точка пересечения графика с осью x).

3.6.4. Вычислить длину волны излучения гелий-неонового лазера, воспользовавшись формулой

$$\lambda = \frac{1}{ma_1}, \quad (3.4)$$

где m – порядок минимума,

a_1 – угловой коэффициент прямой.

3.6.5. Сравнить полученную длину волны с табличным значением $\lambda_{\text{табл.}} = 632,8$ нм.

3.6.8. Вычислить погрешность определения длины волны по формуле

$$\sigma(\lambda) = \frac{1}{ma_1^2} \sigma(a_1), \quad (3.4)$$

где $\sigma(a_1)$ – абсолютная погрешность углового коэффициента прямой, полученный в задании 3.6.2.

3.7. Задание 3. Определение ширины щели ($b = \text{const}$, $l = \text{const}$).

3.7.1. Установить ширину щели такой, чтобы на экране были видны максимумы не менее, чем 10 порядков.

3.7.2. Измерить расстояние $2x_m$ между левым и правым минимумами m порядка ($m = 1, 2, 3, \dots, 10$).

3.7.3. Измерить расстояние l между щелью 1 и экраном по шкале оптической скамьи.

3.7.4. Результаты измерений записать в таблицу 3.2.

3.7.5. Вычислить углы дифракции φ_m по формуле (3.1).

3.7.6. Полученные значения углов дифракции записать в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Данные для зависимости угла дифракции от номера минимума

Порядок минимума m	$2x_m$, мм	l , мм	φ_m	Примечание
1				Ширина щели по показанию микровинта $b = \dots$ мм
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

3.7.7. По данным таблицы 3.2 построить график зависимости угла дифракции от номера дифракционного минимума $\varphi_m = f(m)$ в координатных осях $x = m$, $y = \varphi_m$.

3.7.8. Используя метод наименьших квадратов, определить угловой коэффициент a_2 в уравнении прямой $\varphi_m = f(m)$, а также погрешность углового коэффициента $\sigma(a_2)$. Обратите внимание, что точка пересечения графика с осью x – ноль.

3.7.9. Определить ширину щели по формуле

$$b = \frac{\lambda}{a_2}, \quad (3.5)$$

где $\lambda = 632,8$ нм – табличное значение длины волны лазерного излучения,

a_2 – угловой коэффициент прямой.

3.7.10. Сравнить вычисленную ширину щели с экспериментально измеренной. Оценить погрешность определения ширины щели дифракционным методом по формуле:

$$\sigma(b) = \frac{\lambda}{a_2^2} \sigma(a_2), \quad (3.4)$$

где $\sigma(a_2)$ – абсолютная погрешность углового коэффициента прямой, полученный в задании 3.7.8.

3.7.11. Провести анализ полученных графических зависимостей

$$\frac{1}{\varphi_m} = f(b) \text{ и } \varphi_m = f(m).$$

Сделать вывод о справедливости условия дифракционных минимумов при дифракции от щели (формула (1.1)).

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 4.1. В чем заключается явление дифракции света?
- 4.2. В чем заключается принцип Гюйгенса-Френеля?
- 4.3. Дайте определение дифракции Френеля.
- 4.4. Дайте определение дифракции Фраунгофера.
- 4.5. Какой тип дифракции (Френеля или Фраунгофера) реализуется в данном эксперименте и почему?
- 4.6. Как изменяется дифракционная картина с уменьшением ширины щели?
- 4.7. Как изменится дифракционная картина, если экран приближать к щели?
- 4.8. Как определяется угол дифракции в данной работе?
- 4.9. Какую картину Вы ожидаете увидеть на экране при дифракции от щели излучения He – Ne лазера?
- 4.10. Какие зависимости исследуются в данной работе?
- 4.11. Как в данной работе будет определяться длина волны излучения лазера?
- 4.12. Какие приборы необходимы для выполнения данной работы?
- 4.13. Какие измерения нужно провести для расчета угла дифракции?
- 4.14. Какой вид должен иметь экспериментальный график зависимости φ от m ?
- 4.15. По какому закону изменяется интенсивность максимумов при дифракции от щели?
- 4.16. Как в данной работе определяется ширина щели?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика [Электронный ресурс]: учеб. пособие / И.В. Савельев. – СПб.: Лань, 2018. – 500 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/98246>. (дата обращения: 01.02.24)

2. Орловская Л.В. Волновая и квантовая оптика: учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе [Электронный ресурс] / Л.В. Орловская, Е.В. Иванова, А.В. Орловская. – Томск: ТУСУР, 2018. – 127 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7694>. (дата обращения: 01.02.24)

3. Элементарный учебник физики: учебное пособие в 3 томах. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика [Электронный ресурс] / под редакцией Г.С. Ландсберга. – 15-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 664 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/185693>. (дата обращения: 01.02.24)

4. Зенин, А.А. Общие требования и правила оформления отчета по лабораторной работе по физике: Методические указания [Электронный ресурс] / А.А. Зенин. – Томск: ТУСУР, 2023. – 21 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/10389>. (дата обращения: 01.02.24)

5. Мухачев, В.А. Оценка погрешностей измерений: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / В.А. Мухачев. – Томск: ТУСУР, 2012. – 24 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099>. (дата обращения: 01.02.24)