

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

**ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

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 интерференции лазерного излучения: метод. указания по выполнению лабораторной работы / Л.Ю. Немирович-Данченко. – Томск: ТУСУР, 2024. – 14 с.

Представлена краткая теория интерференции световых волн. Описана экспериментальная установка для изучения интерференции лазерного излучения, 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., 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.....	5
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	8
3 ЗАДАНИЕ	8
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	9
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	13
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	14

ВВЕДЕНИЕ

Интерференция волн – явление усиления или ослабления амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся в пространстве двух или нескольких волн с одинаковыми периодами. Интерференция имеет место для волн любой природы - акустических, радио, световых и т.д. Условием наблюдаемости интерференционной картины является когерентность интерферирующих волн. Напомним, что две волны одной частоты называются когерентными, если разность фаз колебаний, возбуждаемых волнами в данной точке пространства, постоянна во времени.

Наилучшие условия для наблюдения устойчивой картины интерференции могут быть созданы, если в качестве источников света использовать лазеры, излучение которых обладает очень высокой степенью когерентности. Кроме того, излучение лазера монохроматично, а в монохроматическом свете интерференционная картина получается наиболее четкой.

Целью настоящей работы является изучение интерференции электромагнитных волн видимого диапазона, генерируемых газовым гелий – неоновым лазером, и исследование характеристик интерференционной картины.

Методической основой работы является классический интерференционный опыт Юнга.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В эксперименте Юнга источниками света служат две узкие щели S_1 и S_2 , освещаемые различными участками одного и того же волнового фронта. Световые пучки, проходящие через щели S_1 и S_2 , расширяются в результате дифракции и частично перекрываются. Во всей области перекрытия наблюдается чередование мест с максимальной и минимальной интенсивностью света. Если в эту область внести экран, то на нем будет видна интерференционная картина, которая имеет вид чередующихся светлых и темных полос. Вычислим ширину этих полос в предположении, что экран параллелен плоскости, проходящей через щели S_1 и S_2 , и находится от нее на расстоянии, значительно превышающем расстояние между щелями (рис.1.1). На рисунке 1.1 BB', CC' – экраны; S_1, S_2 – щели; d – расстояние между щелями; l – расстояние между экранами; x_1, x_2 – геометрические пути интерферирующих лучей; Δ – разность хода лучей.

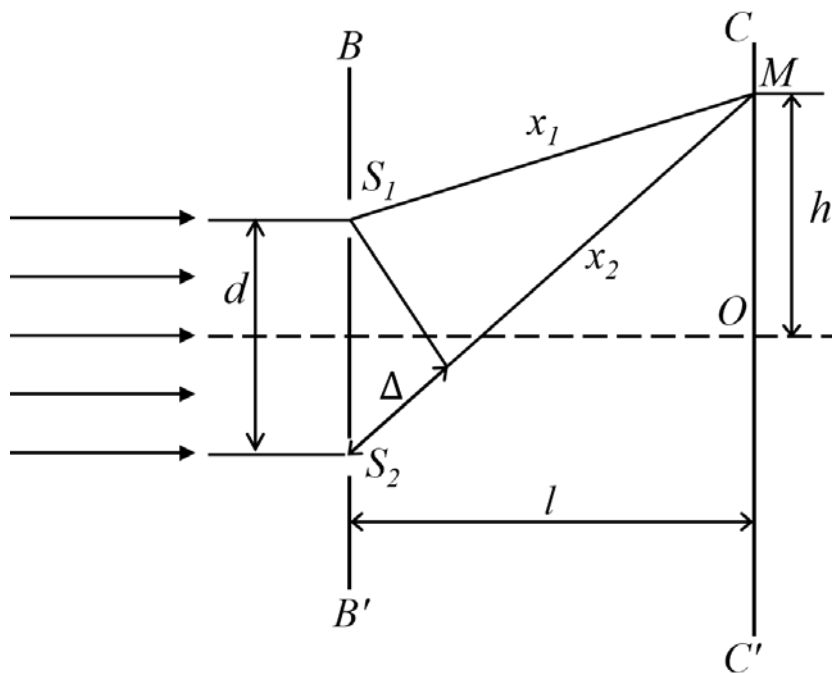


Рисунок 1.1 – Схема опыта Юнга

Положение на экране точки наблюдения M будем характеризовать координатой h , отсчитываемой от точки O , относительно которой щели S_1 и S_2 расположены симметрично.

Известно, что условиями максимумов (1.1) и минимумов (1.2) интенсивности интерференционной картины являются:

$$\Delta = \pm 2m\lambda_0, \quad (1.1)$$

$$\Delta = \pm(m + 1/2)\lambda_0, \quad (1.2)$$

где Δ – оптическая разность хода, равная разности оптических длин путей, проходимых интерферирующими волнами;

$m = 0, 1, 2, \dots$ – порядок максимума или минимума интенсивности;

λ_0 – длина волны в вакууме.

С учетом того, что оптическая длина пути, равная произведению геометрической длины пути на показатель преломления среды n , в условиях проводимого эксперимента совпадает с геометрической длиной пути ($n = 1$), а также $l \gg d$, из рисунка 1.1 легко определить величину Δ :

$$\Delta = x_2 - x_1 = \frac{x_2^2 - x_1^2}{x_1 + x_2} \approx \frac{2hd}{2l} = h \frac{d}{l}. \quad (1.3)$$

Тогда координата максимума m определяется по формуле:

$$h_m^{max} = m \frac{l}{d} \lambda_0, \quad (1.4)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

Координата минимума m определяется по формуле

$$h_m^{min} = (m + 1/2) \frac{l}{d} \lambda_0, \quad (1.5)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

Воспользовавшись формулой (1.5), можно найти ширину интерференционной полосы, определяемую как расстояние между соседними минимумами:

$$\Delta h = h_{m+1}^{min} - h_m^{min} = \frac{l\lambda_0}{d}. \quad (1.6)$$

Из формулы (1.4) вытекает, что расстояние между соседними полосами, определяемое как расстояние между двумя максимумами, также вычисляется по формуле (1.6).

Обсудим влияние геометрии опыта на качество интерференционной картины. В соответствии с формулой (1.6) расстояние между полосами растет с уменьшением расстояния между щелями d и с увеличением расстояния от экрана до щелей l и длины волны λ_0 . Существенное значение имеет условие $l \gg d$, так как в противном случае расстояние между полосами становится соизмеримым с длиной волны, т.е. измеряется долями микрона. Ясно, что в этом случае отдельные полосы становятся неразличимыми.

Характерной особенностью лазерных источников света является высокая степень когерентности световых колебаний по сечению излучаемых световых пучков. Поэтому при использовании лазера в опыте Юнга необходимо лишь следить, чтобы расстояние между щелями S_1 и S_2 было меньше ширины лазерного луча.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для получения картины интерференции лазерного излучения собирается установка по схеме, схематично изображенной на рисунке 2.1.

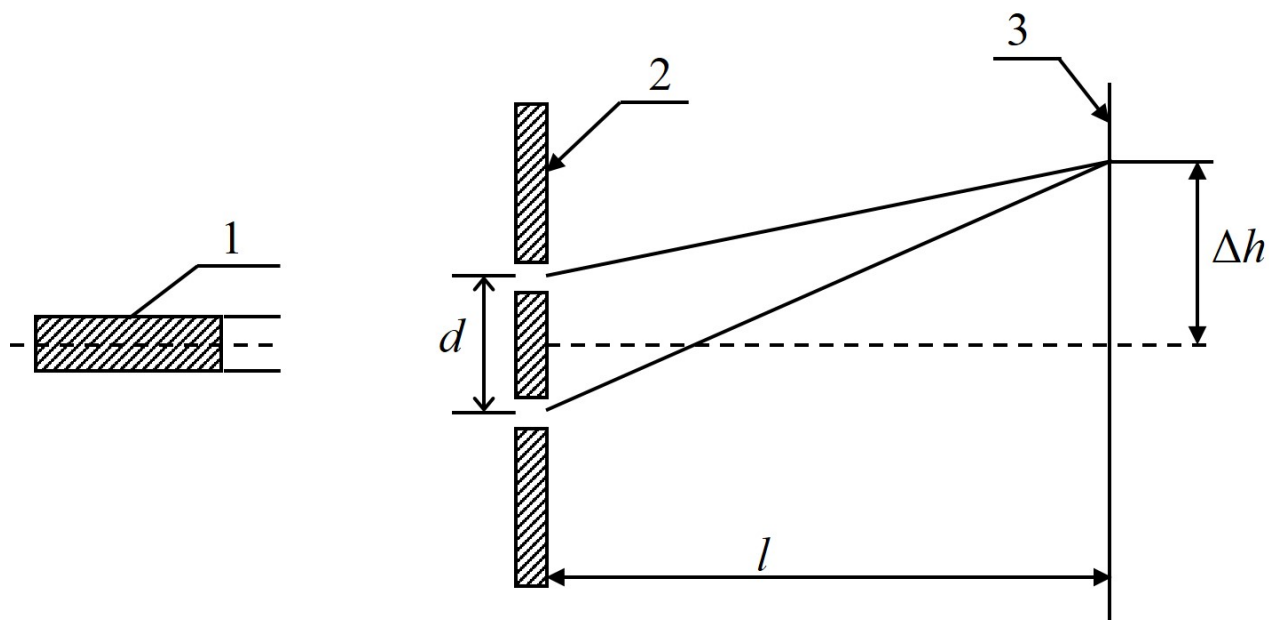


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема наблюдения интерференции:
1 – лазер; 2 – пара щелей; 3 – экран с миллиметровой шкалой;
 d – расстояние между щелями; Δh – ширина интерференционной
полосы; l – расстояние от щели до экрана

Пучок когерентных параллельных лучей, испускаемых лазером 1, падает на пару щелей 2. Интерференционную картину наблюдаем на экране 3.

3 ЗАДАНИЕ

1. Получить интерференционную картину на экране, измерить ширину интерференционной полосы.
2. Определить длину волны лазерного излучения.
3. Определить расстояния между щелями для разных пар щелей.
4. Проверить справедливости формулы (1.6).

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Проверить, чтобы все приборы были установлены в соответствии с рисунком 4.1. 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. Столик с набором пар щелей должен быть на расстоянии примерно 10 см от лазера.

Лазер и столик с набором пар щелей по оптической скамье перемещать нельзя!

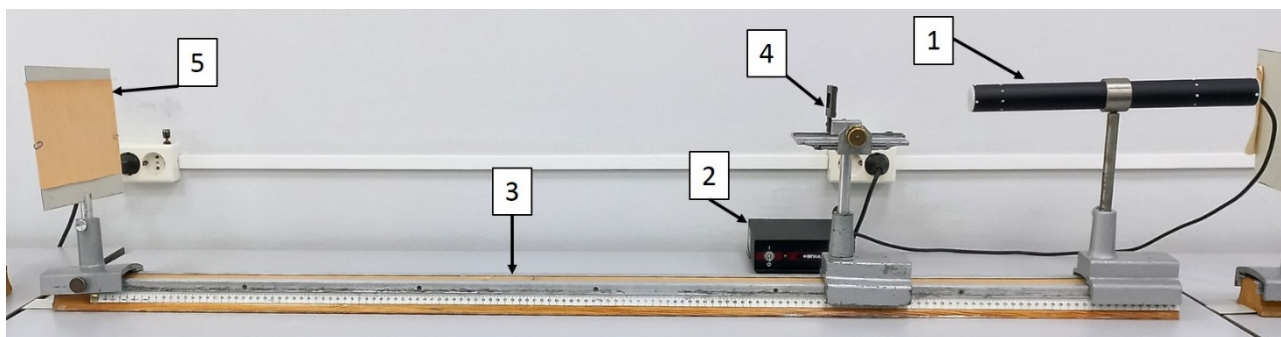


Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка:

1 – лазер; 2 – блок питания лазера; 3 – оптическая скамья;
4 – рамка с набором пар щелей; 5 – экран с миллиметровой шкалой

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

4.3 Перемещая винтом подвижную часть столика перпендикулярно лучу, добиться совмещения отдельно стоящей (крайней) пары щелей с лучом лазера. При этом на экране должна появиться интерференционная картина – чередование красных и черных полос (рис. 4.2).

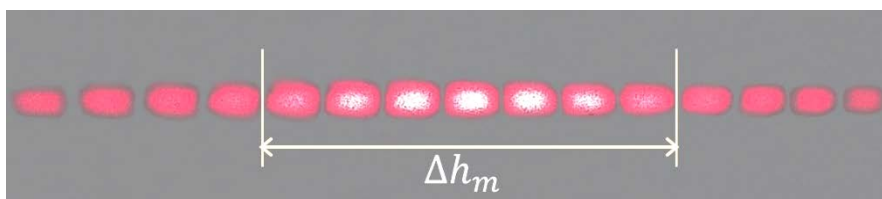


Рисунок 4.2 – Интерференционная картина:
 Δh_m – ширина интерференционной полосы ($m = 7$)

4.3. Определение длины волны λ лазерного излучения

4.3.1. Измерить расстояние l от экрана 5 до рамки с щелями 4 по шкале оптической скамьи 3 (рисунок 4.1). Расстояние l примерно должно быть равно 1,0-1,10 м.

4.3.2. Измерить ширину интерференционной полосы Δh_m для m максимумов (рисунок 4.2). Под расстоянием Δh_m следует понимать расстояние между серединами $m+1$ темных полосок.

4.3.3. Передвигая экран 5, уменьшить расстояние l примерно на 10 – 15 см и снова измерить Δh_m .

4.3.4. Пункт 4.3.3 повторить не менее 4 раз.

4.3.5. Результаты измерений записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты прямых и косвенных измерений для определения длины волны лазерного излучения λ

№ опыта	Δh_m , м	Δh_1 , м	l , м	λ , нм	l/d	Примечание
1						$m = \dots$ $\langle \lambda \rangle = \dots$, нм
2						
3						
4						
5						

4.3.6. Вычислить ширину интерференционной полосы Δh_1 :

$$\Delta h_1 = \frac{\Delta h_m}{m}. \quad (4.1)$$

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

$$\lambda = \frac{\Delta h_1 \cdot d}{l}, \quad (4.2)$$

где $d = 1,4 \cdot 10^{-4}$ м – расстояние между щелями крайней пары.

4.3.8. Найти среднее значение длины волны $\langle \lambda \rangle$.

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

4.3.10. Вычислить погрешность определения длины волны по формуле

$$\sigma(\lambda) = t_{\alpha n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \langle \lambda \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (4.3)$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента (табл. 3.1 в [5]),
 n – число измерений.

4.3.11. Сделать вывод о влиянии изменения расстояния между экраном на ширину интерференционной полосы.

4.4. Определение расстояния между щелями

4.4.1. Установить экран на оптической скамье на расстояние равное l_1 из таблицы 4.1. Значение l поддерживать постоянным при измерениях для всех пар щелей.

4.4.2. Измерить ширину интерференционной полосы Δh_m для m максимумов (рисунок 4.2). Под расстоянием Δh_m следует понимать расстояние между серединами $m+1$ темных полосок.

4.4.3. Добиться совмещения с лучом лазера второй пары щелей так, чтобы сечение лазерного луча перекрывало только исследуемую пару щелей и снова измерить Δh_m .

4.4.4. Повторить пункт 4.4.3. для третьей, четвертой и пятой пар щелей. Результаты измерений внести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты прямых и косвенных измерений для определения расстояния между щелями d

№ опыта	$\Delta h_m, \text{ м}$	$\Delta h_1, \text{ м}$	$d, \cdot 10^{-4} \text{ м}$	Примечание
1				$m = \dots$
2				$l = \dots, \text{ м}$
3				
4				
5				

4.4.5. Вычислить ширину интерференционной полосы Δh_1 по формуле (4.1).

4.4.6. Определить расстояние d между щелями, воспользовавшись формулой:

$$d = \frac{\lambda \cdot l}{\Delta h_1}, \quad (4.4)$$

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

4.4.7. Сравнить значение d_1 с табличным значением $d = 1,4 \cdot 10^{-4}$ м.

4.4.8. Сделать вывод о влиянии изменения расстояния между щелями на ширину интерференционной полосы.

4.5. Проверка справедливости формулы (1.6).

4.5.1. Используя экспериментальные данные, приведенные в таблице 4.1 построить линеаризованный график зависимости $\Delta h_1 = f\left(\frac{l}{d}\right)$ в координатных осях $x = \frac{l}{d}$, $y = \Delta h_1$

4.5.2. Используя метод наименьших квадратов, определить коэффициенты в уравнении прямой $\Delta h_1 = f\left(\frac{l}{d}\right)$.

4.5.3. Определить по угловому коэффициенту длину волны и сравнить ее с ранее рассчитанным значением $\langle \lambda \rangle$.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. В чем заключается явление интерференции волн?

5.2. Какие источники света называются когерентными?

5.3. Можно ли наблюдать интерференционную картину от двух отдельных гелий-неоновых лазеров?

5.4. Что будет наблюдаться в центре картины интерференции в опыте Юнга?

5.5. Как изменится картина интерференции, если гелий-неоновый лазер, излучающий красный свет, заменить гелий-кадмиевым лазером, излучающим в синей области спектра?

5.6. Как отразится на интерференционной картине уменьшение расстояния между щелями?

5.7. В чем заключается физический смысл понятия «оптическая длина пути»?

5.8. Написать условия максимумов и минимумов интерференционной картины в опыте Юнга.

5.9. В чем заключается физический смысл понятия «оптическая разность хода»?

5.10. В опыте Юнга расстояние между щелями равно 0,14 мм. На каком расстоянии от щелей следует расположить экран, чтобы ширина интерференционной полосы оказалась равной 5 мм? Установка освещается монохроматическим светом с длиной волны, равной 600 нм.

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)