университет итмо

Е.А. Ефремова А.А. Зинчик О.Б. Прищепёнок

# РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ ПО ОПТИКЕ

часть первая



Санкт-Петербург 2019

#### МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.А. Ефремова А.А. Зинчик О.Б. Прищепёнок

# РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ ПО ОПТИКЕ часть первая

Учебно-методическое пособие

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО по направлению подготовки 01.03.02, 44.03.04, 13.03.02, 24.03.02, 12.03.01, 12.03.02, 12.03.05, 12.03.03, 11.03.02, 11.03.03, 27.03.04, 15.03.06, 16.03.01, 09.03.01, 09.03.02 в качестве учебно-методического пособия для реализации образовательных программ высшего образования бакалавриата

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург 2019 Ефремова Е.А., Зинчик А.А., Прищепёнок О.Б. Руководство к лабораторному практикуму по оптике– СПб: Университет ИТМО, 2019. – 34 с.

Рецензент:

Крылов Игорь Ратмирович, к. ф.-м. н., доцент, доцент, кафедра общей физики, 1.Ф., Санкт-Петербургский Государственный Университет;

Пособие написано на основе утвержденной программы курса физики Университета ИТМО. Предназначено для студентов, выполняющих работы лабораторного практикума по общей физике (раздел «Оптика»). Пособие содержит описания лабораторных работ и методические указания по их выполнению.

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019 © Ефремова Е.А., Зинчик А.А., Прищепёнок О.Б., 2019

Содержание	
ведение	.4
Іабораторная работа № 1	
ПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ДВУМЯ ЩЕЛЯМИ	
ІНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ	.5
Іабораторная работа № 2	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА	
ІНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ	11
Іабораторная работа № 3	
ПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЩЕЛИ ПО КАРТИНЕ ДИФРАКЦИИ	
РАУНГОФЕРА	16
Іабораторная работа № 4	
АСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.	
ІЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА	
Іитература	.31

#### Введение

Пособие написано на основе утвержденной программы курса общей физики Университета ИТМО. В структуре курса общей физики лабораторный практикум занимает одно из главных мест. Традиционно курс физики Университета ИТМО состоит из трех семестров. Раздел «Оптика» изучается в третьем семестре и посвящен изучению волновых свойств электромагнитного излучения видимого диапазона, проявляющихся в таких эффектах как интерференция, дифракция и поляризация. Предлагаемые к выполнению лабораторные работы основаны на новом оборудовании, входящим в типовой комплект оптического оборудования ФПВ-05 «Свет».

Пособие предназначено для студентов, выполняющих работы лабораторного практикума по общей физике (раздел «Оптика»). В пособие включены описания лабораторных работ по интерференции получающейся методом деления волнового фронта и методом деления амплитуды, дифракции, определении скорости света в различных средах, а также методические указания по их Основное отличие работ по волновой оптике состоит выполнению. В лазерных источников. облалаюших высокой использовании степенью когерентности. Описание каждой лабораторной работы начинается краткой теоретической информацией об исследуемом явлении или эффекте, после чего приводится описание лабораторной установки, методика выполнения измерений, указания по выполнению расчетов и контрольные вопросы.

# Лабораторная работа № 1

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ДВУМЯ ЩЕЛЯМИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

<u>Цель работы</u> – определение расстояния между двумя щелями по полученной от них интерференционной картине.

#### Общие положения

"При наложении когерентных волн происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других — минимумы интенсивности. Это явление называется интерференцией волн" [1].

Для возникновения интерференции необходима когерентность складывающихся волн, то есть постоянство разности фаз, с которой они приходят в точку наблюдения. Такую согласованность невозможно получить от двух раздельных источников. Поэтому интерференционные схемы реализуются при наличии одного источника, свет от которого различными способами разделяется на два пучка, которые должны пройти различное расстояние до точки сложения.

Существуют два основных типа интерференционных схем: схема, построенная на основе деления волнового фронта, и схема, построенная на методе деления амплитуды. В первом случае складываются два участка одного волнового фронта, выделенных с помощью отверстий, зеркал, призм и т.д. Во втором случае разделение излучения производится путем частичного отражения и частичного пропускания света на границе раздела двух сред с дальнейшим сложением этих частей, прошедших различные оптические пути. "Особенно отчетливо проявляется интерференция в том случае, когда интенсивность обеих интерферирующих волн одинакова" [1].

В начале XIX века Томас Юнг сумел осуществить один из первых успешных опытов по наблюдению интерференционной картины, полученной методом деления волнового фронта.

Схематичное изображение опыта Юнга показано на рис. 1. В качестве источника Юнг использовал солнечный свет, который проходил через точечное отверстие S в экране 1. Следом Юнг расположил экран 2 с двумя очень близко расположенными отверстиями S1 и S2, которые играли роль вторичных синфазных источников, поскольку были равноудалены от отверстия S. Их

5

излучение складывалось на удаленном экране 3, демонстрируя там интерференционную картину 4.



1 – экран с точечным отверстием, 2 – экран с двумя отверстиями, 3 – плоскость наблюдения интерференционной картины, 4 – вид интерференционной картины



Проведя измерение ширины интерференционных полос, Томас Юнг сумел провести достаточно грубую оценку длины световых волн, соответствующих разным цветам.

Если в качестве источника излучения используется лазер, то это позволяет наблюдать большое количество интерференционных полос, при условии, что расстояние между щелями d значительного больше собственной ширины щелей. Кроме того, поскольку лазерное излучение сохраняет пространственную когерентность по всему сечению пучка, то, если ширины пучка хватает, чтобы одновременно осветить оба отверстия  $S_1$  и  $S_2$ , отпадает необходимость в наличии первого экрана с отверстием S.

Для определения расстояния между щелями *d* по интерференционной картине необходимо связать это расстояние с параметрами схемы.

Интерференционная картина от двух щелей характеризуется наличием одинаковых по ширине темных и светлых полос. Выразим зависимость ширины

полос интерференции (темных и светлых полос) от длины волны источника излучения.

На рисунке 2 показана схема распространения волн от источников S1 и S2 до точки наблюдения *D*. Волны проходят различные расстояния и имеют разность хода  $\Delta = r_2 - r_1$ . Интерферирующие пучки распространяются под очень малыми углами  $\theta$  к оси системы *OO*', что позволяет считать, что  $\theta \approx x/L$ . В этом случае разность хода  $\Delta$  может быть рассчитана как



Рисунок 2 - Схема распространения волн

$$\Delta \approx d \cdot \theta \approx d \frac{x}{L}.$$
 (1)

Если выполняется условие

 $\Delta = m\lambda$ ,

где  $\lambda$  – длина волны света, *m* – целое число (0, 1, 2, ...), то в точке *D* наблюдается интерференционный максимум, поскольку излучение от двух щелей складывается в фазе. В противном случае, если величина

$$\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \qquad (2)$$

то в точке D наблюдается минимум [4] вследствие разности фаз, кратной нечетному числу  $\pi$ , то есть сложению волн от щелей в противофазе.

"Под шириной интерференционной полосы (периодом интерференционной картины) понимают расстояние между соседними максимумами или минимумами" [1]. Из выражений (1) и (2) можно выразить координаты минимумов в плоскости O`D:

$$x_m = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \frac{L}{d}$$

Из предыдущей формулы получаем зависимость для ширины интерференционной полосы:

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda}{d} \cdot L.$$
(3)

Ширина полосы не зависит от порядка интерференции *m* и является постоянной для данных *L* и *d*.

Уравнение (3) является линейным, то есть ширина полосы  $\Delta x$  прямо пропорциональна *L*. Если построить по экспериментальным данным график зависимости  $\Delta x$  от *L*, то коэффициент наклона графика этой зависимости  $K = \frac{\lambda}{d}$ . Найдя коэффициент *K*, можно определить расстояние между щелями *d*, если известна длину волны  $\lambda$ .

#### Описание лабораторной установки

Вид лабораторной установки представлен на рис. 3. Источником света служит гелий-неоновый лазер 1 (длина волны  $\lambda = 632.82 \pm 0.01$  нм). В роли вторичных источников выступают две щели на учебно-демонстрационном объекте 2.



лазер, 2 – объект, 3 – экран
 Рисунок 3 – Вид лабораторной установки

Координаты объекта и экрана измеряются по шкале, нанесенной на оптическом рельсе. Для наблюдения интерференционной картины используется экран 3, закреплённый позади объекта на оптическом рельсе. На экране нанесена вертикальная и горизонтальная миллиметровые шкалы.

#### Порядок выполнения работы

1. Пользуясь линейкой на оптической скамье, измерьте координату экрана  $X_{\ni}$ .

2. Включите питание лазера

3. Поставьте оправу с объектом на расстоянии 20 – 30 см от экрана. Перемещая ручку горизонтальной подвижки поместите двойную щель в световой пучок.

4. Получите интерференционную картину в виде полосы из максимумов и минимумов интенсивности. При необходимости сместите объект вверх-вниз и вправо-влево, для размещения интерференционной картины в центре экрана

5. Запишите по горизонтальной линейке координаты 5 – 10 последовательных минимумов так, чтобы расстояние между крайними минимумами составляло не меньше 50 – 60 мм. Запишите номер объекта (указан на объекте) и координату  $X_O$  положения щелей.

6. Сдвигая объект со щелями от экрана на 5 – 10 см, повторить измерения п.5 при 5 – 6 различных расстояниях от экрана до щелей.

7. По указанию преподавателя проведите измерения п.п. 3 – 6 для других объектов.

8. Выключите питание лазера.

9. Для каждого измерения вычислите расстояние между объектом и экраном:  $L = X_{\ni} - X_{o}$ . Вычислите расстояние между крайними координатами в каждом измерении и разделите его на число минимумов *m*, получив тем значение периода картины  $\Delta x$ .

10. Для каждой пары щелей постройте график зависимости ширины интерференционной полосы  $\Delta x$  от расстояния *L*. Аппроксимируйте график прямой. По коэффициенту наклона *K* прямой и известной длине волны источника определите расстояние *d* между щелями:  $d = \frac{K}{\lambda}$ . Найдите среднее значение расстояния между щелями  $\overline{d}$  по всем проведенным измерениям.

11.Для одного из графиков в п.10 рассчитайте погрешность наклона  $\Delta K$  и, используя ее, найдите погрешность  $\Delta d$ . Поскольку длина волны лазера известна с большой точностью, величина  $\Delta K$  вносит наибольший вклад в погрешность  $\Delta d$ .

12. Результат представьте как среднее значение  $\overline{d}$  с найденной в п. 11 с погрешностью  $\Delta d$ .

# Контрольные вопросы по лабораторной работе

1. Что такое когерентность? Каким образом можно получить когерентные источники?

2. Чем можно объяснить наличие максимума по центру интерференционной картины?

3. Сформулируйте условия возникновения максимумов и минимумов при интерференции через разность хода.

4. Сформулируйте условия возникновения максимумов и минимумов при интерференции через разность фаз.

5. Как изменится вид интерференционной картины в опыте Юнга при увеличении расстояния между щелями?

6. Как изменится вид интерференционной картины в опыте Юнга при увеличении расстояния *L* до экрана?

7. Что называется контрастом интерференционной картины?

8. Почему для наблюдения наиболее контрастной интерференционной картины необходимо равенство амплитуд складывающих волн?

9. Как изменится вид интерференционной картины в опыте Юнга при изменении длины волны источника с которым проводится опыт?

10.Как будет меняться интерференционная картина? если первое отверстие в опыте Юнга постепенно делать больше?

### Лабораторная работа № 2

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛЯННОЙ ПЛАСТИНЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

<u>Цель работы</u> – определение показателя преломления стеклянной пластины с помощью интерференционной картины полос равного наклона и расчет порядка интерференции для центра картины.

#### Общие положения

типа интерференционных схем: Существуют два основных схема. построенная на основе деления волнового фронта, и схема, построенная на методе деления амплитуды. В первом случае складываются два участка одного волнового фронта, выделенных с помощью отверстий, зеркал, призм и т.д. Во втором случае разделение излучения производится путем частичного отражения и частичного пропускания света на границе раздела двух сред с дальнейшим сложением этих частей. прошедших различные оптические пути. "Особенно отчетливо интерференция в том проявляется случае, когда интенсивность обеих интерферирующих волн одинакова" [1].

При построении интерференционной схемы по принципу деления амплитуды интерференционная картина получается за счет набега разности фаз при прохождении в средах с различными показателями преломления. В случае использования плоскопараллельной пластины необходимо обеспечить падение лучей на пластину под разными углами. В этом случае наблюдается интерференционная картина в виде колец, причем каждое кольцо формируется лучами, имеющими одинаковый угол падения на пластину. Отсюда и следует название картины – интерференционные полосы равного наклона.

Использование в качестве источника излучения лазера, который обладает высокой степенью когерентности (постоянством разности фаз), позволяет наблюдать интерференционные полосы равного наклона при большой разности хода интерферирующих лучей. Эта разность хода может в тысячи раз превышать длину волны лазера  $\lambda$ .

Оптическую схему опыта можно увидеть на рис. 1. Соответствующая ей фотография установки представлена на рис. 2. Монохроматическое излучение создается гелий-неоновым лазером (с длиной волны  $\lambda = 632.82 \pm 0.01$  нм) 1, дающим практически параллельный пучок лучей. Пучок собирается микрообъективом 2 в его главном фокусе *F*'. Вследствие малого фокусного

расстояния микрообъектива прошедший фокус пучок оказывается сильно расходящимся. Далее световой пучок освещает плоскопараллельную стеклянную пластину 3. Интерференционная картина формируется сложением отраженных от передней и задней поверхностей пластины лучей на экране 4, расположенном в той же плоскости, что и главный фокус *F*'.



Рисунок 1 - Оптическая схема опыта

Оптическая разность хода интерферирующих лучей для схемы, приведенной на рис. 1, может быть определена по формуле:  $\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} + \frac{\lambda}{2}$ , где d -толщина пластины; n - показатель преломления стекла пластины;  $\theta$  – угол падения луча на пластину; дополнительное слагаемое  $\frac{\lambda}{2}$  в правой части формулы вызвано фазовым сдвигом на  $\pi$  при отражении от оптически более плотной среды (от внешней поверхности пластины).

Из формулы для определения оптической разности хода можно вывести условие возникновения минимума интерференции:  $2d\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$ или, упростив, получим [4]:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} = m\lambda,\tag{1}$$

где m - порядок интерференции и m = 1, 2, ...



1 – лазер, 2 – микрообъектив, 3 – плоскопараллельная пластина,4 – экран Рисунок 2 – Вид лабораторной установки

Измерив диаметры темных колец (расстояние *BA* на рис. 1), наблюдаемых на экране 4, и расстояние *L* от плоскопараллельной пластины до экрана, можно найти синус угла  $\theta$ .

Условие возникновения двух темных колец, различающихся по порядку интерференции на величину  $\Delta m$  (например, для второго и шестого от центра картины колец  $\Delta m = 4$ ), задается следующими уравнениями:

$$2d\sqrt{n^2-\sin^2\theta_1}=(m+\Delta m)\lambda; \quad 2d\sqrt{n^2-\sin^2\theta_2}=m\lambda.$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим:

$$2d(\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1} - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2}) = \Delta m \cdot \lambda .$$
<sup>(2)</sup>

В данной лабораторной работе углы падения лучей на пластину настолько малы, что можно считать  $\sin \theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{D}{4L}$ , где D – диаметр темного кольца.

Можно упростить выражения, разложив выражение для корня в ряд и пренебрегая членами второго порядка малости. Откуда получаем [4]:

$$\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \approx \sqrt{n^2 - \frac{D^2}{16L^2}} \approx n - \frac{D^2}{32L^2n}.$$
(3)

Подставляя выражение (3) в уравнение (2), получаем зависимость:  $2d\left(n - \frac{D_1^2}{32L^2n} - n + \frac{D_2^2}{32L^2n}\right) = \Delta m \cdot \lambda$ . Упрощая, получим окончательную формулу для

показателя преломления материала плоскопараллельной пластины [4]:

$$n = \frac{d(D_2^2 - D_1^2)}{16L^2 \cdot \lambda \cdot \Delta m}.$$
(4)

Порядком интерференции называется отношение оптической разности хода к длине волны.

В центре интерференционной картины полос равного наклона угол падения  $\theta=0$ , поэтому уравнение для условия минимума принимает вид [2]  $2dn + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$  или, после упрощения,  $2dn = m\lambda$ , отсюда получаем:

$$m = \frac{2dn}{\lambda}.$$
 (5)

Уравнение (5) позволяет рассчитать порядок интерференции в центре интерференционной картины, если известны d, n и  $\lambda$ .

#### Порядок выполнения работы

1. Включите питание лазера.

2. Изменяя положение лазера, микрообъектива и пластины получите интерференционную картину. Наклон пластины изменяется с помощью регулировочных винтов. Расстояние от экрана до плоскопараллельной пластины должно быть не менее 400 – 500 мм.

3. Измерьте расстояние *L* от экрана с микрообъективом до плоскопараллельной пластины по шкале, расположенной на оптическом рельсе.

4. Определите и запишите координаты пересечения с вертикальной и горизонтальной шкалой на экране у 7 – 8 темных расположенных подряд интерференционных колец.

5. Выключите питание лазера.

6. Используя измерения п.4, определите диаметры темных колец.

7. Из расчитанных диаметров колец выберите три пары, отличающихся по порядку интерференции на 3. Для каждой пары колец рассчитайте  $(D_2^2 - D_1^2)$ . Полученные результаты усредните. Среднее значение разности квадратов для  $\Delta m = 3$  используйте при расчете показателя преломления стеклянной пластины.

8. Микрометром измерьте толщину стеклянной пластины d. Запишите инструментальную погрешность микрометра  $\Delta d$ .

9. Рассчитайте показатель преломления пластины *n* по формуле (4), используя известные значения толщины пластины и длину волны излучения лазера.

10.Выведите формулу погрешности для показателя преломления *n* и рассчитайте ошибку  $\Delta n$  для данного метода определения показателя преломления.

11. Рассчитайте порядок интерференции m в центре картины по формуле (5). Выведите формулу погрешности для  $\Delta m$  и рассчитайте ее.

# Контрольные вопросы

1. Запишите условия возникновения темного и светлого интерференционных колец в данной лабораторной работе.

2. Опишите способ получения интерференционной картины полос равного наклона.

3. Будут ли наблюдаться изменения в интерференционной картине в данном опыте, если увеличить длину волны источника?

4. Будут ли наблюдаться изменения в интерференционной картине в данном опыте, если увеличить толщину плоскопараллельной пластины?

5. Для чего нужен микрообъектив?

6. Возрастает или уменьшается порядок интерференции в направлении центра картины?

7. Можно ли получить интерференционную картину на используемой в лабораторной работе установке, не используя лазер в качестве источника?

#### Лабораторная работа № 3

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЩЕЛИ ПО КАРТИНЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА

Цель работы – определение ширины щели по картине дифракции в дальней зоне.

#### Общие положения

"Явления дифракции принято классифицировать в зависимости от расстояний источника и точки наблюдения (экрана) от препятствия, поставленного па пути распространения света. Если эти расстояния очень велики (бесконечно велики), то дифракция называется дифракцией в параллельных лучах или дифракцией Фраунгофера. В противоположном случае говорят о дифракции в непараллельных лучах или дифракции Френеля" [5].

Дифракционные эффекты были описаны еще в 17 веке, но не существовало их объяснения, поскольку природа света считалась корпускулярной.

Если расстояние от препятствия до точки наблюдения стремится к бесконечности, то говорят о дифракции Фраунгофера. Такого же результата можно добиться, если за препятствием поместить собирающую линзу и наблюдать результат дифракции на препятствии в фокальной плоскости линзы. При очень маленьких размерах отверстия, в десятки тысяч раз меньших, чем расстояние до точки наблюдения, можно обойтись без собирающей линзы.

Наиболее простым случаем дифракции Фраунгофера является дифракция на узкой щели заданной ширины *b*. Высота щели считается стремящейся к бесконечности. Несмотря на простоту описания, данный случай имеет в то же время большую практическую значимость, поскольку полученные результаты и зависимости используются для описания дифракции на множестве одинаковых щелей, т.е.решетках, прямоугольных отверстиях и т.д.

Получим зависимость интенсивности дифрагировавшего на одиночной щели излучения от угла дифракции  $\varphi$ . Пусть на щель нормально падает плоская монохроматическая волна (рис. 1) с амплитудой  $E_0$ . Комплексная амплитуда на расстоянии Z за щелью будет описываться интегралом Фраунгофера, упрощенным для одномерного случая.

$$E(x') = C \int_{-b/2}^{b/2} E_0 \exp(-ikx\sin\varphi) dx$$

Все множители, не влияющие на относительное распределение волнового поля по направлениям, записаны единой величиной *С*.



Рисунок 1 - Оптическая схема опыта

Излучение, исходящее из фрагмента щели размером dx под углом  $\phi$ , отличается по фазе от излучения исходящего из другой части щели и распространяющегося в том же направлении, на величину  $kxsin\phi$ . Максимальная разность фаз для противоположных краев щели составит  $kbsin\phi$ .

Введем обозначение:

$$\alpha = \frac{kb\sin\varphi}{2} = \frac{\pi b\sin\varphi}{\lambda} ,$$

После вычисления интеграла, получим зависимость

$$E(\alpha) = E_0 \frac{\sin \alpha}{\alpha}$$
.

Отсюда для распределения интенсивности света по направлениям найдем

$$I(\alpha) = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2$$
,

где *I*<sub>0</sub> – интенсивность в направлении падающей волны.

Полученная зависимость дает нулевую интенсивность  $I(\alpha)$  во всех случаях, когда синус обращается в ноль, за исключением случая  $\alpha = 0$ . Это позволяет записать условие возникновения минимумов как

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

где *m* = 1, 2,...

Учитывая, что угол  $\varphi$  очень мал, можно считать, что  $\sin \varphi \approx x/Z$ .

$$x_m = m\lambda \frac{Z}{b}$$
.

где *x*<sub>*m*</sub> – координата минимума порядка *m*.

Из предыдущей формулы получаем зависимость для расстояния между соседними минимумами:

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda}{b} \cdot Z \,. \tag{3}$$

Уравнение (3) является линейным, то есть расстояние  $\Delta x$  прямо пропорционально *Z*. Если построить по экспериментальным данным график зависимости  $\Delta x$  от *Z*, то коэффициент наклона графика этой зависимости  $K = \frac{\lambda}{b}$ . Найдя коэффициент *K*, можно определить ширину щели *b*, если известна длина волны  $\lambda$ .



лазер, 2 – объект, 3 – экран
 Рисунок 2 – Вид лабораторной установки

## Описание экспериментального оборудования.

Схема лабораторной установки представлена на рис. 3. Источником света служит гелий-неоновый лазер 1 (длина волны  $\lambda = 632.82 \pm 0.01$  нм). Исследуемая щель расположена на учебно-демонстрационном объекте 2. Координаты объекта и экрана измеряются по шкале, нанесенной на оптическом рельсе. Для наблюдения интерференционной картины используется экран 3, закреплённый позади объекта оптическом рельсе. На экране нанесена вертикальная и горизонтальная на миллиметровые шкалы.

# Порядок выполнения работы.

- 1. Пользуясь линейкой на оптической скамье, определите координату экрана  $X_{\mathfrak{Z}}$ .
- 2. Включите питание лазера
- 3. Поставьте оправу с объектом на расстоянии 20 30 см от экрана. Перемещая ручку горизонтальной подвижки, поместите одиночную щель в световой пучок.
- 4. Получите дифракционную картину в виде полосы из максимумов и минимумов интенсивности. При необходимости сместите объект вверх-вниз и вправо-влево для размещения дифракционной картины в центре экрана.
- 5. Запишите по горизонтальной линейке координаты 5 10 последовательных минимумов расположенных слева или справа от центрального максимума так, чтобы расстояние между крайними отметками составляло не меньше 50 -60 мм. Запишите номер объекта (указан на объекте) и координату  $X_0$ плоскости щелей.
- 6. Сдвигая объект со щелями в направлении лазера на 5 10 см, повторите измерения п.5 при 5 – 6 различных расстояниях от экрана до щели.
- 7. По указанию преподавателя проведите измерения п.п. 3 6 для других объектов.
- 8. Выключите питание лазера.
- 9. Для каждого измерения вычислите расстояние между объектом и экраном:  $Z = X_{\mathcal{F}} - X_{\mathcal{O}}$ . Вычислите расстояние между крайними координатами в каждом измерении и разделите его на число минимумов *m*, получив тем значение периода картины  $\Delta x$ .
- 10.Для каждой пары щелей постройте график зависимости ширины интерференционной полосы  $\Delta x$  от расстояния Z. Аппроксимируйте график прямой. По коэффициенту наклона К прямой и известной длине волны источника определите ширину щели  $b: b = \frac{K}{\lambda}$ . Найдите среднее значение

расстояния между щелями  $\overline{b}$  по всем проведенным измерениям.

- 11.Для одного из графиков в п.10 рассчитать погрешность наклона  $\Delta K$  и, используя ее, найдите погрешность  $\Delta b$ . Поскольку длина волны лазера известна с большой точностью, величина  $\Delta K$  вносит наибольший вклад в погрешность  $\Delta b$ .
- 12. Результат представьте как среднее значение  $\bar{b}$  с найденной в п. 11 с погрешностью  $\Delta b$ .

# Контрольные вопросы

- 1. Дайте определение дифракции.
- 2. Как изменится вид дифракционной картины при увеличении ширины щели ?
- 3. Чем отличается дифракция Френеля от дифракции Фраунгофера?
- 4. Какой тип дифракции наблюдается в работе?
- 5. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
- 6. Объясните, как возникают минимумы при дифракции на щели.
- 7. Под какими углами наблюдаются дифракционные минимумы и максимумы?
- 8. Все ли максимумы одинаковой ширины?

#### Лабораторная работа № 4

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

<u>Цель работы</u> - определение скорости света в воздухе и некоторых прозрачных веществах.

#### Введение

Скорость света – одна из самых важных фундаментальных констант, наряду с зарядом электрона, постоянной Планка, массами электрона и протона. Изобретение лазеров дало возможность физикам измерить скорость света с гораздо большей точностью, чем когда либо раньше. В 1972 году ученые из Национального института стандартов и технологии тщательно измерили длину волны и частоту лазерного луча и зафиксировали скорость света, произведение этих двух переменных, на величине 299792458 метров в секунду (186282 мили в секунду). Одним из последствий этого нового измерения было решение Генеральной конференции мер и весов принять в качестве эталонного метра (3,3 фута) расстояние, которое свет проходит за 1/299792458 секунды. Значения фундаментальных постоянных, принятых международным научным И инженерным сообществом можно найти сайте на http://physics.nist.gov/cuu/Constants/.

#### Методика проведения эксперимента

Принцип методики измерения скорости света на данной установке относится к прямым лабораторным методам измерения скорости света. Идея таких методов была предложена еще Галилео Галилеем в 1607 году. Сущность метода состоит в измерении времени, затрачиваемого световым импульсом на прохождение некоторого расстояния L. Если приемник света удален от источника на некоторое расстояние L, то световой импульс будет зарегистрирован через некоторое время  $\Delta t$ , которое необходимо затратить световому импульсу на прохождение расстояния L. Тогда скорость распространения такого импульса определится по формуле:

$$u_{unny,hca} = u_{zp} = \frac{L}{\Delta t} \tag{1}$$

В 1849 году метод Галилея для измерения скорости света в лабораторных условиях был усовершенствован французским физиком А.Физо. В этом методе

был использован не одиночный импульс, а модулированная световая волна – последовательность волновых пакетов. Модуляция по методу А.Физо осуществлялась механическим способом, с помощью быстро вращающегося зубчатого колеса, которое «нарезала» непрерывное излучение от источника на отдельные импульсы. Скорость вращения зубчатого колеса определяет частоту следования импульсов света.

В данной работе источником световых волн служит излучение от твердотельного лазера диода. Лазерный диод излучает свет в видимом красном диапазоне на длине волны  $\lambda \approx 0.654$  мкм.

Интенсивность света от лазера изменяется во времени путем изменения тока накачки лазера с помощью генератора, который вырабатывает напряжение, близкое к гармоническому, с частотой 50 МГц. Таким образом, на выходе получается модулированный сигнал (последовательность волновых пакетов). Полученный сигнал проходит некоторое заданное расстояние *L*, отражаясь от зеркала или уголкового отражателя, приходит обратно. По сдвигу фаз амплитуды модуляции (Рис. 1) можно определить задержку по времени пришедшего сигнала относительно опорного.

$$\Delta \varphi = \omega \Delta t = 2\pi \cdot \Delta t / T \tag{2},$$

где  $\omega$  – это частота модуляции (частота следования импульсов), T – период модуляции (время между двумя последовательными импульсами). Измеряя сдвиг фаз, зная частоту модуляции  $\omega$ , можно найти временную задержку  $\Delta t$  и скорость



распространения импульса.

$$u_{u M n y \pi b c a} = u_{z p} = \frac{L}{\Delta \varphi} \omega = \frac{L}{\Delta \varphi} \frac{2\pi}{T} = \frac{L}{\Delta t}$$
(3)

Заметим, что при времени задержки  $\Delta t = T$  сдвиг фаз между опорной и отраженной волной сдвиг фаз будет равен  $\Delta \phi = 2\pi$ , т.е. оба сигнала будут неотличимы друг от друга. Следовательно, время запаздывания  $\Delta t$  не должно быть больше периода модуляции Т. Кроме того, для надежной регистрации сдвига фаз, время  $\Delta t$  не должно быть много меньше периода модуляции Т, т.е. время запаздывания сравнимо с периодом  $\Delta t$ должно быть модуляции Т, но не превышать его. Для частоты модуляции порядка нескольких десятков мегагерц «длина волны» такого

модулированного света составляет несколько метров, и в этом случае оказывается возможным провести измерения скорости света на расстояниях порядка 1 метра.

# Экспериментальная установка

На рис. 2 представлена лабораторная экспериментальная установка.



Рисунок 2 – Экспериментальная установка

В неё входит: блок измерителя скорости (Speed of Light Meter), цифровой двухканальный осциллограф, рельс длиной 180 см, на котором можно разместить уголковый отражатель и различные среды для измерения скорости света в веществе. В данной работе в качестве исследуемых сред используются: трубка, наполненная водой, (рис 3а), стеклянный цилиндр (рис 3б) и цилиндр из акрилового стекла (рис 3в).



а) вода

б)стекло

в) акрил

Рисунок 3 – образцы исследуемых сред

## Блок измерения скорости света (Speed of Light Meter)

Функциональное назначение блока измерения скорости света(БИСС) понятно из Рис. 4б. Отраженный модулированный сигнал поступает на фотоприемник, усиливается и затем передается на фазовый детектор<sup>1</sup>.



Рисунок 4 – вид и схема БИСС

Одновременно на другой вход фазового детектора поступает опорный сигнал от генератора. Фазовый сдвиг отраженного сигнала измеряется относительно фазы опорного сигнала, вырабатываемого генератором. На дисплей блока измерения скорости света выводится результат  $\Delta \varphi$ . Кроме разности фаз, на дисплей можно вывести временную задержку  $\Delta t \cdot 1000$  и оптическую разность хода  $\Delta x$ .

Вообще говоря, помимо временной задержки, возникающей при распространении света от источника к приемнику, регистрируемая разность фаз зависит и от временных задержек при распространении сигналов внутри блока измерения скорости света, а также от фазовых сдвигов в электронных элементах установки. Но такой (аппаратный) сдвиг фаз не зависит от расстояния и среды между источником и приемником. И т.к. величина аппаратного сдвига фаз остается постоянной, то она не существенна, т.к. измеряется разность, зависящая от расстояния между источником и приемником.

## Ход выполнения работы

Проверьте, что вилка блока измерения скорости вставлена в сетевой фильтр и сам фильтр включён в сеть.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Здесь мы не будем касаться принципа работы фазового детектора. Укажем только, что для вычисления фазового сдвига сначала используется понижение частоты сигналов в область звуковых частот с сохранением информации о разности фаз сигналов. Для этого используют дополнительный генератор (гетеродин), смеситель частоты и низкочастотный фильтр.



Рисунок 5 – Дисплей БИСС



Рисунок 6 – Осциллограф

Включите блок измерения скорости света, нажав на кнопку **MODE**, нажимая до тех пор, пока красная лампочка не загорится напротив надписи **Deg**  $\Delta \phi$ . (Если лампочка не загорелась – проверьте, хорошо ли вставлен провод на задней панели прибора).

Установите уголковый отражатель на рельс. Установите его так, чтобы отметка на нём совпадала с нулевой отметкой на шкале рельса.

Нажмите на измерителе скорости кнопку калибровки (Calibration), расположенную под экраном прибора. После выполнения калиборовки экран прибора должен показывать 00.

Проверьте, что вилка осциллографа вставлена в сетевой фильтр. Включите

осциллограф, нажав на кнопку **On/Off** на верхней панели прибора.

На экране появятся две горизонтальные полосы желтого и красного цвета (рис.6).

Теперь исходящий и входной сигналы нужно подать на первый и второй каналы осциллографа соответственно. Подключите один конец сигнального кабеля (рис.7а) к разъёму с надписью  $\mathbf{f}_{emit}$ - $\mathbf{f}_{sync}$ , расположенному внизу передней панели блока измерения скорости (рис. 7б). Второй конец подключите к разъёму осциллографа с надписью **X**, находящемуся на передней панели справа внизу (рис. 7в).



а)Кабель б)Разъем БИСС в)Разъем осциллографа
 Рисунок 7 – Схема подключения кабеля

Вторым сигнальным кабелем нужно соединить разъем с надписью  $\mathbf{f}_{rec}$ - $\mathbf{f}_{sync}$  на приборе-измерителе скорости и разъем с надписью **Y** на осциллографе (рис. 7в).

Если всё подключено правильно, то исходящий сигнал источника подаётся на первый канал осциллографа (отображается красным цветом на экране), а отражённый от уголкового отражателя сигнал подаётся на второй канал осциллографа (отображается желтым цветом).

Проверьте, что лампочка на источнике горит напротив надписи **Deg**  $\Delta \phi$  (рис. 5) и нажмите кнопку калибровки (**Calibration**).





а)нулевой сдвиг фаз

б)сдвиг фаз на четверть периода



На экране осциллографа вы должны увидеть два периодических сигнала прямоугольной формы, синхронизованных по фазе, как показано на рисунке 8а.

Легко проверить, что при перемещении уголкового отражателя вправо сигнал жёлтого цвета сдвинется влево (рис. 8б). Это означает, что у двух сигналов появился сдвиг фазы. На экране блока измерения скорости вы можете увидеть этот сдвиг фазы в градусах.

Если передвинуть уголковый отражатель так, чтобы сдвиг фаз был 180, то прямоугольные сигналы, изображенные на экране осциллографа, снова окажутся чётко один над другим.

## Измерения

## Измерение скорости света в воздухе

Установите уголковый отражатель так, чтобы метка на нём совпала с нулём на рельсе. Нажмите кнопку калибровки (Calibration). На экране прибора

отобразится 0. Передвигайте уголковый отражатель с шагом 10 см вправо до значения 160 см, занося в таблицу расстояние, на которое отодвинут уголковый отражатель, и соответствующие ему показания прибора: значения сдвига фаз  $\Delta \phi$ , времени  $\Delta t$  и расстояния  $\Delta x$ . Проделайте то же самое, передвигая уголковый отражатель в обратную сторону.

Nº	х (м)	Δt*1000 (мкс)	Δφ (град)	Δх (м)

#### Измерение скорости света в среде

1) Установите уголковый отражатель на отметку 0. Нажмите кнопку калибровки (**Calibration**). На экране прибора отобразится 0. Передвиньте уголковый отражатель на x=50см. Занесите в таблицу значения  $\Delta t$  и  $\Delta \phi$ .

2) Аккуратно, не касаясь пальцами торцов, возьмите цилиндр из акрилового стекла и установите его на рельс между источником и уголковым отражателем.



Рисунок 9 - Схема проведения измерений

Запишите значения  $\Delta \phi$  и  $\Delta t$ .

3) Замените акриловый цилиндр трубкой, наполненной водой. Запишите значения  $\Delta \phi$  и  $\Delta t$ .

4) Замените трубку с водой стеклянным цилиндром. Запишите значения  $\Delta \phi$  и  $\Delta t$ .

Не забудьте записать длины акрилового цилиндра, трубки с водой и стеклянного цилиндра.

#### Обработка результатов измерений

#### Измерение скорости света в воздухе



В ходе выполнения работы было измерено расстояние, которое проходит свет, и время, за которое он это расстояние проходит. Скорость рассчитывается по формуле:

$$u = \frac{L}{\Delta t} = \frac{2\Delta x}{\Delta t} \tag{4}$$

Для расчёта скорости света нужно х перевести в метры (если они были записаны в других единицах), а  $\Delta t$  в секунды.

Для физически более правильного и точного расчёта необходимо построить график зависимости 2. Δx от Δt (см. рис. 10).

Тангенс угла наклона даст значение скорости

$$u = tg\alpha \tag{5}$$

	$l_{\rm среды},$ м	$\Delta \phi$ (град)	Δ <i>t</i> *1000 (мкс)	$\Delta x$ (M)
Без среды	0.50	57	3,1	0,48
Цилинр из акрилового стекла	0,49	82	4,5	0,69
Трубка с водой	0,50	76	4,2	0,59
Стеклянный цилиндр	0,06	60	3,4	0,49

#### Измерение скорости света в среде

Свет проходит в атмосфере расстояние *L*, равное длине объекта за время  $\Delta t$ . Скорость света равна  $L_{\Delta t}$ . Если теперь путь диной *L* заполнен веществом, время прохождения возрастает на  $\Delta t_1$ .

Скорость света в среде можно найти из выражения:

$$t_{scpede} = \frac{2x - 2l_{cpedbi}}{u_{so3d}} + \frac{2l_{cpedbi}}{u_{scpede}}$$
(6)

$$u_{ecpede} = \frac{2l_{cpedel}}{t_{ecpede}} - \frac{2x - 2l_{cpedel}}{u_{eosd}}$$
(7)

#### Расчёт погрешности измерений

Результатом измерения какой-либо величины является набор измеренных значений этой величины, снабжённый оценками систематических погрешностей отсчитывания и градуировки. Теперь надо оценить точность полученных результатов измерений и вычислений.

Пусть измеряемая величина имеет известное значение *x*. Естественно, отдельные, найденные в процессе измерения значения этой величины  $x_1, x_2, ..., x_n$  заведомо не вполне точны, т.е. не совпадают с *x*. Тогда величина  $\delta x_i = x_i - x$  будет являться абсолютной погрешностью i-го измерения. Но поскольку истинное значение результата *x*, как правило, не известно, то реальную оценку абсолютной погрешности производят используя вместо х среднее арифметическое  $\bar{x}$ , которое рассчитывают по формуле:

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n}$$
(8)

Далее рассчитывают *среднеквадратичную погрешность* (стандартное отклонение выборки), являющуюся мерой разброса и характеризующую случайную погрешность определения, по следующей формуле:

$$S_{x_{cp}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i}^{n} (x_{i} - \overline{x})^{2}}$$
(9)

#### Вопросы для самопроверки

- 1) Какие функции выполняет в установке прибор блок измерения скорости?
- 2) Почему используемый в работе двухканальный цифровой осциллограф называется двухканальным и цифровым?
- 3) Опишите кратко процесс оцифровки сигнала в осциллографе.
- 4) Приведите пример использования уголковых отражателей.
- 5) В каких размерных единицах показывает время прибор блок измерения скорости?

# Приложение 1



#### Основные кнопки управления осциллографом

Рисунок 11 – Кнопки управления осциллографом

1 - Кнопка включения/выключения осциллографа;

2a 2b - сигналы первого и второго каналов соответственно;

За 3b - ручки, регулирующие амплитуду сигнала;

4а 4b - ручки, регулирующие положение сигнала на экране по вертикали;

5 - ручка, регулирующая развертку сигнала по горизонтали;

6 - ручка, регулирующая положение сигнала по горизонтали;

7а, 7b – входные разъемы типа BNC (байонет) для подключения сигнального кабеля;

8 - кнопка остановки и запуска сигнала

9a, 9b – цена деления шкалы по вертикали для первого и второго каналов соответственно.

# Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие. в 3-х томах. том 3. Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. Учебное пособие. Гриф МОРФ.– СПб.: Лань, 2016. –517с.

2. Детлаф А. А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для вузов – 8-е изд., стер. –М. : Издательский центр "Академия", 2009. –720с.

3. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы: Учеб. пособие для вузов.–М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2013. – 265с.

4. Башнина Г.Л., Прищепёнок О.Б., Смирнов А.В., Шеламова Т.В. Лабораторный практикум по оптике. Учебное пособие - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. - 64 с.(<u>http://books.ifmo.ru/file/pdf/970.pdf#2</u>)

5. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 4.: Оптика, стер / Д.В. Сивухин. - М.: Физматлит, 2015

6. С.Р. Филонович «Самая большая скорость», --библ. «Квант», вып. 27.-- М.: Наука, 1983 – 177с.

7. Е.И. Бутиков Оптика, СПб, Невский диалект, 2003г – 479с.

8. Г.С. Горелик «Колебания и волны», М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008 – 656с.

Ефремова Екатерина Александровна Зинчик Александр Адольфович Прищепёнок Ольга Борисовна

Руководство к лабораторному практикуму по оптике учебно-методическое пособие

В авторской редакции Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО Зав. РИО Н. Ф. Гусарова Подписано к печати Заказ № Отпечатано на ризографе

# Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49