

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Раздел «ВОЛНОВАЯ ОПТИКА»

Под редакцией В.Н. Игнатова и Д.А. Самарченко

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2012

УДК 535+537.86/87(076.5)
ББК 22.34я7
Л 12

Лабораторный практикум курса общей физики. Раздел «ВОЛНОВАЯ ОПТИКА» / Под ред. В.Н. Игнатова и Д.А. Самарченко: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 216 с.

Авторы: В.Н. Белобородов (работа 4.15, 4.16), В.М. Дубовик (работа 4.11), Е.Е. Земсков (работа 4.7), В.Н. Игнатов (методические рекомендации, работы 4.13, 4.17, 4.19, 4.20), А.В. Кошелкин (работа 4.13), К.С. Липатов (методические рекомендации, работа 4.8), К.С. Мозгов (работа 4.21), С.В. Облизина (работы 4.12, 4.22), Э.В. Онищенко (работа 4.20), В.Д. Попов (работа 4.10), Д.А. Самарченко (работы 4.10, 4.11, 4.24), Е.М. Серебрякова (работы 4.12, 4.21), А.А. Синченко (работа 4.24), С.Г. Успенский (работа 4.18), Е.В. Хангулян (работа 4.9), О.Ю. Цупко (работа 4.14), Н.И. Швецов-Шиловский (работа 4.23), А.В. Шутов (работа 4.6).

Дано описание девятнадцати лабораторных работ по темам «Электромагнитные волны», «Геометрическая оптика» «Интерференция света», «Дифракция света» курса общей физики «Волны и оптика». Описание каждой работы состоит из теоретического введения с кратким изложением основных понятий и закономерностей; подробного описания экспериментальной установки и измерительных приборов, методов измерений и порядка выполнения работы; указаний по обработке результатов измерений; представлению результатов работы; контрольных вопросов. Основное содержание лабораторных работ – изучение законов волновой оптики (на примере интерференции, дифракции и поляризации света), методов измерений и точных измерительных приборов, распространенных в физических лабораториях.

Цель практикума – знакомство с основными явлениями волновой оптики и методами работы как на современной оптической аппаратуре, так и на специально подготовленных для лаборатории учебных установках. Большое значение придается также возможности самостоятельного наблюдения и изучения физических явлений и закономерностей.

Предназначено для студентов 2-го курса НИЯУ МИФИ всех факультетов.
Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доц. А.А. Плясов (НИЯУ МИФИ);
д-р техн. наук, проф. Г.Г. Спирин (ГТУ МАИ)

ISBN 978-5-7262-1681-2

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2012

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ КАФЕДРЫ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

I. На каждое лабораторное занятие студент должен приносить с собой:

- 1) лабораторный журнал (толстая тетрадь формата А4);
- 2) физический практикум, в котором приведено описание выполняемой лабораторной работы;
- 3) счетный прибор (калькулятор), на котором можно вычислять логарифмы и тригонометрические функции;
- 4) несколько листов миллиметровой бумаги размером А4 (210×297 мм) или А5 (148×210 мм);
- 5) ручку (с синими, фиолетовыми или черными чернилами);
- 6) карандаш (ТМ и М), линейку и ластик.

II. Студент обязан приходить в лабораторию подготовленным. Подготовка к лабораторной работе производится в часы самостоятельных занятий и включает в себя следующее.

1. Тщательное изучение описания лабораторной работы по физическому практикуму и расширенное знакомство по основной и дополнительной литературе, представленной в конце описания работы с теоретическим материалом, необходимым для сознательного выполнения работы. В результате студент должен понимать физическую сущность явлений, которые будут изучаться в предстоящем эксперименте; ясно представлять, что и каким методом будет измеряться, как устроена и работает экспериментальная установка. Необходимо иметь представление о порядках тех величин, которые будут измеряться в процессе работы.

Подготовленность к работе можно считать удовлетворительной, если студент может самостоятельно ответить на контрольные вопросы, которыми заканчивается описание каждой работы.

2. Оформление лабораторного журнала:

- а) на новой правой странице журнала должны быть написаны номер и название лабораторной работы;
- б) на следующей правой странице необходимо выписать основные формулы теории, выделив те, по которым производится вычисление определяемых в лабораторной работе величин; подготовить формулы для вычисления погрешностей (см.: Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. М.: МИФИ, 2005);
- в) изобразить с помощью карандаша и линейки схему экспериментальной установки (основные блоки и узлы без лишних подробностей);

г) подготовить таблицы для записи экспериментальных данных (таблицы нужно чертить с помощью карандаша и линейки; желательный размер клетки: 1,5х2,5 см).

Все записи в журнале аккуратно выполняются ручкой на правой странице журнала (левая предназначена для выполнения расчетов). Следует писать достаточно свободно, оставляя место для возможных исправлений.

Если в лабораторном практикуме изображен рекомендуемый вид таблицы, то она чертится для полного числа измерений (в практикуме обычно показана часть таблицы). Если в задании требуется выполнить измерения, но нет указаний на таблицу, то студент рисует таблицу самостоятельно. При этом следует обратить внимание на количество измерений и число измеряемых величин. Каждую таблицу желательно чертить на новой странице, оставляя место над таблицей (около 5 см) и под таблицей (около 10 см). Место над таблицей – место для записи названий приборов и их характеристик: классов точности, полного числа делений шкалы и предела измерений шкалы, на которых производятся измерения. Место под таблицей необходимо на случай, если потребуется выполнить дополнительные измерения. Если нужно составить несколько таблиц или построить несколько графиков (рисунков), то их необходимо пронумеровать.

III. Порядок выполнения лабораторной работы.

1. Выполнение работы начинается с детального изучения установки. Необходимо записать заводские номера и технические характеристики всех приборов (класс точности, пределы измерений и т.д.), определить цену деления прибора. При этом не разрешается крутить ручки приборов, так как можно сбить настройку. Включать установку и приступать к измерениям можно только с разрешения преподавателя. Студент не допускается к выполнению работы, если:

- а) не оформлена предыдущая работа;
- б) имеется более одной несданной работы;
- в) отсутствуют необходимые записи в лабораторном журнале;
- г) студент не может удовлетворительно ответить на контрольные вопросы преподавателя.

2. Получив разрешение преподавателя, студент приступает к выполнению работы, соблюдая правила техники безопасности.

3. Все записи необходимо делать только в лабораторном журнале и только ручкой. Использование дополнительных листков и карандаша для записи результатов измерений категорически запрещается.

4. Прежде чем приступить к серии измерений, обычно проводят прикидочные измерения. При этом проверяется соответствие хода

экспериментальной зависимости теоретической (качественно), определяются пределы измерений, выполняется оценочный расчет искомых величин (на левой странице журнала). Если оценки совпадают с ожидаемыми, то выполняется основной эксперимент. Если нет совпадения, то следует проверить схему экспериментальной установки.

5. Данные основной серии записываются в таблицы. Запрещаются всякие черновые записи исходных данных. Запись отчетов производится в делениях шкалы измерительного прибора (без каких-либо пересчетов).

6. Если был записан ошибочный результат, то его следует аккуратно зачеркнуть.

7. Выполнив измерения, студент проводит расчет искомых величин и их погрешностей, строит указанные в заданиях графики.

8. Работа завершается написанием заключения, в котором указывается:

- а) цель работы;
- б) что и каким методом определялось;
- в) окончательный результат измерений с указанием абсолютной и относительной погрешностей (для доверительной вероятности 0,7); пример записи – сопротивление проводника

$$R = (50,2 \pm 0,4) \text{ Ом}, E = 0,8\%$$

(где 50,2 Ом – среднее значение сопротивления; 0,4 Ом – абсолютная погрешность, которая указывается с одной значащей цифрой, а для случая, когда первая значащая цифра 1 – с двумя; 0,8 % – относительная погрешность);

г) краткое обсуждение полученных результатов (в том числе всех графиков) и анализ погрешностей; полученные значения следует сравнить с известными табличными значениями измеряемых величин; после заключения следует оставить около страницы свободное место на случай его возможной переделки.

9. Если студент не успевает получить зачет по работе в день ее выполнения, то необходимо получить подпись преподавателя в журнале, подтверждающую выполнение работы. В этом случае оформление работы необходимо закончить во внеаудиторное время.

Внимание! Какие бы результаты не были получены, студент обязан написать заключение по работе к следующему занятию.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Микрометрическая подача

Во многих работах составной частью установок является микрометрическая подача, фотография которой приведена на рис. 1, она служит для малых (доли миллиметра) перемещений различных объектов, вставленных в крепежное отверстие столика 1. Стопорные винты 3 позволяют закреплять стойки с различными объектами на корпусе устройства.

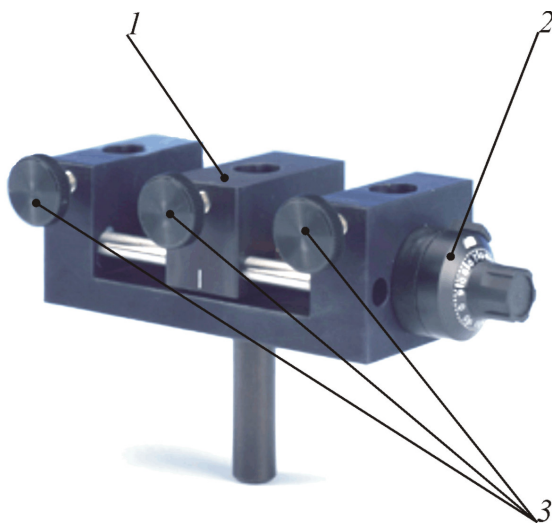


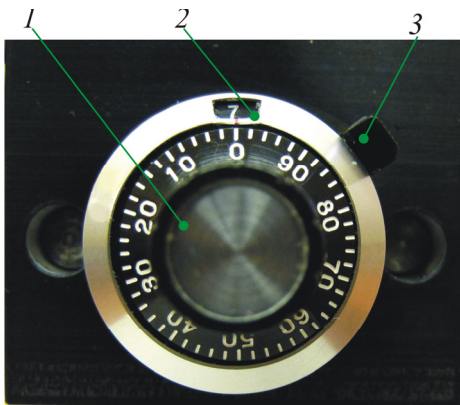
Рис. 1

Перемещение столика осуществляется вращением барабана 2.

Измерительным элементом является микрометрический винт, имеющий резьбу с точным шагом (шаг резьбы $P = 0,50$ мм). Микрометрическая пара конструктивно выполняется в виде резьбовой (микрометрической) гайки (столик 1), установленной на двух направляющих, и микрометрического винта, соединенного с отсчетным барабаном 2. Измеряемое перемещение определяется по углу поворота барабана. Для отсчета целого числа оборотов микрометрического винта служит круговая (основная) шкала, которая распо-

ложена на запрессованном в корпус кольцо. Для отсчета долей оборота микрометрического винта, т. е. десятых и сотых долей миллиметра, служит круговая шкала с радиальными штрихами (50 делений), нанесенными на круглой части барабана (рис. 2). Указателем для отсчета по этой шкале является продольный штрих, нанесенный под окошком.

Рис. 2



Устройство барабана приведено на рис. 2. Ручка барабана *1* служит для приведения в движение микрометрического винта. Для предотвращения вращений ручки барабана в конструкции барабана предусмотрен стопор *3*. Цена деления микрометрического винта на барабанном отсчетном устройстве 0,02 оборота микрометрического винта или 0,01 мм перемещения столика. Для удобства отсчета на барабане нанесены числа, обозначающие сотые доли оборота. Смена показаний на единицу в окне *2* соответствует перемещению столика на $50 \times 0,01 \text{ мм} = 0,5 \text{ мм}$.

Пример. На рис. 2 показание в окне равно 7, отсчет по барабанному отсчетному устройству – 0. Таким образом, отсчет равен $7,00 \text{ об.} = 3,50 \text{ мм}$.

Показания в окне могут меняться от 0 до 19, которые соответствуют перемещению столика на расстояние $20 \times 0,5 \text{ мм} = 10 \text{ мм}$. Так, период показаний отсчетного устройства микрометрической подачи равен 20 оборотам микрометрического винта (10 мм). Для измерения перемещений, превышающих этот период, можно воспользоваться миллиметровой линейкой, расположенной под белой риской столика *1* (на рис. 1 не указана, но в некоторых работах имеется).

Из-за возможного люфта вращать барабан при проведении измерений рекомендуется в одном направлении.

Погрешность отсчета микрометрического винта – 0,01 мм.

Мультиметр универсальный PeakTech 2010DMM

Универсальный цифровой вольтметр типа PeakTech 2010DMM предназначен для измерения следующих величин:

- постоянное напряжение;
- переменное напряжение;
- сопротивление;
- постоянный ток;
- переменный ток;
- емкость конденсаторов;
- индуктивность;
- частота гармонических колебаний.

Кроме перечисленных, мультиметр может выполнять еще ряд специальных функций – измерение температуры (с использованием выносного датчика – термопары), тестирование транзисторов и диодов, проверку целостности («прозвонка») электрических цепей и соединений.

Внешний вид прибора показан на рис. 3.

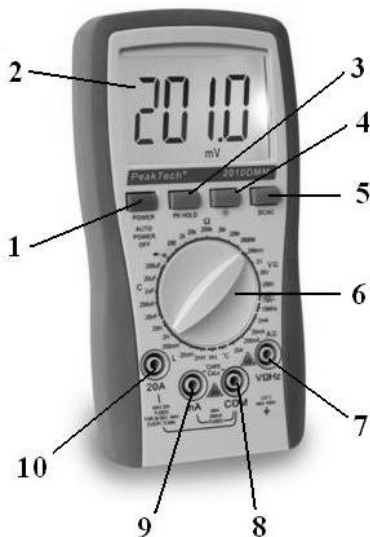


Рис. 3

На рис. 3 обозначены цифрами:

- 1 – кнопка включения/выключения питания прибора (POWER);
- 2 – жидкокристаллический цифровой дисплей;
- 3 – кнопка включения/выключения режима фиксации максимального значения измеряемой величины (PK HOLD);
- 4 – кнопка включения/выключения подсветки дисплея;
- 5 – кнопка выбора вида измеряемого тока или напряжения (постоянный/переменный, DC/AC);
- 6 – переключатель режимов работы и диапазонов измерения;
- 7 – гнездо для подключения щупа в режиме измерения напряжения, сопротивления, частоты ($V \ \Omega \ Hz$);
- 8 – гнездо для подключения «общего» контакта (COM);
- 9 – гнездо для подключения щупа при измерении силы тока до 200 мА;
- 10 – гнездо для подключения щупа при измерении силы тока от 200 мА до 20 А.

В табл. 1 перечислены основные измеряемые физические величины, рабочие диапазоны измерения и соответствующие им приборные погрешности.

Таблица 1

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения	Диапазон измерений	Приборная погрешность
Постоянное напряжение	V	мкВ, мВ, В	200 – 200 мВ	$\pm(0,005U_x + 3D)$
			200 – 1000 В	$\pm(0,01U_x + 5D)$
Постоянный ток	A	мкА, мА	200 мкА – 20 мА	$\pm(0,008I_x + 3D)$
		А	20 – 200 мА	$\pm(0,015I_x + 4D)$
			200 мА – 20 А	$\pm(0,02I_x + 5D)$
Переменное напряжение (действующее значение)	V	мкВ, мВ, В	До 200 мВ	$\pm(0,012U_x + 3D)$
			200 мВ – 200 В	$\pm(0,01U_x + 3D)$
			200 – 750 В	$\pm(0,012U_x + 5D)$
Переменный ток (действующее значение)	A	мкА, мА	200 мкА – 20 мА	$\pm(0,01I_x + 5D)$
		А	20 – 200 мА	$\pm(0,02I_x + 5D)$
			400 мА – 10 А	$\pm(0,03I_x + 10D)$

Величина	Условное обозначение	Единицы измерения	Диапазон измерений	Приборная погрешность
Сопротивление	Ω	Ом, кОм, МОм	До 2 кОм	$\pm(0,008R_x + 5D)$
			20 кОм – 2 МОм	$\pm(0,008R_x + 3D)$
			20 МОм	$\pm(0,01R_x + 3D)$
			2000 МОм	$\pm(0,05R_x + 20D)$
Емкость	С	нФ, мкФ	20 нФ – 20 мкФ	$\pm(0,025C_x + 6D)$
			20 нФ – 200 мкФ	$\pm(0,05C_x + 5D)$
Частота	10 MHz	Гц, кГц, МГц	2кГц – 10 МГц	$\pm(0,005v_x + 4D)$
Индуктивность	L	мГн, Гн	2 мГн – 20 Гн	$\pm(0,025L_x + 20D)$

Примечание. (U_x , I_x , R_x , C_x , L_x , v_x) – измеренное значение величины; D – единица младшего разряда.

Порядок работы с универсальным мультиметром PeakTech 2010DMM

Внимание! Прежде, чем начать работу с прибором, подробно ознакомьтесь со следующими предупреждениями.

- Знак  рядом с гнездами предупреждает, что входное напряжение или ток не должны превышать указанных пределов!
- Всегда проверяйте, что используется именно требуемая функция измерения!
- Всегда проверяйте, что используются именно требуемые гнезда прибора!
- При измерении напряжения проверяйте, чтобы прибор **не был включен** в режим измерения токов, или сопротивлений, или диодного теста!
- Всегда следите, чтобы значения измеряемых величин не превышали установленных пределов измерения!

Измерение напряжений постоянного и переменного тока

1. Подключите синий щуп к входному гнезду «COM», а красный – к гнезду «V Ω Hz».
2. Подсоедините щупы к исследуемой схеме или устройству.

3. Установите переключатель режимов работы в сектор «V». Выберите соответствующий предел измерения. **Если диапазон возможных значений напряжения заранее неизвестен, следует устанавливать наибольший предел измерения**, и затем, последовательно изменяя пределы в сторону уменьшения, подобрать оптимальный предел.

4. Включите прибор нажатием кнопки «POWER».

5. По умолчанию, при включении мультиметра будет активизирован режим измерения постоянного напряжения. Для измерения переменного напряжения нажмите кнопку «DC/AC». На дисплее появится значок «AC», информирующий об активизации соответствующего режима. Повторное нажатие на кнопку «DC/AC» вновь вернет мультиметр в режим измерения постоянного напряжения.

Примечание. При измерении переменного напряжения диапазон рабочих частот прибора PeakTech 2010DMM составляет 50–400 Гц. **За пределами этого диапазона показания прибора не будут соответствовать действительному значению измеряемой величины.**

Измерение силы тока

Внимание! Работа с мультиметром в режиме измерения силы тока требует особой внимательности. Во избежание порчи прибора необходимо строго соблюдать предписанный порядок действий.

Измерение силы тока до 200 мА

1. Подключите синий щуп к входному гнезду «COM», а красный – к гнезду «mA».
2. Подсоедините мультиметр в соответствии со схемой.
3. Установите переключатель режимов работы в сектор «A». Установите предел измерения «200 mA».
4. Включите прибор нажатием кнопки «POWER».
5. Выберите соответствующий вид измеряемого тока – постоянный (DC) или переменный (AC).
6. При необходимости уменьшите предел измерения.

Измерение силы тока от 200 мА до 20 А

1. Подключите синий щуп к входному гнезду «COM», а красный – к гнезду «20 A».

2. Подсоедините мультиметр в соответствии со схемой.
 3. Установите переключатель режимов работы в сектор «А».
- Установите предел измерения «20 А».
4. Включите прибор нажатием кнопки «POWER».
 5. Выберите соответствующий вид измеряемого тока – постоянный (DC) или переменный (AC).

Измерение сопротивлений

Внимание! Перед измерением сопротивлений в схеме убедитесь, что схема обесточена и все конденсаторы полностью разряжены.

1. Подключите синий щуп к входу «COM», а красный – ко входу «V Ω Hz».
2. Установите переключатель режимов измерения в сектор « Ω ».
3. Подсоедините щупы прибора к измеряемому сопротивлению.
4. Включите прибор нажатием кнопки «POWER».
5. Выберите оптимальный предел измерения.

Режим автовыключения

Прибор оснащен устройством автовыключения. Если в течение 15 мин не производится никаких манипуляций с прибором, или не меняются значения измеряемой величины, происходит автоматическое отключение питания прибора. Для повторного включения прибора следует дважды нажать на кнопку «POWER».

Работа 4.6

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ МИКРОВОЛН

Цель: изучение явления интерференции, интерферометра Майкельсона и определение длины волны СВЧ-излучения.

Оборудование: источник микроволн (СВЧ-излучатель); блок питания СВЧ-излучателя; приемник СВЧ-излучения; детектор на кронштейне; вольтметр с усилителем; металлический экран (2 шт.); диэлектрическая (стеклянная) пластина; линейка.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе исследуются закономерности, присущие явлению интерференции электромагнитных волн. *Интерференцией* называется перераспределение энергии излучения в пространстве, возникающее в результате взаимодействия двух и более когерентных волн. Используемый диапазон длин волн относится к сантиметровому, что позволяет с приемлемой точностью производить пространственные измерения с использованием таких простых измерительных приборов, как линейка, а также достаточно компактно (в пределах стола) разместить необходимое для эксперимента оборудование. В работе использован маломощный источник микроволн, представляющий собой рупорную антенну в сборе с прямоугольным волноводом и маломощным ламповым генератором СВЧ-излучения – *клистроном*. Клистроны являются весьма надежными генераторами, излучение которых отличается высокой стабильностью таких характеристик, как частота, мощность излучения. Блок питания СВЧ-излучателя обеспечивает необходимые напряжения на электродах клистронов и позволяет корректировать в небольших пределах режимы его работы.

Для измерения интенсивности волны используется приемник СВЧ-излучения, представляющий собой рупорную антенну в сборе с прямоугольным волноводом и СВЧ-диодом. Основой этого приемника является полупроводниковый диод специальной конструкции, предназначенной для работы в СВЧ-диапазоне. Этот диод соединяется с вольтметром. При помещении диода в СВЧ-поле,

вследствие односторонней проводимости на выводах диода, возникает однополярное пульсирующее напряжение. При этом за счет электрической емкости соединительных проводов и в меньшей степени собственной электрической емкости диода происходит сглаживание этих пульсаций. В результате указанные емкости оказываются заряженными до значений, пропорциональных интенсивности падающего излучения. По показаниям вольтметра, соединенного с диодом, можно судить об интенсивности электромагнитной волны. Рупор антенны предназначен для увеличения интенсивности волны у вершины рупора. Таким образом, в волноводе, который соединен с рупорной антенной и в который помещен СВЧ-диод, создаются повышенные значения напряженности по сравнению с полем падающей на рупор волны. Этим достигаются более удобные режимы проведения измерений. Рупорная антенна удобна для измерения интенсивности падающей волны, однако не пригодна для измерения интенсивности в точках пространства, в которые приходят волны с разных направлений. Именно такая ситуация реализуется, например, в исследовании стоячей волны, получаемой сложением падающей и отраженной от металлического экрана волн. В этом случае используется детектор, представляющий собой СВЧ-диод, укрепленный на кронштейне. Этот диод следует помещать непосредственно в ту точку пространства, где необходимо произвести измерение интенсивности. Экспериментальная установка укомплектована еще одним элементом – диэлектрическим экраном. Он позволяет разделять падающее излучение на две волны посредством явлений преломления и отражения на границе сред. Эти две волны когерентны и вследствие этого их интерференционная картина будет стабильна во времени и потому доступна для измерений, что и используется в данной работе.

Если плоская волна распространяется вдоль оси x и отражается от поверхности, которая перпендикулярна направлению распространения, падающая и отраженная волны интерферируют друг с другом:

$$E = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) - A \cos \omega \left(t + \frac{x}{c} \right). \quad (4.6.1)$$

В результате суперпозиции получается стоячая волна со стационарными координатами максимумов и минимумов, которые называют, соответственно, *пучностями* и *узлами*:

$$E = 2A \sin(\omega t) \sin\left(\frac{\omega x}{c}\right), \quad (4.6.2)$$

где ω – циклическая частота; c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме. Координаты узлов на оси x , отсчитывая от экрана, имеют значения:

$$x = n \frac{\lambda}{2}, \quad (4.6.3)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ Между узлами располагаются пучности.

Рассмотрим схему интерферометра Майкельсона для электромагнитных волн СВЧ-диапазона, показанную на рис. 4.6.1. На этом рисунке S – СВЧ-излучатель, D – приемник СВЧ-излучения, P_1 и P_2 – металлические экраны, посередине рисунка под углом 45° к оси рупора излучателя расположена диэлектрическая пластина G .

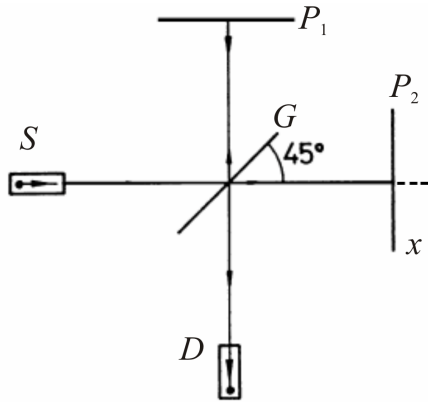


Рис. 4.6.1

Из рис. 4.6.1 видно, что излучение, частично отраженное диэлектрической пластиной G , затем отражается экраном P_1 , возвращается к диэлектрической пластине, преломляясь на ней, частично проходит и потом попадает в приемник. Аналогично обстоит дело и с излучением, отражаемым металлическим экраном P_2 . В результате по направлению к приемнику распространяются две когерентных волны одинаковых интенсивностей. Приемник СВЧ-излучения будет регистрировать результирующую интенсивность, получаемую сложением напряженностей полей этих волн. Если изначально

расстояния до экранов P_1 и P_2 – *плечи интерферометра* – равны, то результирующая интенсивность максимальна (складываемые волны имеют одинаковые фазы). Разность фаз интерферирующих волн можно менять, двигая, например, экран P_2 . В результате, измеряя с помощью приемника СВЧ-излучения интенсивность, будет обнаруживаться ее периодическая зависимость от координаты экрана P_2 . Изменение положения экрана одновременно меняет геометрический путь как падающей волны, так и отраженной. Поэтому разность хода волн, отраженных от пластин P_1 , P_2 и G и распространяющихся к приемнику D , равна:

$$\Delta = GP_1 - GP_2 = 2x, \quad (4.6.4)$$

где x – смещение экран P_2 . Максимум интенсивности результирующей волны будет наблюдаться при условии

$$\Delta = n\lambda, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

а минимум

$$\Delta = \left(n + \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для исследования стоячей волны собирается установка (рис. 4.6.2) из следующих элементов: СВЧ-излучатель 3, блок питания СВЧ-излучателя 2, детектор на кронштейне 4, вольтметр-мультиметр (Digital multimeter 4000) 6, металлический экран 5, линейка 1.

Металлический экран 5 следует расположить перпендикулярно к оси рупора СВЧ-излучателя 3. Кроме того, геометрическая ось рупора излучателя 3 должна попадать в центр экрана 5. Следует иметь ввиду, что, вообще говоря, на выходе из рупора СВЧ-излучателя волновой фронт не является достаточно плоским. Выполаживание фронта происходит лишь на достаточном удалении от рупора. Поэтому СВЧ-излучатель следует располагать значительно дальше от металлического экрана, чем детектор.

Кронштейн детектора 4 следует развернуть таким образом, чтобы корпус СВЧ-диода располагался на геометрической оси рупора вертикально. Такое направление соответствует поляризации в вертикальной плоскости регистрируемых волн. Теперь перемещая де-

тектор вдоль геометрической оси рупора можно производить измерение интенсивности волны по вольтметру в условных единицах.

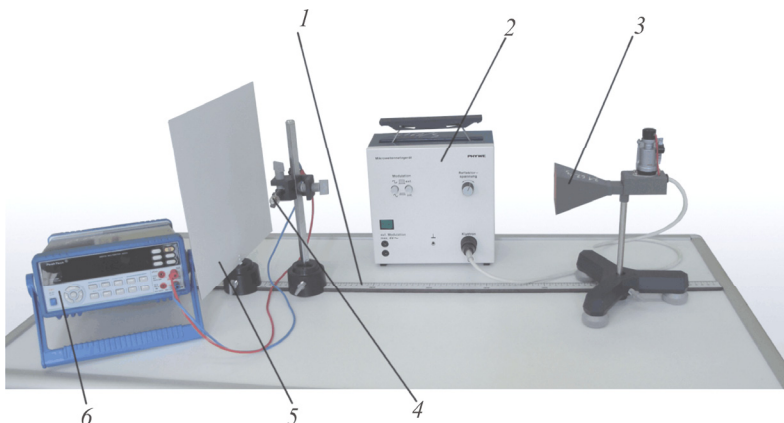


Рис. 4.6.2

Для наблюдения интерференции волн собирается установка по схеме интерферометра Майкельсона (рис. 4.6.3). При этом задействуются следующие элементы: СВЧ-излучатель 2, блок питания СВЧ-излучателя 1, приемник СВЧ-излучения 3, вольтметр 5, два металлических экрана 4, диэлектрическая пластина 7, линейка 6.

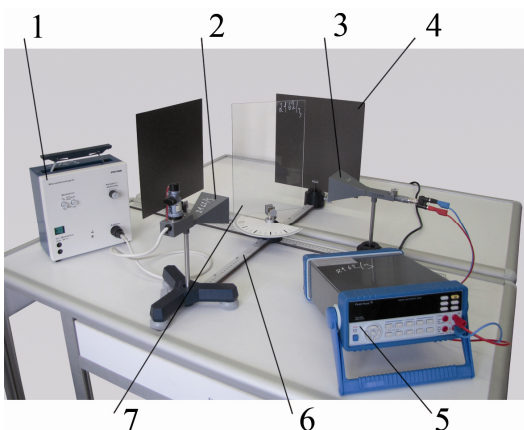


Рис. 4.6.3

Конфигурация установки соответствует ее упрощенному схематическому изображению на рис. 4.6.1.

При работе с установкой следует помнить, что СВЧ-диод является очень чувствительным полупроводниковым прибором с низким предельно допустимым обратным напряжением (~ 1 В). Поскольку на теле человека, а тем более синтетической одежде обычно присутствует статический заряд, обеспечивающий потенциалы, на порядки превосходящие указанное обратное пробивное напряжение, становится ясным, что даже легкое случайное прикосновение к выводам СВЧ-диода может приводить к необратимой деградации его полупроводниковой структуры или пробоем перехода.

Внимание! Не следует прикасаться к выводам СВЧ-диодов, применяемых в СВЧ-приемнике и детекторе.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Выполняя задания, вы подвергаетесь облучению СВЧ-полем малой мощности. Повредить здоровью кратковременное и маломощное излучение не может, но запрещается намеренно направлять рупорную антенну работающего генератора на рядом находящихся людей и на себя. Необходимо сразу отключать питание клистрона после проведения замеров. Не следует прикасаться к выводам СВЧ-диодов, применяемых в СВЧ-приемнике и детекторе. Для исключения повреждения диодов статическим электричеством, до касания держателей и штативов, кратковременно прикоснитесь рукой к заземленным элементам установки – блоку питания.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Измерение длины волны, излучаемой СВЧ-генератором, по координатам стоячей волны

1. Соберите установку в соответствии с рис. 4.6.2. При этом обязательно руководствуйтесь правилами обращения с СВЧ-диодами (см. раздел «Правила техники безопасности»). Установите срез рупорной антенны излучателя на расстояние 50 – 60 см от металлического экрана. Плоскости среза рупора и экрана должны быть строго параллельны. Детектор на кронштейне расположите по высоте и углу так, чтобы перпендикуляр, построенный от экрана к центру рупорной антенны, пересекался СВЧ-диодом, длинная сторона которого должна быть перпендикулярна столу. При этом бу-

дет достигнута максимальная амплитуда детектируемого сигнала из-за совпадения плоскостей поляризации приемника и излучателя.

2. Установите кронштейн детектора вблизи экрана. Кнопки выбора модуляции (Modulation) на источнике питания СВЧ-генератора должны быть отжаты. Ручка «Reflektor-spannyng» вращается только сотрудниками лаборатории.

3. Включите питание вольтметра. Установите автоматический выбор предела измерения вольтметра (надпись «AUTO») и режим измерения постоянного напряжения (DC) на приборе, подключенном к детектору. Включите сетевое питание генератора выключателем, расположенным слева на передней панели. Через время не более 30 с показания вольтметра изменятся от нулевого значения, что будет свидетельствовать об исправности генератора и детектора. Иначе, обратитесь к преподавателю или сотруднику лаборатории.

4. Перемещая детектор по направлению к рупорной антенне, через интервалы в 2 мм снимите 25–30 значений показаний вольтметра и занесите их в табл. 4.6.1. Так как излучение клистрона обладает некоторыми флуктуациями амплитуды, а также вследствие шума детектора и приема многократных паразитных отражений не следует ожидать стабильности измерений, поэтому необходимо ограничиться двумя-тремя цифрами индикатора вольтметра после запятой. Большая мощность излучения может повредить СВЧ-диод, поэтому не располагайте кронштейн вплотную к рупору. Отсчет положения антенны можно производить по горизонтальной координате плоскости среза рупора, а детектора – по линии сопряжения цилиндрического основания кронштейна с плоскостью линейки.

Таблица 4.6.1

№	x_1 , мм	U , В	Примечания
1			
2			

5. Для исключения «паразитных» отражений и вредного влияния СВЧ-излучения на здоровье человека, старайтесь не попадать в область «диаграммы направленности» рупорной антенны. После эксперимента отключите источник питания СВЧ-генератора.

Задание 2. Измерение длины волны излучения СВЧ-генератора на интерферометре по оптической схеме Майкельсона

1. Соберите установку в соответствии с рис. 4.6.3 в определенной последовательности. Для этого отключите вольтметр от детектора на кронштейне. Кронштейн удалите с линейки и поместите на ее середину диэлектрическую (стеклянную) пластинку с держателем и транспортиром, а на краю линейки закрепите один из металлических экранов. В паз держателя стеклянной пластины перпендикулярно закрепите оставшуюся линейку. На нее поместите второй металлический экран на расстоянии 50 см от кронштейна диэлектрика. Кронштейн рупорной антенны генератора поместите над линейкой так, как показано на рис. 4.6.3, а срез рупорной антенны приемника установите параллельно второму экрану также на расстоянии 50 см. Таким образом, второй экран-срез рупорной антенны приемника и первый экран-срез рупорной антенны генератора должны быть попарно параллельны, а пары перпендикулярны. Стеклопластину расположите под углом 45 град. по шкале транспортира.

2. Подключите вольтметр с установками от предыдущего задания (см. п. 3) к выходным гнездам приемника. Включите СВЧ-генератор. Выберите один из экранов из соображения удобства его перемещения и, сдвигая его по линейке по направлению к стеклянной пластине с шагом 2 мм, снимите 25–30 значений вольтметра. Зависимость напряжения на приемнике от координаты экрана, отсчитанной от держателя пластины стекла (двойной длины плеча интерферометра), занести в таблицу, построенную аналогично табл. 4.6.1. Для исключения «паразитных» отражений и вредного влияния СВЧ-излучения на здоровье человека старайтесь не попадать в область «диаграммы направленности» рупорной антенны и отраженных колебаний. После эксперимента отключите источник питания СВЧ-генератора.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По результатам, занесенным в табл. 4.6.1, постройте график зависимости интенсивности стоячей волны от координаты: $I(x)$. Точки на графике должны быть отложены с интервалами погреш-

ностей. По расстоянию x между несколькими пучностями стоячей волны определите длину волны по формуле:

$$\lambda = \frac{2x}{n-1}, \quad (4.6.5)$$

где n – количество взятых пучностей.

2. Аналогичные расчеты сделайте для узлов стоячей волны. Найдите среднее значение длины волны и ее погрешность разброса.

Полученное значение вынести в раздел «Заключение».

3. По результатам измерений задания 2 постройте график зависимости интенсивности от координаты $I(x)$. По расстоянию между несколькими максимумами зависимости определите длину волны по формуле (4.6.5).

4. Аналогичные расчеты сделайте для минимумов. Найдите среднее значение длины волны и ее погрешность разброса. Величину приборной погрешности цифрового вольтметра можно не учитывать и не отмечать на графике из-за высокой точности прибора. Приборные погрешности других измерительных приборов определите в соответствии с правилами лабораторного практикума.

Полученное значение вынесите в раздел «Заключение».

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Сравните полученные различными методами длины волн и сделайте выводы. Отметьте в разделе «Заключение» особенности графиков и неудавшиеся замеры.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. К какому типу излучения относятся электромагнитные волны с длиной волны сантиметрового диапазона?
2. Назовите другие типы электромагнитного излучения и диапазоны их длин волн?
3. Какие преимущества имеет исследование волн сантиметрового диапазона по сравнению с другими?
4. Что используется в данной работе для определения интенсивности электромагнитных волн?
5. Объясните основной принцип регистрации интенсивности электромагнитных волн посредством полупроводникового диода.

6. Что является источником электромагнитных волн в данной установке?
7. Почему рупорная антенна не пригодна для исследования стоячей волны?
8. Каким образом в данной работе образуются две когерентные волны?
9. Какие правила необходимо соблюдать при обращении с СВЧ-диодами?
10. Каким образом в данной работе определяется длина волны стоячей волны?
11. Какие величины измеряются в этой работе непосредственно?
12. Почему прикосновение к выводам СВЧ-диода может приводить к необратимой деградации его полупроводниковой структуры?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. М.: Астрель, АСТ, 2008.
2. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа, 2004.
3. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. М.: МИФИ, 2005.

Дополнительная

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 2003.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. Т. 4. М.: Физматлит, 2006.
3. Лабораторный практикум «Оптика». Ч. 1. М.: МИФИ, 2009.
4. Иродов И.Е. Основные законы. Волновые процессы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

Работа 4.7

ДИФРАКЦИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ МИКРОВОЛН

Цель: исследование свойств электромагнитных волн (поляризации, дифракции); приближение геометрической оптики.

Оборудование: микроволновый передатчик с клистроном; микроволновый приемный диполь; источник питания для микроволнового передатчика; универсальный измерительный усилитель; собирающая линза; вольтметр; метровая линейка; поляризационная решетка; транспортер.

ВВЕДЕНИЕ

Под *электромагнитной волной* (ЭМВ) будем понимать распространение колебаний электрических и магнитных полей в пространстве с течением времени.

Как известно, изменение электромагнитных полей в пространстве с течением времени описывается уравнениями Максвелла. Для статичной, однородной и изотропной среды, в которой нет сторонних токов и зарядов, эти уравнения имеют вид

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{D} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0,\end{aligned}\tag{4.7.1}$$

где $\vec{E}$ и $\vec{H}$ – напряженности электрического и магнитного полей; $\vec{D}$ – вектор электрического смещения; $\vec{B}$ – магнитная индукция.

Используя линейную связь между векторами $\vec{D}$ и $\vec{E}$; $\vec{B}$ и $\vec{H}$: $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$ и $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$, из (4.7.1) получим уравнения только для напряженностей:

$$\Delta \vec{E} = \frac{\partial^2 \vec{E}}{v^2 \partial t^2}; \quad (4.7.2)$$

$$\Delta \vec{H} = \frac{\partial^2 \vec{H}}{v^2 \partial t^2}, \quad (4.7.3)$$

где Δ – оператор Лапласа; $v = (\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0)^{-1/2} = c / \sqrt{\varepsilon \mu}$ – скорость ЭМВ в среде с диэлектрической и магнитной проницаемостями ε и μ , не зависящими от координат и времени, $c = (\varepsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$ – скорость ЭМВ в вакууме.

Уравнения типа (4.7.2), (4.7.3) называются *волновыми*, а их решения – волнами; в данном конкретном случае – *электромагнитными волнами*. Заметим, что уравнения (4.7.2) и (4.7.3) не являются независимыми, поскольку поля $\vec{E}$ и $\vec{H}$ связаны друг с другом уравнениями Максвелла (4.7.1).

Уравнения (4.7.2) и (4.7.3) не позволяют однозначно найти поля в ЭМВ, так как для этого необходимы не только соответствующие уравнения, но и начальные или граничные условия. Рассмотрим наиболее важные задачи о распространении ЭМВ в тех или иных конкретных условиях.

Плоская монохроматическая волна. Простейшее в математическом отношении решение волнового уравнения возникает в случае так называемой бегущей плоской монохроматической волны. Пусть источник электромагнитной волны – плоскость, проходящая через начало координат и перпендикулярная некоторому вектору $\vec{n}$. Допустим, что поля в плоскости изменяются со временем по гармоническому закону циклической частотой ω :

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t + \alpha), \quad (4.7.4)$$

$$\vec{H}(t) = \vec{H}_0 \cos(\omega t + \beta), \quad (4.7.5)$$

где $\vec{E}_0$ и $\vec{H}_0$ – амплитуды электрического и магнитного полей; α и β – начальные фазы колебаний. Тогда решение уравнений (4.7.2), (4.7.3) с граничными условиями (4.7.4), (4.7.5) дает:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t \mp \vec{k} \vec{r} + \alpha), \quad (4.7.6)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_0 \cos(\omega t \mp \vec{k} \vec{r} + \beta), \quad (4.7.7)$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор точки наблюдения.

Уравнения (4.7.6), (4.7.7) определяют *плоскую монохроматическую волну*, распространяющуюся вдоль (знак «минус») и против (знак «плюс») направления вектора $\vec{k} = \frac{\omega}{v} \vec{n}$, называемого *волновым*. Амплитуды $\vec{E}_0$ и $\vec{H}_0$, а также начальные фазы α и β , не являются независимыми друг от друга величинами. Вследствие уравнений Максвелла для них имеем:

$$\vec{E}_0 \perp \vec{H}_0, \quad \left[\frac{\vec{E}_0}{E_0}, \frac{\vec{H}_0}{H_0} \right] = \frac{\vec{k}}{k}; \quad \sqrt{\epsilon\epsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu\mu_0} H_0; \quad \alpha = \beta. \quad (4.7.8)$$

Таким образом, уравнения плоской монохроматической ЭМВ, распространяющейся (для определенности) вдоль вектора $\vec{k}$, принимают вид

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha), \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha). \end{aligned} \quad (4.7.9)$$

Аргумент функции «косинус» называется *фазой волны*, а геометрическое место точек (ГМТ), колеблющихся в одной фазе, – *волновой поверхностью*. Волновая поверхность, уравнение которой

$$\omega t - \vec{k}\vec{r} = \text{const},$$

представляет собой плоскость, перпендикулярную вектору $\vec{k}$. Отсюда название волны – плоская. Эта плоскость перемещается в пространстве вдоль вектора $\vec{k}$ со скоростью $v = \omega/k$, k – модуль волнового вектора, называемый также *волновым числом*. Скорость перемещения поверхности постоянной фазы называется *фазовой скоростью волны*.

Из соотношений (4.7.8) и (4.7.9) следуют основные свойства плоской монохроматической волны:

- 1) векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ колеблются в одной фазе;
- 2) векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ ортогональны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{k}$, так что векторы $\vec{E}$, $\vec{H}$ и $\vec{k}$ образуют правую тройку.

Интенсивностью I плоской ЭМВ называется среднее значение модуля вектора Пойнтинга $\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$. При этом под средним понимается среднее за достаточно большой (по сравнению со време-

нем изменения поля в волне) промежутков времени τ . В частности, в случае плоской монохроматической волны с частотой ω , при условии $\omega\tau \gg 1$, имеем:

$$I = \langle S \rangle_\tau = \langle S \rangle_{\frac{2\pi}{\omega}} + O\left(\frac{1}{\omega\tau}\right) = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} \langle E^2 \rangle_\tau = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E_0^2.$$

В дальнейшем, в качестве определения интенсивности будем использовать

$$I \propto \langle E^2 \rangle_\tau, \quad (4.7.10)$$

так как на практике чаще измеряются относительные изменения интенсивности, а не абсолютные.

Поляризация плоской монохроматической волны. Явление *поляризации электромагнитной волны* состоит в упорядоченном изменении его векторных характеристик $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}, \vec{B}$ со временем. Заметим, что в изотропных средах для описания поляризации достаточно бывает рассмотреть поведения одного вектора $\vec{E}$.

Перечислим возможные способы этого упорядочения:

- 1) *эллиптическая* поляризация, при которой конец вектора $\vec{E}$ описывает эллипс;
- 2) *линейная (плоская)* поляризация – колебания вектора $\vec{E}$ происходят вдоль одной прямой;
- 3) *круговая* поляризация – конец вектора $\vec{E}$ описывает окружность.

Линейная и круговая поляризации являются предельным случаем эллиптической поляризации электромагнитной волны. При этом «наблюдения» происходит с точки зрения условного «наблюдателя», смотрящего навстречу лучу.

Прибор, позволяющий выделить линейно поляризованное излучение из излучения с любым типом поляризации, в том числе и из естественного (неполяризованного), называется *поляризатором*. Прибор, используемый для анализа поляризации излучения, называется *анализатором*.

Проходящее через анализатор плоско поляризованное излучение подчиняется *закону Малюса*

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (4.7.11)$$

где φ – угол между плоскостью поляризации волны и плоскостью пропускания анализатора; I и I_0 – интенсивность прошедшего и падающего излучения соответственно. Он легко объясним, если учесть, что детектор реагирует только на проекцию вектора $\vec{E}$ на ось самого детектора (рис. 4.7.1). Пусть E_0 – амплитуда напряженности электрического поля падающей волны, тогда детектор будет воспринимать только составляющую амплитуды: $E_m = E_0 \cos \varphi$. Учитывая, что $I \propto E_m^2$, видно, откуда следует закон (4.7.11).

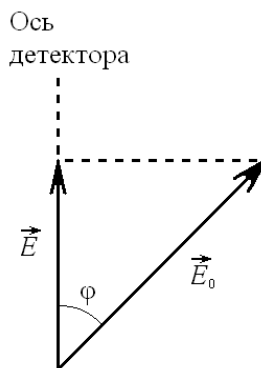


Рис. 4.7.1

Дифракция. Дифракцией называют совокупность явлений, наблюдаемых при распространении электромагнитных волн в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

Всякая дифракционная задача, если ее рассматривать строго, сводится к нахождению решения уравнений Максвелла, удовлетворяющего соответствующим граничным условиям. Однако в такой строгой постановке задачи, ввиду их сложности, допускают аналитические решения лишь в простейших случаях.

Принцип Гюйгенса–Френеля. Предположение Гюйгенса заключается в том, что при распространении электромагнитной волны каждая точка волновой поверхности является источником вторичных сферических волн. Получающийся при этом следующий волновой фронт есть результат наложения этих элементарных волновых поверхностей и является огибающей по отношению к этим поверхностям (рис. 4.7.2).

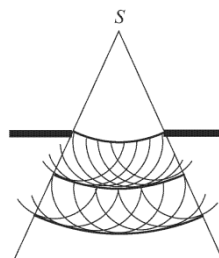


Рис. 4.7.2

Однако для количественного решения задачи о расчете электромагнитного поля одного принципа Гюйгенса недостаточно. Он дает лишь геометрический способ построения волновых фронтов. Кроме того этот принцип противоречит многим экспериментальным фактам, например отсутствию обратной волны.

Френель дополнил принцип Гюйгенса физически ясным положением, согласно которому вторичные волны при наложении ин-

терферируют. Тем самым огибающая поверхность волновых фронтов получила физический смысл. К огибающей все волновые фронты приходят в одной фазе, и их интерференция приводит к большой интенсивности волны.

Дифракция Фраунгофера и Френеля. Явления дифракции принято классифицировать в зависимости от расстояний источника r_0 и точки наблюдения (экрана) s от препятствия шириной d , поставленного на пути распространения ЭМВ. Если эти расстояния очень велики $L \gg d^2/\lambda$ (где $L = r_0 s/(r_0 + s)$), то дифракция называется *дифракцией в параллельных лучах*, или *дифракцией Фраунгофера*. В случае $L \sim d^2/\lambda$ говорят о *дифракции в непараллельных лучах*, или *дифракции Френеля*. Практически для осуществления дифракции Фраунгофера точечный источник ЭМВ помещают в фокусе собирающей линзы. Получающийся параллельный пучок ЭМВ дифрагирует на каком-то препятствии. Дифракционная картина наблюдается в фокальной плоскости линзы, поставленной на пути дифрагированной ЭМВ. Ясно, что между фраунгоферовой и френелевой дифракциями нет принципиального различия и резкой границы. Одна непрерывно переходит в другую.

Дифракция на цилиндрической линзе. Рассмотрим дифракцию плоской монохроматической ЭМВ на цилиндрической линзе шириной b . Протяженность фронта волны и самой линзы в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа (см. рис. 4.7.3), – бесконечно большие. Найдем распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы.

После прохождения линзы плоская волновая поверхность представляет собой уже цилиндрическую поверхность радиусом f . Для плосковыпуклой линзы связь между радиусом кривизны волновой поверхности и фокусным расстоянием f линзы выражается формулой:

$$\frac{1}{f} = (N - 1) \frac{1}{R}, \quad (4.7.12)$$

где N – отношение показателя преломления материала линзы к показателю преломления воздуха для данной длины волны.

В результате преломления плоскопараллельной волны на цилиндрической линзе получается сходящаяся волна. В зависимости от точки наблюдения можно увидеть либо дифракцию Фраунгофе-

ра, либо дифракцию Френеля. В фокальной плоскости будет наблюдаться дифракция Фраунгофера.

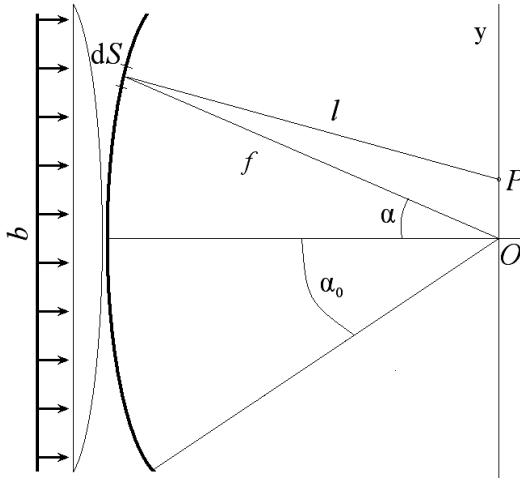


Рис. 4.7.3

В соответствии с принципом Гюйенса–Френеля для цилиндрических волн, амплитуда колебаний A в точке наблюдения P :

$$A(y) = A_0 \int_{-\alpha_0}^{+\alpha_0} \frac{f}{\sqrt{\lambda f}} e^{ik(f^2 + y^2 - 2fy \sin \alpha)^{1/2}} d\alpha,$$

где A_0 – амплитуда падающей волны; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

В общем виде данный интеграл не вычисляется. Однако в предположении $\alpha_0 \ll 1$ и $x \ll f$ его можно упростить. В результате вычислений получим:

$$A(y) = A_0 \sqrt{\frac{f}{\lambda}} \frac{2 \sin(ky \alpha_0)}{iky} e^{ikf}.$$

Здесь e^{ikf} – постоянный фазовый множитель, который может быть отброшен, и, учтя (4.7.10), формула для интенсивности приобретает вид

$$I(y) = I_0 \frac{f}{\lambda} \frac{4 \lambda^2 \sin^2((2\pi/\lambda)y \alpha_0)}{4\pi^2 y^2},$$

I_0 – интенсивность падающей ЭМВ. После упрощения

$$I(y) = I_0 \frac{f\lambda}{4\pi^2 y^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi y \alpha_0}{\lambda} \right).$$

Введем переменную $\xi = 2\pi y \alpha_0 / \lambda$.

Легко видеть, что $f\alpha_0 \approx b/2$, тогда

$$I(y) = I_0 \frac{b^2}{\lambda f} \frac{\sin^2(\xi)}{\xi^2}. \quad (4.7.13)$$

Минимумы интенсивности (рис. 4.7.4) определяются из условия $\xi = \pi \cdot n$, где $n = \pm 1, \pm 2, \dots$, или

$$y_n = \frac{f}{b} \lambda n.$$

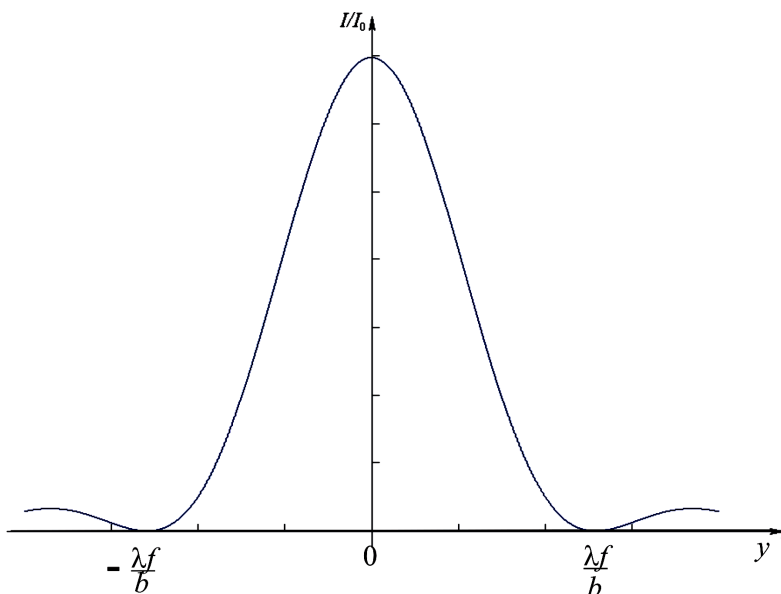


Рис. 4.7.4

Приближение геометрической оптики. Наиболее просто решение задачи о распространении излучения в неоднородных средах выглядит в случае достаточно малых длин волн, когда выполнено

неравенство $\lambda \left| \frac{da}{dx} \right| \ll a$, означающее, что амплитуда a слабо меняется на расстояниях порядка длины ЭМВ.

Часто такого рода предел количественно формулируется в виде $\lambda \rightarrow 0$ и называется *геометрической оптикой*, поскольку в этом случае основные законы оптики можно сформулировать на языке геометрии.

В пределе геометрической оптики ЭМВ распространяется вдоль линий, называемых *лучами*. Под лучом будем понимать линию, касательная к которой в каждой точке направлена так же, как и вектор Пойнтинга $\vec{S}$. В однородной и изотропной среде $\vec{S}$ коллинеарен волновому вектору $\vec{k}$. Отсюда, в частности, следует, что луч представляет собой линию, ортогональную семейству волновых поверхностей. Совокупность лучей называется *пучком*.

Основополагающим принципом в геометрической оптике является *принцип Ферма*, который гласит что: *действительный путь распространения ЭМВ (луч) есть путь, для прохождения которого ЭМВ требуется минимальное время по сравнению с любым другим мыслимым путем между теми же точками.*

В основе приближения геометрической оптики для ЭМВ лежат четыре закона:

- 1) закон прямолинейного распространения ЭМВ;
- 2) закон независимости ЭМВ;
- 3) закон отражения;
- 4) закон преломления.

Первый, третий и четвертый законы могут быть получены из принципа Ферма. Второй закон является следствием, с одной стороны, принципа суперпозиции ЭМВ, а с другой – пренебрежения интерференции волн в пределе геометрической оптики.

Система поверхностей называется *центрированной*, если центры кривизны всех поверхностей лежат на одной прямой, которая называется *главной оптической осью*.

Линза – прозрачное тело, ограниченное осесимметричными поверхностями, как правило, сферическими, но иногда цилиндрическими, параболическими и др. Рассмотрим распространение ЭМВ от точечного источника, расположенного в точке P (рис.4.7.5). Лу-

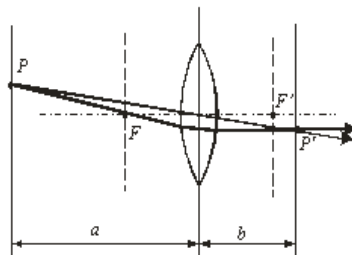


Рис. 4.7.5

чи, вышедшие из точки P , пройдя через линзу, пересекаются в точке P' .

Если же все лучи, вышедшие из P , пересекаются в одной точке P' , то P' называется *стигматическим* (или *резким*) изображением источника P . Изображение называется *действительным*, если лучи пересекаются в точке P' и *мнимым*, если в точке P' пересекаются их продолжения лучей, проведенные в направлении, противоположном направлению распространения ЭМВ. Линза дает стигматическое изображение только для *параксиальных* (идущих вблизи оптической оси, приосевых) лучей с малой *апертурой* (углом раствора).

Если толщина линзы мала по сравнению с радиусами кривизны поверхностей, то линза называется *тонкой*. Формула тонкой линзы

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (4.7.14)$$

где a – расстояние от источника до линзы; b – расстояние от линзы до изображения P' ; f – фокусное расстояние. Для собирающей линзы $f > 0$, для рассеивающей $f < 0$. Величина a считается отрицательной для сходящегося пучка; а b – отрицательно для мнимого изображения. Если источник P отодвигать по главной оптической оси на бесконечность ($a \rightarrow \infty$), то изображение P' будет приближаться к точке F' . С точки зрения волновой оптики это означает, что падающая на линзу плоская волна после прохождения линзы становится сходящейся волной с центром (фокусом) F' .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Фотография экспериментальной установки для определения фокуса собирающей линзы из синтетической смолы показана на рис. 4.7.6. Экспериментальная установка состоит из: 1 – микроволнового передатчика с клистроном (с частотой излучения $\nu = 9,45$ ГГц, что соответствует длине волны $\lambda = 31,8$ мм); 2 – собирающей линзы; 3 – микроволнового приемного диполя; 4 – универсального измерительного усилителя; 5 – метровой линейки; 6 – вольтметра; 7 – источника питания для микроволнового передатчика.

Передающее и принимающие устройства располагаются на расстоянии приблизительно 65 см над поверхностью стола, чтобы уменьшить помехи, возникающие при отражении от него. Источ-

ник 1 и приемник 3 располагаются на расстоянии $l = 1000$ мм друг от друга, а линза или решетка на расстоянии $l_1 = 250$ мм от источника.

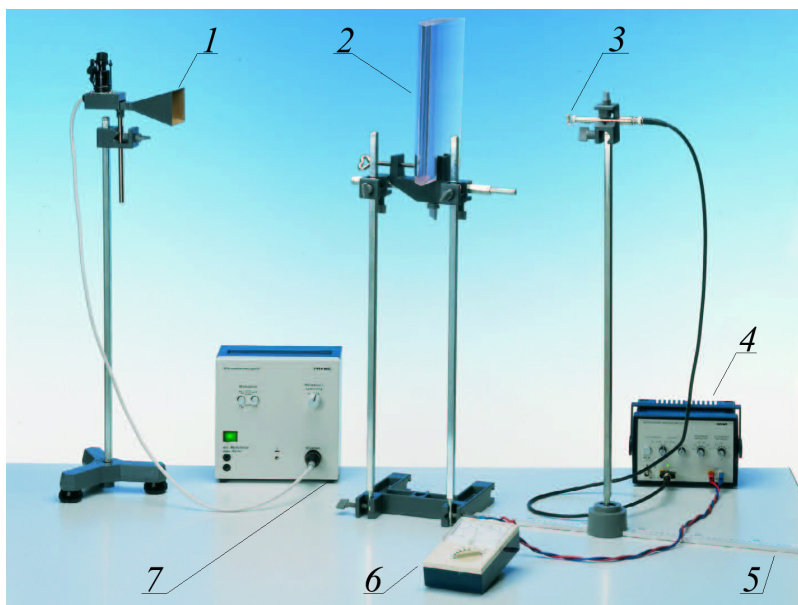


Рис. 4.7.6

С помощью коаксиального кабеля принимающий диполь 3 соединяется с входом для низкого напряжения измерительного усилителя 4. Отражающее напряжение клистрона и направление передающей антенны выбирается так, чтобы сигнал на принимающем диоде был максимальным. Отражающее напряжение регулируется с помощью рукоятки «reflector-spanning» на источнике питания для микроволнового передатчика 7. Кроме того, плоскость поляризации электромагнитной волны ориентирована параллельно короткой стороне микроволнового передатчика. Линейка 5, предназначенная для измерения продольной или поперечной координат положения диполя, крепится к столу настольными зажимами. При обработке результатов нужно учитывать что $U_d \sim I \sim E^2$.

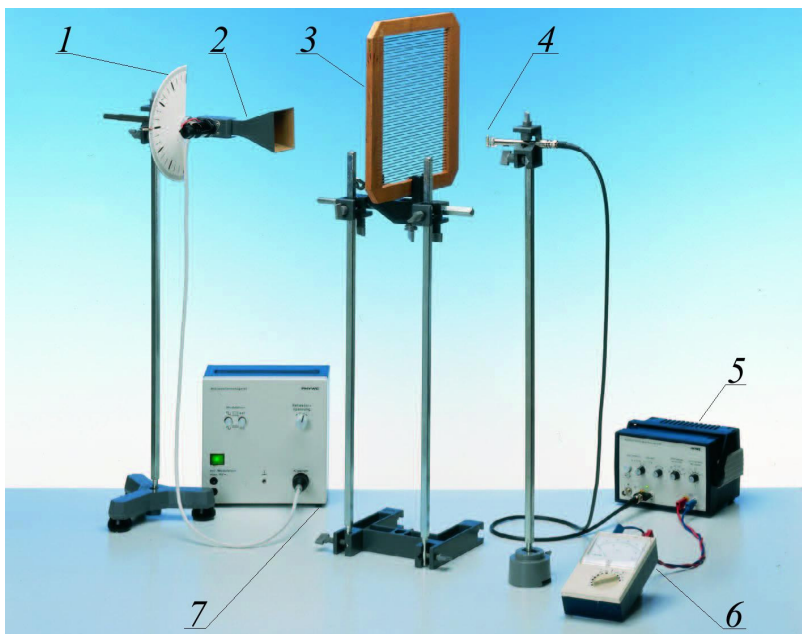


Рис. 4.7.7

Экспериментальная установка для проверки поляризующих свойств металлической решетки показана на рис. 4.7.7, где 1 – транспортер; 2 – микроволновый передатчик с клистроном; 3 – поляризационная решетка; 4 – микроволновый приемный диполь; 5 – универсальный измерительный усилитель; 6 – вольтметр; 7 – источник питания для микроволнового передатчика.

Внимание! Не следует прикасаться к выводам СВЧ-диодов, применяемых в СВЧ-приемнике и детекторе.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Внимание! Категорически запрещается прикасаться к принимающему диоду! Избегайте прямого попадания микроволнового излучения в глаза.

Во избежание получения ожога не прикасайтесь к клистроу во время работы (клистрон сильно нагревается).

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Определение фокусного расстояния собирающей линзы

1. Чтобы достичь максимального сигнала принимающего диода необходимо:

принимаящий диполь установить параллельно узкой стороне передающей антенны;

перемещая его перпендикулярно оптической оси и слегка поворачивая вокруг вертикальной оси, найти положение, при котором сигнал принимающего диода будет максимальным.

2. Установите в держатель линзу из синтетической смолы.

3. Отцентрируйте цилиндрическую линзу так, чтобы она была строго перпендикулярно оптической оси.

4. Измерьте зависимость напряжения U приемника от его координаты x . Проведите не менее 20 измерений с шагом в 15–20 мм. Измерения проводятся на интервале от 100 до 600 мм. Начальной точкой отсчета является выпуклая поверхность цилиндрической линзы. Для вычисления статистической погрешности необходимо провести не менее трех серий измерений. Результаты измерений занесите в табл. 4.7.1.

Таблица 4.7.1

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
x , мм											...
U_1 , дел.											...
U_2 , дел.											...
U_3 , дел.											...
$\langle U \rangle$, дел.											...
Предел											...
U , мВ											...

5. Определите значения x , при которых наблюдается максимум U .

Задание 2. Дифракция электромагнитных волн

1. Дифракция на линзе наблюдается в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Для этого закрепите линейку с помощью

настольных зажимов перпендикулярно оптической оси на фокусном расстоянии, определенном в задании 1.

2. Измерьте зависимость напряжения U приемника от его координаты y , для чего проведите не менее 15 измерений с шагом в 10–12 мм. Измерения проводятся на интервале от -80 до +80 мм, особенно тщательно измерения проводятся вблизи минимумов и максимумов напряжения. Проведите не менее трех серий измерений. Результаты измерений занесите в табл. 4.7.2.

Таблица 4.7.2

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
y , мм											...
U_1 , дел.											...
U_2 , дел.											...
U_3 , дел.											...
$\langle U \rangle$, дел.											...
Предел											...
U , мВ											...

3. Уберите линзу и повторите измерения предыдущего пункта. Результаты измерений занесите в табл. 4.7.3.

Таблица 4.7.3

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
y , мм											...
Предел											...
U_0 , мВ											...
$\langle U_0 \rangle$, мВ											

Задание 3. Поляризация электромагнитных волн

1. Для проверки способности экрана пропускать поляризованную электромагнитную волну:

замените линзу металлической решеткой;

прикрепите полукруглую шкалу к микроволновому передатчику так, чтобы шкала вращалась.

Для этого снимите микроволновый передатчик с клистроном с зажимной стойки. Затем открутите металлический штырь снизу и прикрутите его сзади микроволнового передатчика.

Прикрепите указатель с транспортиром к зажимной стойке, после этого вставьте металлический штырь с микроволновым передатчиком в держатель транспорта, так как это указано на рис. 4.7.7.

2. Поскольку направление колебаний вектора напряженности электрического поля параллельно узкой части излучателя угол наклона φ изменяйте от 90 до 0° с шагом 5°.

3. Проведите не менее трех серий измерений. Результаты измерений занесите в табл. 4.7.4.

Таблица 4.7.4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
φ , угл. град.	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	...
U_1 , дел.											...
U_2 , дел.											...
U_3 , дел.											...
$\langle U \rangle$, дел.											...
Предел											...
U , мВ											...
$\cos^2 \varphi$											...

Замечание. Объем заданий может быть уменьшен по согласованию с преподавателем.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При обработке результатов измерений нужно учитывать, что среднее значение определяется по формуле:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (4.7.15)$$

а в качестве погрешности измеряемой величины Δx указывается стандартная погрешность, т.е. значение среднеквадратичного отклонения σ_n , для которой доверительная вероятность $\alpha = 0,7$, тогда Δx определяется по формуле:

$$\Delta x = t_{\alpha, n} \sigma_n,$$

где среднеквадратичное отклонение σ_n определяется по формуле:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}.$$

1. По результатам измерений задания 1 постройте график зависимости $U(y)$ и определите по нему фокусное расстояние цилиндрической линзы. Вычислите с помощью формулы (4.7.12) показатель преломления материала N . Радиус кривизны R указывается в приложении на стенде.

2. Погрешность показателя преломления материала N определяется по формуле: $\Delta N = \sqrt{(\Delta R/f)^2 + (R \Delta f/f^2)^2}$, где ΔR – погрешность радиуса кривизны линзы, а Δf – приборная погрешность линейки.

3. По результатам измерений пп. 2 и 3 задания 2 постройте график зависимости относительной интенсивности

$$I(y)/I_0 = \langle U(y) \rangle / \langle U_0 \rangle$$

и по полученному графику определите минимумы функции (4.7.13).

4. Вычислите с помощью условия минимума параметр b .

5. На том же графике постройте теоретически зависимость (4.7.13) и сравните ее с экспериментальной.

6. По результатам измерений задания 3 постройте график зависимости $\langle U \rangle$ от $\cos^2 \varphi$, постройте теоретическую зависимость I от $\cos^2 \varphi$.

7. Во всех заданиях основной погрешностью можно считать случайную погрешность.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении к работе необходимо указать:

фокусное расстояние, найденное по графику $U(x)$;

рассчитанный показатель преломления материала линзы;

рассчитанный параметр b ;

Также нужно сделать вывод о соответствии:

экспериментального графика $\langle U(y) \rangle / \langle U_0 \rangle$ теоретической зависимости построенной по формуле (4.7.13);

закона Малюса экспериментальным результатам.

Все экспериментальные результаты записываются с указанием абсолютной и относительной погрешностями.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение явления дифракции.
2. Сформулируйте закон Малюса.
3. Напишите уравнение для плоской, сферической и цилиндрической электромагнитной волны.
4. Каким образом в данной работе проводится проверка закона Малюса?
5. Как по зависимости $U(x)$, найденной в задании 1, получить фокусное расстояние?
6. Дайте определение явления поляризации. Перечислите основные виды поляризации.
7. Сформулируйте принцип Ферма.
8. Каковы условия минимумов и максимумов дифракционной картины?
9. Напишите формулу тонкой линзы. По какому критерию можно считать линзу тонкой?
10. Дайте определение вектора Пойнтинга.
11. В чем заключается принцип Гюйгенса–Френеля?
12. Перечислите, чего не следует делать во время работы с установкой.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Волны. Оптика. Т. 4. М.: АСТ, Астрель, 2008.
2. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа, 2004.
3. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. М.: МИФИ, 2005.

Дополнительная

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 2003.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. Т. 4. М.: Физматлит, 2006.
3. Лабораторный практикум «Оптика». Ч. 1. М.: МИФИ, 2009.
4. Иродов И.Е. Основные законы. Волновые процессы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

Работа 4.8

ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ

Цель: исследование закономерностей распространения волн в пространстве, изучение свойств рупорной антенны.

Оборудование: рупорная антенна с клистроном; штатив с градусной шкалой; источник питания; приемник со штативом; поворотная штанга; цифровой мультиметр; рулетка; соединительные кабели.

ВВЕДЕНИЕ

Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитное поле в пространстве может существовать в виде волн. В случае монохроматической электромагнитной волны с частотой ω поведения векторов электрического и магнитного полей описываются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha), \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha),\end{aligned}\tag{4.8.1}$$

где $\vec{k}$ – волновой вектор.

В такой волне векторы напряженности электрического и магнитного полей $\vec{E}$ и $\vec{H}$ изменяются в пространстве и во времени по гармоническому закону: вектор $\vec{E}$ всегда перпендикулярен вектору $\vec{H}$, и каждый из них перпендикулярен к направлению распространения волны $\vec{k}/k$ (векторы $\vec{E}$, $\vec{H}$ и $\vec{k}$ образуют правую тройку).

Для *ультракоротких волн* (волн УКВ-диапазона, к которым относятся электромагнитные волны с длиной λ в диапазоне от 0,1 мм до 1000 см), изучаемых в настоящей работе, характерна линейная (плоская) поляризация: колебания вектора $\vec{E}$ происходят вдоль одного определенного направления.

Интенсивность I монохроматической волны пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля:

$$I = \left(\frac{1}{2}\right) c \epsilon_0 E_m^2. \quad (4.8.2)$$

Таким образом, измеряя квадрат амплитуды напряженности электрического поля, можно определить интенсивность волны с точностью до постоянного коэффициента.

Антенной называется устройство для излучения и приема радиоволн. Антенна является конвертером электрического тока радиочастотного диапазона в электромагнитное излучение и наоборот. Форма, размеры и конструкция антенн разнообразны, и зависят как от длины излучаемых и принимаемых волн, так и от назначения антенны.

В данной работе используется *пирамидальная рупорная антенна*, схема устройства которой показана на рис. 4.8.1.

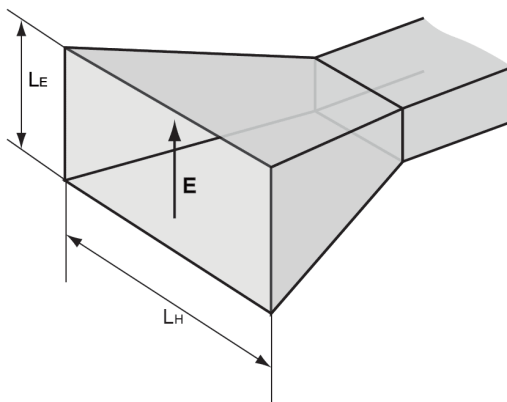


Рис. 4.8.1

Она представляет собой участок прямоугольного волновода с переменным (расширяющимся) сечением, с открытым излучающим концом.

На рис. 4.8.1 показано направление вектора электрического поля $\vec{E}$. Форма фронта излучаемой волны изменяется по мере удаления от антенны; так, вблизи среза рупора антенны фронт волны можно считать плоским, на некотором удалении от антенны волна при-

ближается к сферической. Интенсивность сферической волны в не поглощающей среде изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника, как показано на рис. 4.8.2.

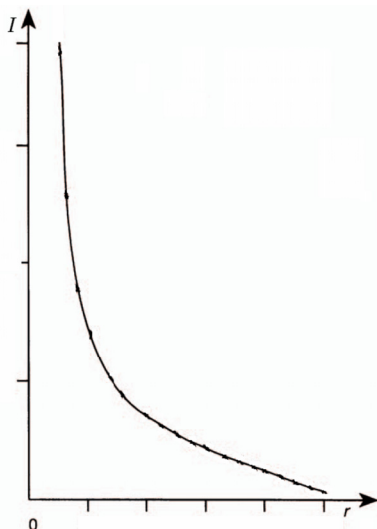


Рис. 4.8.2

Важной характеристикой антенны является ее диаграмма направленности. *Диаграммой* направленности антенны по полю называют зависимость комплексной амплитуды вектора $\vec{E}$ от угловых координат точки наблюдения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Отдельные пики напряженности электрического поля на диаграмме направленности принято называть *лепестками*. В зависимости от формы диаграммы направленности различают остро- (рис. 4.8.3, *а*) или слабонаправленные (рис. 4.8.3, *б*) антенны.

Для остронаправленных антенн характерна диаграмма направленности с выраженным, достаточно узким главным лепестком и относительно слабыми боковыми лепестками (см. рис. 4.8.3, *а*). Такие антенны используются в радиолокации, в системах дальней радиосвязи и т.п. Антенны с диаграммой направленности, более или менее приближающейся к диаграмме изотропного излучателя (см. рис. 4.8.3, *б*), находят применение, например, в радиовещании.

Рупорная антенна имеет довольно узкий основной лепесток с малым относительным уровнем интенсивности в боковых лепестках, т.е. может быть отнесена к разряду *остронаправленных*.

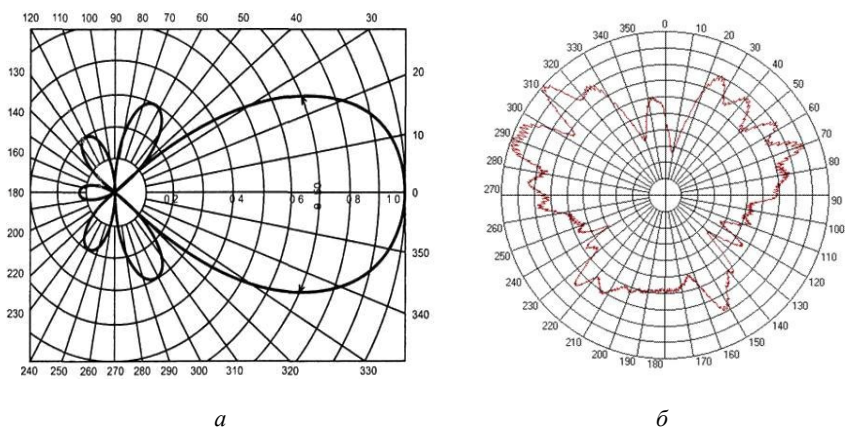


Рис. 4.8.3

Для характеристики поля излучения антенн такого типа вводится понятие *коэффициента направленного действия (КНД)*:

$$D = \frac{I_0}{I_s} \quad (4.8.3)$$

Здесь I_0 есть интенсивность, создаваемая данной антенной в направлении основного излучения, а I_s – интенсивность, создаваемая в той же точке гипотетическим изотропным (ненаправленным) излучателем, имеющим такую же мощность.

КНД рупорной антенны может быть рассчитан по формуле:

$$D = 4\pi \frac{S}{\lambda^2} k, \quad (4.8.4)$$

где $S = L_E L_H$ – площадь раскрыва антенны; λ – длина волны; $0,6 \leq k \leq 0,8$ – коэффициент, учитывающий особенности конструкции антенны.

Экспериментально величина D может быть определена следующим образом. Если измерить угловую зависимость интенсивности волны $I(\theta, \varphi)$ в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях – в

плоскости колебаний вектора $\vec{E}$ и вектора $\vec{H}$, то получим кривые, подобные изображенным на рис. 4.8.4 и 4.8.5. В частности, на рис. 4.8.4 изображено угловое распределение интенсивности $I(\theta, \varphi = 0)$ в плоскости колебаний магнитного вектора $\vec{H}$, а на рис. 4.8.5 – угловое распределение интенсивности $I(\theta = 0, \varphi)$ в плоскости колебаний электрического вектора $\vec{E}$.

Можно показать, что

$$D = \frac{I_0}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi I(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}. \quad (4.8.5)$$

С учетом того, что доля энергии в боковых лепестках пренебрежимо мала по сравнению с энергией, «уходящей» в главный лепесток, КНД может быть приближенно вычислен по формуле:

$$D = \frac{b}{\Delta\theta_{1/4} \cdot \Delta\varphi_{1/4}}. \quad (4.8.6)$$

Здесь константа $b = (4,7 \cdot 10^3)^\circ$, а $\Delta\theta_{1/4}$ и $\Delta\varphi_{1/4}$ – угловые ширины главных лепестков (в градусах), измеренные, соответственно, в плоскостях колебаний векторов $\vec{H}$ и $\vec{E}$, на уровне $I = \frac{1}{4} I_0$.

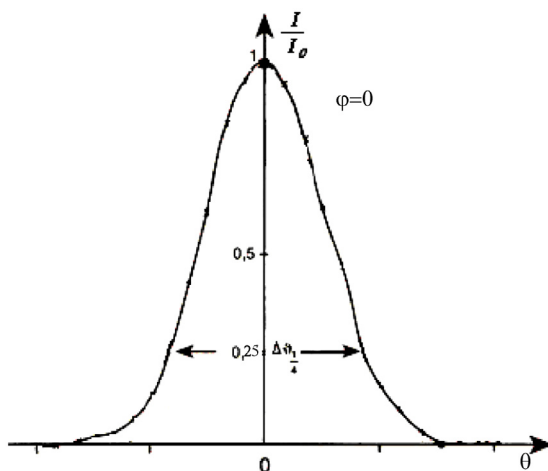


Рис. 4.8.4

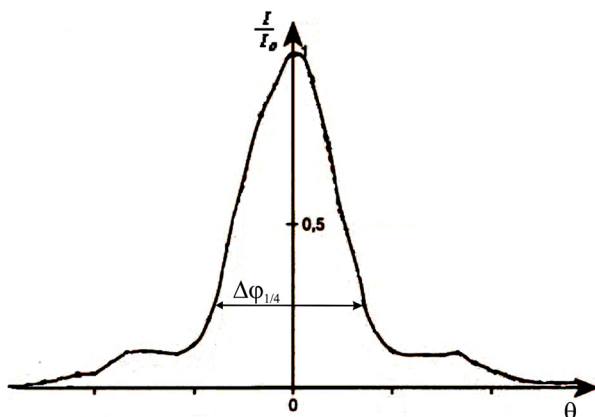


Рис. 4.8.5

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 4.8.6. Источником высокочастотных электромагнитных колебаний служит электронная лампа – клистрон 1, соединенный с помощью волновода прямоугольного сечения с рупорной антенной 2, являющейся излучателем волн УКВ-диапазона (в данной работе длина волны $\lambda = 3,18$ см). Антенна укреплена на штативе 3, который снабжен круговой градусной шкалой 4. Клистрон подключен к источнику питания 5. Приемником (детектором) электромагнитных волн служит высокочастотный диод 6, закрепленный с помощью штатива на поворотной штанге 7. Излучатель и приемник располагаются на высоте не менее 40 см от поверхности стола, чтобы уменьшить влияние волн, отраженных от поверхности. Сигнал приемника по экранированному кабелю передается на цифровой мультиметр 8, который измеряет напряжение, возникающее на зажимах диода. Для измерения расстояний между излучателем и приемником служит рулетка 9.

Особенность диодного детектора состоит в том, что кристаллический диод имеет приблизительно квадратичную зависимость тока от напряжения на начальном участке вольт-амперной характеристики $i(U)$. Следовательно, ток, проходящий через диод, пропорционален интенсивности I электромагнитной волны (см. введение).

Таким образом, напряжение, измеряемое мультиметром, будет пропорционально интенсивности исследуемой волны.



Рис. 4.8.6

Примечание. В модифицированном варианте работы в качестве приемника может использоваться также рупорная антенна, на которой смонтирован приемный диод.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Строго соблюдайте общие правила техники безопасности при работе с электроприборами.

Не оставляйте включенную установку без присмотра.

В установке используется электромагнитное излучение СВЧ-диапазона, которое при длительном воздействии на организм человека может быть вредно для здоровья. В связи с этим следует включать генератор **ТОЛЬКО НЕПОСРЕДСТВЕННО НА ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ! ПО ОКОНЧАНИИ ИЗМЕРЕНИЙ ОТКЛЮЧИТЕ ГЕНЕРАТОР!**

При работе клистрон сильно нагревается. Будьте осторожны – в ходе эксперимента не прикасайтесь к корпусу клистрона во избежание ожога!

Находясь вблизи установки, выключайте мобильные телефоны и другие средства беспроводной связи – их работа может существенно повлиять на результаты измерений.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Подготовка установки к измерениям

Прежде, чем приступить к работе с установкой, убедитесь, что излучающая антенна и приемник находятся на достаточной высоте (не менее 40 см от поверхности стола). Проверьте, чтобы соединительный кабель между приемником и мультиметром не проходил в непосредственной близости от высокочастотного кабеля генератора, а также вблизи каких-либо других токоведущих проводов или электрических розеток. Все это может стать причиной возникновения помех, приводящих к искажению результатов измерений.

В течение всего эксперимента следите за положением измерительного кабеля!

1. Включите цифровой мультиметр. С помощью кнопки DC/AC выберите режим измерения переменного напряжения (AC). Переключатель режимов работы/диапазонов установите на измерение напряжения (V) и выберите предел измерения «200mV».

Внимание! Мультиметр оборудован системой автоматического отключения питания. Если более 15 мин с мультиметром не выполняются никакие манипуляции, а также остается постоянным входное напряжение, прибор автоматически отключится. В этом случае для возобновления работы необходимо дважды нажать кнопку включения/выключения.

2. Включите генератор и прогрейте его в течение 5 мин. Установите регулятор «Reflektor spanning» в среднее положение. На панели «Modulator» с помощью кнопок управления режимом модуляции установите режим модуляции гармонической модуляции « $\sim$ » и «int».

3. Расположите приемный диполь в плоскости колебаний вектора E (т.е. параллельно узкой стороне рупора). Такое положение соответствует максимальному уровню принимаемого сигнала.

4. Найдите направление основного излучения антенны. Для этого установите приемный диполь на расстоянии около 30 см от среза рупора антенны. Поворачивая штангу с детектором на небольшие углы вблизи нулевого значения, найдите такое положение, при котором напряжение принимаемого сигнала будет наибольшим. Это положение штанги соответствует направлению основного излучения. Установка готова к измерениям.

Задание 2. Определение зависимости интенсивности волны от расстояния

Установите штатив с детектором на расстоянии $r = 10$ см от среза рупора антенны. Запишите значение напряжения на детекторе. Снимите зависимость напряжения от расстояния r от антенны до приемного диполя. Измерения проводите с шагом 5 см от 10 см до наибольшего возможного удаления. Измерения повторите не менее трех раз, занося результаты измерений в табл. 4.8.1.

Таблица 4.8.1

r , см	10	15	20	25	...	85
$U(r)$, мВ						
$\langle U(r) \rangle$, мВ						
$\sigma(U)$, мВ						
$\frac{1}{\sqrt{U(r)}}$, мВ ^(-1/2)						

Задание 3. Определение диаграммы направленности антенны

1. Снимите зависимость напряжения детектора от угловой координаты $U(\theta)$ (в горизонтальной плоскости, которая в данном случае совпадает с плоскостью колебаний вектора $\vec{H}$). Для этого установите детектор на расстоянии 20 см от антенны. Поворачивая столик с антенной, проведите измерения напряжения детектора с шагом 5° для углов θ в диапазоне $\pm 45^\circ$, считая от направления основного излучения. Данные измерений занесите в заранее подготовленную табл. 4.8.2.

Таблица 4.8.2

$\theta, ^\circ$	-45	-40	-35	-30	-25	-20	...	45
$U, \text{ мВ}$								
$U(\theta) = (U - U_f), \text{ мВ}$								
$\Delta U, \text{ мВ}$								
$\frac{U}{U_0}(\theta)$								

2. Третья строка таблицы заполняется после определения фоновой составляющей напряжения U . В окружающем пространстве всегда и неизбежно присутствуют электромагнитные колебания радиочастотного диапазона. Они имеют как естественное, так и (преимущественно) техногенное происхождение. Величина U_f (напряжение, соответствующее фоновому значению интенсивности электромагнитного поля) определяется по наименьшему из измеренных значений напряжения.

Измерения повторите для расстояния между антенной и детектором 40 см.

3. Для измерения зависимости $U(\varphi)$ (в вертикальной плоскости, соответствующей плоскости колебаний вектора $\vec{E}$) необходимо изменить конфигурацию установки. Отключите источник питания клистрона. Ослабьте зажим, фиксирующий цилиндрический хвостовик антенны излучателя. Поверните антенну на 90° и вновь зафиксируйте хвостовик. Следите за тем, чтобы ось антенны была направлена по нулевой отметке градусной шкалы.

4. Поверните также и рупор детектора. Для этого аккуратно снимите детектор со штатива. Вывинтите цилиндрический держатель из крепежной втулки приемной антенны, и винтите его в боковое отверстие. Вновь укрепите рупор на штативе. Теперь плоскость колебаний вектора $\vec{E}$ расположена в горизонтальной плоскости.

5. Включите источник питания. Установите приемник на расстоянии 20 см от среза рупора антенны. Тщательно отъюстируйте взаимное расположение рупоров излучателя и приемника таким образом, чтобы при положении штанги напротив отметки «0» на градусной шкале оси излучающей и приемной антенн совпадали. При этом напряжение, измеряемое на приемном детекторе, будет максимальным.

6. Повторите измерения, аналогично пп. 1–2, для расстояний между антенной и приемником 20 и 40 см.

По окончании измерений верните антенны излучателя и приемника в исходное положение.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Усредните данные измерений задания 2 и рассчитайте среднее значение напряжений $\langle U(r) \rangle$ и погрешность случайного разброса величины напряжения σ_U . Постройте графики зависимостей

$U(r)$ и $f(r) = \frac{1}{\sqrt{U(r)}}$. Анализируя полученные графики, дайте от-

вет на вопрос: подтверждается ли гипотеза о сферичности исследуемой волны? Изложите и обоснуйте этот вывод в заключении к работе.

2. По данным измерений в задании 3 рассчитайте величины $\frac{U(\theta)}{U_0}$ и $\frac{U(\varphi)}{U_0}$, где U_0 – значение напряжения на направлении основного излучения. Рассчитайте также погрешность значений $\frac{U(\theta)}{U_0}$ и $\frac{U(\varphi)}{U_0}$ (исходя из приборной погрешности мультиметра).

3. Постройте на одном чертеже графики зависимостей $\frac{U(\theta)}{U_0}$ для расстояний $r = 20$ см и $r = 40$ см. Такие же графики постройте для зависимости $\frac{U(\varphi)}{U_0}$. Определите из графиков величины $\Delta\theta_{1/4}$ и

$\Delta\varphi_{1/4}$. Рассчитайте по формуле (4.8.6) значение коэффициента направленного действия D рупорной антенны. Полученное экспериментальное значение КНД сравните с величиной, рассчитанной по формуле (4.8.4).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении к работе необходимо указать значение коэффициента направленного действия D рупорной антенны в сравнении с расчетным значением КНД.

Проанализировав полученные графики, дайте ответ на вопрос: подтверждается ли гипотеза о сферичности исследуемой волны? Изложите и обоснуйте этот вывод в заключении к работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется интенсивностью монохроматической волны?
2. Как изменяется интенсивность сферической волны в зависимости от расстояния между источником волны и точкой наблюдения?
3. Что такое диаграмма направленности антенны? Как разделяются антенны по характеру диаграммы направленности?
4. Что представляет собой рупорная антенна? Что можно сказать о форме волны, излучаемой такой антенной?
5. Что такое коэффициент направленного действия антенны?
6. Что является в данной работе приемником (детектором) электромагнитного излучения?
7. Как связано напряжение, измеряемое на детекторе, с интенсивностью электромагнитной волны?
8. Как найти направление основного излучения антенны?
9. Изложите методику экспериментального определения КНД антенны. Каким образом учитывается влияние фоновой составляющей электромагнитных колебаний на результаты измерений?
10. Как на основании экспериментальных данных можно сделать вывод о характере волнового фронта?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1988.
2. Воскресенский Д.И. и др. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006.

Работа 4.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ СОБИРАЮЩИХ И РАССЕИВАЮЩИХ ЛИНЗ

Цель: изучение основных закономерностей геометрической оптики, измерение фокусных расстояний собирающих и рассеивающих линз.

Оборудование: оптическая скамья с нанесенной миллиметровой шкалой; источник света; блок питания; экран; набор линз и держателей.

ВВЕДЕНИЕ

В работе изучают простейшие оптические приборы – линзы, а также оптические системы, состоящие из линз. *Линза* – прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями. Прямая, проходящая через центры кривизны этих поверхностей, называется *главной оптической осью системы*. Рассмотрим распространение света от точечного источника, расположенного в точке P (рис. 4.9.1). Если все лучи, вышедшие из P , пройдя через линзу, пересекаются в одной точке P' , то P' называется *стигматическим* (или *резким*) изображением источника P . Изображение называется *действительным*, если световые лучи пересекаются в точке P' , и *мнимым*, если в точке P' пересекаются их продолжения, проведенные в направлении, противоположном направлению распространения света. Линза дает стигматическое изображение только для лучей, идущих вблизи оптической оси с малым углом раствора, такие лучи называются *параксиальными*. В этом случае изображением небольшого предмета, расположенного в плоскости, перпендикулярной к оптической оси (предметная плоскость), будет плоская фигура, геометрически подобная исходной и перпендикулярная к той же оси.

В дальнейшем источником P (или S) будем называть не только светящийся точечный объект, но и центр кривизны волновой поверхности, падающей на линзу световой волны. Причем если на

линзу падает сходящаяся волна, то точка P лежит на продолжении лучей и называется *мнимым источником*.

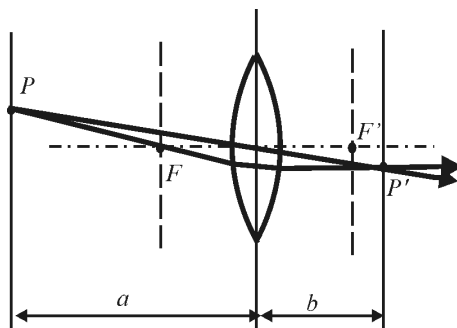


Рис. 4.9.1

Если толщина линзы мала по сравнению с радиусами кривизны поверхностей, то линза называется *тонкой*. По формуле тонкой линзы:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (4.9.1)$$

где a – расстояние от источника до линзы; b – расстояние от линзы до изображения P' (см. рис. 4.9.1); f – *фокусное расстояние*. Для собирающей линзы $f > 0$, для рассеивающей $f < 0$. Величина a считается отрицательной для сходящегося пучка; a b отрицательна для мнимого изображения.

Если собирающая линза создает действительное изображение предмета, то для определения ее фокусного расстояния можно применить несколько методов, основанных на получении резкого изображения предмета.

Первый метод. Фокусное расстояние можно определить, измерив расстояния от линзы до предмета и изображения. Очевидно, что, измерив расстояния от линзы до предмета и его изображения (см. рис. 4.9.1), по формуле тонкой линзы (4.9.1) можно определить фокусное расстояние

$$f = \frac{ab}{a + b}. \quad (4.9.2)$$

Относительная погрешность данного метода будет определяться погрешностью определения расстояний a и b :

$$\frac{\Delta f}{f} = \delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \frac{\Delta a}{f}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \frac{\Delta b}{f}\right)^2}.$$

В случае, когда абсолютные погрешности в измерениях расстояний a и b приблизительно равны ($\Delta a \cong \Delta b$), относительная погрешность измерений данного метода будет равна:

$$\delta f \cong \frac{\sqrt{a^4 + b^4}}{(a+b)^2} \frac{\Delta a}{f}. \quad (4.9.3)$$

Из этого выражения видно, что точность данного метода падает с уменьшением фокусного расстояния линзы.

Для короткофокусных линз целесообразнее использовать второй метод. Это связано с тем, что для них расстояние a мало, а приборная погрешность этого расстояния становится, соответственно, достаточна велика.

Второй метод. Измерив расстояние от источника до изображения l и расстояние между двумя положениями линзы, соответствующие резким изображениям предмета c (рис. 4.9.2), фокусное расстояние f можно определить по формуле

$$f = \frac{l^2 - c^2}{4l}. \quad (4.9.4)$$

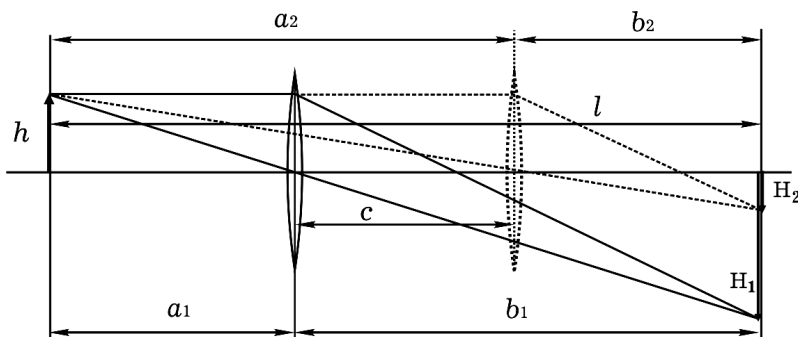


Рис. 4.9.2

Обозначим через a_1 и b_1 расстояния от линзы до источника и его изображения в первом положении, а через a_2 и b_2 – соответствующие величины во втором положении. Из обратимости хода лучей следу-

ет, что $a_1 = b_2, a_2 = b_1$. Тогда, $a_1 + b_1 = a_2 + b_2 = l$, а $c = b_1 - a_1 = a_2 - b_2$. Выразив из этих соотношений величины a и b , и используя формулу тонкой линзы (4.9.1), получим формулу (4.9.4).

Из формулы (4.9.4) следует, что данный метод позволяет определить фокусные расстояния линз, если размеры установки l будут больше $4f$.

Относительная погрешность измерения δf фокусного расстояния линзы этим методом будет определяться погрешностью определения l и c . Принимая $\Delta c \cong \Delta l$, погрешность δf будет равна:

$$\frac{\Delta f}{f} = \delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial l} \frac{\Delta l}{f}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \frac{\Delta c}{f}\right)^2} = \frac{\Delta l}{l^2 - c^2} \sqrt{\left(\frac{l^2 + c^2}{l}\right)^2 + 4c^2}.$$

Преобразуя данное выражение, окончательно получим:

$$\delta f = \frac{\Delta l}{l} \frac{1}{1 - \left(\frac{c}{l}\right)^2} \sqrt{\left(1 + \left(\frac{c}{l}\right)^2\right)^2 + 4\left(\frac{c}{l}\right)^2}. \quad (4.9.5)$$

Третий метод. Если же собирающая линза не позволяет получить изображение в пределах установки, или необходимо определить фокусное расстояние рассеивающей линзы, которая создает мнимое изображение, то фокусное расстояние определяется по смещению точки фокусировки (рис. 4.9.3).

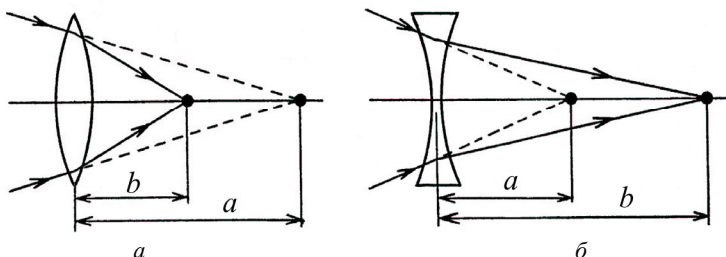


Рис. 4.9.3

На рис. 4.9.3 показаны изменения точки фокусировки при внешнем (а) и внутреннем (б) смещении линзы. Изменяя рас-

стояния a и b , указанные на рисунке, фокусное расстояние можно вычислить по формуле:

$$f = \frac{ab}{a - b}. \quad (4.9.6)$$

Так же как и в предыдущих случаях, погрешность данной методики определим, полагая равными абсолютные погрешности измерений всех координат ($\Delta a \cong \Delta b$):

$$\delta f \cong \frac{\sqrt{a^4 + b^4}}{(a - b)^2} \frac{\Delta a}{f}. \quad (4.9.7)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 4.9.4 представлена фотография установки.

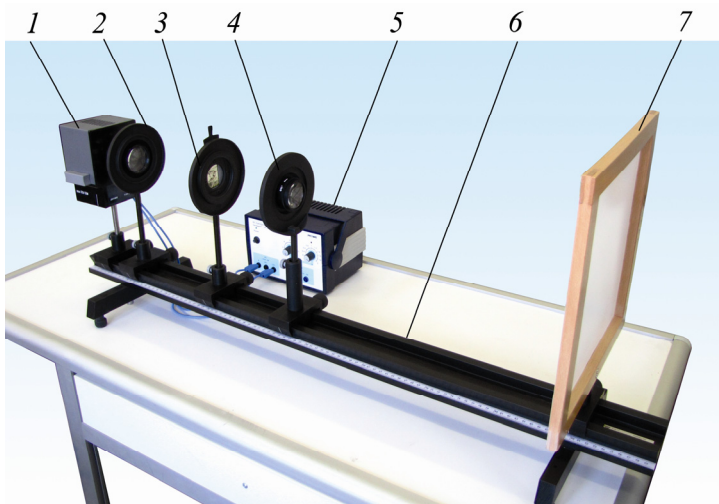


Рис. 4.9.4

В данной работе используется оптическая скамья 6 с нанесенной миллиметровой шкалой и закрепленные на ней в специальных держателях оптические объекты. Координаты оптических объектов определяются по меткам, нанесенным на держатели. Действительное изображение предмета получается на экране 7. В качестве ис-

точника света 1 используется лампа накаливания, подключенная к источнику тока 5. Для создания параллельного пучка света в данной работе используется конденсорная линза 2, установленная непосредственно после источника света 1. Для закрепления предмета в работе используется поворотный держатель 3, который позволяет менять положение предмета, чтобы убедиться в четкой фокусировке изображения. Для закрепления линз используются специальные держатели 4. Для перемещения держателя необходимо открепить винт, находящийся в его основании. Снятия отсчета координат можно проводить только при закрепленном винте.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. При установке линз в держатель соблюдать осторожность, следить за тем, чтобы плоскость линзы была параллельна плоскости держателя.

2. Закрепляя линзу, следите, чтобы пальцы не попали между держателем и линзой, это может привести к травмам.

3. Категорически запрещается переключать провода, соединяющие лампу с источником тока.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Определение фокусного расстояния короткофокусной собирающей линзы (первый метод)

1. Оставив на оптической скамье источник света, конденсорную линзу и экран, проверьте, что установка откалибрована, т.е. система создает параллельный пучок света. Для этого, включив источник питания и перемещая экран вдоль оптической скамьи, убедитесь в том, что размер светового пятна на экране почти не изменяется.

2. Установите на оптической скамье между конденсорной линзой и экраном предмет (стрелка) в поворотном держателе на расстоянии порядка 5 см от конденсорной линзы. Координату x_1 метки держателя предмета занесите в табл. 4.9.1.

3. На расстоянии порядка 10 см от предмета установите короткофокусную линзу (с фокусным расстоянием 50 или 100 мм).

4. Закрепите экран на оптической оси таким образом, чтобы координата x_3 метки держателя экрана была равна 90 см.

5. Перемещая держатель с исследуемой линзой вдоль оптической скамьи, добейтесь появления на экране четкого увеличенного изображения предмета. Занесите координату x_2 метки держателя линзы в табл. 4.9.1.

6. Повторите пп. 4, 5 для других положений экрана.

Таблица 4.9.1

№	x_1 , мм	x_2 , мм	x_3 , мм	$a = x_2 - x_1$, мм	$b = x_3 - x_2$, мм	f , мм
1			900			
2			800			
3			700			
4			600			
5			500			

Задание 2. Определение фокусного расстояния короткофокусной собирающей линзы (второй метод)

1. Установите на оптической скамье между конденсорной линзой и экраном предмет (слайд) в поворотном держателе на расстоянии порядка 5 см от конденсорной линзы. Координату x_1 метки держателя предмета занесите в табл. 4.9.2.

2. На расстоянии порядка 10 см от предмета установите короткофокусную линзу (с фокусным расстоянием 50 или 100 мм).

3. Закрепите экран на оптической оси таким образом, чтобы координата x_3 метки держателя экрана была равна 90 см.

4. Перемещая держатель с исследуемой линзой вдоль оптической скамьи, добейтесь появления на экране четкого увеличенного изображения предмета. Занесите координату x_2 метки держателя линзы в табл. 4.9.2.

Таблица 4.9.2

№	x_1 , мм	x_2 , мм	x_2' , мм	x_3 , мм	$l = x_3 - x_1$, мм	$c = x_2 - x_2' $, мм	f , мм
1				900			
2				800			
3				700			

5. Перемещая держатель с исследуемой линзой, добейтесь появления четкого уменьшенного изображения предмета. Занесите координату x_2' метки держателя линзы в табл. 4.9.2.

6. Повторить пп. 3–5 для трех других положений экрана.

Задание 3. Определение фокусного расстояния длиннофокусной собирающей линзы

1. Установите на оптической скамье между конденсорной линзой и экраном предмет (слайд) в поворотном держателе на расстоянии порядка 5 см от конденсорной линзы.

2. На расстоянии порядка 10 см от предмета установите короткофокусную линзу (с фокусным расстоянием 50 или 100 мм).

3. Закрепите экран на оптической оси, таким образом, чтобы координата x_3 метки держателя экрана была равна 90 см.

4. Перемещая держатель с короткофокусной линзой вдоль оптической скамьи, добейтесь появления на экране четкого увеличенного изображения предмета.

5. Установите на оптической скамье между короткофокусной линзой и экраном длиннофокусную собирающую линзу (с фокусным расстоянием 200 или 300 мм) на расстоянии порядка 10 см от короткофокусной линзы. Занесите координату x_4 метки держателя длиннофокусной линзы в табл. 4.9.3.

6. Перемещая экран, добейтесь появления четкого изображения предмета. Занесите координату x'_3 метки держателя экрана в табл. 4.9.3.

Таблица 4.9.3

№	x_4 , мм	x'_3 , мм	x_3 , мм	$a = x_3 - x_4$, мм	$b = x'_3 - x_4$, мм	f , мм
1			900			
2			800			
3			700			

7. Повторить пп. 3–6 для трех других положений экрана.

Задание 4. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

1. Установите на оптической скамье между конденсорной линзой и экраном предмет (слайд) в поворотном держателе на расстоянии порядка 5 см от конденсорной линзы.

2. На расстоянии порядка 10 см от предмета установите короткофокусную линзу (с фокусным расстоянием 50 или 100 мм).

3. Закрепите экран на оптической оси таким образом, чтобы координата x_3 метки держателя экрана была равна 90 см.

4. Перемещая держатель с короткофокусной линзой вдоль оптической скамьи, добейтесь появления на экране четкого увеличенного изображения предмета.

5. Установите на оптической скамье между короткофокусной линзой и экраном рассеивающую линзу (с фокусным расстоянием –200 или –150 мм) на расстоянии порядка 10 см от короткофокусной линзы. Занесите координату x_4 метки держателя рассеивающей линзы в табл. 4.9.4.

Перемещая экран, добейтесь появления четкого изображения предмета. Занесите координату x_3' метки держателя экрана в табл. 4.9.4.

Таблица 4.9.4

№	x_4 , мм	x_3' , мм	x_3 , мм	$b = x_3 - x_4$, мм	$a = x_3' - x_4$, мм	f , мм
1			900			
2			800			
3			700			

6. Повторите пп. 3–6 для трех других положений экрана.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Вычислите в каждом из заданий фокусное расстояние линзы и его погрешность. В первом задании для расчета фокусного расстояния используется формула (4.9.2) из введения, а для расчета погрешности фокусного расстояния – формула (4.9.3). В задании 2 для расчета фокусного расстояния и его погрешности используются формулы (4.9.4) и (4.9.5) соответственно. В третьем и четвертом задании для расчетов используются формулы (4.9.6) и (4.9.7).

ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении необходимо привести фокусные расстояния трех исследуемых линз с указанием погрешности и сделать выводы о

точности измерения фокусного расстояния короткофокусной линзы двумя методами. Все полученные значения сравнить с табличными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая линза называется тонкой?
2. Что такое фокусное расстояние линзы?
3. Какие методы определения фокусного расстояния используются для собирающих линз?
4. Какие методы определения фокусного расстояния применимы для рассеивающих линз?
5. В каком случае изображение называется действительным, а в каком – мнимым?
6. Как определить фокусное расстояние линзы, если эта величина больше размеров оптической скамьи?
7. В каком случае собирающая линза дает два четких изображения предмета? Почему одно из них увеличенное, а другое уменьшенное?
8. Как определяется погрешность фокусного расстояния линзы в первом задании?
9. Чему равна погрешность измерения координаты и погрешность расстояния, например, от линзы до экрана?
10. Почему удобнее проводить измерения максимально удаляя экран от предмета?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Волны. Оптика. Кн. 4. М.: АСТ, Астрель, 2008.
2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. М.: Физматлит, 2006.

Дополнительная

1. Лансдберг Г.С. Оптика. М.: ОГИЗ, 1947.
2. Макс Борн. Оптика. Киев: ОНТИ, 1937.

Работа 4.10

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ

Цель: *определение зависимости показателя преломления стекла от длины волны света, исследование дисперсии стеклянной призмы.*

Оборудование: спектрометр-гониометр; ртутная лампа; источник питания 220 В; дифракционная решетка; призма; держатели.

ВВЕДЕНИЕ

Фазовая скорость монохроматической волны в веществе определяется выражением $v = c/n$, где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления вещества. Для прозрачных сред показатель преломления $n = \sqrt{\epsilon}$, где диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon(\omega)$ является функцией частоты ω распространяющегося излучения. Таким образом, фазовая скорость волны и показатель преломления также являются функциями ее частоты, а следовательно, и длины волны λ . Зависимость этих величин от частоты (или длины волны) называется *дисперсией*. Среды, обладающие дисперсией, называются *диспергирующими*.

Дисперсия света возникает в результате вынужденных колебаний заряженных частиц (электронов и ионов), входящих в состав вещества, под действием переменного поля электромагнитной волны. Теория дисперсии света в рамках классической теории была дана Г. Лоренцем.

Принято различать случаи нормальной и аномальной дисперсии. Для всех прозрачных бесцветных веществ показатель преломления возрастает с увеличением частоты. Такой характер зависимости $n(\omega)$ называют *нормальной дисперсией*. Если вещество поглощает свет, то в спектральном интервале, в котором наблюдается поглощение света, и вблизи него ход дисперсии обнаруживает аномалию: рост частоты сопровождается уменьшением показателя пре-

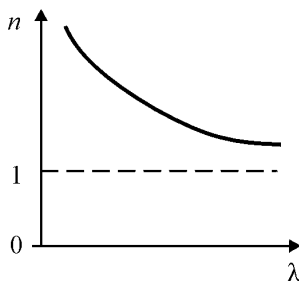
ломления. Явление аномальной дисперсии было экспериментально открыто Леру в 1860 г.

Для нормальной дисперсии, переходя от частоты ω к длине волны (в вакууме) $\lambda = 2\pi c / \omega$, приведем удобную для сравнения с опытными данными формулу

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + A/\lambda^2 + B/\lambda^4}. \quad (4.10.1)$$

Эта формула была установлена Френелем и Коши еще до создания классической теории дисперсии, а A и B в ней – эмпирические постоянные. Во многих случаях выражение (4.10.1) дает удовлетворительное описание эмпирических данных; график зависимости $n(\lambda)$ представлен на рис. 4.10.1. Заметим, что так называемая *дисперсия вещества* – $dn/d\lambda$ – отрицательна.

Рис. 4.10.1



Типичной диспергирующей системой является стеклянная призма. Свет разных длин волн, проходя через призму, отклоняется на разные углы. Для определения зависимости $n(\lambda)$ в данной работе используется метод, основанный на измерении угла наименьшего отклонения. Суть этого метода в следующем. Пусть луч света с длиной волны λ падает на грань призмы с преломляющим углом θ под некоторым углом α_1 , отсчитываемым от нормали к поверхности (рис. 4.10.2). Ход луча показан на рис. 4.10.2: ι_1 и α_2 – углы преломления на левой и правой гранях, а ι_2 – угол падения на правую грань. В результате двух преломлений вышедший из призмы луч отклоняется на угол $\alpha = \alpha_1 - \iota_1 + \alpha_2 - \iota_2$ по отношению к падающему лучу. Согласно геометрическим теоремам $\iota_1 + \iota_2 = \theta$. По закону преломления света:

$$\begin{aligned}\sin \alpha_1 &= n \sin \iota_1; \\ \sin \alpha_2 &= n \sin \iota_2.\end{aligned}\tag{4.10.2}$$

Можно показать, что при симметричном прохождении света через призму $\iota_1 = \iota_2 = \theta/2$ угол отклонения минимален ($\alpha = \alpha_{\min}$). В этом случае показатель преломления определяется формулой

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\theta + \alpha_{\min})}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)},\tag{4.10.3}$$

где угол $\alpha_{\min}$ зависит от λ .

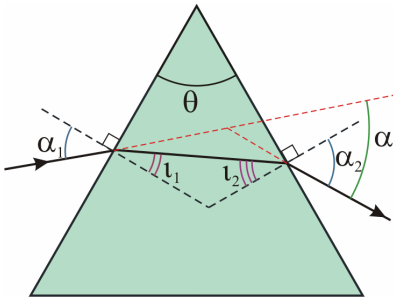


Рис. 4.10.2

В данной работе используется призма с $\theta = 60^\circ$, и формула (4.10.3) упрощается:

$$n = 2\sin(30^\circ + \alpha_{\min}/2).\tag{4.10.4}$$

Таким образом, определение показателя преломления для каждой длины волны сводится к измерению соответствующего угла наименьшего отклонения.

Призма как спектральный прибор обладает способностью пространственно разделять пучки лучей различных длин волн. Соответствующей характеристикой прибора является *угловая дисперсия*, определяемая как отношение $\delta\alpha/\delta\lambda$, где $\delta\lambda$ – разность углов отклонения световых пучков с длинами волн, отличающимися на $\delta\lambda$. Дифференцируя соотношение (4.10.3) по λ и используя тригонометрические соотношения, получим

$$\frac{\delta\alpha_{\min}}{\delta\lambda} = \frac{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}} \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|. \quad (4.10.5)$$

Для призмы с преломляющим углом $\theta = 60^\circ$ угловая дисперсия вблизи угла наименьшего отклонения определяется формулой

$$\frac{\delta\alpha_{\min}}{\delta\lambda} = \frac{1}{\sqrt{1 - (n/2)^2}} \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|, \quad (4.10.6)$$

Таким образом, видим, что угловая дисперсия призмы определяется в значительной степени дисперсией вещества, из которого она сделана.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка показана на рис. 4.10.3. Конструктивно установка представляет собой спектрометр-гониометр *1* со сменяемым спектральным прибором – призмой *2* на поворотном столике, рядом с которым располагается ртутная лампа *3*, закрытая защитным кожухом, с блоком питания *4*. На кожухе ртутной лампы *3* имеется круглое отверстие для выхода светового потока. Излучение ртутной лампы содержит дискретный набор длин волн (линейчатый спектр), а не всевозможные их значения, как у лампы накаливания. Свет от источника, пройдя призму, образует ряд изображений щели, соответствующих этим длинам волн.

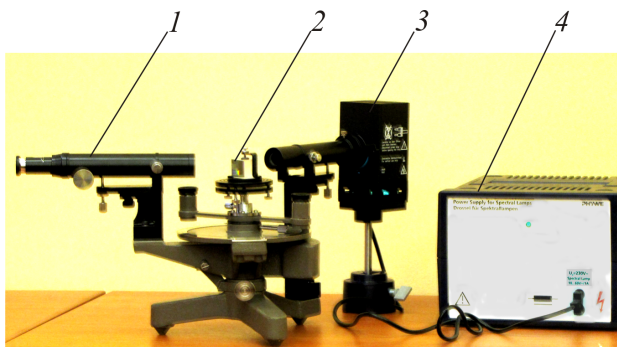


Рис. 4.10.3

Блок питания установки 4 помещен в стальной корпус, на верхней крышке которого находится подпружиненная ручка для его переноски. На передней панели находятся гнезда типа Pico 9 для безопасного подключения ртутной лампы. На задней панели расположен тумблер включения блока питания.

Основным измерительным прибором в этой установке является гониометр. Этот прибор позволяет производить измерения углов поворота с большой точностью. Схема гониометра приведена отдельно на рис. 4.10.4.



Рис. 4.10.4

На рис. 4.10.4 цифрами обозначены следующие элементы установки: 1 – винт регулировки зрительной трубы по высоте; 2 – регулировка резкости зрительной трубы; 3 – окуляр; 4 – зрительная труба; 5 – винт горизонтальной регулировки зрительной трубы; 6 – лупа для считывания показаний; 7 – столик для установки спектрального прибора; 8 – спектральный прибор (показана призма); 9 – проградуированный вращающийся диск; 10 – коллиматор; 11 – винт регулировки тонкой настройки коллиматора; 12 – винт регулировки ширины щели; 13 – щель коллиматора; 14 – винт регулировки коллиматора по высоте; 15 – винт регулировки уровня столика; 16 – стопорный винт, фиксирующий положение вращающегося диска и спектрального прибора относительно друг друга; 17 – отсчетная шкала; 18 – винт регулировки высоты.

Отсчет углов поворота столика производится по угловой шкале 9 с нониусным отсчетом 17. Для повышения точности для снятия

отсчета используется лупа 6. Излучение ртутной лампы, проходящее через щель 13, преобразуется коллиматором в параллельный пучок, который направляется на призму 8, установленную на столике гониометра 7. Отклоненное излучение наблюдается визуально с помощью зрительной трубы 4, «сфокусированной» на «бесконечность», что позволяет восстановить изображение щели. Угол отклонения излучения измеряется по отсчетной шкале столика 9. Отсчет градусов следует производить по шкале лимба напротив нуля нониуса 17 (цена деления по шкале лимба – $0,5^\circ$). К этим данным следует добавить количество угловых минут, снятых по шкале нониуса – первое деление нониуса, совпадающее с каким-либо делением шкалы лимба.

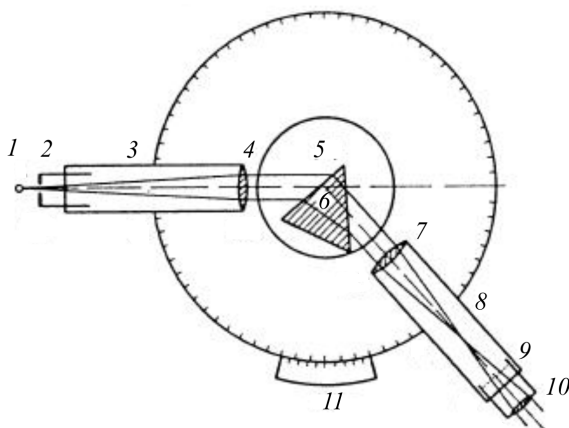


Рис. 4.10.5

Ход лучей и назначение отдельных элементов гониометра показаны на рис. 4.10.5: 1 – источник света; 2 – щель на тубусе; 3 – коллиматор; 4 – объектив (собирающая линза) коллиматора; 5 – поворотный столик с регулировочными винтами; 6 – призма; 7 – объектив зрительной трубы; 8 – зрительная труба; 9 – визирный крест (проволочный указатель); 10 – окуляр; 11 – градуированная окружность с нониусом.

Внимание! При проведении работы не трогать руками стеклянных поверхностей оптических приборов: лупы 6, окуляра 3, призмы 8. Настройка осуществляется только дежурным сотрудником или преподавателем.

Основную сложность при использовании данной установки представляет собой настройка гониометра. Зрительная труба и коллиматор должны быть настроены («сфокусированы») на бесконечность, для этого наведите зрительную трубу на удаленный предмет (на улице или в конце коридора). Перемещая окуляр 3 (см. рис. 4.10.4), добейтесь четкого наблюдения визирного креста, затем вращением винта 2 добейтесь резкого изображения удаленного предмета. Не изменяя настройки окуляра, поверните зрительную трубу так, чтобы ее оптическая ось совпала с осью коллиматора. Ослабив винт 11 (см. рис. 4.10.4) и передвигая тубус со щелью, найдите такое положение, при котором в окуляре наблюдается резкое изображение коллиматорной щели 13 в центре визирного креста. Поворачивая тубус со щелью вокруг горизонтальной оси, добейтесь вертикального положения щели. Закрепите винт 11.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Запрещается смотреть на незащищенную кожухом горящую ртутную лампу, поскольку в ее спектре содержится ультрафиолетовое излучение. Ультрафиолетовое излучение может приводить к поражению хрусталика и сетчатки глаза.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Определение зависимости $n(\lambda)$

1. Включите установку. Проследите, чтобы входная щель была достаточно хорошо освещена. Убедитесь, что на поворотном столике **отсутствует** призма. Затем поворотом зрительной трубы введите изображение щели коллиматора в середину поля зрения. Тщательно сфокусируйте изображение винтом 2 (см. рис. 4.10.4). Оно должно быть достаточно узким и ярким (ширину изображения щели менять винтом 12 (см. рис. 4.10.4)). Совместите вертикальный штрих визирного креста с серединой изображения щели. После этого сделайте отсчет N_0 по шкале нониуса.

2. Установите на столик гониометра исследуемую призму. Имейте в виду, что световой пучок, падающий на призму, преломляется в сторону ее основания (см. рис. 4.10.5). Поворачивая от руки столик с призмой, глазом отыщите цветной спектр и в это направление введите зрительную трубу. Просмотрите в трубу весь спектр – от красной до яркой фиолетовой линии.

3. Поворачивая столик с призмой в одном направлении, проследите за движением спектральных линий. При некотором определенном угле падения луча на призму наблюдаемая спектральная линия останавливается в поле зрения окуляра, а затем начинает двигаться в обратном направлении. Положение спектральной линии в момент остановки соответствует углу наименьшего отклонения луча $\alpha_{\min}$.

Начиная с красной линии, проделайте п. 3, тщательно фокусируя изображение линии винтом 2 (по рис. 4.10.4). Фокусировка каждой линии необходима вследствие того, что оптическое стекло также обладает дисперсией, и фокальное расстояние зрительной трубы меняется в зависимости от длины волны света. Совместив вертикальный штрих визирного креста с серединой выбранной линии, сделайте отсчет N_i по шкале нониуса. Результаты измерений занесите в табл. 4.10.1.

Таблица 4.10.1

N серии	Цвет линии	Длина волны, λ , нм	N_i	$\alpha_{\min} = N_i - N_0$
1	Белый	—		
	Красный	627,3		
	Желтый дублет	579,1 577,0		...
	Зеленый	546,1		
	Синий	435,8		
	Фиолетовый	404,7		
2	...			

4. Проделайте несколько серий измерений (число серий согласуется с преподавателем, но не менее трех) согласно пп. 1–3.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По результатам измерений (табл. 4.10.1) вычислите средние значения $\langle \alpha_{\min} \rangle_i$ для каждой линии ртутной лампы.

2. Оцените погрешность разброса углов наименьшего отклонения для каждой линии. Для этого вычислите среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\alpha_{\min i,k} - \langle \alpha_{\min i} \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (4.10.7)$$

где n – число серий. Тогда в качестве оценки погрешности измерений примите

$$\Delta\alpha_{\min i} = t_{\alpha,n} \sigma_i,$$

где $t_{\alpha,n}$ – коэффициент Стьюдента, который находится из справочной таблицы по известному числу n и доверительной вероятности α , выбираемой по согласованию с преподавателем, обычно равным 0,7. По согласованию с преподавателем допустимо использовать метод Корнфелда.

3. Рассчитайте для каждой линии показатель преломления $n(\lambda)$ стеклянной призмы по формуле (4.10.4).

4. Оцените погрешность косвенных измерений показателя преломления по формуле

$$\Delta n = \cos(30^\circ + \alpha_{\min}/2) \cdot \Delta\alpha_{\min}. \quad (4.10.8)$$

5. Результаты расчетов занесите в табл. 4.10.2.

Таблица 4.10.2

λ , нм	$\langle \alpha_{\min} \rangle$, град.	$\Delta\alpha_{\min}$, град.	$n(\lambda)$	Δn
...	...	...	...	...

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. По результатам расчетов (табл. 4.10.2) постройте график зависимости показателя преломления стекла от длины волны света. Укажите на нем погрешность Δn . В пределах погрешности проведите гладкую кривую (см. рис. 4.10.1).

2. Проведите касательную к кривой (п. 1) в окрестности желтого дублета. Оцените ее коэффициент наклона $dn/d\lambda$ – дисперсию стекла. Сделайте вывод о характере дисперсии.

3. По формуле (4.10.6) оцените угловую дисперсию призмы $\delta\alpha/\delta\lambda$ и разность углов наименьшего отклонения для желтого дуб-

лета. Сделайте вывод о возможности измерения этой разности данным прибором.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление дисперсии?
2. В чем заключается метод измерения угла наименьшего отклонения луча света призмой?
3. Какой знак имеет $dn/d\lambda$ в случае аномальной дисперсии?
4. Для получения максимальных значений угла наименьшего отклонения $\alpha_{\text{мин}}$ какую стеклянную призму необходимо использовать с преломляющим углом в 45 или 60°?
5. Почему в работе в качестве источника света используется ртутная лампа, а не лампа накаливания?
6. Спектральные линии каких длин волн λ преломляются под большими углами α при падении на призму?
7. Как установить призму на минимум отклонения для данной длины волны?
8. Как производятся отсчеты по отсчетной шкале гониометра и нониусу?
9. Почему в спектре, полученного разложением белого света призмой, отсутствует белая линия?
10. Что наблюдалось бы при преломлении солнечного света, проходящего через призму?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Калашников Н.П., Смодырев М.А. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа, 2004.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. М.: Астрель, АСТ, 2004, 2009.

Дополнительная

1. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Физматлит, 2003.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. Т. 4. М.: Физматлит, 2009.
3. Лабораторный практикум «Оптика». М.: МИФИ, 2009.

Работа 4.11

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ОПЫТЕ С БИПРИЗМОЙ ФРЕНЕЛЯ

Цель: изучение явления интерференции света и определение длины волны света от источника.

Оборудование: гелий-неоновый лазер – источник оптического когерентного излучения; бипризма Френеля; столик с держателем для бипризмы; линзы в оправе ($f = +20$ мм и $f = +300$ мм); держатели; оптическая скамья, $l = 1,0$ м; измерительная рулетка длиной 2 м.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе изучается явление интерференции света методом деления волнового фронта с помощью бипризмы Френеля. Бипризма Френеля представляет собой двойную призму с весьма малыми величинами преломляющих углов θ . При таких преломляющих углах луч после прохождения призмы отклоняется на угол φ , который не зависит от угла падения, если он мал, но зависит от величины преломляющего угла θ и показателя преломления материала призмы.

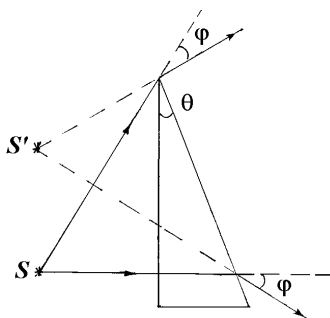


Рис. 4.11.1

Схему прохождения лучей через призму иллюстрирует рис. 4.11.1. Рассмотрим точечный источник S . Если лучи, прошедшие через призму, продолжить назад до пересечения между собой, то получим изображение S' точечного источника S . Поскольку пересекаются не сами лучи, а их продолжения, то такое изображение источника будет мнимым.

Таким образом, после прохождения призмы световая волна распространяется так, как если бы ее источник помещался в точке S' , а призма отсутствовала.

Если теперь склеить две одинаковые призмы по узким граням, то получится бипризма Френеля. Такая призма сформирует два точечных источника (рис. 4.11.2). При малых преломляющих углах источник S и оба его мнимых изображения S_1 и S_2 лежат практически в одной плоскости. Таким образом, после прохождения призмы формируются две такие же волны, как если бы их источники располагались в точках S_1 и S_2 . Принципиально важным для наблюдения интерференции является когерентность рассматриваемых волн. Это связано с тем, что испускаются они одним и тем же источником S .

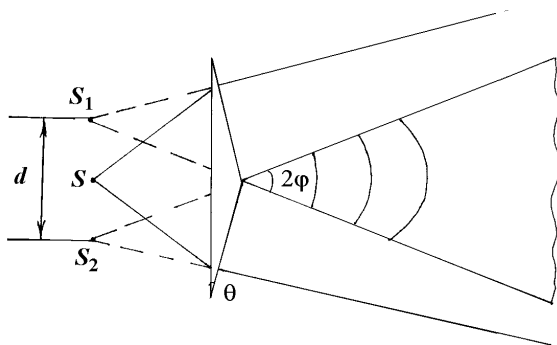


Рис. 4.11.2

Область перекрытия двух волн образует зону интерференции, угловая ширина которой равна 2φ . Если в зоне интерференции за бипризмой установить на соответствующем расстоянии l от источника экран, то на нем будет наблюдаться система чередующихся интерференционных полос. Для увеличения четкости интерференционной картины используют источники света с большой степенью монохроматичности. По этой причине в настоящей работе источником света служит гелий-неоновый лазер, излучающий в очень узком спектральном диапазоне.

Ширина одной полосы определяется известной формулой:

$$\Delta x = \lambda l / d, \quad (4.11.1)$$

где λ – длина световой волны, испускаемой источником; d – расстояние между мнимыми источниками S_1 и S_2 . Величины Δx и l , входящие в формулу (4.11.1), могут быть измерены непосредственно, в то время как расстояние d непосредственно измерить нельзя.

Для того чтобы определить расстояние между мнимыми источниками, поместим между бипризмой и экраном Э собирающую линзу Л с известным фокусным расстоянием $f = f_d$ (рис. 4.11.3). Подберем ее положение так, чтобы на экране, удаленном на расстоянии b , возникли четкие изображения источников S_1^* и S_2^* .

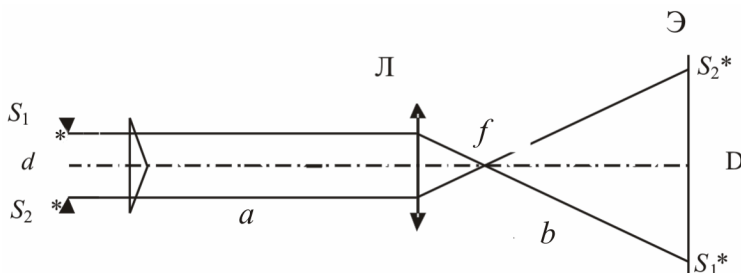


Рис. 4.11.3

Измерив расстояние D между действительными изображениями S_1^* и S_2^* , можно вычислить расстояние d , воспользовавшись подобием треугольников

$$\frac{D}{d} = \frac{b-f}{f}, \quad (4.11.2)$$

получим

$$d = \frac{Df}{b-f}. \quad (4.11.3)$$

Подставив (4.11.3) в (4.11.1), получим расчетную формулу для длины волны источника света:

$$\lambda = \frac{\Delta x d}{l} = \frac{\Delta x D f}{l(b-f)}. \quad (4.11.4)$$

Таким образом, измерив: а) ширину интерференционной полосы Δx ; б) расстояние D между изображениями мнимых источников; в) расстояние b от линзы до экрана; г) расстояние $l = a + b$ от источ-

ника до экрана, можно по формуле (4.11.4) определить длину волны λ источника света при известном фокусном расстоянии f линзы Л.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Фотография установки приведена на рис. 4.11.4.

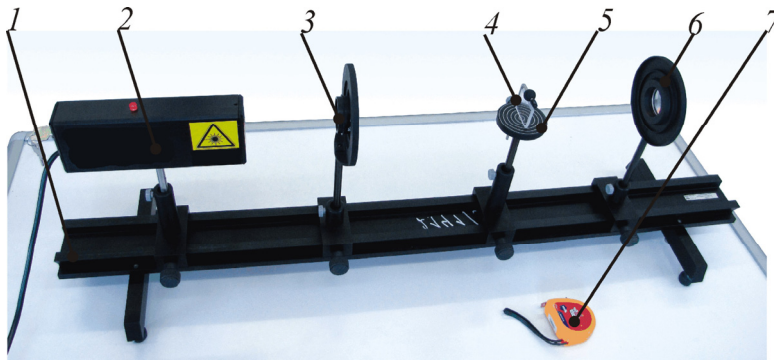


Рис. 4.11.4

Все элементы экспериментальной установки смонтированы на рейтерах, устанавливаемых в держатели, закрепляемые на оптической скамье 1. Как уже отмечалось, в качестве источника оптического излучения в работе используется гелий-неоновый лазер 2 ($\lambda = 632,8$ нм), дающий слабо расходящийся, практически монохроматический луч. В средней части сечения луча излучение можно считать близким к плоской монохроматической волне. Излучение лазера падает на собирающую короткофокусную линзу 3 ($f_k = +20$ мм). После прохождения этой линзы параллельные лучи собираются в одной точке – фокусе за линзой, а затем расходятся. Этим в данной работе достигается моделирование точечного источника. За линзой 3 располагается бипризма Френеля 4 на столике 5 с держателем для бипризмы. Экраном служит белый лист бумаги, укрепленный на стене на расстоянии нескольких метров от установки (на рисунке не показан). Кроме того, установка укомплектована дополнительной длиннофокусной линзой 6 ($f_d = 300$ мм), предназначенной для косвенного измерения расстояния d между мнимыми источниками S_1 и S_2 , снимаемой с оптической скамьи во время измерения ширины интерференционной полосы. Эта дополнитель-

ная линза b устанавливается для производства измерений D и b , по которым определяется d (см. формулу (4.11.4)). Лазер снабжен выключателем, замыкаемым с помощью ключа, для предотвращения несанкционированного включения.

Для измерения расстояния от линзы b до экрана используется рулетка 7.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При работе с источниками когерентного излучения (лазерами), даже малой интенсивности, требуется неукоснительно соблюдать меры безопасности, исключающие поражение органов зрения. Связано это, прежде всего, с тем, что когерентное излучение может быть достаточно точно сфокусировано в малой области, размеры которой определяются дифракционными эффектами и могут иметь размер порядка длины волны. При попадании луча лазера в глаз может сложиться именно такая ситуация, когда хрусталик глаза сфокусирует луч в малой области на сетчатке. В этом случае когерентное излучение даже маломощного лазера может создать интенсивности, вполне достаточные для разрушения тканей глаза. Поэтому категорически запрещается «заглядывать» в луч лазера, а также вносить в него блестящие или какие-либо зеркально отражающие свет предметы. Даже многократно отраженное излучение лазера не теряет свойства когерентности и представляет опасность для глаз.

Установка (в данной работе корпус лазера), питаемая от сети, должна быть заземлена, для исключения опасности поражения электрическим током при нарушении электропрочности изоляции.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Определение длины волны света

1. Произведите наладку установки. Закрепите на оптической скамье 1 лазер 2, линзу 3 и бипризму 4, если они не были установлены заранее. Ключом включите лазер. По нижнему краю оптической скамьи проложена измерительная лента длиной 1 м, а на держателях элементов оптической схемы сделаны вертикальные риски, что позволяет устанавливать элементы схемы на определенных расстояниях между собой и от края скамьи. Закрепите лазер на расстоянии 2 см, линзу 3 – 23,3 см, бипризму – 45 см от края скамьи.

С помощью крепежных винтов на рейтерах оптических элементов отцентрируйте лазер, линзу и бипризму по высоте так, чтобы луч лазера попадал на бипризму. Перемещая бипризму, укрепленную с помощью держателя на столике, добейтесь того, чтобы луч лазера попадал в центральную часть угла бипризмы.

Будьте осторожны! Бипризма легко перемещается по столику. Не уроните ее! Линзу можно брать только за торцы, а не за отшлифованную часть, чтобы не оставить на ней отпечатки пальцев.

В результате тщательного выполнения предварительной настройки установки на экране должна появиться интерференционная картина в виде примерно полутора десятков интерференционных полос.

Внимание! В случае если установка отъюстирована и готова к измерениям, этот пункт задания выполнять не надо.

2. С помощью линейки измерьте расстояние Δl между $m = 5$ полосами в центральной части интерференционной картины.

Повторите еще дважды эти измерения, работая с разными минимумами интерференционной картины.

Выберите другое число полос $m = 7$ и проделайте описанные выше измерения.

Данные измерений занесите в табл. 4.11.1.

Таблица 4.11.1

Число полос m	$m_1 = 5$			$m_2 = 7$		
Δl_i , мм						
$\Delta x_i = \Delta l_i / m$, мм						

3. Поставьте на оптическую скамью дополнительную линзу 6 ($f_d = 300$ мм) и, перемещая ее по оптической скамье, получите на экране изображение двух мнимых точечных источников. Измерьте расстояние D между ними три раза.

4. С помощью рулетки 7 измерьте расстояние b от экрана до линзы 6 и расстояние L от экрана до линзы 3. Расстояние $l = a + b$ от источников S_1 и S_2 до их изображений на экране находится как $L - f$, где $f = f_k = 20$ мм – фокусное расстояние линзы 3.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным измерений п. 2 рассчитайте среднее значение ширины одной полосы $\langle \Delta x \rangle$ и ее среднеквадратичную погрешность

$$\sigma_{\langle \Delta x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\Delta x_i - \langle \Delta x \rangle)^2}{6 \cdot 5}}.$$

2. По данным измерений п. 3 найдите $\langle D \rangle$ и погрешность ΔD .

3. По формуле (4.11.4) рассчитайте длину волны света λ от лазера. Относительную погрешность $\delta \lambda$ найдите по формуле расчета погрешности косвенных измерений:

$$\delta \lambda = \sqrt{(\delta \Delta x)^2 + (\delta D)^2 + (\delta f)^2 + (\delta l)^2 + (\delta(b - f))^2},$$

где $f = f_d = 300$ мм – фокусное расстояние линзы б. Затем найдите абсолютную погрешность $\Delta \lambda$.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Полученное значение длины волны λ сравните с ее паспортным значением для гелий-неонового лазера: $\lambda = 632,8$ нм. Попадает или нет это значение в доверительный интервал $\lambda \pm \Delta \lambda$?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему бипризму делают с очень малым преломляющим углом?
2. Будет ли наблюдаться интерференционная картина, если одну половину бипризмы закрыть красным светофильтром, а другую – зеленым?
3. Что произойдет с интерференционной картиной, если одну половину бипризмы перекрыть тонкой прозрачной пластинкой (толщиной порядка нескольких длин волн)?
4. Что может определять максимальное число полос наблюдаемой интерференционной картины?
5. Получить формулу (4.11.1), предполагая малыми величины преломляющего угла призмы и угла падения луча.
6. По каким причинам в опыте с бипризмой Френеля следует направлять луч лазера в центральную часть угла бипризмы?
7. Из каких соображений записывается формула (4.11.2)?

8. Вывести формулу (4.11.4) для ширины интерференционной полосы.
9. Почему в качестве источника в работе используется лазер?
10. Зачем нужна короткофокусная линза 3?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1988.
2. Лабораторный практикум «Оптика» / Под ред. Д.А. Самарченко. М.: МИФИ, 2002.

Дополнительная

1. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1986.

Работа 4.12

КОЛЬЦА НЬЮТОНА

Цель: изучение явления интерференции света методом колец Ньютона в проходящем свете; определение радиуса кривизны плосковыпуклой линзы; определение длины волны монохроматического света.

Оборудование: оптическая скамья; ртутный фонарь высокого давления; источник питания для лампы; двойной конденсор; устройство для получения колец Ньютона; линза; интерференционные фильтры; экран; линейка.

ВВЕДЕНИЕ

Интерференция – одно из ярких проявлений волновой природы света. Это интересное и красивое явление наблюдается при определенных условиях при наложении двух или нескольких световых пучков. Первый эксперимент по наблюдению интерференции света в лабораторных условиях принадлежит И. Ньютону. Ньютон наблюдал интерференционную картину, возникающую при отражении света в тонкой воздушной прослойке между плоской стеклянной пластиной и плосковыпуклой линзой большого радиуса кривизны. Интерференционная картина имела вид концентрических колец, получивших название *колец Ньютона*.

Кольца Ньютона можно наблюдать как в отраженном, так и в проходящем свете.

Рассмотрим ход лучей в проходящем свете (рис. 4.12.1).

Кольца Ньютона возникают в монохроматическом свете, интерферирующем в тонкой прослойке между выпуклой линзой и пластиной из плоского стекла. Луч 1 проходит через линзу и пластинку и интерферирует с лучом 2, который проходит через линзу, отражается от пластинки и от нижней части линзы (см. рис. 4.12.1).

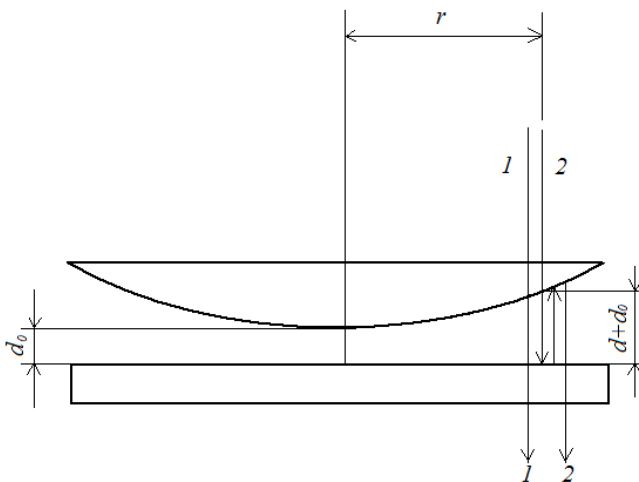


Рис. 4.12.1

Толщина слоя воздуха на расстоянии r от точки соприкосновения линзы и пластины составляет $D = d \pm d_0$. Так как идеальное соприкосновение отсутствует, следует учитывать значение d_0 . Оно имеет положительное значение, когда, например, между линзой и пластиной находятся частицы пыли, и отрицательное значение – при более высоком давлении. Таким образом, геометрическая разность хода Δ интерферирующих лучей равна:

$$\Delta = 2 \cdot (d \pm d_0).$$

Следует учесть, что при отражении от оптически более плотной среды фаза волны изменяется на π , что равносильно дополнительной разности хода $\frac{\lambda}{2}$. Так как отражение происходит дважды, то полная оптическая разность хода волн 1 и 2 равна:

$$\Delta = 2(d + d_0) + \lambda. \quad (4.12.1)$$

Светлые кольца наблюдаются при выполнении условия максимума интерференции порядка m :

$$\Delta = 2 \cdot (d \pm d_0) \pm \lambda = \pm m\lambda.$$

Темные кольца наблюдаются при выполнении условия минимума интерференции порядка m :

$$\Delta = 2(d \pm d_0) \pm \lambda = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda .$$

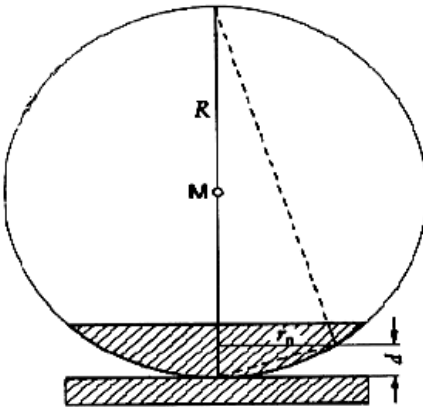


Рис. 4.12.2

Из прямоугольного треугольника (рис. 4.12.2) имеем

$$r_m^2 = (2R - d)d = 2Rd - d^2 .$$

Поскольку $d \ll R$, то $r_m^2 \approx 2Rd$, откуда $d = \frac{r_m^2}{2R}$. При идеальном контакте $d_0 = 0$.

Тогда условие максимума приобретает вид

$$\frac{r_{\max}^2}{R} = (m - 1)\lambda , \quad (4.12.2)$$

а условие минимума

$$\frac{r_{\min}^2}{R} = \frac{(2m - 1)}{2} \lambda . \quad (4.12.3)$$

График экспериментальной зависимости $r_m^2 = f(m)$ демонстрирует, каков контакт между линзой и плоской пластиной в выполненных измерениях.

Измерив r_m светлых или темных колец и зная m и λ , по формулам (4.12.2) или (4.12.3) можно определить радиус кривизны линзы R .

Однако практически трудно добиться идеального контакта сферической поверхности линзы и пластинки (вследствие упругой деформации стекла и попадания на место соприкосновения пылинок). Поэтому непосредственно использовать формулу (4.12.3) для вычислений нельзя: m -му темному кольцу в действительности может соответствовать не m -й порядок интерференции, а $m + k$, где k – неизвестное целое число, одинаковое для всех колец.

Для исключения возможной ошибки вычисление R производят по разности квадратов радиусов колец. В этом случае неизвестное k исключается, и расчетная формула принимает вид

$$R = \frac{(r_m^2 - r_n^2)}{\lambda(m - n)}, \quad (4.12.4)$$

где m и n – номера колец.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Внешний вид экспериментальной установки наблюдения колец Ньютона представлен на рис. 4.12.3.

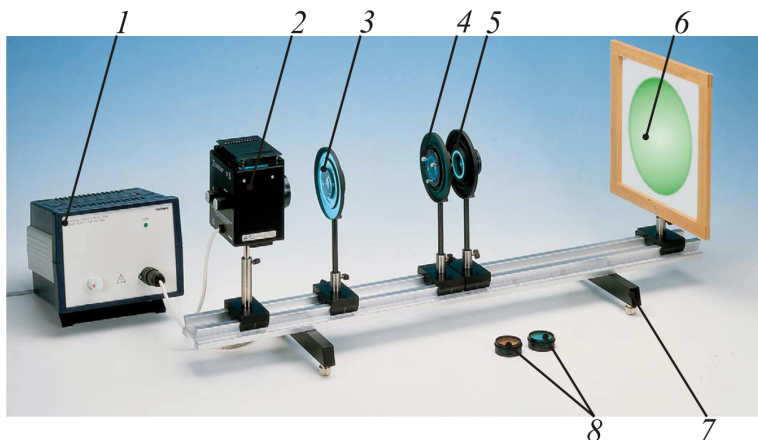


Рис. 4.12.3

Источником света служит ртутная лампа 2 с конденсором 3 ($f = 60$ мм), питаемая от источника 1. В корпус устройства 4 помещены линза большого радиуса и пластина. На полупрозрачный экран 6 проектируется интерференционная картина и миллиметровая сетка с помощью линзы 5 ($f = +50$ мм). Все элементы крепятся на оптической скамье 7. Экран помещается на расстоянии 30–40 см от линзы. Имеются три (желтый, зеленый, голубой) интерференционных фильтра, которые при измерениях помещаются в держатель для линз.

Юстировка системы производится без использования светофильтров, в отсутствии внешнего освещения. Соприкосновения плосковыпуклой линзы и пластинки добиваются с помощью трех винтов на поверхности устройства 4, перемещая середину интерференционной картины в центр миллиметровой сетки.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. В процессе регулировки устройства 4 убедитесь, что линза и стеклянная пластина только прикасаются друг к другу.

2. Соблюдайте особую осторожность при работе с интерференционными светофильтрами. Запрещается стряхивать с них пыль и протирать. Светофильтры разрешается брать только за оправу.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Подготовка установки к работе и определение увеличения системы

1. Установите все элементы установки на оптической скамье. Конденсор придвиньте вплотную к лампе. Экран расположите на расстоянии 30–40 см от линзы. Включите ртутную лампу. Проследите ход лучей сначала без светофильтров.

2. Проведите юстировку системы. Аккуратно, при помощи трех регулировочных винтов на устройстве для получения колец Ньютона установите плосковыпуклую линзу на плоскопараллельной стеклянной пластине так, чтобы светлый центр колец интерференции находился в средней точке миллиметровой шкалы, спроецированной на экран. В процессе регулировки убедитесь, что линза и стеклянная пластина только прикасаются друг к другу. Меняя

положение линзы, получите на экране четкое изображение миллиметровой шкалы.

3. С помощью линейки померяйте расстояние H между несколькими n делениями миллиметровой шкалы h . Определите линейное увеличение оптической системы

$$\beta = H/nh. \quad (4.12.5)$$

Задание 2. Определение радиуса кривизны плосковыпуклой линзы

Вставьте в держатель для линзы желтый светофильтр с длиной волны $\lambda_{\text{желт}} = (582 \pm 4)$ нм. Измерьте линейкой диаметры D_i 6–8 темных колец. Результаты измерений занесите в табл. 4.12.1.

Таблица 4.12.1

N кольца	D_i , мм	r_i , мм	r_i^2 , мм ²	$\Delta(r)^2$, мм ²
1				
2				
...				

Задание 3. Определение длины волны света

Повторите измерения диаметров темных колец с другими светофильтрами в соответствующих порядках. Результаты измерений занесите в табл. 4.12.2.

Таблица 4.12.2

N кольца	D_i , мм	r_i , мм	r_i^2 , мм	$\Delta(r_i)^2$, мм ²
1				
2				
...				

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определите линейное увеличение оптической системы β по формуле (4.12.5).

2. Определите радиусы колец, зная увеличение системы:

$$r_i = D_i / 2\beta.$$

3. Чтобы определить радиус кривизны линзы R , воспользуйтесь графическим методом. Для этого постройте график зависимости квадратов радиусов колец от их номера. На графике укажите погрешность $\Delta(r)^2 = 2r \Delta r$. Зависимость r_n^2 должна иметь вид прямой. Угловой коэффициент, например, может быть найден методом парных точек:

$$k_i = \frac{r_m^2 - r_n^2}{m - n},$$

где m и n – номера колец, радиусы которых r_m и r_n . Вычислите среднее значение k и погрешность Δk .

4. Радиус кривизны линзы определите по формуле:

$$R = \frac{k}{\lambda}, \quad (4.12.6)$$

где λ – длина волны света для данного светофильтра.

5. Для определения длины волны света сделайте аналогичные действия (пп. 2–4). По найденному ранее радиусу кривизны линзы R , определите длину волны света для каждого светофильтра.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. В разделе «Заключение» кратко изложите содержание и основные результаты работы.

2. Укажите полученное значение радиуса кривизны линзы.

3. Приведите полученную длину волны света и сравните ее с длиной волны света для данного светофильтра. При несовпадении укажите возможные причины расхождения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему интерференционная картина представляет собой систему чередующихся светлых и темных колец?
2. Как изменяется вид интерференционной картины при наблюдении в проходящем и отраженном свете?
3. Почему для получения интерференционной картины используются линзы с большим радиусом кривизны?
4. Что произойдет, если в месте соприкосновения линзы и пластинки не будет оптического контакта?
5. Получите выражение для радиуса k -го светлого кольца Ньютона в отраженном и проходящем свете.
6. Как изменится интерференционная картина, если в установке использовать белый свет?
7. При каких условиях наблюдаются кольца Ньютона?
8. Почему в центре интерференционной картины наблюдается темное пятно в отраженном свете и светлое пятно в проходящем свете?
9. Почему с удалением от центра интерференционной картины кольца Ньютона расположены ближе друг к другу?
10. Почему в отраженном свете картина колец Ньютона более четкая?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. М.: Астрель, АСТ, 2003.
2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: Физматлит, 1999.

Дополнительная

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, Наука, 2003.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. М.: Физматлит, 2006.

Работа 4.13

ЗОНЫ ФРЕНЕЛЯ И ЗОННАЯ ПЛАСТИНКА

Цель: знакомство с понятиями «зона Френеля» и «зонная пластинка»; экспериментальная проверка принципа Гюйгенса–Френеля; изучения зонной пластинки.

Оборудование: лазер (He-Ne); зонная пластинка; линза в оправе, $f = +20$ мм; линза в оправе, $f = +50$ мм; линза в оправе, $f = +100$ мм; линза в оправе, $f = -50$ мм; матовое стекло; поляризационный фильтр.

ВВЕДЕНИЕ

Для описания процесса распространения света в среде с крупномасштабными неоднородностями – явления дифракции – удобно использовать принцип Гюйгенса–Френеля, который является прямым следствием решений уравнений Максвелла. В соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля фронт волны является источником когерентных вторичных волн так, что амплитуда светового вектора, испускаемого элементом площади волновой поверхности, пропорциональна этой площади. Для понимания особенностей распространения света при дифракции удобно разбивать волновой фронт на так называемые *зоны Френеля*.

Рассмотрим монохроматическую волну. Разобьем волновой фронт на участки таким образом, чтобы разность расстояний от точки наблюдения до границ двух соседних областей было равно половине длины волны $\frac{\lambda}{2}$.

В случае сферической волны, распространяющейся от точечного источника, расположенного в точке P_0 , картина разбиения для точки наблюдения P имеет вид колец (рис. 4.13.1).

На рис. 4.13.1 введены следующие обозначения: Σ – фронт волны в данный, фиксированный момент времени; b – расстояние от переднего края фронта до точки наблюдения; r_0 – радиус волнового фронта. Из рисунка видно, что в этом случае зоны Френеля представляют собой сферические сегменты радиуса r_m и площади S_m , где буква m нумерует зоны.

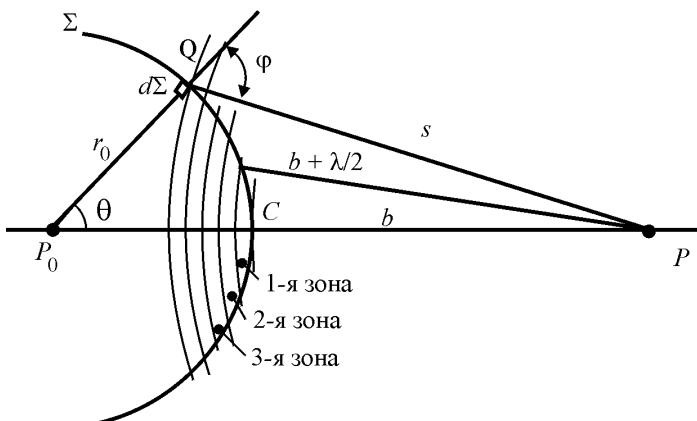


Рис. 4.13.1

Простой расчет [1] показывает, что радиус m -й зоны Френеля и ее радиус и площадь равны:

$$r_m = \sqrt{\frac{r_0 b}{r_0 + b}} m \lambda ; \quad (4.13.1)$$

$$S_m = \frac{\pi r_0 b \lambda}{r_0 + b}; \quad m \ll \frac{b}{\lambda}. \quad (4.13.2)$$

Ограничение на номер зоны для видимого $\lambda \approx 0,5$ мкм света и реальных условий проведения эксперимента $b \approx 1$ м, означающее что $m \ll 2 \cdot 10^5$, не является принципиальным.

Из формулы (4.13.2) следует, что площадь m -й зоны Френеля (а следовательно, и амплитуда светового вектора, испускаемого с ограниченного ей участка волнового фронта) не зависит от номера зоны.

Формула (4.13.1) может быть переписана следующим образом:

$$\frac{1}{r_0} + \frac{1}{b} = \frac{1}{\left(\frac{r_m^2}{m \lambda} \right)} \equiv \frac{1}{f_m}, \quad (4.13.3)$$

где $f_m = \frac{r_m^2}{m \lambda}$.

Соотношение (4.13.3) формально совпадает с формулой тонкой линзы [1], что позволяет интерпретировать f_m как фокусное расстояние m -й зоны Френеля. Если падающая волна – плоская, то $r_0 \rightarrow \infty$ и

$$f_m = b. \quad (4.13.4)$$

Зонная пластинка. Возьмем прозрачный плоский экран и разметим его концентрическими кольцами так, что каждое из колец будет отвечать (в соответствии с формулами (4.13.1) и (4.13.2)) первым m зонам Френеля для данной длины волны. Далее затемним, сделав их непрозрачными, четные (или нечетные) зоны. Созданный таким образом объект называется *зонной пластинкой*.

Поместим зонную пластинку перпендикулярно направлению распространения плоской монохроматической волны. Поскольку волновой фронт плоской волны – плоскость, площади первых зон Френеля равны и открытые зоны Френеля зонной пластинки испускают синфазные вторичные световые волны одинаковой амплитуды, то в соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля наибольшая амплитуда световых колебаний будет наблюдаться в точках на оси распространения сигнала, определяемых уравнением (4.13.4).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для наблюдения фокусов зонной пластинки представляет собой оптическую скамью (рис. 4.13.2), на которой расположены: источник электромагнитных волн видимого диапазона (лазер) 1; набор линз 2, формирующих параллельный пучок; зонная пластинка 3; матовое стекло 4, играющее роль экрана наблюдения, и лупа 5.

Схема расположения принадлежностей на оптической скамье представлена на рис. 4.13.3.

Зонная пластинка, используемая для эксперимента, имеет 20 зон, радиус первого темного центрального круга $r_1 = 0,60$ мм. Длина волны излучения $\lambda = 632,8$ нм.

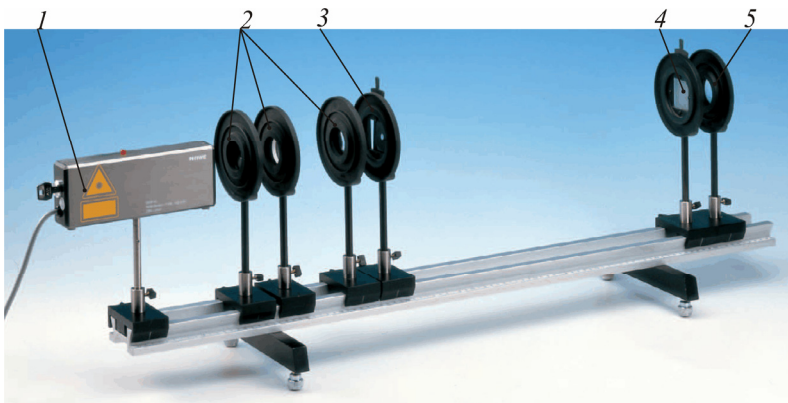


Рис. 4.13.2

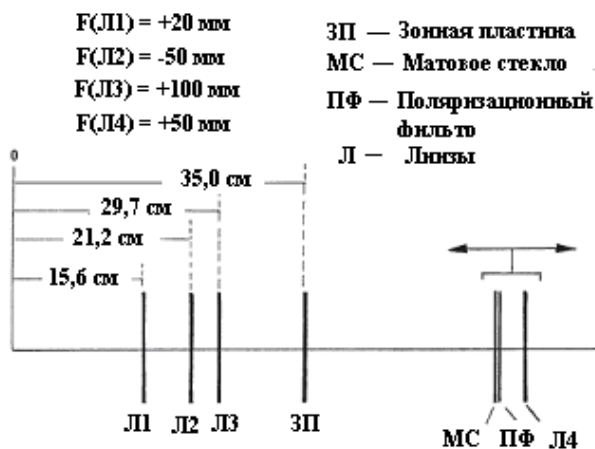


Рис. 4.13.3

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Внимание! При работе категорически запрещается прямое наблюдение (смотреть на лазерный луч вдоль прямой его распространения) лазерного луча.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Подготовка установки

Лазер, закрепленный в ползунке, устанавливается в начало оптической скамьи. Для того чтобы расширить лазерный луч до диаметра около 5 мм, расположите систему линз Л1, Л2 и Л3 на оптической скамье, как показано на рис. 4.13.3.

Осторожное перемещение линз Л2 и Л3 позволяет добиться параллельного лазерного луча длиной в несколько метров (максимум 10 м). Для настройки оптической системы также может быть использован в качестве тестовой диафрагмы кусок черного картона с отверстием. Установите зонную пластинку ЗП и матовое стекло МС, при этом убедитесь в том, что зонная пластинка полностью освещена. Изображение от зонной пластинки проектируется на матовом стекле, которое располагается в конце оптической скамьи перед увеличительной линзой Л4.

Задание 2. Наблюдение фокусов зонной пластинки и измерение их положения

1. Перемещая одновременно матовое стекло и линзу Л4 по направлению к пластинке, найдите четкое изображение фокусов и определите соответствующие фокусные расстояния. (Поляризационный фильтр ПФ, который используется для уменьшения яркости картины, устанавливается вместе с матовым стеклом в одну оправу).

2. Занесите результаты измерений в заранее заготовленную таблицу, которая может иметь, например, вид табл. 4.13.1.

Таблица 4.13.1

m	$f_{\text{теор}}, \text{ см}$	$f_{\text{эсп}}, \text{ см}$	M	$r_{\text{теор}}, \text{ мм}$	$r_{\text{эсп}}, \text{ мм}$
1			1		
3			2		
5			3		
7			4		
9			5		

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Вычислите значения фокусных расстояний f_m .

2. Сравните результаты расчетов и измерений. Сделайте вывод.
3. Постройте график зависимости фокусного расстояния пластинки от значения обратного порядка фокуса.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Студент должен представить:

значения фокусных расстояний f_m ;

график зависимости фокусного расстояния пластинки от значения обратного порядка фокуса.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит принцип Гюйгенса–Френеля?
2. Что такое зона Френеля?
3. Чему равен радиус m -й зоны Френеля?
4. Чем равна площадь m -й зоны Френеля?
5. Каковы пределы применимости формул для радиуса и площади зоны Френеля, используемые в работе?
6. Какой объект называется зонной пластинкой?
7. Что такое фокус зонной пластинки?
8. Как вычислить фокусное расстояние зонной пластинки?
9. Почему у зонной пластинки несколько фокусов?
10. Какая картина будет наблюдаться, если на зонную пластину направить пучок белого света?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. М.: Астрель, АСТ, 2004, 2009.
2. Калашников Н.П. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа, 2004.

Дополнительная

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1986.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики. Оптика. М., 1986.

Работа 4.14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ И ШИРИНЫ ЛИНИЙ СПЕКТРА ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Цель: *ознакомление с оптической схемой и работой интерферометра Майкельсона; определение длины волны зеленой линии спектра ртути, длины когерентности, времени когерентности, ширины линии спектра.*

Оборудование: интерферометр Майкельсона; ртутная лампа высокого давления, 50 Вт; источник питания для лампы Hg –Cs, 50 Вт; оптическая скамья; линзы; ирисовая диафрагма; цветной фильтр, зеленый, 525 нм; белый экран; держатель для диафрагм.

ВВЕДЕНИЕ

Интерференция световых волн. Под *интерференцией волн* понимается широкий круг явлений, который возникает при наложении двух или более волн и происходящих при этом их усилении или ослаблении. Обычно под интерференционным эффектом понимается отличие интенсивности волнового поля в точке наблюдения от суммы интенсивностей складываемых волн.

Интерференция света заключается в пространственном перераспределении энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн. В результате интерференции в одних местах области наложения волн результирующая интенсивность оказывается большей, в других – меньшей. На экране, помещенном в эту область, возникают чередующиеся светлые и темные участки – *интерференционная картина*.

Для получения интерференции необходимо, чтобы разность фаз возбуждаемых волнами колебаний оставалась постоянной во времени (но своей для каждой точки пространства). Такие волны называются *когерентными*. В более общем смысле *под когерентностью* понимают согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов, позволяющее получить при их сложении интерференционную картину.

Естественные источники света не являются когерентными. Свет от обычных (не лазерных) источников – ламп накаливания, газосветных ламп и т.д., состоящих из макроскопически большого числа независимых элементарных излучателей, представляет собой хаотическую смесь волн различных частот, поляризаций и фаз. Поэтому два независимых источника света никогда не дают интерференционной картины. Излучение от такого источника тем или иным способом разделяют на два световых пучка, а затем вновь сводят их, накладывая друг на друга. При определенных условиях на качество света в такой схеме удастся получить интерференционную картину.

Пусть в некоторой точке O происходит разделение волны на две когерентные волны, которые накладываются друг на друга в точке P (рис. 4.14.1). До точки P первая волна проходит в среде с показателем преломления n_1 путь s_1 , вторая волна проходит в среде с показателем преломления n_2

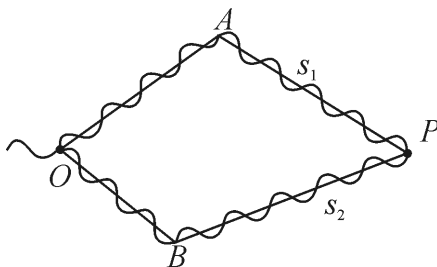


Рис. 4.14.1

путь s_2 . В точке P разность фаз когерентных волн зависит от времени распространения волн из точки O в точку P (т.е. от времени запаздывания). Для первой волны это время равно $t_1 = s_1/v_1$, для

второй волны – $t_2 = s_2/v_2$, где $v_1 = \frac{c}{n_1}$ и $v_2 = \frac{c}{n_2}$ – фазовые скорости

первой и второй волны (c – скорость света в вакууме). Поэтому, если в точке O фаза колебания равна ωt , то первая волна создаст в точке P колебание $A_1 \cos \omega(t - s_1/v_1)$, а вторая волна – колебание $A_2 \cos \omega(t - s_2/v_2)$. Здесь A_1 и A_2 – амплитуды волн.

Следовательно, разность фаз колебаний, возбуждаемых волнами в точке P , будет равна

$$\delta = \omega(s_2/v_2 - s_1/v_1) = \frac{\omega}{c}(n_2 s_2 - n_1 s_1) = \frac{\omega}{c} \Delta, \quad (4.14.1)$$

где Δ – оптическая разность хода двух волн; n_1s_1 и n_2s_2 – оптические длины путей, проходимых первой и второй волнами.

Заменив ω/c через $2\pi\nu/c = 2\pi/\lambda_0$, выражению для разности фаз (4.14.1) можно придать вид

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_2s_2 - n_1s_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta. \quad (4.14.2)$$

Здесь λ_0 – длина волны в вакууме.

Из формулы (4.14.2) следует, что если оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме:

$$\Delta = m\lambda_0, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (4.14.3)$$

то разность фаз оказывается кратной 2π :

$$\delta = 2\pi m, \quad (4.14.4)$$

и колебания, создаваемые в точке P обеими волнами, будут происходить в одинаковой фазе. Таким образом, условие (4.14.4) есть условие *интерференционного максимума*. Слова «в одинаковой фазе» следует понимать так, что фаза колебаний одинакова с точностью до 2π , поскольку гармонические функции (синус и косинус), которыми описывают волновые процессы, периодичны с периодом 2π .

Число m называют *порядком интерференции*. Отметим, что переход от некоторого максимума к соседнему отвечает изменению оптической разности хода на длину волны. Точка экрана, где оптическая разность хода равна нулю, называется *центром интерференционной картины*.

Если же оптическая разность хода равна

$$\Delta = \left(m' + \frac{1}{2}\right)\lambda_0, \quad m' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (4.14.5)$$

то разность фаз получается равной:

$$\delta = \pi + 2\pi m', \quad (4.14.6)$$

и колебания, создаваемые в точке P обеими волнами, будут происходить в противофазе. Таким образом, условие (4.14.6) есть условие *интерференционного минимума*.

Когерентность. Естественные источники света не являются монохроматическими и точечными. Немонохроматичность света и увеличение размеров источника приводят к ухудшению и даже к

исчезновению интерференционной картины. Поэтому требование когерентности накладывает условия на ширину спектра излучения и на угловые размеры протяженного источника. Первое условие связано с понятием *временной когерентности*, второе – с понятием *пространственной когерентности*.

Для возникновения интерференции от двух волн, исходящих из одного обычного (не лазерного) источника света, необходимо *одновременное* выполнение следующих условий:

1) оптическая разность хода должна быть меньше, чем так называемая *длина когерентности* (временная когерентность);

2) расстояние между источниками света должно быть меньше так называемого *радиуса когерентности*, который равен отношению длины волны света и углового размера источника, видимого из точки наблюдения интерференционной картины (пространственная когерентность).

В данной работе исследуется временная когерентность.

Найдем выражение, определяющее длину когерентности $L_{\text{ког}}$, т.е. разность хода, при которой исчезает интерференционная картина.

Пусть S_1 и S_2 – два вторичных источника света от источника S . Предположим, что излучение источника S состоит из двух близких одинаково интенсивных спектральных линий с длинами волн λ и $\lambda' = \lambda + \delta\lambda$. Будем также считать, что начальные фазы источников S_1 и S_2 одинаковы.

Из формулы (4.14.3) видно, что центр интерференционной картины ($\Delta = 0$) получается при $m = 0$ и не зависит от λ . Поэтому центр интерференционной картины для обеих длин волн будет в одном и том же месте. В этом месте будет наблюдаться максимум интенсивности. Рассмотрим другую точку экрана, в которой оптическая разность хода $\Delta = m\lambda'$. В этой точке будет наблюдаться интерференционный максимум для длины волны λ' . Если для этой же точки экрана выполняется условие $\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$, то интерфери-

рующие лучи с другой длиной волны λ придут в противоположной фазе, и, следовательно, для длины волны λ будет наблюдаться интерференционный минимум. Таким образом, при выполнении этого условия в рассматриваемой точке экрана светлые полосы с длиной

волны λ' накладываются на темные полосы с длиной волны λ . Интерференционные полосы в окрестности этой точки исчезнут. Таким образом, предельный порядок интерференции, начиная с которого полосы исчезают, определяется условием:

$$m_{\text{пред}} \lambda' = \left(m_{\text{пред}} + \frac{1}{2} \right) \lambda,$$

или

$$m_{\text{пред}} = \frac{\lambda}{2(\lambda' - \lambda)} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\delta \lambda}.$$

При оценке предельного порядка интерференции $m_{\text{пред}}$ предполагалось, что свет содержит две монохроматические волны равной интенсивности. Практически даже лазерное излучение или свет, пропущенный через светофильтр, представляют собой набор монохроматических компонент в некотором конечном интервале длин волн $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$, $\Delta\lambda \ll \lambda$. Поэтому предельный порядок интерференции $m_{\text{пред}}$ определяется характеристиками светового излучения и приблизительно равен

$$m_{\text{пред}} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (4.14.7)$$

Разность хода, при которой интерференционная картина исчезнет, определяется формой спектра и по порядку равна:

$$L_{\text{ког}} \simeq m_{\text{пред}} \lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (4.14.8)$$

Величина $L_{\text{ког}}$ и называется *длиной когерентности*. Можно также сказать, что длина когерентности – это максимальная разность хода, при которой интерференция еще наблюдается.

Величина $\lambda/\Delta\lambda$ характеризует степень монохроматичности света: чем она больше, тем больше и степень монохроматичности.

Введение разности хода между пучками света эквивалентно временной задержке одного из них. Поэтому способность световой волны к интерференции после ее разделения на два пучка и последующего их наложения с некоторой разностью хода называется

временной когерентностью. Временную задержку между волнами, отвечающую длине когерентности,

$$\tau = L_{\text{ког}}/c \quad (4.14.9)$$

называют *временем когерентности* исходной световой волны.

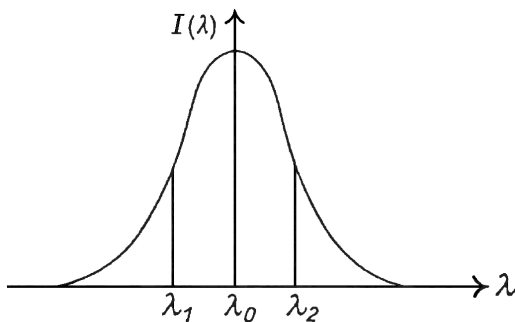


Рис. 4.14.2

Мерой немонохроматичности спектральной линии является так называемая *ширина спектральной линии*. Каждая отдельная линия спектра состоит из спектрального распределения с центральной длиной волны λ_0 . На рис. 4.14.2 показан *контур спектральной линии* – распределение интенсивности в зависимости от длины волны $I(\lambda)$. Ширину спектральной линии определяют как расстояние между точками контура спектральной линии, в которых интенсивность равна половине ее максимального значения: $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ (см. рис. 4.14.2).

Каждая отдельная линия спектра состоит из спектрального распределения с центральной длиной волны λ_0 (как показано на рис. 4.14.2). При заданной длине когерентности L и длине волны λ_0 можно рассчитать ширину линии $\Delta\lambda$ из выражений (4.14.8) и (4.14.9).

Укажем некоторые физические явления, приводящие к значительному уширению линий. Эффект Доплера, возникающий вследствие беспорядочного теплового движения излучающих атомов, – *доплеровское* уширение. Существует также уширение давлением, связанное с тем, что присутствие соседних частиц влияет на излучение индивидуального атома. Оно дает большой эффект, если

время столкновения между атомами много меньше времени излучения (так называемый *ударный механизм* уширения). Время столкновения уменьшается с увеличением плотности и температуры газа. Для обычных спектральных ламп ширина линии вследствие уширения давлением приблизительно составляет $\Delta\lambda \approx 10^{-10}$ м, а длина когерентности $L_{\text{ког}} = 3 \cdot 10^{-4}$ м.

Интерферометр Майкельсона, принципиальная схема. Оптические измерительные приборы, основанные на интерференции света, называются *интерферометрами*. В настоящей работе используется интерферометр Майкельсона, принципиальная схема которого показана на рис. 4.14.3.

Два зеркала Z_1 и Z_2 расположены перпендикулярно друг другу. На пересечении нормалей к этим двум зеркалам расположено частично посеребренное зеркало Z_3 . Оно служит для деления падающего пучка на два пучка равной интенсивности.

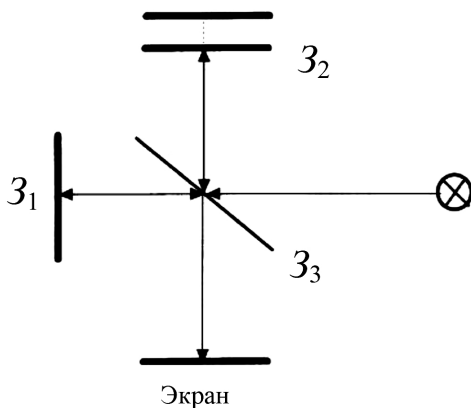


Рис. 4.14.3

Луч света от источника падает на полупрозрачное зеркало Z_3 , находящееся под углом 45° , и разделяется на два луча с одинаковой интенсивностью – один луч проходит через зеркало Z_3 , другой отражается от него. Первый луч после прохождения зеркала Z_3 отражается от зеркала Z_1 и вторично падает на зеркало Z_3 , где снова разделяется на две части. Одна из них отражается в сторону экрана, другая же идет к источнику и не представляет интереса. Другой луч после отражения от зеркала Z_3 отражается от зеркала Z_2 , затем

возвращается к зеркалу Z_3 , где опять разделяется на две части, одна из которых идет на экран. Таким образом, лучи совмещаются и падают на экран, где наблюдается интерференционная картина. Экран расположен перпендикулярно направлению падающих на него лучей. Если складываемые волны являются сферическими (пучок слегка расходящийся), то интерференционная картина имеет вид концентрических колец. Это пример так называемых полос равного наклона.

Расстояния от полупрозрачного зеркала до зеркал называют *плечами интерферометра*. Плечи интерферометра в общем случае не равны друг другу. Оптическая разность хода интерферирующих волн Δ равна удвоенной разности длин плеч. Соответственно, изменение длины любого плеча на $\lambda/2$ (здесь и далее все длины волн – длины волн в вакууме) приводит к изменению оптической разности хода на λ и, соответственно, к смещению интерференционной картины на экране на одну полосу. Таким образом, интерферометр может служить чувствительным прибором для измерения очень малых перемещений или нахождения длин волн.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка для определения длины волны и исследования когерентности представляет собой оптическую скамью с закрепленными на ней источником света, интерферометром Майкельсона и другими оптическими инструментами (рис. 4.14.4). Установка позволяет определить длину волны света и соответствующую длину когерентности.

В качестве источника света выступает ртутная лампа 6 высокого давления, подключенная к источнику питания 7. Свет от лампы проходит через так называемую ирисовую диафрагму 5. Ирисовая диафрагма состоит из нескольких поворотных серповидных лепестков, приводимых в движение кольцом на оправе. При полностью открытой диафрагме лепестки формируют круглое отверстие, при частично закрытой – фигуру, близкую к многоугольнику. Подобные диафрагмы используются в фототехнике для регулирования количества света, проходящего через объектив.

После ирисовой диафрагмы свет проходит через линзу 4 с фокусным расстоянием 20 см и через зеленый фильтр (525 нм), установленный на том же держателе. Далее свет попадает на интерфе-

рометр Майкельсона 3, закрепленный на поворотном держателе 2 и установленный на оптической скамье 1. После прохождения интерферометра свет попадает на экран, расположенный сбоку от оптической скамьи (на рис. 4.14.4 не показан).

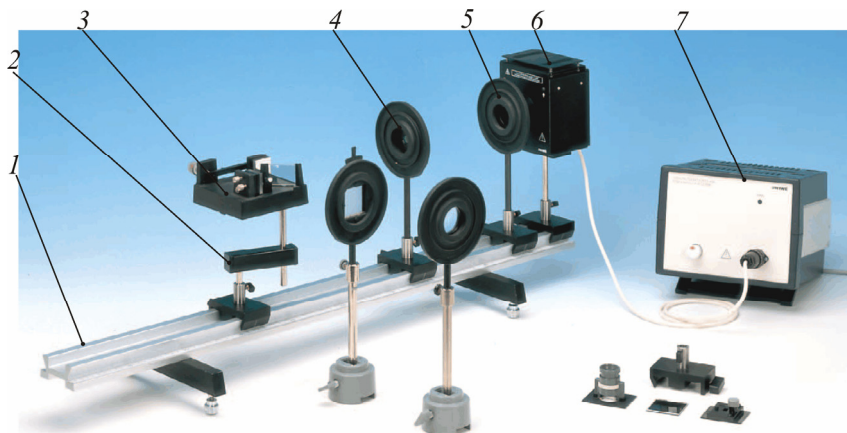


Рис. 4.14.4

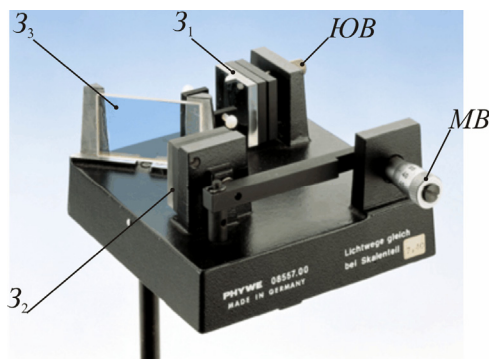


Рис. 4.14.5

Фотография интерферометра Майкельсона отдельно показана на рис. 4.14.5. Зеркало интерферометра 3_1 зафиксировано в одной точке, но с помощью двух юстировочных винтов $ЮВ$ можно менять его наклон в двух направлениях, перпендикулярных друг другу. Зеркало 3_2 можно плавно перемещать с помощью микрометриче-

ского винта MB , не меняя его наклона. Полупрозрачное зеркало Z_3 установлено жестко.

На экране наблюдается *интерферограмма* в виде концентрических колец. В центре интерференционной картины наблюдается темное или светлое пятно, в зависимости от оптической разности хода лучей и сдвигов фаз. Если центр интерферограммы – темный, оптическая разность хода – нечетное число, кратное $\lambda/2$.

При вращении микрометрического винта MB кольца увеличиваются или уменьшаются в диаметре. При этом в центре картины либо возникают новые кольца, либо уменьшающиеся кольца стягиваются в точку и затем исчезают. Смещение картины на одну полосу соответствует перемещению зеркала на половину длины волны.

Микрометрический винт MB имеет две шкалы – основную и шкалу барабана. Основная шкала имеет деления по 0,5 мм. Барабан имеет 50 дел. Таким образом, поворот на одно деление барабана сдвигает барабан на 10 мкм. Однако барабан и зеркало соединены с рычагом так, что их плечи относятся в 10 раз. Поэтому одно деление шкалы барабана соответствует 1 мкм. Значение на микрометрическом винте, при котором разность хода равна нулю, составляет 0,750 мм:

$$(7,5 \text{ мм по основной шкале} + 0 \times 10 \text{ мкм по барабану})/10.$$

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Кнопки включения/выключения источника питания и соединения с другими приборами должны быть легко доступны. Вентиляционные отверстия должны быть открыты. Избегать попадания жидкостей и предметов в вентиляционные отверстия. Комната должна быть сухой. Не использовать источник питания без подключенной ртутной лампы. Не использовать при наличии видимых повреждений прибора или кабелей.

Внутри лампы находится трубка с парами ртути под высоким давлением. Не аккуратное обращение с ней может нанести ущерб здоровью (поражение осколками при возможном взрыве лампы вследствие высокого внутреннего давления при работе). Поэтому не допускается касание частей, находящихся под высоким напряжением.

Интенсивное инфракрасное и ультрафиолетовое излучения могут вызвать покраснение и ожог кожи, также могут повредить глаза.

При работе лампы образуются озон и другие вредные газы и испарения.

Должны быть приняты следующие меры предосторожности.

Не следует работать с лампой очень долго без необходимости. Из-за образования паров помещение должно хорошо вентилироваться, нельзя стоять так, чтобы голова была прямо над вентиляционными отверстиями лампы (вследствие относительно малой мощности лампы вредные выбросы малы).

Избегать попадания лучей света на кожу. Никогда не смотреть внутрь пучка (луча). Экспериментальная установка должна быть устроена так, чтобы никто не мог смотреть внутрь пучка света.

Следует иметь в виду, что лампа – горячая.

При наличии видимых повреждений не включать лампу.

После включения лампы ее не следует выключать в течение 15 мин. После выключения лампы ее не следует включать в течение 15 мин. Если лампа не загорается через 20 с после включения, следует ее выключить (признак неисправности). Лампа рассчитана на 100 ч работы. Использование ее после этого времени повышает риск взрыва.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Подготовка установки к измерениям

Включите ртутную лампу. Откройте ирисовую диафрагму примерно наполовину, закрепите ее в держателе для линз и установите перед испускающей трубкой ртутной лампы. Линзу ($f = +20$ см) и зеленый светофильтр разместите на расстоянии 30 см от диафрагмы. Линза и светофильтр должны находиться вместе на втором держателе для диафрагмы. Расстояние между несущей пластиной интерферометра и линзой должно составлять примерно 16 см. Экран, на который проецируется изображение, расположите перпендикулярно направлению падающего луча. На экране должны появиться два круглых изображения (зеленых пятен). Экран нужно расположить на таком расстоянии от интерферометра, чтобы линейные размеры изображений были порядка нескольких сантиметров (расстояние должно быть, по возможности, большим, порядка нескольких десятков сантиметров).

Зеркало Z_2 нужно поставить в положение, указанное на интерферометре (в этом случае оптическая разность хода для интерферирующих лучей равна нулю, см. также раздел «Описание установки»). Совместите оба изображения при помощи двух юстировочных винтов, расположенных на зеркале Z_1 и меняющих его наклон. Для появления интерференционных колец нужно совместить изображения с очень большой точностью. Даже при визуальном полном совмещении пятен кольца могут не наблюдаться, в этом случае нужно очень плавно крутить юстировочные винты на зеркале Z_1 для нахождения такого положения зеркала, при котором кольца будут наблюдаться. В случае сложностей с получением интерференционных колец позвать преподавателя или сотрудника лаборатории.

Задание 2. Определение длины волны зеленой линии спектра ртути

Вращение микрометрического винта приводит к перемещению зеркала и появлению (исчезновению) колец. Медленно изменяя положение зеркала в таком диапазоне, при котором качество интерференционной картины позволяет следить за появлением (исчезновением) колец, посчитайте количество появившихся (исчезнувших) колец. Прodelайте несколько раз (не менее пяти) для различных диапазонов изменения положения зеркала, в том числе рекомендуется сделать измерения, при которых зеркало проходит через точку, в которой оптическая разность хода равна нулю. Можно следить как за появлением светлых колец, так и за появлением темных колец.

При прохождении одного деления шкалы на экране появляется несколько колец, поэтому рекомендуется прекращать вращение и останавливать подсчет колец тогда, когда указатель на шкале находится близко к делению шкалы. В силу этих же причин необходимо подсчитывать как можно большее количество появившихся полос, для увеличения точности измерений. Если работу выполняют два студента, то один из них должен крутить микрометрический винт, другой – считать появление светлых (темных) колец.

Полученные результаты занесите в табл. 4.14.1. Обозначения в таблице: N – номер измерения; d_1 – начальный отсчет по микрометрическому винту; d_2 – конечный отсчет по микрометрическому винту; $D = |d_1 - d_2|$ – смещение зеркала; n – количество появившихся

светлых или темных колец (нужно считать или только светлые, или только темные полосы).

Таблица 4.14.1

N	d_1 , мкм	d_2 , мкм	D , мкм	n , шт.	λ_N , мкм	λ , мкм	$\Delta\lambda$ разб, мкм
1							
2							
...							

Задание 3. Исследование когерентности и определение ширины линии спектра

Установите зеркало в положение, при котором разность хода равна нулю. Поворачивая микрометрический винт в обе стороны от этого положения, определите положение зеркала, при котором интерференционные кольца полностью исчезают. Сделайте несколько измерений смещения зеркала (не менее трех). Удвоенное смещение зеркала дает значение длины когерентности: L_1 , L_2 , При изменении положения зеркала интерференционная картина как целое медленно сдвигается (это происходит при недостаточно хорошей юстировке установки). Необходимо не путать смазывание картины из-за ухода ее в плохо наблюдаемую область с исчезновением полос.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Длина волны света рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{2D}{n}. \quad (4.14.10)$$

Погрешность интерферометров определяется точностью измерения перемещения зеркала. Однако в данной лабораторной работе такая точность недостижима вследствие невысокого качества наблюдаемой интерференционной картины. Во-первых, не удастся использовать большую часть диапазона изменения положения зеркала и, соответственно, получить большие значения n . Во-вторых, подсчет появившихся или исчезнувших полос визуально сложен, что приводит к неточности измерения n . Поэтому разброс значений

длины волны света (случайная погрешность) в данной работе получается значительно больше, чем ошибка, обусловленная приборной погрешностью микрометрического винта. Поэтому рекомендуется рассчитать значение длины волны λ_N для каждого проделанного измерения, далее рассчитать среднее значение длины волны λ , и погрешность разброса $\Delta\lambda_{\text{разб}}$. Результаты расчетов занести в табл. 4.14.1.

Длина когерентности $L_{\text{ког}}$ оценивается как среднее полученных в задании 3 значений. Время когерентности τ оценивается по формуле (4.14.9). Значение ширины линии спектра $\Delta\lambda$ оценивается по формуле (см. формулу (4.14.8)):

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{L_{\text{ког}}}, \quad (4.14.11)$$

где используются значения длины волны λ и длины когерентности $L_{\text{ког}}$, полученные ранее.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Величины, представляемые как результат работы:

- 1) длина волны зеленой линии спектра ртути с погрешностью (полученное значение нужно сравнить с табличным: $\lambda = 546 \text{ нм}$);
- 2) длина когерентности (оценка);
- 3) время когерентности (оценка);
- 4) ширина линии спектра (оценка).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется интерференцией?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Почему нельзя получить интерференцию с помощью двух независимых естественных источников света?
4. Что такое порядок интерференции?
5. Что такое временная когерентность?
6. Что такое длина когерентности? Что такое время когерентности?
7. Описать принципиальную схему интерферометра Майкельсона.

8. Какой вид может иметь интерференционная картина при использовании интерферометра Майкельсона?

9. Каким образом можно с помощью интерферометра измерить длину волны света?

10. Объяснить, как в данной работе с помощью микрометрического винта производить отсчет. Объяснить, как достигается точность измерений микрометрическим винтом и чему она равна.

11. Каким образом в данной работе находится длина когерентности?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика. М.: АСТ, Астрель, 2008.

2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: Бинном. Лаборатория знаний, 2010.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 4. Оптика. 3-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2005.

2. Ландсберг Г.С. Оптика. 6-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2003.

3. Физическая энциклопедия. М.: Большая российская энциклопедия, 1988–1998.

Работа 4.15

ДИФРАКЦИЯ НА ЩЕЛИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Цель: наблюдение дифракционной картины Фраунгофера на одиночной щели; измерение распределения интенсивности света в дифракционной картине; ознакомление с принципом неопределенности Гейзенберга.

Оборудование: He-Ne лазер; универсальный измерительный усилитель; оптическая скамья; держатель объектов с дополнительными экранами; диафрагмы; фотоэлемент; цифровой мультиметр.

ВВЕДЕНИЕ

Дифракция Фраунгофера на щели. Когда параллельный, монохромный и когерентный луч длиной волны λ проходит через одиночную щель шириной d , на экране появляется дифракционная картина с основным максимумом и несколькими вторичными максимумами (рис. 4.15.1).

Согласно формуле Кирхгофа для комплексной амплитуды:

$$E(P) = \int_S K \frac{e^{ikR}}{R} E(S) dS, \quad (4.15.1)$$

где S – область, ограниченная контуром отверстия; R – расстояние от точки интегрирования в области S до точки наблюдения P ; K – плавная функция угла дифракции. При дифракции Фраунгофера, которая наблюдается при выполнении условия

$$\frac{d^2}{\lambda b} \ll 1, \quad (4.15.2)$$

зависимость интенсивности от угла дифракции α описывается как

$$I(\alpha) = I(0) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha} \right)^2, \quad (4.15.3)$$

где $I(0)$ – интенсивность в центре дифракционной картины.

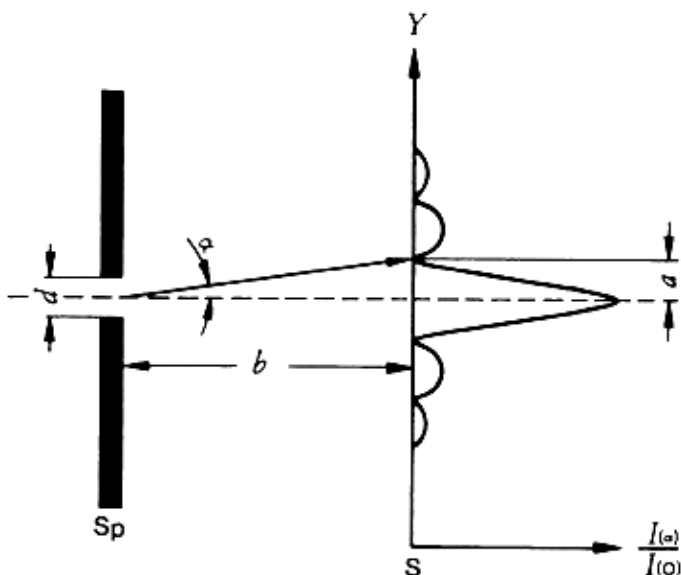


Рис. 4.15.1

Минимумы интенсивности возникают, если

$$\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha = n\pi; \quad n = 1, 2, \dots$$

Минимумы интенсивности находятся в точках

$$\alpha_n = \arcsin \frac{n\lambda}{d},$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$

Максимумы интенсивности возникают при

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)=\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha .$$

Таким образом, получаем первый максимум для $\alpha = 0$. Следующие максимумы возникают, если аргумент тангенса принимает значения: $1,43\pi$; $2,459\pi$; $3,47\pi$; $4,479\pi$;

Соответственно, углы, в направлении которых наблюдаются максимумы интенсивности:

$$\alpha'_0 = 0;$$

$$\alpha'_2 = \arcsin 1,430 \cdot \frac{\lambda}{d};$$

$$\alpha'_2 = \arcsin 2,459 \cdot \frac{\lambda}{d}.$$

Относительные величины этих максимумов интенсивности:

$$I(\alpha'_1) = 0,0472 \cdot I(0);$$

$$I(\alpha'_2) = 0,0165 \cdot I(0).$$

Квантовая механика. Эксперименты, проведенные в XIX в., подтвердили основные положения дифракционной теории распространения света. В начале XX в. были получены экспериментальные данные, из которых следовало, что массивные микрочастицы обладают волновыми свойствами. В частности, электроны, проходя препятствия, испытывают дифракцию как электромагнитные волны. Ограничение размера отверстия или щели приводит к тому, что после прохождения препятствия микрочастице уже нельзя приписать определенного направления вектора импульса – возникает неопределенность. В случае электромагнитной волны эта неопределенность проявляется в распределении интенсивности света на экране, установленном за препятствием.

Неопределенность Гейзенберга заключается в том, что две такие канонически сопряженные величины, как координата и импульс, не могут быть точно определены одновременно.

Рассмотрим, например, совокупность фотонов (квантов света), координаты которых описываются функцией распределения веро-

ятности $f(y)$, а импульсы – функцией $g(p)$. Неопределенности координаты y и импульса p определяются соотношением

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi}, \quad (4.15.4)$$

где $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка (квант действия).

Для потока фотонов, проходящих сквозь щель шириной d , неопределенность координаты y не превосходит размер щели:

$$\Delta y \approx d. \quad (4.15.5)$$

Поскольку фотоны y щели движутся только перпендикулярно плоскости щели (по оси x), после прохождения щели они могут двигаться и по оси y .

Плотность вероятности для компоненты скорости v_y находится из интенсивности распределения в картине интерференции. Для определения неопределенности скорости в данном эксперименте используют первый минимум (рис. 4.15.1 и 4.15.2).

$$\Delta v_y = c \cdot \sin \alpha_1, \quad (4.15.6)$$

где α_1 – угол первого минимума; c – скорость света.

Следовательно, неопределенность импульса равна:

$$\Delta p_y = p \cdot \sin \alpha_1. \quad (4.15.7)$$

Отношение между длиной волны частицы и импульсом описываются формулой де Бройля:

$$\frac{h}{\lambda} = p. \quad (4.15.8)$$

Таким образом,

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha_1. \quad (4.15.9)$$

Геометрия дифракции на одиночной щели показана на рис. 4.15.2, *a* с препятствием на пути луча и на рис. 4.15.2, *б* с компонентом скорости фотона.

Таким образом, угол α_1 первого минимума равен:

$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{d} \quad (4.15.10)$$

согласно выражению (4.15.3).

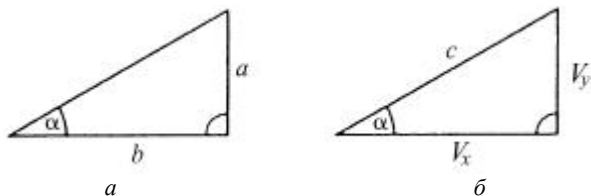


Рис. 4.15.2

Подставив выражение (4.15.10) в выражение (4.15.9) и (4.15.5), получим соотношение неопределенности

$$\Delta y \cdot \Delta p_y = h. \quad (4.15.11)$$

При уменьшении ширины щели d первый минимум дифракционной картины возникает при больших углах α_1 .

В данном эксперименте угол α_1 получили на основе положения первого минимума (см. рис. 4.15.1):

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{a}{b}. \quad (4.15.12)$$

Подставив (4.15.12) в выражение (4.15.9), получим:

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \sin \left(\operatorname{arctg} \frac{a}{b} \right). \quad (4.15.13)$$

Подставив (4.15.5) и (4.15.13) в выражение (4.15.11) и разделив его на h , получим:

$$\frac{d}{\lambda} \sin \left(\operatorname{arctg} \frac{a}{b} \right) = 1. \quad (4.15.14)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 4.15.3 показана экспериментальная установка для изучения интенсивности дифракции на щели.

На оптической скамье 1 установлены рейтеры, на которых закреплены: гелий-неоновый лазер 2 ($\lambda = 632,8$ нм); держатель 3 для дополнительных экранов 4; фотоэлемент 8, на котором имеется экран 7. Фотоэлемент вместе с экраном может перемещаться поперек оптической скамьи с помощью микрометрического винта 9. На-

пряжение на фотоэлементе, пропорциональное интенсивности падающего на его окошко света, подается через универсальный измерительный усилитель 6 на цифровой мультиметр 5.

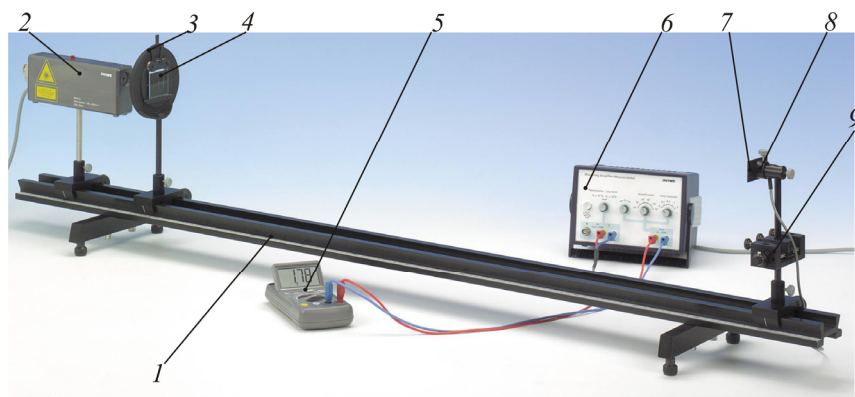


Рис. 4.15.3

На оптической скамье имеется измерительная линейка.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Внимание! Остерегайтесь прямого попадания лазерного пучка в глаза.

При работе с источниками когерентного излучения (лазерами), даже малой интенсивности, требуется неукоснительно соблюдать меры безопасности, исключающие поражение органов зрения. Связано это, прежде всего, с тем, что когерентное излучение может быть достаточно точно сфокусировано в малой области, размеры которой определяются дифракционными эффектами и могут иметь размер порядка длины волны. При попадании луча лазера в глаз может сложиться именно такая ситуация, когда хрусталик глаза фокусирует луч в малой области на сетчатке. В этом случае когерентное излучение даже маломощного лазера может создать в локальной области интенсивности вполне достаточные для разрушения тканей глаза. Поэтому категорически запрещается «заглядывать» в луч лазера, а также вносить в него блестящие или какие-либо зеркально отражающие свет предметы. Даже многократно от-

раженное излучение лазера не теряет свойства когерентности и представляет опасность для глаз.

Установка (в данной работе корпус лазера), питаемая от сети, должна быть заземлена, для исключения опасности поражения электрическим током при нарушении электропрочности изоляции.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Измерение интенсивности распределения в дифракционной картине, полученной от щели

Выведите из лазерного луча экран со щелями. Отъюстируйте установку так, чтобы лазерный луч попадал в центр фотодатчика при нулевых показаниях микрометрического винта.

Расположите на пути лазерного луча различные экраны со щелями (0,1 и 0,4 мм) так, чтобы на фотодатчике наблюдалась отчетливая и максимально яркая дифракционная картина в виде отдельных полосок. Измерьте интенсивность распределения в дифракционной картине при помощи фотоэлемента, находящегося на максимальном расстоянии от щели.

Важно! Чтобы убедиться в том, что интенсивность луча, исходящего из лазера, постоянна, включите лазер за полчаса до начала эксперимента. Измерения проводите в затемненной комнате или при постоянном дневном свете.

Запишите ширину щели d . Измерьте на оптической скамье координаты рейтеров с щелью и с датчиком, вычислите расстояние b между ними.

Цена одного деления микрометрического винта на барабанном отсчетном устройстве 0,005 мм. Цена деления микрометрического винта в окне 0,5 мм. Одно деление в окне соответствует 100 дел. на барабане. В данной работе достаточно использовать отсчеты по показаниям в окне. Рекомендуется шаг в 1 дел. Барабан имеет 20 дел., которые соответствуют перемещению датчика на 10 мм. Из-за возможного люфта перемещать датчик при проведении измерений с одной щелью рекомендуется в одном направлении. При измерениях возможны флуктуации показаний мультиметра. Поэтому рекомендуется для каждой точки заготовить четыре колонки в таблице для интенсивности: минимальное, максимальное, среднее и теоретическое значения. Также в таблице следует предусмотреть поле

для вычисления погрешности $\Delta I = \sqrt{\Delta I_1^2 + \Delta I_2^2}$, в которую могут давать вклад как приборная погрешность ΔI_1 , так и случайная погрешность ΔI_2 (табл. 4.15.1).

Измерения проводить так, чтобы были данные для пяти дифракционных максимумов и четырех дифракционных минимумов (как на рис. 4.15.1).

Таблица 4.15.1

N	y , дел.	y , мм	I_1	I_2	$I_{\text{ср}}$	$I_{\text{теор}}$	ΔI
1							
2							
...							

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По результатам выполнения задания 1 определить угловую ширину центрального дифракционного максимума и проверить выполнение соотношения неопределенностей Гейзенберга.

Вычислить теоретическую зависимость интенсивности от координаты, которую нормировать на максимальное значение интенсивности, полученное экспериментально при заданной ширине щели. Теоретические значения поместить в табл. 4.15.1.

Построить графики экспериментальной и теоретической зависимости интенсивности от координаты (на одном листе строятся обе кривые для одной щели).

Проверить для всех щелей выполнение критерия применимости приближения дифракции Фраунгофера (4.15.2).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Величины, представляемые как результат работы:
 ширина центрального дифракционного максимума;
 произведение неопределенностей координаты и соответствующей проекции импульса фотона;
 графики теоретической и экспериментальной зависимости интенсивности от координаты датчика;

результаты проверки применимости в работе приближения дифракции Фраунгофера.

По графикам с учетом погрешностей проверить выполнение для пиков максимумов интенсивности теоретических соотношений $I(\alpha_1) = 0,0472 \cdot I(0)$ и $I(\alpha_2) = 0,0165 \cdot I(0)$, а также выполнение соотношения (4.15.14) для обеих щелей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При каком типе дифракции справедлива формула (4.15.3)?
2. Сформулируйте соотношение неопределенностей Гейзенберга.
3. Каким соотношением связаны длина волны и импульс фотона?
4. Каким соотношением связаны длина волны и импульс массивной частицы?
5. При каких значениях углов дифракции наблюдается минимумы интенсивности?
6. При каких значениях углов дифракции наблюдаются максимумы дифракции?
7. Что такое формула Кирхгофа?
8. Во сколько раз интенсивность первого дифракционного максимума при дифракции от щели меньше, чем интенсивность центрального дифракционного максимума?
9. Во сколько раз интенсивность второго дифракционного максимума при дифракции от щели меньше, чем интенсивность центрального дифракционного максимума?
10. Какой источник света применяется в работе?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. М.: Астрель, АСТ, 2009.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 5. М.: Астрель, АСТ, 2009.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 4. Оптика. 3-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2005.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 5. Оптика. 3-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2005.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. 6-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2003.

Работа 4.16

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА КРОМКЕ И ЩЕЛИ

Цель: наблюдение дифракционных картин Фраунгофера и Френеля; измерение распределения интенсивности света в дифракционных картинах от щели и кромки.

Оборудование: He-Ne лазер; универсальный измерительный усилитель; оптическая скамья; держатель объектов с дополнительными экранами; диафрагмы и линзы; фотоэлемент; цифровой мультиметр.

ВВЕДЕНИЕ

Если свет с длиной волны λ падает на щель шириной b , каждая точка щели служит начальной точкой новой сферической волны. В результате интерференции этих новых волн на экране за щелью на расстоянии S формируется дифракционная картина.

Если рассматривать дифракцию плоской волны в приближении Фраунгофера ($b^2 / (\lambda S) \ll 1$), то интенсивность в точке P на экране равна:

$$I = I(0) \cdot \left(\frac{\sin \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta} \right)^2, \quad (4.16.1)$$

где $I(0)$ – интенсивность в центре дифракционной картины. На рис. 4.16.1 показана зависимость интенсивности $I(x)$ в дифракционной картине при дифракции на щели от положения вдоль прямой x , проходящей параллельно плоскости щели. I_0 – интенсивность в отсутствии экрана с щелью.

Максимумы интенсивности (4.16.1) возникают при выполнении условия

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \right) = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta.$$

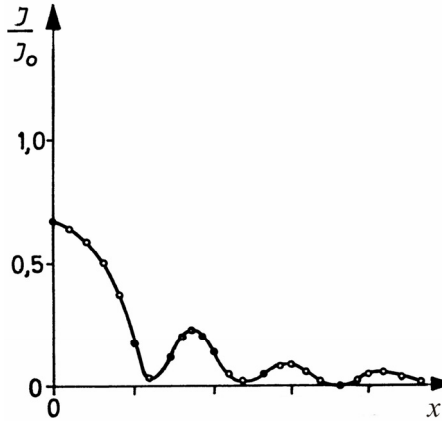


Рис. 4.16.1

Таким образом, получаем центральный максимум для $\theta = 0$. Следующие максимумы возникают, если аргумент тангенса принимает значения: $1,43\pi$; $2,459\pi$; $3,47\pi$; $4,479\pi$; Вместо этих значений можно в вычислениях использовать приближенные значения, которые соответствуют максимуму числителя в (4.16.1): $1,5\pi$; $2,5\pi$; $3,5\pi$; $4,5\pi$. Такая замена приводит к следующим выражениям, связывающим положения максимумов и размер щели:

$$b = \frac{2m+1}{2 \sin \theta_m} \cdot \lambda, \quad (4.16.2)$$

где $\sin \theta_m = \frac{x_m}{\sqrt{x_m^2 + S^2}}$; m – порядок максимума от центра; x_m – расстояние до m -го максимума ($m = \pm 1, \pm 3, \dots$); S – расстояние от щели до экрана (рис. 4.16.2).

Минимумы интенсивности возникают, если

$$\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta = n\pi, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

При $a \gg x$ минимумы примерно находятся в точках с координатами

$$x = n \frac{S\lambda}{b}.$$

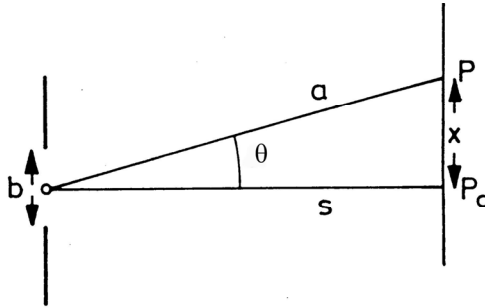


Рис. 4.16.2

Если условие наблюдения дифракции Фраунгофера не выполняется ($b^2 / (\lambda S) \sim 1$), то распределение интенсивности в дифракционной картине определяется в приближении Френеля. Такая ситуация реализуется, в частности, при дифракции сферической волны на кромке (крае полуплоскости).

Выберем начало координат в точке пересечения плоскости кромки с соединительной линией PQ между точечным источником света Q и точкой наблюдения P , ось Oy параллельно краю полуплоскости, а ось Ox перпендикулярно ей (рис. 4.16.3). Распределение интенсивности дифракционной картины в точке P при малых углах δ будет определяться формулой

$$I = \frac{I_0}{2} \left(\left(\xi(V) + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\eta(V) + \frac{1}{2} \right)^2 \right). \quad (4.16.3)$$

Используя обозначения рис. 4.16.3, запишем значения величин в выражении (4.16.3)

$$V = x \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)}. \quad (4.16.4)$$

Здесь x – расстояние от кромки до точки пересечения плоскости экрана с прямой PQ . ξ и η являются интегралами Френеля, которые определяются как

$$\xi(V) = \int_0^V \cos \left(\frac{\pi}{2} u^2 \right) du \quad \text{и} \quad \eta(V) = \int_0^V \sin \left(\frac{\pi}{2} u^2 \right) du. \quad (4.16.5)$$

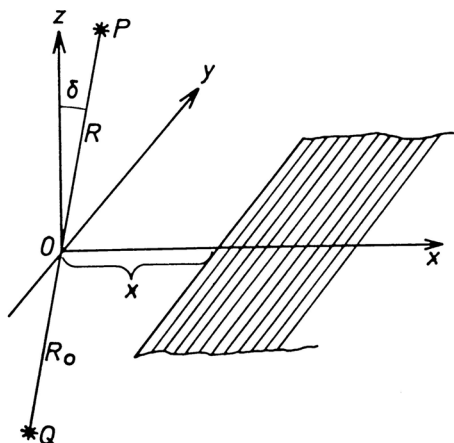


Рис. 4.16.3

Величина V – алгебраическая, принимающая как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от знака координаты края полуплоскости x . Формулы (4.16.5) в параметрическом виде задают спираль Корню.

Интенсивность в области геометрической тени постоянно снижается. На освещенной стороне она имеет минимумы и максимумы. Величина I_0 равна интенсивности в отсутствие преград, так как

$$\lim_{V \rightarrow \infty} \xi(V) = \lim_{V \rightarrow \infty} \eta(V) = \frac{1}{2}.$$

На рис. 4.16.4 показана зависимость интенсивности $I(x)$ в дифракционной картине при дифракции на кромке от положения вдоль прямой x , проходящей перпендикулярно кромке. I_0 – интенсивность в отсутствии кромки.

Если излучение от точечного источника проходит через щель шириной b , то условием дифракции Фраунгофера будет выполнение соотношения

$$b^2 / (\lambda S) \ll 1,$$

где

$$1/S = 1/R + 1/R_0.$$

В этом случае справедлива формула (4.16.1).

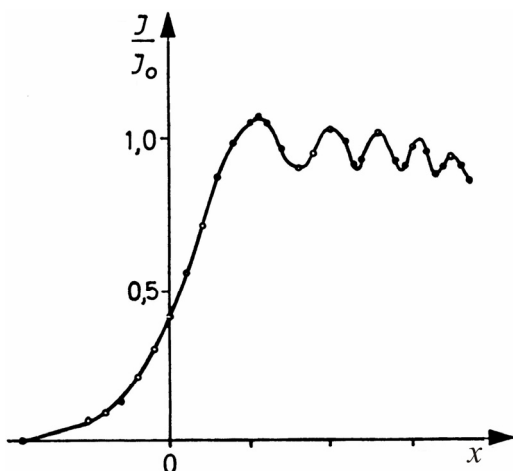


Рис. 4.16.4

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка для изучения дифракции света на щели и кромке показана на рис. 4.16.5.



Рис. 4.16.5

В качестве источника излучения используется гелий-неоновый лазер 1 ($\lambda = 632,8$ нм); рядом с которым ставится линза, держатель 3 для с дополнительными экранами; вдоль линейки 4 передвигается на рейтере фотоэлемент 5. Напряжение на фотоэлементе, пропор-

циональное интенсивности падающего на его окошко света, подается на цифровой мультиметр 6 через универсальный измерительный усилитель 7. В работе также используется рулетка для измерения расстояния между элементами 1, 2, 3 и 4 (5).

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Внимание! При работе с данной установкой недопустимо ориентировать лазер так, чтобы его излучение попадало напрямую на человека. Остерегайтесь прямого попадания лазерного пучка в глаза.

При работе с источниками когерентного излучения (лазерами) даже малой интенсивности требуется неукоснительно соблюдать меры безопасности, исключающие поражение органов зрения. Связано это, прежде всего, с тем, что когерентное излучение может быть достаточно точно сфокусировано в малой области, размеры которой определяются дифракционными эффектами и могут иметь размер порядка длины волны. При попадании луча лазера в глаз может сложиться именно такая ситуация, когда хрусталик глаза фокусирует луч в малой области на сетчатке. В этом случае когерентное излучение даже маломощного лазера может создать в локальной области интенсивности вполне достаточные для разрушения тканей глаза. Поэтому категорически запрещается «заглядывать» в луч лазера, а также вносить в него блестящие или какие-либо зеркально отражающие свет предметы. Даже многократно отраженное излучение лазера не теряет свойства когерентности и представляет опасность для глаз.

Установка (в данной работе корпус лазера), питаемая от сети, должна быть заземлена, для исключения опасности поражения электрическим током при нарушении электропрочности изоляции.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Дифракция на щели

1. Соберите экспериментальную установку, как показано на рис. 4.16.5.
2. Линзу 2 уберите. Измерьте рулеткой расстояние $S = R > 3$ м от раздвижной щели 3 до линейки 4 с фотоэлементом 5. Зная расстояние S и длину волны λ , вычислите ширину щели $b_{\max}$, при ко-

торой $b_{\max}^2 / (\lambda S) = 1$. Откройте щель настолько, чтобы ее ширина действительно была в несколько раз меньше, чем рассчитанное значение $b_{\max}$.

3. Для получения дифракции на щели направьте луч лазера симметрично на вертикальные кромки щели. Если ширина дифракционных полос в месте расположения фотоэлемента будет меньше цены деления линейки, то уменьшите ширину щели. Если дифракционные полосы достаточно широки, но имеют маленькую интенсивность, то можно несколько расширить щель.

4. Измерьте по линейке координаты рейтера d_m , $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, при которых в центре фотоэлемента наблюдаются дифракционные максимумы. Запишите эти значения в табл. 4.16.1. Положения центров m -х максимумов дифракционной картины вычислите по формуле

$$x_m = d_m - d_0,$$

где d_0 – координата рейтера, соответствующая центральному дифракционному максимуму.

Таблица 4.16.1

N	m	d_m , мм	x_m , мм	λ , нм	b , мм
1					
2					
...					

По формуле (4.16.2) рассчитайте значение ширины щели для каждого m и занесите в таблицу. Вычислите приборную погрешность Δb , рассчитайте среднее значение ширины щели и величину случайную погрешность ширины щели. Итоговая погрешность определяется формулой: $\Delta b = \sqrt{\Delta b_1^2 + \Delta b_2^2}$, где Δb_1 и Δb_2 – приборная и случайная погрешности.

Задание 2. Дифракция на кромке

1. Для изучения дифракции на кромке расположите рассеивающую линзу с фокусным расстоянием $F = 50$ мм напротив лазе-

ра. Один край щели, которая открыта полностью, служит кромкой. Расстояние между линзой и щелью должно равняться $L_0 = 75$ мм. Линейка, на которой можно перемещать цилиндрическую основу с фотоэлементом под прямыми углами к лазерному лучу, находится на расстоянии $R > 3$ м от источника излучения. При необходимости заново измерьте расстояние R .

Вычислите расстояние от мнимого источника до кромки $R_0 = F + L_0$.

2. Если установка собрана правильно, то полуплоскость закрывает половину светового потока (ось лазерного луча проходит через кромку), а на фотоэлементе наблюдаются дифракционные полосы. Ширина щели должна быть такой, чтобы вторая кромка находилась вне лазерного луча. Передвигая датчик вдоль линейки, измерьте с помощью мультиметра зависимость интенсивности дифрагированной волны I_d от координаты рейтера. Результаты занесите в табл. 4.16.2.

3. Уберите экран со щелью и измерьте зависимость интенсивности падающего на фотоэлемент лазерного излучения I_l при тех же координатах рейтера. Результаты занесите в табл. 4.16.2. Вычислите отношение интенсивностей $I_r = I_d / I_l$.

Таблица 4.16.2

N	x , см	I_d , В	I_l , В	$I_r = I_d / I_l$	ΔI_r
1					
2					
...					...

Определите приблизную погрешность отношения интенсивностей ΔI_r , занести ее в табл. 4.16.2.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Вычислите ширину щели по результатам измерения в задании 1.

2. Постройте распределение интенсивности света при дифракции на кромке.

3. Постройте распределение отношение интенсивности дифрагированного света к интенсивности падающего света $I_r = I_d / I_l$. Сделайте вывод о применимости в данной работе приближений плоской и сферической волн по отношению к излучению лазера.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Величины, представляемые как результат работы:

ширина щели по результатам измерения в задании 1;

график распределения интенсивности света при дифракции на крае полуплоскости;

график распределения относительной интенсивности света $I_r = I_d / I_l$ при дифракции на крае полуплоскости.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие явления исследуются в данной работе?
2. Какой источник света применяется в работе?
3. Зачем в работе используется линза?
4. Как с помощью лазера с известной длиной волны, рулетки и экрана с линейкой определить ширину щели?
5. Что такое интегралы Френеля?
6. Каково положение дифракционных минимумов при дифракции на щели?
7. Каков характер дифракции света с длиной волны $\lambda = 600$ нм на щели шириной $b = 0,1$ мм, если расстояние от щели до экрана составляет 3 м?
8. Каков характер зависимости интенсивности от координаты в области геометрической тени от края полуплоскости?
9. Каков характер зависимости интенсивности от координаты вне геометрической тени от края полуплоскости?
10. Во сколько раз интенсивность первого дифракционного максимума при дифракции от щели меньше, чем интенсивность центрального дифракционного максимума?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. М.: Астрель, АСТ, 2004, 2009.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 4. Оптика. 3-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2005.
2. Оптика. Ландсберг Г.С. 6-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2003.

Работа 4.17

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ НА МНОЖЕСТВЕ ЩЕЛЕЙ И ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ

Цель: изучение явлений интерференции и дифракции света; определение длины волны света когерентного источника; определение ширины щелей.

Оборудование: He-Ne лазер; оптическая скамья; держатель для линз; держатель для дисков; линзы ($f = +20$ мм, $f = +100$ мм); набор диафрагм; дифракционные решетки; фотоэлемент; цифровой мультиметр.

ВВЕДЕНИЕ

Дифракция Фраунгофера на щели. Дифракцией света называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

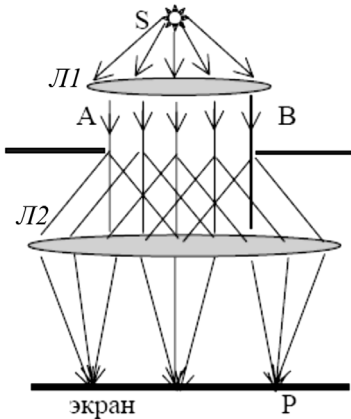


Рис. 4.17.1

Рассмотрим случай дифракции Фраунгофера на щели (рис. 4.17.1). Для наблюдения дифракции возьмем точечный источник света S и поместим его в фокусе собирающей линзы $Л1$. После нее свет пойдет в виде плоской волны и на пути встретит преграду в виде плоскости с бесконечной щелью шириной $AB = b$, расположенную перпендикулярно волне. За преградой дифрагированные лучи попадают на собирающую линзу $Л2$, которая собирает все параллельные лучи в одной точке экрана, расположенного в фокальной плоскости этой линзы. В нашу задачу

входит нахождение распределения интенсивности лучей, попа-

дающих на экран. Для этого используем принцип Гюйгенса–Френеля и его математическое выражение. Рассмотрим некоторую точку экрана P . В ней собираются лучи, вышедшие из различных точек открытого волнового фронта (щели), но все они вышли из щели под одним и тем же углом θ , отсчитанным от перпендикуляра к преграде. Разобьем мысленно эту щель на очень узкие полоски шириной dx , а затем просуммируем векторы напряженности электрического поля волн, пришедших в точку P от этих полосок. Амплитуда напряженности электрического поля в точке P будет пропорциональна площади излучателя, а значит dx .

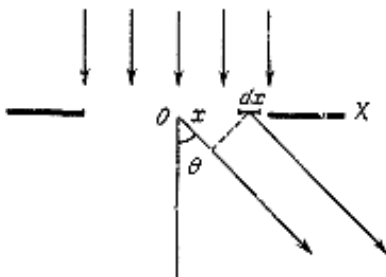


Рис. 4.17.2

Поэтому комплексную амплитуду напряженности электрического поля в точке P запишем так: $dE_m = E_0 e^{i\varphi} \times \frac{dx}{b}$, где φ – фаза колебаний; E_0 – амплитуда напряженности в плоскости щели. Волна, пришедшая из точки с координатой x под углом θ , опережает по фазе волну, пришедшую из точки с координатой $x = 0$ на $\varphi = kx \sin \theta$ (рис. 4.17.2), $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, а λ – длина волны. Найдем амплитуду результирующего электрического поля волны в точке P , используя принцип суперпозиции

$$\operatorname{Re} E_m = \operatorname{Re} \frac{E_0}{b} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} e^{ikx \sin \theta} dx = E_0 \frac{\sin \alpha}{\alpha}, \quad (4.17.1)$$

где $\alpha = \frac{k b \sin \theta}{2} = \frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}$.

Тогда для интенсивности световой волны, попавшей в точку экрана P , получаем следующее выражение:

$$I(\theta) = I_0 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} = I_0 \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda} \right)}{\left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda} \right)^2}. \quad (4.17.2)$$

График этой зависимости изображен на рис. 4.17.3.

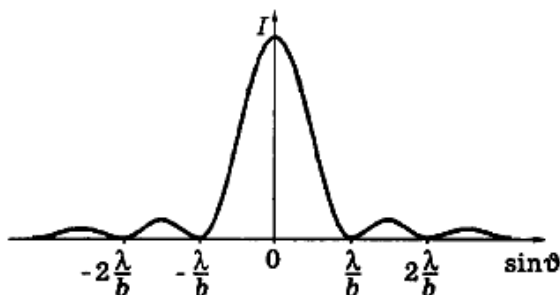


Рис. 4.17.3

Минимумы интенсивности будут наблюдаться в точках, в которых синус будет обращаться в нуль (кроме центральной точки, где расположен центральный максимум): $\alpha = m\pi$, $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$. Расчет дает формулу для минимумов дифракционной картины:

$$b \sin \theta = m\lambda, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.17.3)$$

Для нахождения положения максимумов интенсивности света на экране необходимо вычислить производную от интенсивности и приравнять ее к нулю. В результате расчетов для максимумов интенсивности получается трансцендентное уравнение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \alpha \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda} \right) = \left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda} \right). \quad (4.17.4)$$

Численное решение этого уравнения показывает, что максимумы функции получатся в тех местах, где $\alpha = 2,86\pi/2$; $\alpha = 4,92\pi/2$ и т.д.

Практически можно считать, что максимумы находятся посередине между соседними минимумами. Значения интенсивности в максимумах быстро убывают с увеличением порядка. Их отношения приближенно можно выразить в виде

$$1 : \left[\frac{2}{3\pi} \right]^2 : \left[\frac{2}{5\pi} \right]^2 : \dots \approx 1 : 0,047 : 0,017 : \dots \quad (4.17.5)$$

Дифракция Фраунгофера на множестве щелей. Важное практическое применение имеет явление дифракции Фраунгофера на системе из большого числа одинаковых параллельных щелей, находящихся на равных расстояниях друг от друга.

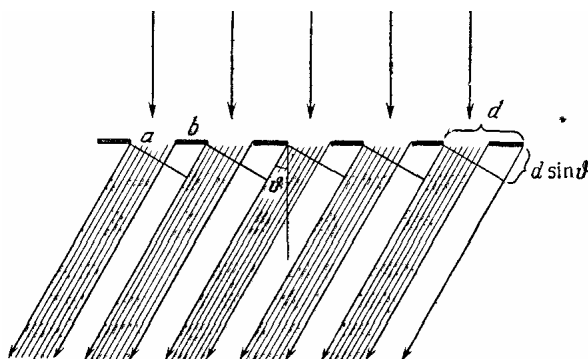


Рис. 4.17.4

Поставим на пути распространения плоской монохроматической световой волны экран, содержащий N одинаковых щелей, расположенных на равных расстояниях d друг от друга (рис. 4.17.4). Рассмотрим случай нормального падения света на экран.

Соседние отверстия создают волны, отличающиеся по фазе постоянную величину

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}, \quad (4.17.6)$$

где $\Delta = d \sin \theta$ – разность хода волн от соседних отверстий.

Амплитуды A_n волн, созданных n -й щелью, образуют геометрическую прогрессию. Вся система отверстий создает колебание с амплитудой:

$$A = \sum_{n=1}^N A_n = A_1 \frac{e^{-iN\delta} - 1}{e^{-i\delta} - 1} = A_1 \cdot e^{-i(N-1)\delta/2} \frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)}, \quad (4.17.7)$$

где A_1 – амплитуда колебаний дифрагировавших на одной щели волн. При получении (4.17.7) использовалась известная формула для суммы конечного числа членов геометрической прогрессии:

$$\sum_{n=1}^N e^{-i(n-1)\delta} = \frac{e^{-iN\delta} - 1}{e^{-i\delta} - 1}.$$

Интенсивность излучения

$$I(\theta) = I_1(\theta) \frac{\sin^2\left(\frac{N\delta}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}. \quad (4.17.8)$$

Здесь $I_1(\theta)$ – интенсивность от одной щели в точке P . В результате интерференции всех N когерентных вторичных волн происходит перераспределение светового потока по направлениям и получается существенно отличающееся от $I_1(\theta)$ распределение интенсивности в френгоферовой дифракционной картине.

С учетом (4.17.2) выражение для интенсивности волны в точке P можно представить в виде

$$I(\theta) = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}\right) \sin^2\left(\frac{N \pi d \sin \theta}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)}. \quad (4.17.9)$$

В тех направлениях θ_m , для которых $\delta/2 = m\pi$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) второй множитель в (4.17.8) принимает значение N^2 , интенсивность в N^2 раз больше, чем от одной щели в том же направлении. Так происходит потому, что разность хода Δ вторичных волн от соседних щелей для этих направлений θ_m равна целому числу m длин волн ($\Delta = m\lambda$) и все они приходят в точку наблюдения в одинаковой фазе. Такие максимумы называются *главными*, а целое число m – *порядком главного максимума*, или *порядком спектра*. Углы θ_m , в направление которых наблюдаются максимумы, определяются из условия

$$d \sin \theta_m = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (4.17.10)$$

Первый множитель $I_1(\theta)$ в (4.17.8), описывающий дифракцию от отдельной щели, сравнительно плавно зависит от θ , поэтому можно считать, что в направлении θ_m будет наблюдаться максимум интенсивности, если только $I_1(\theta_m) \neq 0$ (если данное направление не отвечает минимуму распределения интенсивности от одной щели).

Выражение (4.17.8) для интенсивности дифрагировавшего света обращается в нуль каждый раз, когда $\sin(N\delta/2) = 0$, но $\sin(\delta/2) \neq 0$. В соответствующих таким значениям δ направлениях лежат минимумы, интенсивность света в которых равна нулю. Между ними находятся побочные (или дополнительные) максимумы. Между двумя соседними главными максимумами расположены $N - 1$ минимумов и $N - 2$ побочных максимумов.

Графики второго множителя в формуле (4.17.8), т.е. функции $\frac{\sin^2\left(\frac{N\delta}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}$, приведены на рис. 4.17.5 для нескольких значений N .

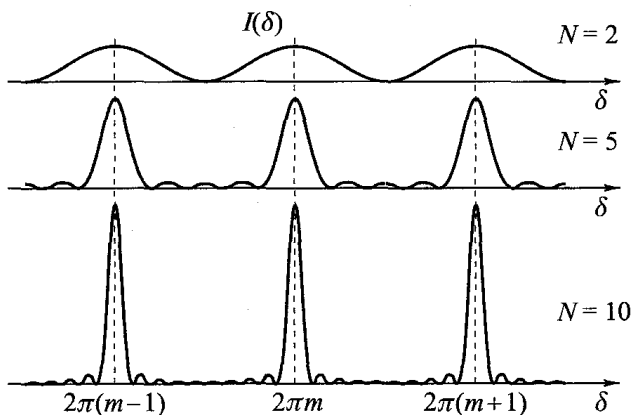


Рис. 4.17.5

Для двойной щели (4.17.8) можно преобразовать к виду

$$I(\theta) = I_1(\theta) \frac{\sin^2\left(\frac{2\delta}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} = 4I_1(\theta) \cos^2 \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}. \quad (4.17.11)$$

На рис. 4.17.6 приведена схема наблюдения дифракции на двух щелях.

При условии, что расстояния L от щелей до экрана много больше расстояния d между щелями и $x \ll L$, $d \sin \theta = \frac{dx}{L}$ и (4.17.11) можно преобразовать к виду

$$I(\theta) = 4I_1(\theta) \cos^2 \frac{\pi dx}{L\lambda}. \quad (4.17.12)$$

Второй сомножитель в (4.17.12) достигает максимума при

$$x = \frac{k\lambda L}{d}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (4.17.13)$$

а первый сомножитель обращается в нуль при

$$x = \frac{m\lambda L}{b} \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4-17.14)$$

Основная энергия дифрагированных волн излучается внутри центрального дифракционного максимума шириной

$$\Delta x = \frac{2\lambda L}{b}. \quad (4.17.15)$$

Поскольку $d > b$, внутри центрального дифракционного максимума помещается несколько интерференционных максимумов шириной

$$\delta x = \frac{L\lambda}{d}. \quad (4.17.16)$$

Интерференционные максимумы могут накладываться на дифракционные минимумы, при этом на экране соответствующие интерференционные максимумы исчезают. На рис. 4.17.6 изображена ситуация с исчезновением интерференционных максимумов с $k = \pm 3$. Если в центральном дифракционном максимуме ширины Δx укла-

дывается p интерференционных максимумов, то из формул (4.17.14) и (4.17.15) следует, что

$$b = \frac{2d}{p}. \quad (4.17.17)$$

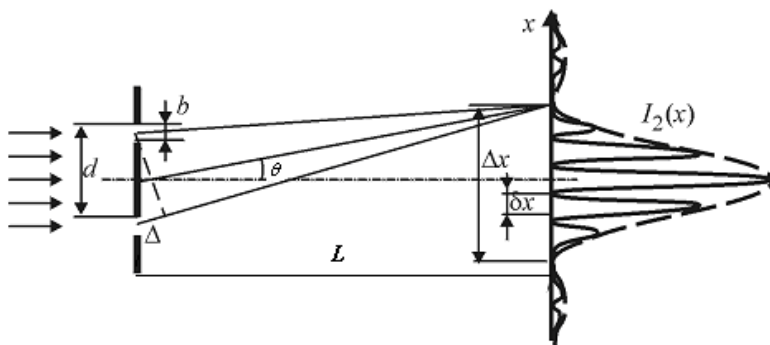


Рис. 4.17.6

В работе формулы (4.17.15)–(4.17.17) используются для определения длины волны света λ , ширины щели b и расстояния между щелями d .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 4.17.7 приведена экспериментальная установка для изучения интенсивности дифракции на множестве щелей и дифракционной решетке.

Основными элементами экспериментальной установки являются: 1 – оптическая скамья, 150 см; 2 – регулируемая основа для оптической скамьи; 3 – держатели для линз; 4 – лазер гелий-неоновый, He – Ne ($\lambda = 632,8$ нм); 5 – линза в оправе, $F = + 20$ мм; 6 – линза в оправе, $F = + 100$ мм; 7 – держатель для объектов; 8 – цифровой мультиметр; 9 – универсальный измерительный усилитель; 10 – фотоэлемент для оптического диска; 11 – микрометрическая подача для измерения относительных перемещений фотоэлемента.

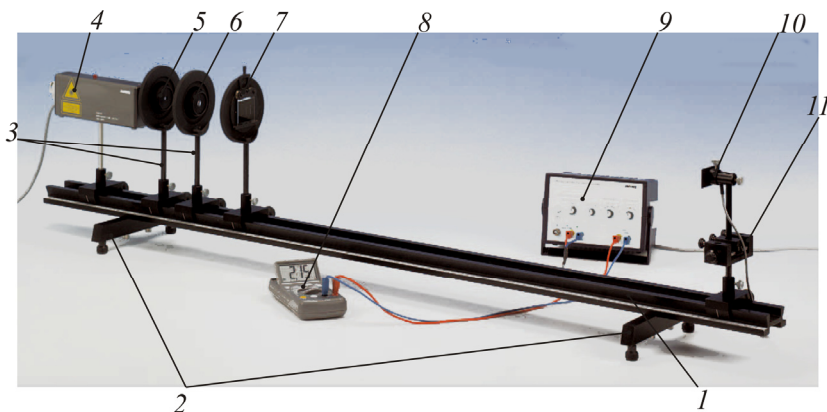


Рис. 4.17.7

На оптической скамье *1* имеется измерительная линейка. Рекомендуемые положения элементов (их координаты) установки следующие: лазер *4* – 2,5 см; линза *5* – 14,5 см; линза *6* – 27,5 см; изучаемые объекты *7* – $z_1 = 33$ см; фотоэлемент *10* – $z_2 = 147,5$ см.

Внимание! Размещение элементов установки на оптической скамье и их юстировка выполняется дежурным сотрудником лаборатории.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 4.17.8.

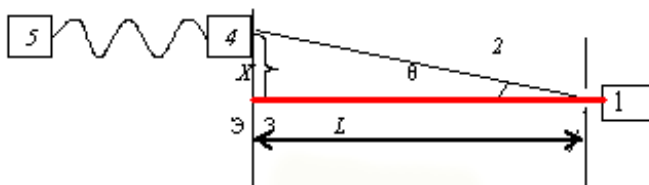


Рис. 4.17.8

В качестве источника света в данной работе используется He-Ne лазер *1*, генерирующий практически плоскую монохроматическую волну в красной области спектра. Световая волна направляется на диафрагму из трех одинарных щелей различной ширины перпендикулярно к ее плоскости. Перемещая диафрагму в горизонтальной плоскости, можно вводить в поле излучения лазера одну из трех щелей. Дифракционная картина наблюдается на экране *3*. В плоскости экрана может перемещаться фотоприемник *4* с маленьким

входным окошком. Сигнал с фотоприемника (в качестве фотоприемника используется фотодиод), пропорциональный средней интенсивности света, прошедшей через входное окошко, измеряется цифровым вольтметром 5 (цифровой мультиметр 10 на рис. 4.17.8).

Две линзы создают плоскую волну, диаметр пучка которой больше диаметра пучка на выходе лазера.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Внимание! Остерегайтесь прямого попадания лазерного пучка в глаза.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Изучение дифракции света на одинарной щели

1. Включить питание лазера 4 (выполняет преподаватель или инженер).

2. Вставьте в держатель для дисков 7 пластинку с тремя одинарными щелями.

3. На пути лазерного излучения поместите одну из одинарных щелей и юстируя ее положение относительно луча лазера, получите на экране отчетливую и устойчивую дифракционную картину, содержащую не менее восьми темных полос. Запишите координаты щели z_1 и экрана (фотоэлемента) z_2 , тогда расстояние L от щели равно: $L = z_2 - z_1$.

4. Перемещая фотоприемник с помощью микрометрического винта 11 с шагом 0,2 мм, определите координаты центрального максимума и минимумов интенсивности различных порядков ($m = 3$ или 4). Измерения повторите три раза. Результаты занесите в табл. 4.17.1.

5. Повторите пп. 3 и 4 для двух других одинарных щелей.

Таблица 4.17.1

№ измерения	Координата центрального дифракционного максимума, x_0	Координата первого минимума, $x_1 (m = 1)$	Координата второго минимума, $x_2 (m = 2)$	Координата третьего минимума, $x_3 (m = 3)$
1				
2				
3				
$\langle x_i \rangle$				

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Для трех порядков вычислите расстояние между минимумом и центральным максимумом по формуле:

$$\Delta x_i = \langle x_i \rangle - \langle x_0 \rangle.$$

2. Постройте график, откладывая по горизонтали номер минимума, а по вертикали Δx_i .

3. По графику определите угловой коэффициент $k = \frac{\Delta x}{m}$.

4. Ширину щели b найдите по формуле:

$$b = \frac{\lambda L}{k}, \quad (4.17.18)$$

где L – расстояние от щели до экрана (фотоэлемента).

Рассчитайте погрешность измерений по формуле: $\Delta b = b \frac{\Delta k}{k}$,

где Δk найдите из графика.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Студент в заключении представляет: график зависимости Δx_i от m ; значение ширины щели b с погрешностью.

Задание 2. Изучение дифракции света на множестве щелей и определение отношения интенсивностей центральных максимумов

1. Вставьте в держатель для объектов пластинку с множественными щелями.

2. Введите в пучок лазера двойную щель. Убедитесь, что она находится в вертикальном положении и равномерно освещена.

3. Получите четкую дифракционную картину.

4. Для двойных щелей измерьте на экране 3 координаты первичных минимумов, ограничивающих центральный дифракционный максимум, и вычислите его ширину Δx .

5. Определите количество p интерференционных максимумов в пределах центрального дифракционного максимума. Зная L и расстояние между щелями $d = 0,25$ мм, определите из формул (4.17.14)–(4.17.16) длину волны λ и ширину щели b .

6. Горизонтальным перемещением объекта со щелями введите в пучок лазера тройную щель.

7. Входное окно фотоэлемента поместите в положение левого минимума центрального дифракционного максимума. Запишите показание микроинтента $x_{\text{лев}}$.

8. Перемещая входное окно фотоэлемента с шагом 0,1 мм вправо снимите распределение интенсивности дифракции от координаты x фотоэлемента (интенсивность пропорциональна напряжению на цифровом мультиметре).

9. Измерения закончите в координате правого минимума центрального дифракционного максимума $x_{\text{прав}}$.

10. Повторите пп. 5–8 для четырех- и пятикратных щелей. (Количество объектов задает преподаватель.)

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. На миллиметровке постройте график зависимости интенсивности дифракции от координаты x фотоэлемента.

2. По графику определите ширину главного максимума δx и по формуле (4.17.16) найдите расстояние между щелями d .

3. Определите погрешность Δd .

Таблица 4.17.2

Интенсивность				Эксперимент	Теория
I_{03}	I_{04}	I_{05}	I_{05}/I_{03}		$(5/3)^2 = 2,78$
			I_{05}/I_{04}		$(5/4)^2 = 1,56$

4. Измерьте значение интенсивностей центральных максимумов для трехкратной I_{03} , четырехкратной I_{04} и пятикратной I_{05} щелей. Занесите эти значения в табл. 4.17.2.

5. Сравните результаты с теорией.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении студент должен представить:

график зависимости интенсивности дифракции от координаты x фотоэлемента;

расстояние между щелями d с погрешностью;

сравнение результатов с теорией.

Задание 3. Изучение просветных дифракционных решеток и определение длины волны излучения лазера

1. Вставьте в держатель для объектов дифракционную решетку 4 линии/мм.
2. Получите отчетливую дифракционную картину на экране фотоэлемента.
3. Установите фотоэлемент в положение главного максимума нулевого порядка и запишите его координату (отметка на микрометрическом винте) x_0 .
4. Затем с помощью микрометрического винта перемещайте входное окошко фотоэлемента в положения главных максимумов, в начале первого порядка, а потом всех остальных, записывая их координаты x_i (отметка на микрометрическом винте). Измерения проводите по обе стороны от центрального максимума.
5. С помощью микрометрического винта переместите входное окошко фотоэлемента в положение главного максимума второго порядка и запишите его координату (отметка на микрометрическом винте) x_2 .
6. С помощью микрометрического винта переместите входное окошко фотоэлемента в положение главного максимума третьего порядка и запишите его координату (отметка на микрометрическом винте) x_3 .
7. Прodelайте эти измерения для двух других решеток (каждое измерение выполнить не менее трех раз).
8. Результаты измерений занесите в табл. 4.17.3.

Таблица 4.17.3

Порядок m	Координаты главных максимумов x_i					
	Число n линий решетки на мм					
	4		10		50	
0						
1						
2						
3						

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Для каждой решетки рассчитайте расстояние от главного максимума нулевого порядка до главных максимумов i -го порядка ($i = 1, 2, 3$) по формуле:

$$\Delta x_i = |x_i - x_0|.$$

2. Постройте графики зависимости величины обратной расстоянию главных максимумов от постоянной решетки для каждого порядка ($m = 1, 2, 3$). По горизонтальной оси отложите значение постоянной решетки d , по вертикальной – $\frac{1}{\Delta x_i}$. Постоянная решет-

ки $d = \frac{1 \text{ мм}}{n}$, где n – число линий на мм.

3. Найдите угловой коэффициент графиков k .

4. Рассчитайте длину волны для каждого графика по формуле

$$\lambda = \frac{1}{kLm}.$$

5. Найдите среднее значение длины волны и ее погрешность. В качестве погрешности измерений возьмите максимальную из погрешности разброса и погрешности, определенной по формуле:

$$\Delta \lambda = \lambda \frac{\Delta k}{k^2}.$$

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении студент должен представить:
графики зависимости величины обратной расстоянию главных максимумов от постоянной решетки для каждого порядка ($m = 1, 2, 3$);
среднее значение длины волны и ее погрешность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление дифракции света? Какой вид дифракции носит название дифракции Фраунгофера?
2. Как изменится дифракционная картина при уменьшении расстояния между щелями d ?
3. Что такое дифракционная решетка?

4. Условия образования максимумов и минимумов в спектре дифракционной решетки?
5. Объясните основные закономерности, наблюдаемые при дифракции Фраунгофера на щели и решетке.
6. Что называется дифракцией света, и при каких условиях она наблюдается?
7. Чему равно предельное число дифракционных порядков, которое можно получить при помощи решетки с периодом d и с шириной щели b ?
8. Как связана ширина (резкость) и интенсивность дифракционных максимумов с числом щелей?
9. Какой вид имеет дифракционная картина в случае дифракции на щели?
10. Какие преимущества у лазера по сравнению с обычными источниками света при наблюдении дифракции?
11. Как изменяется дифракционная картина при увеличении ширины щели?
12. При каком условии в данном эксперименте можно говорить о дифракции Фраунгофера?
13. Чему равняется ширина Δx центрального дифракционного максимума?
14. Каково отношение максимумов интенсивности волн, дифрагированных от двух и от одной щелей, если их ширины одинаковы?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. Волны. Оптика. М.: Астрель, 2003.
2. Калашников Н.П. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа, 2004.

Дополнительная

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа. 1986.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики. М.: Физматлит, 1986.

Работа 4.18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДИФРАКЦИИ НА ОДНОЙ ЩЕЛИ И СИСТЕМАХ ДВОЙНЫХ ЩЕЛЕЙ

Цель: изучение явлений интерференции и дифракции света; определение длины волны света когерентного источника, расстояний между щелями, ширины отдельной щели.

Оборудование: лазер; оптическая скамья; фотоэлемент с усилителем; экраны.

ВВЕДЕНИЕ

Явление дифракции заключается в отклонении от законов геометрической оптики, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями. В частности, при прохождении света через непрозрачную преграду с отверстием вместо резко ограниченного освещенного изображения отверстия на экране при определенных условиях можно получить сложное распределение интенсивности, называемое *дифракционной картиной*. В данной лабораторной работе созданы все условия для наблюдения дифракции. В качестве источника света используется лазер, обладающий высокой степенью временной и пространственной когерентности. Пучок лазерного излучения падает на диафрагму с отверстиями в виде одной или двух щелей, дифрагирует на этих щелях и попадает на экран. Результирующая интенсивность I волны на экране зависит от длины волны λ , ширины щелей b , расстояния между щелями d , а также расстояния от щелей до экрана l (рис. 4.18.1). В работе используются узкие щели с шириной $b^2 \ll \lambda l$, что обеспечивает в опыте наблюдение дифракции Фраунгофера.

Дифракция на одной щели. Распределение интенсивности колебаний электрического поля в волне, дифрагировавшей на одной щели в направлении, составляющем угол φ с нормалью к плоскости экрана (см. рис. 4.18.1), определяется зависимостью:

$$I_1 = I_0 \frac{\sin^2(\pi b \sin \varphi / \lambda)}{(\pi b \sin \varphi / \lambda)^2} = I_0 \frac{\sin^2(\pi b x / (\lambda l))}{(\pi b x / (\lambda l))^2}, \quad (4.18.1)$$

где I_0 – интенсивность света в центре дифракционной картины; x – координата точки на экране, на котором наблюдается и регистрируется интерференционная картина. Здесь мы воспользовались тем фактом, что при малых углах $|\varphi| \ll 1$ можно воспользоваться приближенной формулой $\sin \varphi \approx \varphi \approx x/l$.

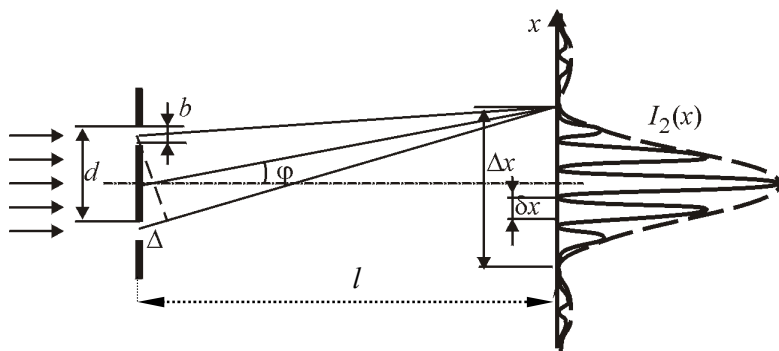


Рис. 4.18.1

Интенсивность на экране, согласно (4.18.1), обращается в нуль, когда числитель (4.18.1) равен нулю, т.е. при $x = m\lambda l/b$, где $m = \pm 1, \pm 2, \dots$, что определяет положение дифракционных минимумов. Большая часть энергии дифрагированных волн излучается внутри центрального дифракционного максимума шириной

$$\Delta x = 2 l \lambda / b. \quad (4.18.2)$$

График зависимости интенсивности света от координаты x на экране, получаемый в данной лабораторной работе, показан пунктирной линией на рис. 4.18.1. На рис. 4.18.1 видно, что центральный максимум вдвое шире других вторичных максимумов и что при увеличении ширины щели вдвое ширина центрального максимума уменьшается вдвое.

Дифракция на двух щелях. В том случае, когда лазерное излучение проходит через две щели, то они являются когерентными источниками монохроматических волн, в результате сложения которых на экране возникает интерференционная картина. Для одинаковых щелей интенсивности дифрагировавших волн равны, тогда интенсивность света, излучаемого двумя щелями в направлении φ , имеет вид

$$I_2 = 2I_1(1 + \cos \delta) = 4I_1 \cos^2 \delta / 2, \quad (4.18.3)$$

где $\delta = 2\pi\Delta/\lambda$ – разность фаз колебаний полей двух волн в определенной точке экрана, а I_1 – интенсивность света от одной щели. Значение δ определяется оптической разностью хода волн Δ , которая при расстоянии между щелями $d \ll l$ вычисляется по формуле (см. рис. 4.18.1):

$$\Delta = d \sin \varphi \approx xd/l. \quad (4.18.4)$$

Подставив в (4.18.3) выражение (4.18.1), с учетом (4.18.4) получим зависимость от координаты x интенсивности света от двух щелей

$$I_2 = 4I_0 \frac{\sin^2(\pi bx/(\lambda l))}{(\pi bx/(\lambda l))^2} \cdot \cos^2(\pi xd/(\lambda l)). \quad (4.18.5)$$

Характерное распределение интенсивностей света от двух щелей $I_2(x)$ можно видеть в правой части рис. 4.18.1. Пунктирной линией проведена огибающая, равная $4 \cdot I_1(x)$, где $I_1(x)$ – интенсивность света от одной щели. Согласно (4.18.5), внутри центрального дифракционного максимума помещается несколько интерференционных максимумов шириной

$$\delta x = l \lambda / d. \quad (4.18.6)$$

Формулы (4.18.2), (4.18.6) используются в настоящей работе для определения ширины щели b и расстояния между щелями d .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 4.18.2 показана экспериментальная установка для изучения интенсивности дифракции на щелях. Оптическая скамья I установлена на регулируемой основе 2 . На оптической скамье I расположены лазер 4 , линза 5 с фокусным расстоянием $f = +20$ мм, линза 6 с фокусным расстоянием $f = +100$ мм, держатель для щелей 7 , микрометрическая подача 11 для измерения относительных перемещений фотоэлемента 10 . Фотоэлемент 10 , генерирующий ЭДС, пропорциональную интенсивности падающей на него световой волны, соединен с усилителем 9 и цифровым мультиметром 8 . Линзы 5 и 6 закреплены в держателях линз 3 .

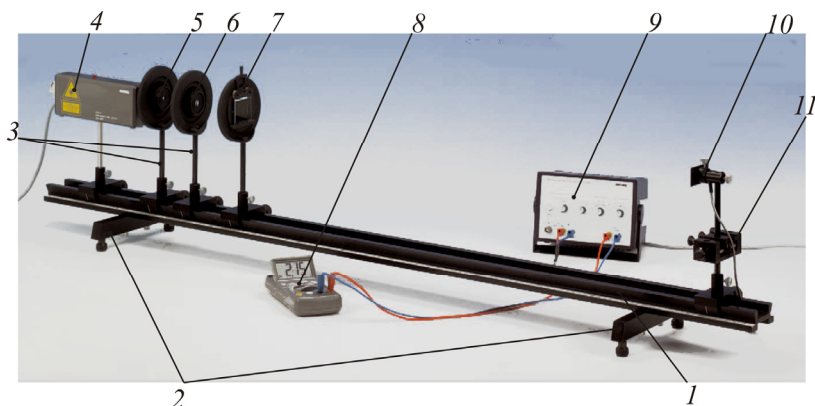


Рис. 4.18.2

Внимание! Запрещается прикасаться пальцами к оптическим поверхностям линз и экранов со щелями. Экраны и линзы необходимо брать только за их оправы.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Внимание! Попадание в глаза прямого лазерного пучка опасно для зрения! При работе с лазером его свет можно наблюдать только после отражения от рассеивающих поверхностей.

ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Включите установку в сеть. Лазер включается поворотом ключа, расположенного в его торце. Убедитесь, что фотоэлемент соединен с усилителем, а последний – с мультиметром. Включив мультиметр, проверьте, что его показания зависят от освещенности его щели. Прогрейте лазер около 15 мин.

2. При помощи линз сформируйте параллельный пучок лазерного излучения. Для этого установите линзу 5 около лазера, а линзу 6 на расстоянии, приблизительно равном 120 мм (сумма фокусных расстояний обеих линз) от линзы 5, таким образом, чтобы на выходе из 6 образовался параллельный пучок лазерного излучения шириной в несколько миллиметров. Все элементы оптической системы должны быть установлены так, чтобы пучок был параллелен

оптической скамье. Убедитесь с помощью листа белой бумаги, что диаметр пучка не меняется при перемещении листа вдоль скамьи.

3. Убедитесь, что экран фотоэлемента 10 перпендикулярен оптической скамье и хорошо закреплен таким образом, что параллельный пучок лазерного излучения падает на него. Также проверьте, что с экрана фотоэлемента снята специальная заслонка с треугольным вырезом, частично закрывающая щель. Щель должна быть полностью открыта.

4. Разместите держатель для щелей 7 между линзой 6 и экраном фотоэлемента 10. Установите в держатель 7 экран с двойными щелями и добейтесь такой ширины параллельного пучка лазерного излучения, чтобы обе щели были равномерно освещены им.

5. Далее настройте установку так, чтобы на экране фотоэлемента появилась горизонтальная картина дифракции от щели (для лучшего наблюдения картины можно использовать лист белой бумаги). Убедитесь также, что картина попадает в щель фотоэлемента.

6. Определите по шкале оптической скамьи координаты всех элементов оптической системы и запишите их в лабораторный журнал. В дальнейшем, при проведении работы перемещать элементы на оптической скамье запрещается.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Измерение интенсивности света при дифракции на одной щели

1. Поставьте в держатель 7 экран с одинарными щелями и введите в пучок лазерного излучения щель шириной $b = 0,1$ мм. Убедитесь, что на экране фотодатчика 10 возникает дифракционная картина, которая попадает в щель фотодатчика.

2. Вращая винт микрометрической подачи 11, поместите щель фотодатчика приблизительно в центр дифракционной картины. По показаниям цифрового мультиметра 8 убедитесь, что интенсивность в центре дифракционной картины не «перегружает» фотодатчик. Для этого необходимо перемещать фотодатчик около самой яркой части картины и наблюдать за изменением интенсивности. Если она не меняется, то это означает, что фотодатчик «перегружен» и не может правильно работать в этой области дифракционной картины. В таком случае необходимо одеть на экран фото-

датчика специальную заслонку с треугольным вырезом, которая закрывает собой часть щели. При этом если работа будет выполняться с заслонкой, нужно строго следить за тем, чтобы в процессе выполнения измерений заслонка не меняла своего положения.

3. Снимите зависимость показаний мультиметра I в вольтах, пропорциональных интенсивности в дифракционной картине, от координаты x , измеряемой в делениях по винту микрометрической подачи, так, чтобы в области измерений попал центральный и два боковых пика дифракционной картины, расположенных слева и справа от центрального. При работе с мультиметром выбирайте предел измерений $I_{\max}$ таким образом, чтобы результат содержал как можно больше значащих цифр. После каждого измерения листом бумаги перекрывайте пучок лазера и измеряйте значение фоновой освещенности $I_{\text{фон}}$. При обработке результатов необходимо будет вычесть фоновую освещенность. Результаты занесите в табл. 4.18.1.

Таблица 4.18.1

x , дел	x , мм	I , В	$I_{\max}$, В	$I_{\text{фон}}$, В

Внимание! Во избежание влияния на результат люфта винт микрометрической подачи необходимо вращать только в одну сторону.

Задание 2. Измерение интенсивности света при дифракции на двух щелях

1. Поставьте в держатель 7 экран с двумя щелями и введите в пучок лазерного излучения две щели шириной $b = 0,1$ мм и расстоянием между ними $d = 0,5$ мм. Убедитесь, что обе щели одинаково освещаются падающим плоскопараллельным пучком лазерного излучения. На экране фотодатчика 10 должна получиться горизонтальная дифракционная картина, которая попадает в щель фотодатчика.

2. Вращая винт микрометрической подачи 11, поместите щель фотодатчика приблизительно в центр дифракционной картины.

Глядя на показания цифрового мультиметра δ , убедитесь, что интенсивность в центре дифракционной картины не «перегружает» фотодатчик. В противном случае необходимо одеть на экран фотодатчика специальную заслонку с треугольным вырезом, которая закрывает собой часть щели. При этом если работа будет выполняться с заслонкой, нужно строго следить за тем, чтобы в процессе выполнения измерений заслонка не меняла своего положения.

3. Снимите зависимость показаний мультиметра I в вольтах, пропорциональных интенсивности в дифракционной картине, от координаты x , измеряемой в делениях по винту микрометрической подачи, таким образом, чтобы в области измерений попал весь центральный максимум дифракционной картины от минимума до минимума со всеми содержащимися в нем интерференционными максимумами. При этом нужно выбирать координаты для снятия показаний так часто, чтобы на графике можно было различить каждый интерференционный максимум в пределах центрального пика. Результаты занесите в таблицу, построенную аналогично табл. 4.18.1.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 4.18.1 постройте график зависимости интенсивности дифракционной картины (за вычетом фона) от одной щели от координаты x , отсчитываемой в миллиметрах вдоль экрана. Одному делению на винте микрометрической подачи отвечает 0,5 мм.

2. Определите из графика ширину центрального максимума, а также левого и правого побочного максимума (с погрешностями).

3. Зная длину волны лазерного излучения $\lambda = 632,8$ нм и расстояние от экрана со щелями до экрана фотозлемента (при этом расстояние от оси крепления фотодатчика до экрана фотодатчика $b_1 = 45$ мм), определите из формулы (4.18.2) ширину щели.

4. По результатам задания 2 постройте график зависимости интенсивности в дифракционной картине (за вычетом фона) от двух щелей от координаты x , отсчитываемой в миллиметрах вдоль экрана.

5. Из графика определите число интерференционных полос, расположенных внутри центрального пика, и его ширину. Из этих данных найдите ширину интерференционного максимума (с погрешностью).

6. Зная ширину интерференционного максимума, расстояние от щелей до экрана и длину волны лазера, найдите расстояние между щелями.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении к работе следует представить: графики зависимости интенсивности в дифракционной картине от одной и двух щелей; вычисленную по результатам графиков ширину одинарной щели с погрешностью и расстояние между двойными щелями с погрешностью. Сравните полученные в работе параметры щелей с их табличными значениями.

Табличные значения

Длина волны лазера	$\lambda = 632,8 \text{ нм}$
Расстояние от оси крепления фотодатчика до экрана фотодатчика	$b_1 = 45 \text{ мм}$
Ширина одинарной и двойных щелей	$b = 0,1 \text{ мм}$
Расстояние между двойными щелями	$d = 0,5 \text{ мм}$
Цена деления на винте бегунка	$0,5 \text{ мм}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в данной работе в качестве источника света используется лазер?
2. В чем заключается явление дифракции света?
3. Сформулируйте принцип Гюйгенса–Френеля.
4. При каком условии в данном эксперименте можно говорить о дифракции Фраунгофера?
5. Чему равняется ширина Δx центрального дифракционного максимума?
6. Чему равняется ширина δx интерференционного максимума?
7. Как выглядит картина на экране при дифракции на одной щели и на двух щелях?
8. Сформулируйте условие наблюдения минимумов интенсивности для дифракции Фраунгофера на щели.

9. При каком условии наблюдаются интерференционные максимумы?

10. Почему при снятии измерений винт микрометрической подачи необходимо вращать только в одну сторону?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 4. Волны. Оптика. М.: Наука, Физматлит, 1998.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. М.: Физматлит, Изд-во МФТИ, 2002.

3. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.

Дополнительная

1. Калитеевский Н.С. Волновая оптика. М.: Высшая школа, 1995.

2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.

Работа 4.19

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ НА ЩЕЛИ И ПРОВОЛОКЕ

Цель: исследование дифракционной картины от щели и нити, отверстия и диска, проверка теоремы Бабине.

Оборудование: He-Ne лазер; универсальный измерительный усилитель; оптическая скамья; держатель объектов с дополнительными экранами; дифракционный объект; фотоэлемент; цифровой мультиметр.

ВВЕДЕНИЕ

Дифракция Фраунгофера на одной щели. *Дифракцией* называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. Дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени. Различают два случая дифракции света – дифракцию Френеля и дифракцию Фраунгофера. Характер дифракции зависит от значения безразмерного параметра:

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

где b – размер препятствия; λ – длина световой волны; L – расстояние от препятствия до экрана наблюдения (рис. 4.19.1).

Рассмотрим схему наблюдения дифракции Фраунгофера, представленную на рис. 4.19.2. Плоская монохроматическая волна падает нормально на плоскость, где расположена бесконечно длинная щель шириной b (щель можно считать бесконечно длинной, если ее

длина намного больше ее ширины, так при ширине в 0,01–0,05 мм длина в несколько миллиметров может считаться бесконечной).

Рис. 4.19.1

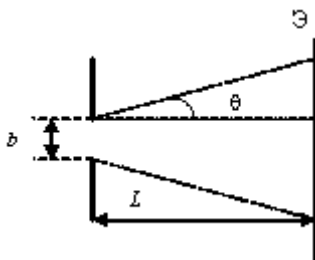
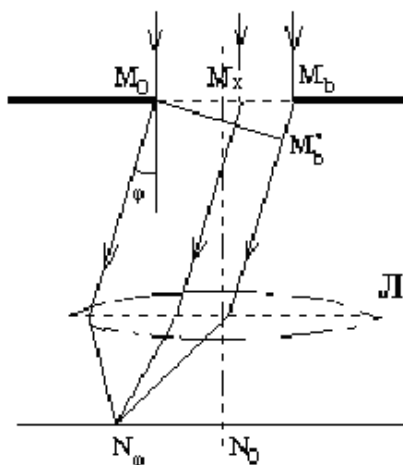


Рис. 4.19.2



За щелью расположена линза L , в фокальной плоскости которой находится экран $\mathcal{E}$. Наличие линзы равносильно тому, что экран расположен как бы на «бесконечном» расстоянии от объекта. Если бы свет распространялся прямолинейно в соответствии с законами геометрической оптики, то в фокальной плоскости линзы получилась бы бесконечно узкая светлая полоса, проходящая через точку N_0 на экране $\mathcal{E}$. Но в соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля каждая точка волнового фронта, достигающего плоскости, где расположена щель, является источником вторичных волн. Тогда лучи, идущие от всех этих вторичных источников под некоторым углом ϕ к первоначальному направлению, образуют плоский волновой фронт и соберутся в фокальной плоскости линзы в точке N_ϕ (см. рис. 4.19.2).

Расчет поля в плоскости экрана проведем непосредственно на основе принципа Гюйгенса–Френеля. Для этого разобьем открытую часть поверхности щели на зоны в виде узких полосок одинаковой ширины dx , параллельных краям щели. Эти элементарные участки становятся источниками вторичных волн. Амплитуды dA_0 этих волн, приходящих в точке N_ϕ на экране от разных полосок, одинаковы, так как все зоны имеют одинаковую площадь и одинаковый к направлению вторичных волн угол ϕ . Эти амплитуды будут пропорциональны произведению амплитуды падающей волны E_0 на размер полоски dx , т.е.

$$dA_0 = CE_0 dx, \quad (4.19.1)$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Однако фазы колебаний, приходящих от различных участков щели, будут различаться. Для определения разности фаз проведем прямую M_0M_b' , перпендикулярную к направлению дифрагированных лучей. Из рис. 4.19.2 видно, что разность хода между волнами, идущими от точки M_0 и от точки M_x , расположенной на расстоянии x от точки M_0 , равна $x \sin \phi$.

Следовательно, если считать, что фаза волны, приходящей в точку N_ϕ из M_0 , равна нулю, то колебание dE_ϕ напряженности электрического поля, приходящее от элемента dx из окрестности точки M_x в N_ϕ , может быть записано в виде

$$dE_\phi = dA_0 \cos(\omega t - kx \sin \phi), \quad (4.19.2)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; ω – частота колебания.

Для вычисления величины E_ϕ в точке N_ϕ необходимо просуммировать вклады от различных участков щели, т.е. проинтегрировать dE_ϕ в пределах от $x = 0$ до $x = b$:

$$\begin{aligned} E(\phi) &= \int_0^b CE_0 \cos(\omega t - kx \sin \phi) dx = \\ &= CE_0 b \frac{\sin\left(\frac{\pi b \sin \phi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \phi}{\lambda}\right)} \times \cos\left(\omega t - \frac{1}{2} kb \sin \phi\right). \end{aligned} \quad (4.19.3)$$

Сомножитель $\cos\left(\omega t - \frac{1}{2}kb \sin \varphi\right)$ в формуле (4.19.3) описывает временное изменение поля в точке наблюдения с частотой ω , а модуль выражения, стоящего перед косинусом, есть амплитуда A_φ результирующей волны в точке N_φ :

$$A_\varphi = CE_0 b \frac{\sin\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)}. \quad (4.19.4)$$

Отметим, что амплитуда волны, распространяющейся в направлении $\varphi = 0$, пропорциональна ширине щели b и равна

$$A_0 = CE_0 b \quad (4.19.5)$$

и выражение (4.19.4) можно переписать в виде

$$A_\varphi = \left| A_0 \frac{\sin\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)} \right|. \quad (4.19.6)$$

Интенсивность света определяется квадратом амплитуды $I \propto |A|^2$, т.е.

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)^2} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2, \quad (4.19.7)$$

где I_0 – интенсивность в центре дифракционной картины.

На рис. 4.19.3 приведен график зависимости интенсивности I_φ от синуса угла дифракции φ .

Интенсивность максимальна для направления $\varphi = 0$, совпадающего с направлением распространения падающей волны. Направления, соответствующие последующим максимумам, можно найти из решения задачи поиска экстремума функции (4.19.6).

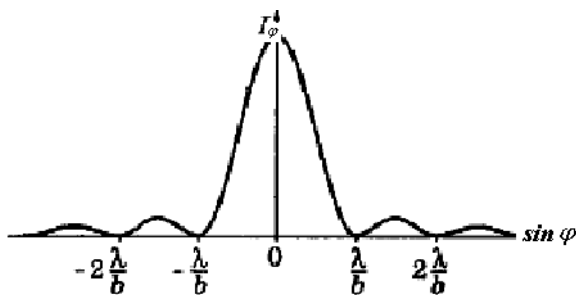


Рис. 4.19.3

Для нахождения положения максимумов интенсивности света на экране необходимо вычислить производную от интенсивности и приравнять ее нулю. В результате расчетов для максимумов интенсивности получается трансцендентное уравнение:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}\right) = \left(\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda}\right) \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} u = u. \quad (4.19.8)$$

Оно решается графоаналитическим путем. Пересечение тангенциальной кривой $\operatorname{tg} u = u$ и прямой $u = x$ даст корни этого трансцендентного уравнения.

Максимумы функции получатся в тех местах, где $u = 2,86\pi/2$; $u = 4,92\pi/2$ и т.д.

Практически можно считать, что максимумы находятся посередине между соседними минимумами. Значения интенсивности в максимумах быстро убывают с увеличением порядка. Их отношения приближенно можно выразить в виде

$$1 : \left[\frac{2}{3\pi}\right]^2 : \left[\frac{2}{5\pi}\right]^2 : \dots \approx 1 : 0,047 : 0,017 : \dots \quad (4.19.9)$$

Тогда как для направлений: $\sin \varphi = \frac{\lambda}{b}, \frac{2\lambda}{b}, \frac{3\lambda}{b}, \dots$, удовлетворяющих уравнению $\sin u = 0$, интенсивность равна нулю. Эти направления соответствуют случаю, когда разность хода между волнами, приходящими от крайних участков щели, равна целому числу длин волн. Это означает, что для любого произвольно выбранного участка щели всегда найдется другой, равный по величине, участок,

излучение от которого придет строго в противофазе с излучением от выбранного участка. Тем самым в результате интерференции интенсивность распространяющегося в этих направлениях излучения будет равна нулю.

Из рис. 4.19.3 видно, что основная часть светового потока сосредоточена в центральной дифракционной полосе, определяемой значениями $\sin \varphi = \pm \lambda/b$ (так называемый центральный максимум), малая его часть будет распространяться в пределах первых (около 5%) и вторых (около 2%) максимумов и т.д. На рис. 4.19.4 показано распределение интенсивности при дифракции Фраунгофера на одной щели: 1 – узкая щель; 2 – широкая щель.

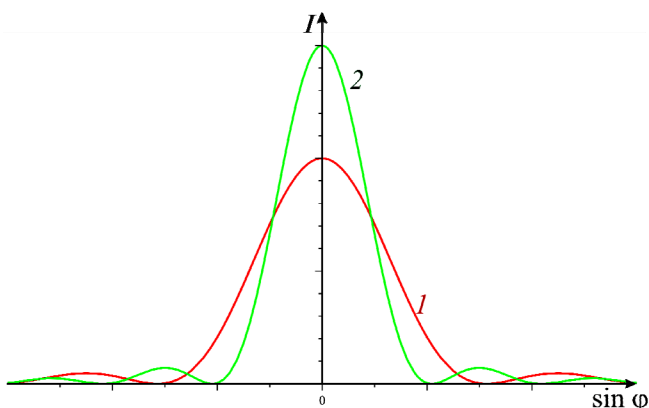


Рис. 4.19.4

Рассмотрим влияние ширины щели на распределение интенсивности дифракционной картины (см. рис. 4.19.3). Увеличение ширины щели приводит к приближению первых минимумов к центру дифракционной картины, при этом высота дифракционного максимума увеличивается (см. рис. 4.19.4, кривая 2). Соотношение интенсивностей света в отдельных максимумах не изменяется, однако увеличивается абсолютное значение интенсивности, связанное с тем, что с ростом ширины щели увеличивается энергия проходящего через нее излучения.

В заключении отметим, что дифракция Фраунгофера может наблюдаться и при падении волны на объект, и при отсутствии линзы.

Дифракция на проволоке. Принцип Бабине. Для нахождения дифракционной картины от проволоки толщиной b (или полосы

шириной b) проведем следующие рассуждения. При расчете дифракционной картины от щели той же ширины b мы искали суммарный вклад от вторичных источников, расположенных на открытой части исследуемого объекта. Для проволоки, наоборот, данная часть объекта будет закрытой, а остальное пространство – открытым. Такие объекты, как бы дополняющие друг друга, носят название *дополнительных экранов*.

Обозначим распределение поля на экране в случае дифракции на щели $U_{\text{щ}}(x')$, а на проволоке – $U_{\text{п}}(x')$, где x' – координата в плоскости экрана. Тогда сумму полей $U_{\text{щ}}(x') + U_{\text{п}}(x')$ можно представить как сумму интегралов по открытым областям для каждого из этих объектов, или как интеграл от суммы открытых областей. Но отверстия для дополнительных объектов располагаются так, что полностью «открывают» весь волновой фронт падающего излучения, следовательно,

$$U_{\text{щ}}(x') + U_{\text{п}}(x') = U_0(x'), \quad (4.19.10)$$

где $U_0(x')$ – волновое возмущение на экране в случае отсутствия какого-либо препятствия. Таким образом, сумма распределений полей от дополнительных объектов равна полю, наблюдаемому на экране при отсутствии препятствия. Полученный результат носит название *принципа*, или *теоремы Бабинне*.

Обратите внимание, что $U_0(x')$ есть волновое возмущение на экране для случая **отсутствия** какого-либо препятствия, а не для случая, когда на пути падающего излучения **одновременно установлены** и щель, и проволока (как нетрудно сообразить, свет через такую совокупность объектов не пройдет). Дело в том, что при рассмотрении принципа Бабинне суммировались вклады именно от открытых областей каждого из объектов, а при рассмотрении случая, когда на пути падающей волны устанавливаются несколько объектов, суммируются, наоборот, закрытые области.

Если в качестве источника плоской волны используется лазер, поперечные размеры пучка которого (обычно не более 1 см) много больше ширины щели b , то на экране в случае отсутствия препятствия будет наблюдаться яркое пятно, а в остальной области экрана поле можно считать равным нулю. Для этой «теневого» области справедливо соотношение

$$U_{\text{щ}}(x') + U_{\text{п}}(x') = 0,$$

следовательно,

$$U_{\text{ш}}(x') = -U_{\text{п}}(x'),$$

а для интенсивностей $I \approx U^2$,

$$I_{\text{ш}}(x') = I_{\text{п}}(x'). \quad (4.19.11)$$

В области основного пятна $I_{\text{п}}(x') \approx I_0(x')$, так как в данной области $U_0(x') \gg U_{\text{ш}}(x')$.

Таким образом, для дополнительных объектов – щели и проволоки одинаковых размеров, распределение интенсивности на экране одинаково всюду, за исключением области, куда попадает исходный пучок в случае отсутствия препятствия. Если толщина проволоки такова, что размер первого дифракционного максимума для щели такой же ширины, как и проволока, превысит размер пучка лазера, то для обоих объектов будут совпадать координаты как всех минимумов, так и всех максимумов дифракционной картины.

Обратим внимание на одно интересное явление. Иногда при дифракции на проволоке, кроме минимумов, соответствующих дифракционным минимумам, наблюдаемым при дифракции на щели такого же размера, можно заметить еще два резких глубоких минимума в тех областях, где сильно уменьшается интенсивность лазерного пучка. Это явление легко объяснить, исходя из принципа Бабинне. В самом деле, в области лазерного пучка справедливо соотношение $U_0(x') \gg U_{\text{ш}}(x')$, а в той области, куда лазерное излучение не попадает, $U_0(x') \approx 0 < U_{\text{ш}}(x')$. Следовательно, существует такая точка x'_0 , в которой $U_0(x'_0) = U_{\text{ш}}(x'_0)$, и, следовательно, $U_{\text{п}}(x'_0) = 0$. Эта точка находится на границе лазерного пучка, а так как интенсивность пучка в этой области обычно падает достаточно резко, то «провал» в интенсивности имеет малую ширину. Так как размеры окна фотодиода, используемого в установке, сравнимы с размером «провала», при регистрации дифракции на проволоке уменьшение интенсивности регистрируется не всегда.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 4.19.5 показана экспериментальная установка для изучения интенсивности дифракции на щелях и дополнительных объектах.

Основными узлами экспериментальной установки являются: 1 – оптическая скамья, 150 см; 2 – лазер, He-Ne ($\lambda = 632,8$ нм); 3 – держатель для дополнительных экранов; 4 – дополнительные экраны, на которых происходит дифракция света; 5 – цифровой мультиметр.

тиметр; 6 – универсальный измерительный усилитель; 7 – экран для наблюдения дифракционных картин; 8 – фотоэлемент; 9 – микрометрическая подача.

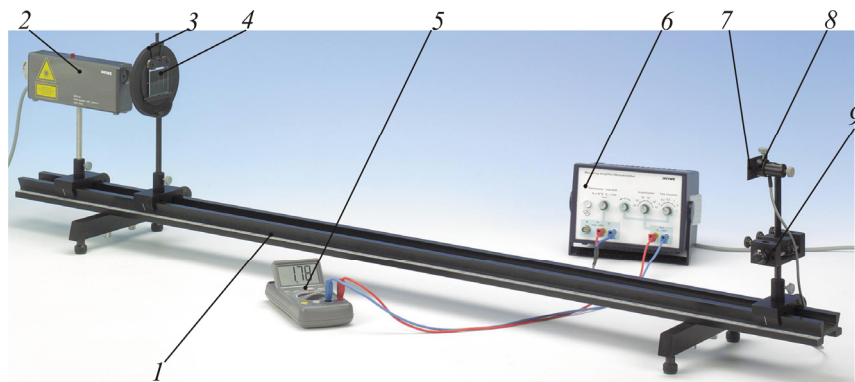


Рис. 4.19.5

На оптической скамье 1 установлены рейтеры, на которых закреплены: гелий-неоновый лазер 2 ($\lambda = 632,8$ нм); держатель для дополнительных экранов 3; фотоэлемент 8, на котором имеется экран 7. Фотоэлемент вместе с экраном могут перемещаться поперек оптической скамьи с помощью микрометрического винта 9. Напряжение на фотоэлементе, пропорциональное интенсивности падающего на его окошко света, подается через универсальный измерительный усилитель 6 на цифровой мультиметр 5.

На оптической скамье имеется измерительная линейка. Положение элементов (их координаты) установки следующее: лазер 2 – 2,5 см; держатель для дополнительных экранов 3 – 4 см; фотоэлемент 8 – 124 см.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 4.19.6.

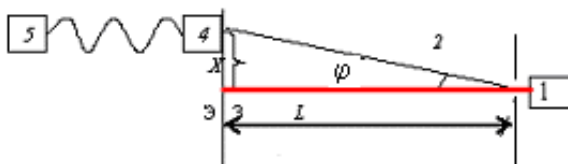


Рис. 4.19.6

В качестве источника света в данной работе используется He-Ne лазер 1, генерирующий практически плоскую монохроматическую волну в красной области спектра. Световая волна направляется на диафрагму, содержащую щели и дополнительные экраны. Перемещая диафрагму в горизонтальной плоскости, можно вводить в поле излучения лазера один из объектов. Дифракционная картина наблюдается на экране 3. В плоскости экрана может перемещаться фотоприемник 4 с маленьким входным окошком. Сигнал с фотоприемника (в качестве фотоприемника используется фотодиод), пропорциональный средней интенсивности света, прошедшей через входное окошко, измеряется цифровым вольтметром 5 (цифровой мультиметр 5 на рис. 4.19.4).

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Внимание! Остерегайтесь прямого попадания лазерного пучка в глаза!

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Изучение дифракции Фраунгофера на одной щели

1. Включите питание лазера (выполняет преподаватель или инженер).
2. Вставьте в держатель для дисков диафрагму из трех одинарных щелей.
3. Введите в световое поле лазера щель.
4. Измерьте на экране расстояние между минимумами m -го порядка слева и справа x'_m и x''_m , начиная с $m = 1$. Данные занесите в табл. 4.19.1 ($x_m = (x'_m + x''_m)/2$).
5. Измерьте расстояние L между щелью и экраном.

Таблица 4.19.1

m	1	2	3	4	5
x'_m , мм					
x''_m , мм					
x_m , мм					

Задание 2. Изучение дифракции на дополнительных экранах. Проверка теоремы Бабинне

Согласно теореме Бабинне, если на пути светового пучка ставить поочередно препятствия и отверстия с одним и тем же сечением, то дифракционные картины вне прямого светового пучка на экране совпадают. Поэтому условия дифракционных минимумов и максимумов для нити и щели (полоски) одинаковые.

1. Введите в световое поле лазера щель.
2. Перемещая фотозащитный элемент с шагом 0,1 мм в горизонтальном направлении с помощью микрометрического винта, снимите распределение интенсивности дифрагированной волны от координаты фотозащитного элемента $I(x)$ и запишите результаты в заранее заготовленную таблицу.
3. Постройте график зависимости $I(x)$ и определите отношение интенсивностей дифракционных максимумов различных порядков. Сравните полученные результаты с теоретическими значениями, вычисленными по формуле (4.19.8).
4. Введите в световое поле лазера полосу, ширина которой равна ширине щели.
5. Повторите пп. 2 и 3.
6. Определите ширину полосы, используя методику, описанную в задании 1.
7. Сравните интенсивности пиков (кроме центрального) щели и полосы и сделайте заключение о согласии полученных результатов с теоремой Бабинне.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Представим $L\lambda$ с учетом $\sin \varphi_m \approx x_m/L$ в виде уравнения прямой линии $x = A + By$:

$$x_m = (L\lambda/b) \cdot m, \quad (4.19.12)$$

где $x = x_m$, $y = m$, а $B = L\lambda/b$.

Постройте график зависимости x_m от m . Из графика определите угловой коэффициент B . Вычислите среднее значение ширины щели $\langle b \rangle = L\lambda/B$, $\lambda = 6,238 \cdot 10^{-4}$ мм.

Оцените параметр дифракции $b^2/(L\lambda)$ и сравните с единицей (см. (4.19.9)) и сделайте вывод о типе дифракции.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения работы студент должен представить:
график зависимости x_m от m ;
значение ширины щели с погрешностью;
параметр дифракции;
ширину полосы дополнительного экрана;
сравнение интенсивности пиков (кроме центрального) щели и полосы и заключение о согласии полученных результатов с теоремой Бабинне.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление дифракции света? Какой вид дифракции носит название дифракции Фраунгофера?
2. Объясните основные закономерности, наблюдаемые при дифракции Фраунгофера на щели.
3. Какой вид имеет дифракционная картина в случае дифракции на щели?
4. Как изменяется дифракционная картина при увеличении ширины щели?
5. При каком условии в данном эксперименте можно говорить о дифракции Фраунгофера?
6. Чему равняется ширина Δx центрального дифракционного максимума?
7. Что такое дополнительные экраны?
8. Сформулируйте теорему Бабинне.
9. Почему в работе не рассматривается центральный максимум.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1987.
2. Калашников Н.П. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа, 2004.

Дополнительная

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1986.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики. Оптика. М., 1986.

Работа 4.20

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫМИ ПЛАСТИНКАМИ

Цель: изучение преобразования линейно-поляризованного света четвертьволновой пластинкой.

Оборудование: оптическая скамья с размещенным на ней ртутным фонарем, поляризатором, пластинкой, анализатором, кремниевым фотоэлементом и вспомогательными оптическими элементами (конденсором, интерференционным фильтром, ирисовой диафрагмой и выходной линзой); блок питания ртутной лампы; блок фотоусилителя; цифровой мультиметр.

ВВЕДЕНИЕ

Одноосный кристалл, вырезанный параллельно оптической оси, называют *кристаллической пластинкой в четверть волны*, если ее толщина d удовлетворяет условию

$$(n_o - n_e)d = m\lambda_0 + \lambda_0 / 4. \quad (4.20.1)$$

Здесь $n_o - n_e$ – разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей; λ_0 – длина волны оптического излучения в вакууме; m – любое целое число.

Если на такую пластинку нормально к ее поверхности падает плоскополяризованный луч, то обыкновенный и необыкновенный лучи идут, не разделяясь, а на выходе из пластинки между ними возникает дополнительная разность фаз, равная $\pi/2$.

На рис. 4.20.1 изображена амплитуда падающего на пластинку луча $\vec{E}_0$, ориентированного вдоль оси входного поляризатора P . Оптическая ось кристаллической пластинки, расположенной за входным поляризатором, направлена вдоль оси y и образует угол θ с осью P . Выходной поляризатор (анализатор A) ориентирован так, что его ось образует угол φ с осью кристаллической пластинки. Напомним, что колебания светового вектора в обыкновенном луче

происходят в направлении, перпендикулярном оптической оси, а в необыкновенном – вдоль нее. Тогда на входе в пластинку (см. рис. 4.20.1) эти колебания происходят с частотой ω по закону:

$$\begin{aligned}(E_x)_e &= E_0 \cdot \sin \theta \cdot \cos \omega t; \\ (E_y)_o &= E_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega t.\end{aligned}\tag{4.20.2}$$

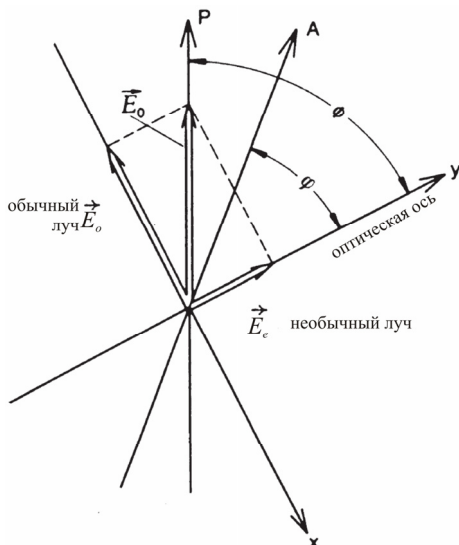


Рис. 4.20.1

Индексы (o и e) относятся к обыкновенному и необыкновенному лучам.

На выходе из пластинки возникает дополнительная разность фаз $\pi/2$, так что колебания происходят по закону:

$$\begin{aligned}(E_x)_e &= E_0 \cdot \sin \theta \cdot \sin \omega t; \\ (E_y)_o &= E_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega t.\end{aligned}\tag{4.20.3}$$

Уравнения (4.20.3) являются параметрическим уравнением эллипса с полуосями, ориентированными вдоль осей x , y , которые имеют величину $E_0 \sin \theta$ и $E_0 \cos \theta$ соответственно. Это означает, что на выходе из кристаллической пластинки свет эллиптически поляризован.

Рассмотрим теперь различные частные случаи. Если $\theta = 0$, то вышедший из пластинки свет линейно-поляризован вдоль оси y .

Если он проходит через анализатор, ось которого образует угол φ с оптической осью пластинки (ось y), то на выходе из анализатора получается линейно-поляризованный свет с амплитудой:

$$E_1 = E_0 \cos \varphi. \quad (4.20.4)$$

В этом случае реализуется закон Малюса с максимальной интенсивностью вышедшего света:

$$I_{1m} \propto E_0^2. \quad (4.20.5)$$

Аналогично, при $\theta = \pi/2$ на выходе из пластинки свет линейно-поляризован вдоль оси x с амплитудой

$$E_2 = E_0 \sin \varphi, \quad (4.20.6)$$

так что снова получим закон Малюса. При $\theta = \pi/4$ вышедший из пластинки свет поляризован по кругу, а величина вращающегося вектора равна $E_0/\sqrt{2}$, как это следует из уравнений (4.20.3). Анализатор, независимо от его ориентации, пропускает линейно-поляризованный свет с амплитудой $E_0/\sqrt{2}$ и интенсивностью $I_0/2$, вдвое меньшей максимальной интенсивности в предыдущих экспериментах.

При произвольном значении угла θ свет, вышедший из пластинки, эллиптически поляризован. Если анализатор A ориентирован вдоль оси x , то интенсивность вышедшего из него света равна в соответствии с (4.20.3)

$$I^{(x)} = I_0 \sin^2 \theta. \quad (4.20.7)$$

Если же A ориентирован вдоль y , то получим интенсивность

$$I^{(y)} = I_0 \cos^2 \theta. \quad (4.20.8)$$

Это означает, что при вращении анализатора вокруг направления распространения светового луча интенсивность, регистрируемая приемником, будет меняться от максимального до минимального значений, задаваемых уравнениями (4.20.7) и (4.20.8).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Общий вид установки приведен на рис. 4.20.2. На рабочем столе расположены: выпрямитель, преобразующий сетевое напряжение в постоянное величиной 12 В (на фотографии отсутствует); блок пи-

тания ртутной лампы 1; блок фотоусилителя 11; цифровой мультиметр 12.

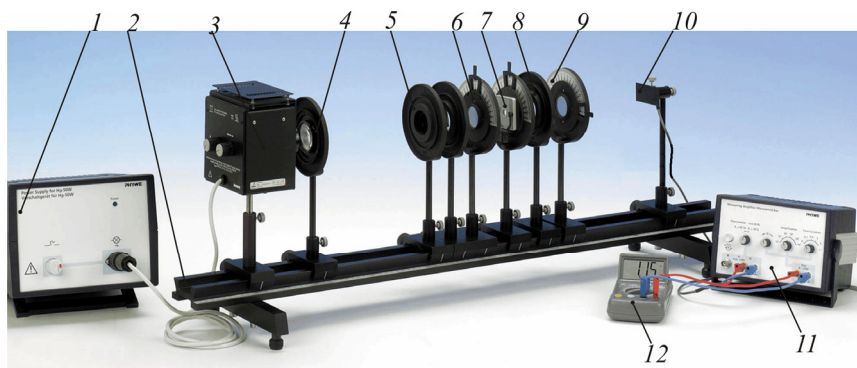


Рис. 4.20.2

На оптической скамье 2 расположены последовательно слева направо: ртутный фонарь 3, имеющий на тыльной стороне корпуса два регулировочных винта, которые позволяют перемещать световой луч, вышедший из фонаря, сверху вниз и слева направо; конденсор-линза 4 с фокусным расстоянием $f = 60$ мм, с ее помощью можно получить параллельный пучок лучей; ирисовая диафрагма 5. Уменьшение или увеличение отверстия ирисовой диафрагмы дает возможность дополнительно ограничивать поперечные размеры пучка. Далее поляризатор P с круговой шкалой 6, позволяющей измерять угол между осью P и вертикалью в градусах; кристаллическая пластинка в четверть волны 7 с такой же круговой шкалой; дополнительная линза 8 с фокусным расстоянием $f = 100$ мм, позволяющая сфокусировать падающий луч на входном отверстии кремниевого фотоэлемента; анализатор A с круговой шкалой 9, идентичный поляризатору P ; кремниевый фотоэлемент 10 на вертикальном держателе.

Все вертикальные держатели вставлены в рейтеры, которые можно перемещать и закреплять на оптической скамье.

При наличии дополнительного рейтера рядом с одной четверть-волновой пластинкой можно расположить другую, которая внесет дополнительную разность фаз в $\pi/2$ между обыкновенным и необыкновенным лучами.

Внимание! Цифровой мультиметр используется в режиме измерения постоянного тока « mA ». Рекомендуемый предел измерения тока – « $20\text{ }mA$ ».

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Опасность может представлять только сетевое напряжение, поэтому перед началом работы следует убедиться в исправности сетевых кабелей.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Измерение интенсивности света, вышедшего из кристаллической пластинки в четверть волны, в зависимости от ориентации анализатора

1. Убедитесь, что все оптические объекты находятся на оптической скамье в той последовательности, которая приведена на рис. 4.20.2.

2. Проверьте, что выход выпрямителя соединен питающим проводом с фотоусилителем, к входу которого « IN » подключен кремниевый фотодиод, а к выходу красным и синим проводами – мультиметр в режиме « DC » (« mA »). Убедитесь также, что питающий кабель лампы подсоединен к ее блоку питания.

3. Включите сетевые шнуры выпрямителей блока питания лампы в сетевые розетки и включите сам блок питания тумблером, расположенным на его задней панели.

4. Настройте установку. Для этого снимите кристаллическую пластинку, установите поляризаторы соосно и проверьте, что световое пятно освещает окно фотоприемника. Подберите удобный предел мультиметра ($\approx 20\text{ }mA$). Если луч не попадает в окно фотоприемника, регулировочными винтами фонаря подправьте его направление. Скрестите поляризаторы. Удобно, чтобы ось P была вертикальной, ось A – горизонтальной. Фототок при этом достигнет минимального значения, близкого к нулю. Поставьте кристаллическую пластинку на оптическую скамью. Найдите такие два ее положения, при которых фототок равен нулю: вы нашли направление кристаллической оси пластинки, а вместе с ним направление осей x , y . Желательно пластинку вставить в обойму симметрично, так чтобы эти оси были горизонтальными и вертикальными.

5. Измерьте зависимость интенсивности света (в мА), попадающего в фотоприемник от угла поворота анализатора для разных углов ориентаций входного поляризатора P по отношению к оси кристаллической пластинки θ . Рекомендуемые значения угла θ : 0; 90; 45; 60; 30°.

6. Результаты занесите в заранее подготовленную табл. 4.20.1.

Таблица 4.20.1

$\theta = 0^\circ$							
N	1	2	...				
φ , град.							
I , мА							

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Используя полученные экспериментальные результаты, построить графики зависимости фототока от угла поворота анализатора для всех выбранных углов ориентации поляризатора относительно оси кристаллической пластинки. На этих графиках найти максимальное и минимальное значения фототока, пропорциональные соответствующим интенсивностям. Из формул (4.20.7) и (4.20.8) следует, что отношение этих величин дает величину угла θ . Вычислить этот угол и его погрешность.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Результатами работы являются вышеназванные графики, а также вычисленные значения угла θ , которые следует сравнить с теми значениями этого угла, которые были выбраны в работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое линейно-поляризованный свет?
2. Какой свет называют эллиптически-поляризованным?
3. Почему имеется две разные эллиптические поляризации?
4. Что такое пластинка в четверть волны?
5. Как расположена оптическая ось такой пластинки?

6. Как должен падать на пластинку плоскополяризованный свет, чтобы на выходе его поляризация сохранилась?
7. Как получить свет, поляризованный по кругу?
8. Как убедиться, что это так?
9. Как получить эллиптически-поляризованный свет?
10. Как из такого света с помощью второй пластинки получить линейную поляризацию?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. М.: Астрель, АСТ, 2008.
2. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа, 2004.

Дополнительная

1. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1989; Оникс, Мир и Образование, 2007.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 2003.
3. Иродов И. Е. Волновые процессы. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2004.

Работа 4.21

ПОЛЯРИМЕТРИЯ

Цель: изучение явления естественного вращения плоскости поляризации света; исследование оптической активности сахарных растворов различной концентрации с помощью полутеневого поляриметра; определение удельного вращения растворов и постоянной скорости реакции инверсии сахара.

Оборудование: полутеневого поляриметр PL 1; трубки с растворами оптически-активных веществ.

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая активность вещества. *Оптическая активность* – способность среды вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через нее света. Одним из первых исследований, приведших к обнаружению оптической активности, было исследование зависимости интенсивности линейно-поляризованного света после его прохождения через анализатор от угла β между плоскостями поляризации падающего света и анализатора, проведенное французским физиком Этьеном Луи Малюсом. В 1810 г. им была установлена зависимость соотношения между интенсивностями падающего на анализатор I_0 и выходящего из него I света и углом β , получившее название закона Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \beta. \quad (4.21.1)$$

Сама же оптическая активность впервые была обнаружена в 1811 г. французским физиком Домиником Франсуа Араго в кварце. В 1815 г. французский физик Жан Батист Био обнаружил ее у чистых жидкостей (скипидара), а затем растворов и паров многих, главным образом органических, веществ. Он же установил, что угол φ поворота плоскости поляризации линейно зависит от толщины d слоя активного вещества (или его раствора) и концентрации C этого вещества (*закон Био*):

$$\varphi = \alpha C d, \quad (4.21.2)$$

где коэффициент α называется *удельной оптической активностью*; поворот плоскости поляризации света в данной среде происходит либо по часовой стрелке ($\varphi > 0$), либо против нее ($\varphi < 0$), если смотреть навстречу ходу лучей света. Соответственно, оптически активные вещества, проявляющие естественную оптическую активность разделяют на правовращающие (положительно вращающие, $\varphi > 0$) и левовращающие (отрицательно вращающие, $\varphi < 0$).

Феноменологическую (макроскопическую) теорию оптической активности предложил в 1823 г. французский физик Огюст Жан Френель, объяснивший ее различием преломления показателей среды n_+ и n_- для право- и левополяризованных по кругу световых волн. Полученное Френелем выражение имеет вид

$$\varphi = \frac{\pi d}{\lambda(n_+ - n_-)}, \quad (4.21.3)$$

где λ – длина волны излучения в вакууме. Таким образом, φ может быть значительным даже при очень малом различии n_+ и n_- , если d , как это обычно бывает, много больше λ . Этим объясняется чрезвычайно высокая чувствительность методов, основанных на измерении оптической активности (например, при определении различий в показателе преломления этим методом точность в 10^4 раз превосходит точность измерений с помощью интерферометров).

Развитие теории оптической активности тесно связано с изучением ее дисперсии – зависимости α от λ . Еще Био установил, что в исследованных им случаях α тем меньше, чем больше λ ($\varphi \sim \lambda^{-2}$). Такая дисперсия характерна для так называемой нормальной оптической активности вдали от длин волн λ_0 , на которых в оптически активном веществе происходит резонансное поглощение. Дальнейшие исследования показали, что для объяснения оптической активности существен учет изменения поля световой волны на расстояниях порядка размеров молекулы (при описании многих других оптических явлений таким изменением можно пренебречь).

Одним из решающих этапов выяснения природы оптической активности явилось открытие Луи Пастером в 1848 г. *оптических антиподов – веществ, неразличимых по всем физическим (и многим химическим) свойствам, кроме направления вращения плоскости поляризации (отличаясь знаками, удельные оптические активности двух антиподов равны по абсолютной величине)*. Оказалось, что кристаллические решетки, состоящие из оптических антипо-

дов, отдельные молекулы в аморфных, жидких и газообразных оптически-активных веществах (такие молекулы называются *оптическими изомерами*) являются зеркальными отражениями друг друга, так что никакими перемещениями и поворотами в пространстве не могут быть совмещены один с другим при полном тождестве образующих их элементов. Для молекул каждого из оптических изомеров характерна пространственная асимметрия – они не имеют плоскости зеркальной симметрии и центра инверсии.

Итак, *оптически-активные вещества* – среды, обладающие естественной оптической активностью. Оптически-активные вещества подразделяются на два типа. К первому типу относятся вещества, оптически-активные в любом агрегатном состоянии (различные виды сахара, камфара, винная кислота), ко второму – вещества, активные только в кристаллической фазе (кварц, киноварь). У веществ первого типа оптическая активность обусловлена асимметричным строением их молекул, у веществ второго типа – специфической ориентацией молекул (ионов) в элементарных ячейках кристалла из-за асимметрии поля сил, связывающих частицы в кристаллической решетке. Кристаллы оптически-активных веществ всегда существуют в двух формах – правой и левой; при этом решетка правого кристалла зеркально симметрична решетке левого и не может быть пространственно совмещена с нею.

Явление оптической активности замечательно во многих отношениях и находит большое практическое применение. Оно более чувствительно к изменениям структуры молекул, к межмолекулярному взаимодействию, к влиянию растворителя и т.д., чем любое другое оптическое явление. Изучение оптической активности сыграло исключительно важную роль не только в физике, но и в химии и биологии. Создание стереохимии основано на открытии оптической изометрии молекул, тождественных во всех отношениях, за исключением того, что одна вращает плоскость поляризации влево, а другая – вправо на тот же угол. Биологическое значение явления, в частности, связано со способностью, впервые открытой Пастером, ряда микроорганизмов питаться только определенным оптическим изомером того или иного вещества, а также существенными отличиями биологических свойств правых и левых изомеров некоторых веществ.

Теория вращения плоскости поляризации света впервые была дана Френелем. Френель основывался на предположении, что оп-

тически-активные вещества обладают особым типом двойного лучепреломления, заключающимся в разложении линейно-поляризованного светового колебания на два колебания, обладающими правой и левой поляризациями.

Вращение плоскости поляризации обусловлено тем, что две волны с круговой поляризацией (правой и левой) распространяются в веществе с различными скоростями. Поэтому плоскость поляризации линейно-поляризованной волны, представленной как сумма двух указанных волн, на выходе из вещества оказывается повернутой относительно своего первоначального положения на некоторый отличный от нуля угол.

Рассмотрим плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся в оптически неактивной среде в направлении оси OZ декартовой системы координат в отсутствии сторонних токов и зарядов. Представим эту волну как совокупность двух поляризованных по кругу волн (правой и левой) с одинаковыми частотами ω и амплитудами a .

Пусть компоненты правополяризованной волны определяются соотношениями (v – скорость распространения плоскополяризованной волны)

$$E_{+x} = -a \cos \omega \left(t - \frac{z}{v} \right) = -a \cos \varphi \quad (4.21.4)$$

и

$$E_{+y} = a \sin \omega \left(t - \frac{z}{v} \right) = a \sin \varphi . \quad (4.21.5)$$

Аналогичные соотношения для левополяризованной волны имеют вид

$$E_{-x} = a \cos \omega \left(t - \frac{z}{v} \right) = a \cos \varphi \quad (4.21.6)$$

и

$$E_{-y} = a \sin \omega \left(t - \frac{z}{v} \right) = a \sin \varphi . \quad (4.21.7)$$

Результирующая волна

$$\begin{aligned} E_x &= E_{+x} + E_{-x} = 0 , \\ E_y &= E_{+y} + E_{-y} = 2a \sin \omega \left(t - \frac{z}{v} \right) = 2a \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.21.8)$$

будет плоскополяризованной. Плоскость XOZ является плоскостью поляризации, а световой вектор результирующей волны лежит в плоскости YOZ .

Предположим, согласно Френелю, что в оптически-активной среде каждая поляризованная по кругу волна распространяется без изменений, но скорости волн с правой и левой поляризацией различны. После прохождения в оптически-активной среде расстояния d эти волны будут иметь разность фаз $\Delta\varphi$, определяемую соотношением

$$\Delta\varphi = \omega d \left(\frac{1}{v_+} - \frac{1}{v_-} \right) = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_+ - n_-), \quad (4.21.9)$$

где v_+ и v_- – скорости распространения, а n_+ , n_- – показатели преломления право- и левополяризованной волн в оптически-активной среде; λ – длина волны света в вакууме. Соответствующие поляризованные по кругу компоненты будут описываться соотношениями

$$\begin{cases} E_{+x} = -a \cos \varphi'; \\ E_{+y} = a \sin \varphi'; \\ E_{-x} = a \cos(\varphi' + \Delta\varphi); \\ E_{-y} = a \sin(\varphi' + \Delta\varphi), \end{cases} \quad (4.21.10)$$

где

$$\varphi' = \omega \left(t - \frac{d}{v_+} \right). \quad (4.21.11)$$

Результирующая плоскополяризованная волна будет иметь компоненты

$$\begin{aligned} E_x &= -a \cos \varphi' + a \cos(\varphi' + \Delta\varphi) = 2a \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \sin\left(\varphi' + \frac{\Delta\varphi}{2}\right); \\ E_y &= a \sin \varphi' + a \sin(\varphi' + \Delta\varphi) = 2a \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \sin\left(\varphi' + \frac{\Delta\varphi}{2}\right). \end{aligned} \quad (4.21.12)$$

Эти две компоненты светового вектора E колеблются синфазно, и результирующее колебание происходит в плоскости, составляющей угол α с плоскостью YOZ , где

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_x}{E_y} = \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right). \quad (4.21.13)$$

Таким образом, плоскость поляризации после прохождения в оптически-активной среде повернулась на угол

$$\alpha = \frac{\Delta \varphi}{2} = \frac{\pi d}{\lambda} (n_+ - n_-). \quad (4.21.14)$$

Угол поворота α пропорционален расстоянию d , пройденному волной в оптически-активной среде. Коэффициент пропорциональности $\frac{\pi}{\lambda} (n_+ - n_-)$, называемый постоянной вращения, зависит как от длины волны λ , так и от оптических свойств среды.

Как следует из соотношения (4.21.14), при заданной длине волны λ угол поворота плоскости поляризации пропорционален толщине слоя активного вещества в соответствии с законом Био, открытым экспериментально:

$$\alpha = [\alpha] C d, \quad (4.21.15)$$

где d – толщина слоя оптически активного вещества; C – концентрация активного вещества; $[\alpha]$ – удельное вращение.

Удельным вращением $[\alpha]$ называется величина, численно равная углу поворота плоскости поляризации слоем раствора единичной толщины и единичной концентрации.

Применение закона Био позволяет определить концентрацию C активного вещества в растворе с известным удельным вращением $[\alpha]$ путем измерения угла поворота α . Такой метод называется *поляриметрическим* методом количественного анализа. Этот метод точнее и быстрее, чем химические методы количественного анализа.

Поляриметрический метод постоянно применяется в химических лабораториях для оценки чистоты веществ, для анализа протекания химических реакций и разделения фракций.

Концентрация C (кг/м³) активного вещества равна массе активного вещества в единице объема раствора:

$$C = \frac{m}{V}, \quad (4.21.16)$$

где V – объем раствора; m – масса активного вещества в этом объеме.

На практике раствор предпочитают характеризовать относительной концентрацией P , определяемой следующим образом:

$$P = \frac{m}{m + M}, \quad (4.21.17)$$

где M – масса растворителя.

Плотность раствора равна

$$\rho = \frac{m + M}{V}. \quad (4.21.18)$$

Решая совместно уравнения (4.21.16), (4.21.17) и (4.21.18), найдем связь между C и P :

$$C = \rho P. \quad (4.21.19)$$

Удельное вращение характеризует природу вещества, обратно пропорционально квадрату длины волны светового излучения и слабо зависит от температуры. Для большинства веществ $[\alpha]$ уменьшается примерно на 0, 1% при повышении температуры на 10° . Обычно в практической деятельности используется величина $[\alpha]_D^{20^\circ}$. *Удельное вращение раствора оптически-активных веществ $[\alpha]_D^{20^\circ}$ определяется как угол вращения плоскости поляризации излучения D-линии натрия (длина волны $\lambda = 589$ нм) в цилиндре длиной 100 мм, содержащем 1 г вещества в 1 см³ при температуре 20°C .*

Таким образом, удельное вращение можно найти из угла вращения плоскости поляризации α в сосуде длиной 100 мм при заданной концентрации C следующим образом:

$$[\alpha]_D^{20^\circ} = \frac{\alpha}{C}. \quad (4.21.20)$$

В данной работе могут исследоваться растворы сахарозы и лактозы. Если опыт проводится при температуре ϑ , отличной от 20°C , а также при длине сосуда d (отсчитываемой в миллиметрах), отличной от 100 мм, полученное значение удельного вращения следует откорректировать согласно следующим формулам:

$$[\alpha]_d^{20^\circ} = \frac{\frac{100}{d}[\alpha]_d^\vartheta}{1 - 0,00037(\vartheta - 20^\circ)} \text{ для сахарозы;} \quad (4.21.21)$$

$$[\alpha]_D^{20^\circ} = \frac{100}{d}[\alpha]_D^9 - 0,072(20^\circ - 9) \text{ для лактозы.} \quad (4.21.22)$$

Принцип работы и устройство поляриметра. Естественное вращение плоскости поляризации можно наблюдать, поместив оптически-активное вещество между поляризатором и анализатором. Если главные плоскости поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны (скрещены), то линейно-поляризованный свет, вышедший из поляризатора, в отсутствие оптически-активного вещества будет целиком задержан анализатором, и поле зрения будет темным.

Введение оптически-активного вещества приводит к повороту плоскости поляризации, благодаря чему поле зрения прибора просветлеет. Чтобы снова добиться минимума интенсивности света, необходимо на такой же угол повернуть анализатор, и тем самым найти угол поворота плоскости поляризации в исследуемом веществе.

Однако такой метод недостаточно точен, так как визуально трудно найти с достаточной точностью положение анализатора, соответствующее максимальному затемнению поля зрения. Это объясняется тем, что затемнение поля происходит постепенно и заметить момент полного исчезновения света трудно.

Для устранения этого недостатка применяется так называемый полутеневой метод, используемый в полутеневом устройстве – *поляриметре с бикварцевой пластинкой*, в котором установка производится не на полную темноту, а на равномерное затемнение двух

или более частей поля зрения (рис. 4.21.1). Благодаря физиологическим особенностям глаза точность такой установки оказывается очень высокой.

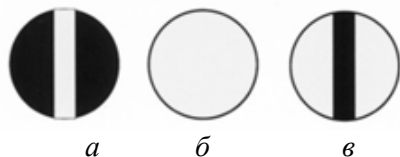


Рис. 4.21.1

Полутеневой метод заключается в следующем. В оптическую схему поляриметра, кроме поляризатора 3 и анализатора 7, вводят кварцевую пластинку 4 (рис. 4.21.2) небольшой толщины, ориентированную по отношению к поляризатору так, что она поворачивает плоскость поляризации лучей, прошедших через поляризатор, на некоторый небольшой угол (порядка 5°). Кварцевая пластинка вырезана так, что она покрывает собой лишь среднюю часть поля зрения, наблюдаемого в

окуляр 12. Боковые же части поля зрения освещаются светом, прошедшим только через поляризатор.

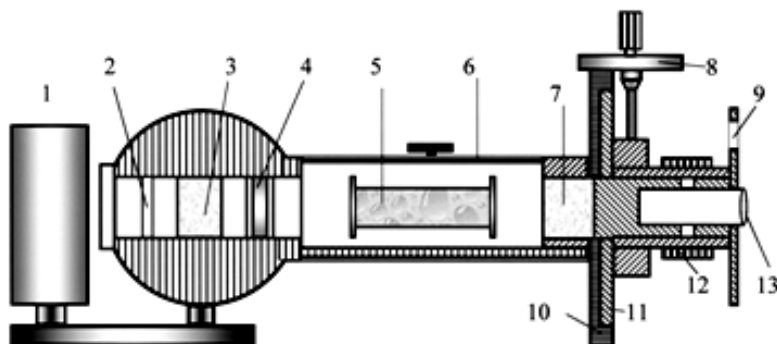


Рис. 4.21.2

Если теперь установить анализатор так, чтобы его плоскость поляризации оказалась перпендикулярной к плоскости поляризации поляризатора, то свет в боковых частях поля зрения погасится, а через среднюю часть проходит достаточное количество светового излучения (см. рис. 4.21.1, а). При повороте анализатора на небольшой угол можно полностью погасить среднюю часть поля зрения, но боковые части будут освещены (см. рис. 4.21.1, в). Очевидно, что найдется такое положение анализатора (см. рис. 4.21.1, б) при котором и боковые, и средняя часть поля зрения будут равномерно освещены (так называемая установка на «полутень»).

Если после установки прибора на полутень между поляризатором и анализатором ввести оптически-активное вещество, то равномерность освещения боковых и средней части поля зрения нарушится и для получения равномерного освещения поля зрения нужно повернуть анализатор на угол, равный углу вращения плоскости поляризации луча вследствие прохождения им оптически-активного вещества.

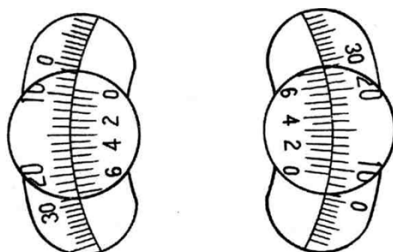
Стоит отметить, что в некоторых поляриметрах кварцевая пластина расположена таким образом, что она перекрывает половину поля зрения. Тогда в поле зрения будет наблюдаться не тройное, а двойное поле, при этом суть метода остается прежней.

Так как равенство освещенностей, при котором граница между областями поля зрения пропадает, можно установить с гораздо

большей точностью, чем наступления минимальной освещенности, то полутеневого метод дает гораздо более точные результаты.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Используемый в работе прибор называется *круговым поляриметром*. Его схема показана на рис. 4.21.2. Свет от натриевой лампы 1 с длиной волны 589,3 нм (*D*-линия натрия) проходит через светофильтр 2 и попадает в поляризатор 3. Далее свет проходит через кварцевую пластинку 4, трубку 5 с исследуемым веществом,



$$\alpha = 9,30^\circ$$

Рис. 4.21.1

анализатор 7 и зрительную трубку. Через окуляр 13 наблюдается световое поле. С помощью муфты 12 производится фокусировка зрительной трубки. Поворот анализатора осуществляется поворотом маховичка 8. Угол поворота анализатора отсчитывается по шкале лимба 10 через лупу 9. Шкала снабжена подвижным нониусом 11.

Нуль шкалы соответствует одинаковой яркости всех участков светового поля в отсутствие оптически-активного вещества. Для повышения точности отсчета прибор имеет два симметрично расположенных механизма отсчета (рис. 4.21.3).

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Для предохранения от ожогов не дотрагивайтесь до включенной лампы.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Определение точности измерений

1. Извлеките из прибора трубку для раствора, закройте крышкой вырез трубы и включите лампу осветителя. Измерения рекомендуется начинать через 5 мин после включения лампы.

2. Сфокусируйте зрительную трубку на отчетливое видение границ полей. Убедитесь, что установку полей на одинаковую яркость можно осуществить при двух взаимно перпендикулярных положениях поляризатора 3.

3. Установите поляризатор 3 поворотом маховичка 8 на равную яркость полей сравнения в светлом поле.

4. Потренировавшись на установку одинаковой яркости полей сравнения, произведите затем эту операцию не менее семи раз и запишите соответствующие отсчеты N_i по одной из отсчетных шкал механизма отсчета поляриметра.

5. Поверните поляризатор 3 на 90° (в полутеневое положение). В этом положении также не менее семи раз произведите установку поляризатора на равенство яркостей полей и запишите соответствующие отсчеты по той же шкале механизма отсчета.

6. Вычислите для обоих случаев среднеквадратичный разброс отсчетов около среднего значения

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\Delta N_i)^2}, \quad (4.21.23)$$

где n – число измерений; $\Delta N_i = N_i - \langle N \rangle$.

7. Сравните точность измерения в обоих случаях. В полутеновом методе при правильной настройке прибора разброс должен быть значительно меньше.

Задание 2. Определение угла поворота плоскости поляризации

1. Определите нулевой отсчет при наличии трубки с растворителем без растворенного в нем оптически-активного вещества. Для этого установите трубку с дистиллированной водой в приборе и сфокусируйте окуляр на четкое видение границ раздела полей.

2. Поворотом поляризатора 3 маховичком 8 (см. рис. 4.21.2) тщательно уравнивайте яркость полей и запишите соответствующий отсчет по шкале. Это измерение сделайте не менее пяти раз. Среднее значение этих отсчетов определяет нулевой отсчет N_0 .

3. Аналогичную операцию сделайте для всех растворов сахара с известными концентрациями, а также для одного раствора с

неизвестной концентрацией. Результаты измерений занесите в табл. 4.21.1.

Таблица 4.21.1

n	N_0	$C, \text{ г/см}^3$			
		N			
1					
...					
5					
$\langle N_0 \rangle$					
ΔN					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. Вычислите для каждого раствора сахара с известной концентрацией угол поворота плоскости поляризации α , постройте график зависимости α от концентрации C (градуировочный график).
2. Определите по градуировочному графику неизвестную концентрацию раствора сахара.
3. Вычислите по формулам (4.21.20)–(4.21.22) для каждого значения концентрации раствора удельное вращение $[\alpha]$ при комнатной температуре, определите его среднее значение (длина трубки приведена на самой трубке).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. В разделе «Заключение» кратко изложите содержание и основные результаты работы.
2. Сравните два метода измерений с помощью кругового поляриметра.
3. Укажите значения неизвестной концентрации раствора C и удельного вращения плоскости поляризации $[\alpha]$ при комнатной температуре и $[\alpha]_D^{20^\circ}$ при 20°C .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называется естественным?
2. Какой свет называется поляризованным?
3. Что такое линейно-поляризованная волна?
4. Что такое волна с круговой поляризацией?
5. Какие вы знаете способы получения линейно-поляризованного света?
6. Что такое плоскость поляризации?
7. Что такое свет, поляризованный по кругу, как его можно описать математически?
8. Поясните следующее утверждение: «линейно-поляризованная волна может быть разложена на две волны с круговой поляризацией».
9. Какие вещества называют оптически-активными?
10. Что называется удельным вращением вещества?
11. В чем заключается явление двойного лучепреломления?
12. Каково устройство и принцип действия полутеневого поляриметра?
13. Объясните вращение плоскости поляризации света по теории Френеля.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев В.И. Курс общей физики. Кн. 4. Волны. Оптика. М.: Наука, 2003.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. М.: Наука, 2002.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2003.

Дополнительная

1. Ландсберг Г.Г. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1986.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 1999.
4. Зисман А.Г. Тодес О.М. Курс общей физики. Т. 3. М.: Наука, 1970.
5. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Оникс, Мир и Образование, 2007.

Работа 4.22

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА

Цель: *определение плоскости поляризации лазерного луча; проверка закон Малюса.*

Оборудование: лазер гелий-неоновый; оптическая скамья; поляризатор в держателе с поворотным устройством; фотоэлемент; мультиметр цифровой.

ВВЕДЕНИЕ

В 1809 г. французский инженер Э. Малюс открыл закон, названный его именем. В опытах Малюса свет последовательно пропусклся через две одинаковые пластинки из турмалина (прозрачное кристаллическое вещество зеленоватой окраски). Пластинки могли поворачиваться друг относительно друга на угол φ (рис. 4.22.1).

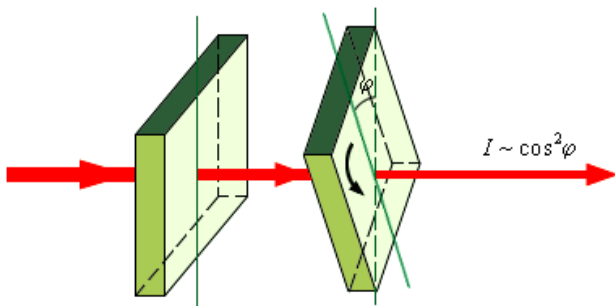


Рис. 4.22.1

Интенсивность прошедшего света оказалась прямо пропорциональной $I \propto \cos^2 \varphi$.

В середине 60-х годов XIX в. Максвелл сделал вывод о том, что свет – электромагнитные волны. Этот вывод был сделан на основе совпадения известного значения скорости света со скоростью распространения предсказанных Максвеллом электромагнитных волн.

Максвелл справедливо полагал, что поперечность электромагнитных волн является еще одним важнейшим доказательством электромагнитной природы света. В электромагнитной волне вектора $\vec{E}$ и $\vec{H}$ перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости Σ , перпендикулярной направлению распространения волны $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{v}$ (рис. 4.22.2). Во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет электрический вектор $\vec{E}$, поэтому его называют *световым*. Если при распространении электромагнитной волны в вакууме световой вектор сохраняет свою ориентацию, такую волну называют *линейно-поляризованной*, или *плоскополяризованной*.

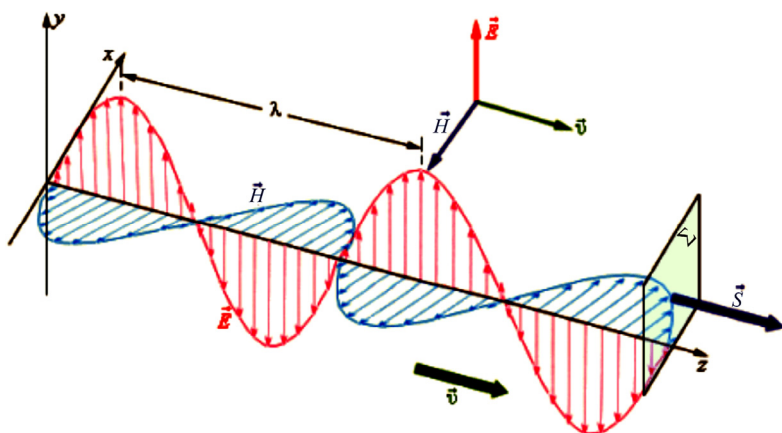


Рис. 4.22.2

Структура электромагнитной волны может быть очень сложной. Наиболее простой является плоская монохроматическая волна, описываемая следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_m \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha); \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}_m \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha),\end{aligned}\quad (4.22.1)$$

где $\vec{E}_m$ и $\vec{H}_m$ – амплитуды колебаний векторов напряженности электрического и магнитного полей волны; ω – круговая частота колебаний; $\vec{k}$ – волновой вектор; α – начальная фаза колебаний.

Аргумент функции косинуса называется *фазой волны*, а геометрическое место точек, колеблющихся в одной фазе – *волновой поверхностью*. Волновая поверхность, уравнение которой $\omega t - \vec{k}\vec{r} = \text{const}$, представляет собой плоскость, перпендикулярную волновому вектору $\vec{k}$, а значит, и вектору скорости $\vec{v}$ (плоскость Σ на рис. 4.22.2). Эта плоскость перемещается в пространстве вдоль вектора $\vec{k}$ со скоростью $v = \frac{\omega}{k}$, k – модуль волнового вектора, называемый также *волновым числом*. Скорость перемещения поверхности постоянной фазы называется *фазовой*. Известно, что $\omega = \frac{2\pi}{T}$; $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$, где T – период колебаний; λ – длина волны; v – скорость распространения волны.

Итак, основные свойства волны: $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{v}$; $\vec{E}, \vec{H}, \vec{v}$ – правая тройка векторов; колебания электрического и магнитного полей происходят в одной фазе, причем между мгновенными значениями E и H в любой точке существует определенная связь, а именно:

$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0}E = \sqrt{\mu\mu_0}H, \quad (4.22.2)$$

где ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные. Скорость электромагнитных волн зависит от диэлектрических и магнитных свойств среды:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}. \quad (4.22.3)$$

Для слабых полей $E_m \approx 10^2$ В/см, в лазерных пучках $E_m \approx 10^6$ В/см.

За *интенсивность волны* I принимается среднее значение плотности потока энергии:

$$I = \langle S \rangle_\tau = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E_0^2. \quad (4.22.4)$$

При распространении волны, описываемой уравнением (4.22.1), во всех точках светового луча вектор $\vec{E}$ колеблется вдоль фиксированного направления, параллельного $\vec{E}_m$.

Свет, электрический вектор которого, колеблется вдоль некоторого фиксированного направления, называется *линейно-поляризованным* (ЛПС), или *плоскополяризованным*.

Излучение обычных источников света неполяризовано. В *естественном свете* все направления колебаний вектора $\vec{E}$ в плоскости, ортогональной направлению распространения света, представлены в равной степени (рис. 4.22.3). Связано это с тем, что в случае спонтанного излучения различные атомы источника испускают отдельные цуги волн независимо друг от друга в случайные моменты времени.



Рис. 4.22.3

Линейно-поляризованный свет получают, пропуская естественный свет через оптические поляризаторы. Плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{E}$ в волне, прошедшей через поляризатор, называется *плоскостью пропускания*, или *главной плоскостью* поляризатора (П – плоскость пропускания поляризатора (см. рис. 4.22.3)). Если поляризатор используется для анализа характера поляризации, то его называют *анализатором*.

Рассмотрим прохождение через анализатор линейно-поляризованной волны. Пусть $\vec{E}_0$ и I_0 – вектор амплитуды и интенсивность света, падающего на анализатор. Вектор амплитуды и интенсивность света, прошедшего через анализатор – $\vec{E}_1$ и I_1 . Угол φ – угол

между плоскостью пропускания анализатора и плоскостью колебаний электрического поля падающей волны $\vec{E}_0$ (рис. 4.22.4).

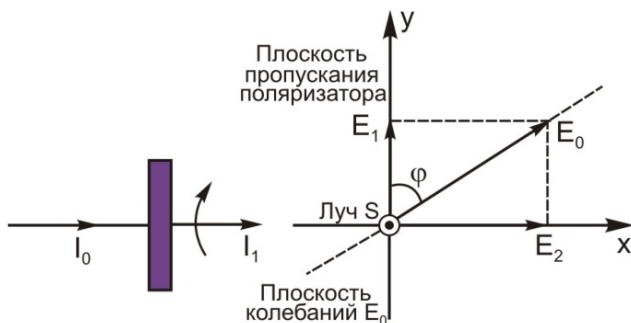


Рис. 4.22.4

Из рис. 4.22.4 видно, что пропускаемая анализатором А амплитуда $E_1 = E_0 \cos \varphi$ – проекция вектора $\vec{E}_0$ на ось y . Компонента E_2 – проекция вектора $\vec{E}_0$ на ось x , анализатором полностью задерживается. Так как интенсивность волны, падающей на фотоэлемент пропорциональна квадрату амплитуды, получаем:

$$I_1 = I_0 \cos^2 \varphi. \quad (4.22.5)$$

Соотношение (4.22.5) называется *законом Малюса*. Если на анализатор падает естественный свет, то угол φ изменяется со временем, и в результате усреднения $I_1 = I_0 \langle \cos^2 \varphi \rangle$, т.е. $I_1 = \frac{I_0}{2}$.

Если свет поляризован не полностью, а частично, то его можно представить как смесь естественного и плоскополяризованного. *Степень поляризации* определяется формулой

$$P = \frac{I_{\text{поляри}}}{I_0}, \quad (4.22.6)$$

где $I_{\text{поляри}}$ – интенсивность поляризованного света; I_0 – полная интенсивность частично поляризованного света.

При пропускании света через анализатор, поворачивая его вокруг оси распространения света, можно определить его степень поляризации по формуле:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4.22.7)$$

где $I_{\max}$, $I_{\min}$ – максимальная и минимальная интенсивности света, прошедшего через анализатор.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Внешний вид экспериментальной установки для изучения закона Малюса представлен на рис. 4.22.5: 1 – лазер He-Ne с линейно-поляризованным излучением; 2 – поляризатор в поворотном устройстве с транспортиром; 3 – фотоземлет; 4 – мультиметр, регистрирующий ток фотоземлета, 5 – оптическая скамья.

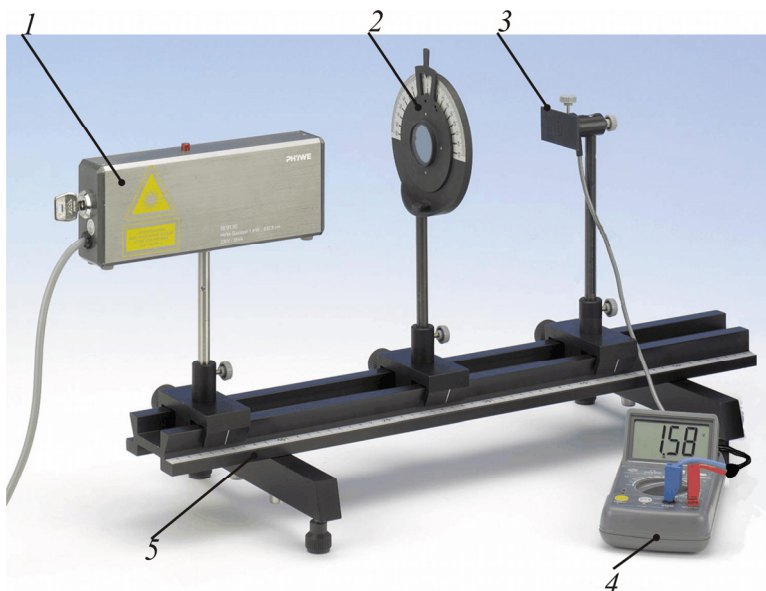


Рис. 4.22.5

Сила тока фотоземлета прямо пропорциональна интенсивности света, освещающего фотоземлет.

Перед началом работы лазер необходимо разогреть в течение 30 мин. Затем проверить юстировку установки, т.е. убедиться, что фотоэлемент полностью освещен.

При проведении эксперимента в незатемненной комнате следует определить фоновый ток I_0 при выключенном лазере. В дальнейшем полученное значение необходимо учитывать при расчетах.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Внимание! При работе с лазером его свет можно наблюдать только после отражения от рассеивающих поверхностей. Попадание в глаза прямого пучка ОПАСНО ДЛЯ ЗРЕНИЯ.

ЗАДАНИЕ

Проверка закона Малюса

1. Проверьте и при необходимости проведите юстировку установки, т.е. убедитесь, что фотоэлемент полностью освещен.

2. Установите поляризатор в поворотном устройстве с транспортиром вблизи выхода светового излучения лазера.

3. Перекрыв пучок лазерного излучения, уточните величину фона I_0 . Убедитесь, что излучение лазера линейно-поляризовано. В том случае, если излучение лазера линейно-поляризовано, вращая за рукоятку обойму поворотного держателя поляризующего фильтра, определите максимальную $I_{\max}$ и $I_{\min}$ интенсивность прошедшего через поляризатор светового излучения.

Таблица 4.22.1

№	α , град.	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	...	$\langle I \rangle - I_0$, мА	φ , °	$\cos^2 \varphi$	$\left(\frac{\langle I \rangle - I_0}{I_{\max} - I_0} \right)$
1	0								
2	5								
...									

4. Поворачивая поляризатор с шагом в 5° между положениями $\alpha = \pm 90^\circ$, определите соответствующий ток фотоэлемента I . Повторите измерения 3–5 раз. Результаты измерений занесите в табл. 4.22.1.

5. Перекрыв пучок лазерного излучения, еще раз уточните величину фона I_0 .

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. Определите степень поляризации излучения.

2. По результатам измерений (см. табл. 4.22.1) определите среднее значение тока фотоэлемента $\langle I \rangle$ для каждого значения α и его погрешность.

3. По результатам измерений (см. табл. 4.22.1) определите угол φ между плоскостью пропускания анализатора и плоскостью колебаний электрического поля падающей волны при различных значениях α .

4. Оцените погрешность $\cos^2 \varphi$, используя цену деления транспортира.

5. Оцените погрешность $\left(\frac{\langle I \rangle - I_0}{I_{\max} - I_0} \right)$, используя метод расчета ошибок косвенных измерений.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Постройте графики зависимости $\left(\frac{\langle I \rangle - I_0}{I_{\max} - I_0} \right)$ от $\cos^2 \varphi$ для положительных и отрицательных α .

2. Сделайте выводы о характере поляризации лазерного излучения.

3. Сделайте вывод о направлении плоскости поляризации лазерного луча.

4. Сделайте вывод о выполнении закона Малюса.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите уравнения электромагнитной волны.
2. Перечислите свойства электромагнитных волн.
3. Чем линейно-поляризованный свет отличается от естественного?

4. Что называется плоскостью поляризации света?
5. Выведите закон Малюса.
6. Как практически можно отличить линейно-поляризованный свет от естественного?
7. Объясните принципы действия поляризационного устройства.
8. Как рассчитать интенсивность прошедшей через поляризатор плоскополяризованной световой волны?
9. Каким образом можно повернуть плоскость поляризации на угол φ ?
10. Как определить угол φ между плоскостью пропускания анализатора и плоскостью колебаний электрического поля падающей волны при различных значениях α ?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. М., 2007.
2. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1989; Оникс, Мир и Образование, 2007.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 2003.
4. Иродов И.Е. Волновые процессы. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2004.

Дополнительная

1. Компьютерный курс «Открытая физика 2.5, часть 1», Сетевая версия (build 050204), на компакт-диске, ООО «ФИЗИКОН», 2004.
2. Березина О.Я., Чудинова С.А. Поляризация света. Закон Малюса. Методические указания. Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2007.

Работа 4.23

ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ

***Цель:** исследование эффекта Фарадея; определение постоянной Верде образца.*

Оборудование: стеклянный стержень; катушки (600 витков, 2 шт.); полюса с отверстием; U-образный железный пластинчатый сердечник; кожух для лампы; галогенная лампа 12 В/50 Вт; конденсор $f = 60$ мм; трансформатор 25 VAC/20 VDC (12 А); амперметр; цифровой тесламетр; датчик Холла; линза в оправе $f = 150$ мм; светофильтр; поляризаторы; экран полупрозрачный; оптическая скамья.

ВВЕДЕНИЕ

Эффект Фарадея (продольный магнитооптический эффект Фарадея) заключается в том, что при распространении линейно-поляризованного света в прозрачном веществе вдоль постоянного магнитного поля наблюдается вращение плоскости поляризации света. Этот эффект был обнаружен М. Фарадеем в 1845 г.

Строгое последовательное описание эффекта Фарадея возможно только в рамках квантовой механики. Эффект Фарадея тесно связан с эффектом Зеемана, который состоит в расщеплении уровней энергии атомов в магнитном поле. Переходы между расщепленными уровнями происходят с испусканием фотонов правой и левой поляризации. Это приводит к различным показателям преломления и коэффициентам поглощения для волн различной поляризации. Можно считать, что различие скоростей для волн разной поляризации обусловлено различными длинами волн поглощаемого и переизлучаемого фотонов.

Феноменологически эффект Фарадея объясняется тем, что в присутствии магнитного поля вещество необходимо описывать не одним показателем преломления, а двумя: для волн с правой круговой и левой круговой поляризациями. В результате право- и левополяризованные составляющие линейно-поляризованного света распространяются при прохождении через вещество вдоль магнитного поля с различными фазовыми скоростями, приобретая раз-

ность хода, линейно-зависящую от оптической длины пути. Если показатели преломления для волн с правой и левой циркулярной поляризацией равны n_+ и n_- соответственно, то плоскость поляризации линейно-поляризованного монохроматического света с длиной волны λ , прошедшего в среде путь l , повернется на угол

$$\Delta\varphi = \frac{\pi l (n_+ - n_-)}{\lambda}.$$

В области не слишком сильных магнитных полей разность $(n_+ - n_-)$ линейно зависит от величины индукции магнитного поля, и для угла поворота справедлива следующая формула:

$$\Delta\varphi = V(\lambda, T) l B, \quad (4.23.1)$$

где B – величина магнитной индукции постоянного магнитного поля, а $V(\lambda)$ – постоянная Верде, которая определяется свойствами среды и зависит от длины волны света λ и температуры T . В случае пространственно неоднородного магнитного поля под величиной B в формуле (4.23.1) следует понимать среднее значение проекции магнитной индукции $\langle B_k \rangle$ на направление распространения света.

Зависимость постоянной Верде от длины волны света описывается следующей эмпирической формулой:

$$V(\lambda) = \frac{\pi(n^2 - 1)}{\lambda n} \left(A + \frac{B}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \right), \quad (4.23.2)$$

где $n = n(\lambda)$ – показатель преломления света веществом в отсутствии магнитного поля. Для стекла (тяжелый флинт) константы, соответственно, равны:

$$A = 15,71 \cdot 10^{-7} \text{ рад/Тл},$$

$$B = 6,34 \cdot 10^{-19} \text{ рад} \cdot \text{м}^2 / \text{Тл}$$

и

$$\lambda_0 = 156,4 \text{ нм.}$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки для исследования эффекта Фарадея показана на рис. 4.23.1.

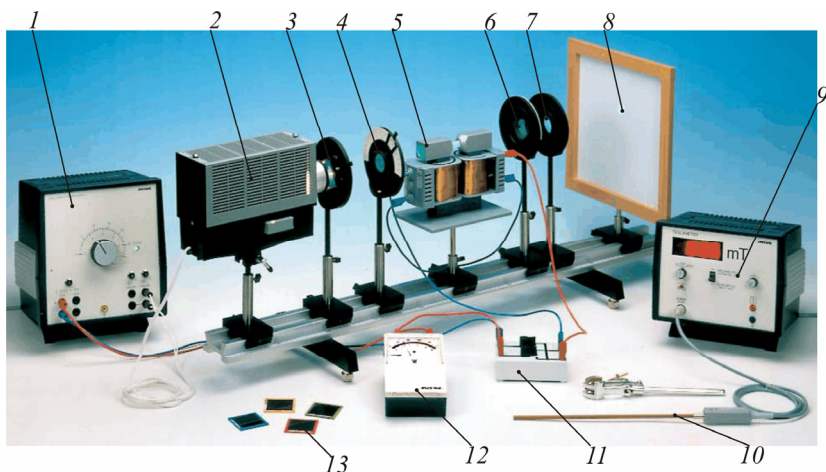


Рис. 4.23.1

Цифрами обозначены: 1 – источник питания (трансформатор); 2 – галогенная лампа; 3 – светофильтр; 4 – поляризатор; 5 – электромагнит, между полюсными наконечниками которого помещается образец; 6 – анализатор; 7 – собирающая линза; 8 – полупрозрачный экран; 9 – тесламетр; 10 – щуп с датчиком Холла; 11 – переключатель для изменения направления тока; 12 – амперметр; 13 – светофильтры.

Образец (стеклянный стержень) устанавливается в специальное отверстие в полюсных наконечниках электромагнита, как показано на рис. 4.23.1. Для получения монохроматического света с различными длинами волн используются светофильтры (цветные стекла). Создаваемое в данной установке магнитное поле является неоднородным. Поэтому необходимо исследовать, как величина индукции этого поля зависит от расстояния на линии, соединяющей полюса электромагнита. Такое исследование нужно выполнить для различных значений силы тока через электромагнит. Затем для каждого значения тока следует вычислить среднее значение величины магнитной индукции.

Дополнительно на рис. 4.23.2 представлена оптическая схема установки.

Здесь 1 – конденсор; 2 – светофильтр; 3 – поляризатор; 4 – образец; 5 – анализатор; 6 – линза с фокусным расстоянием $f = 15$ см; 7 – полупрозрачный экран.

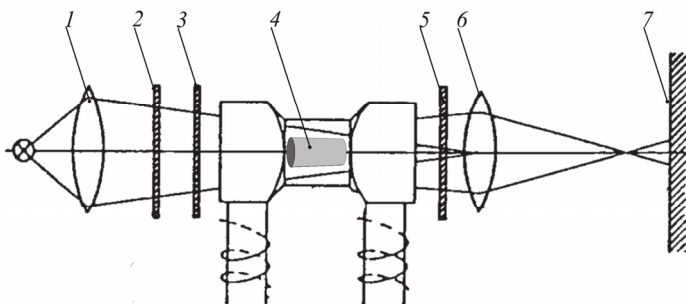


Рис. 4.23.2

Для измерения индукции магнитного поля в круговом отверстии полюсных наконечников электромагнита используется тесламетр цифровой 9, отдельно показанный на рис. 4.23.3.



Рис. 4.23.3

На рис. 4.23.3 цифрами обозначены: 1 – разъем для подключения внешнего датчика (датчика Холла); 2 – ручка грубой установки нуля; 3 – переключатель диапазонов измерения; 4 – переключатель режимов работы «Переменное поле/Постоянное поле» («Alternating field/Direct field»); 5 – четырехразрядный цифровой дисплей; 6 – ручка тонкой установки нуля.

На задней панели прибора расположен тумблер включения/выключения сетевого питания.

Перечислим основные технические характеристики тесламетра.

Диапазоны измерения:

- 0–20 мТл (разрешение 0,01 мТл);
- 0–200 мТл (разрешение 0,1 мТл);
- 0–1000 мТл (разрешение 1 мТл).

Основная приборная погрешность:

- при постоянном магнитном поле $\pm 2\%$;
- при переменном магнитном поле (50–500 Гц) $\pm 2\%$;
- при переменном магнитное поле (500–1000 Гц) $\pm 3\%$.

Тесламетр предназначен для работы в комплекте с датчиками Холла: аксиальным или тангенциальным.

В данной работе используется аксиальный датчик Холла 10 (см. рис. 4.23.2).

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо соблюдать правила техники безопасности при работе с электричеством. Вносить изменения в схему можно только при выключенном источнике питания. Во избежания порчи установки сила тока через электромагнит не должна превышать предельно допустимого значения 4 А.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Исследование распределения магнитного поля между полюсами электромагнита

1. Соберите установку так, как показано на рис. 4.23.1, не помещая при этом образец в установку. Включите источник питания и тесламетр. Вращая ручку источника питания, установите силу тока, текущего через электромагнит, равной 0,5 А. При помощи щупа датчика Холла с шагом 5 мм измерьте величину магнитной индукции вдоль линии, соединяющей полюса электромагнита. Результаты занесите в табл. 4.23.1.

Таблица 4.23.1

$$I = 0,5 \text{ А}$$

x , мм						
B , мТл						

2. Повторите действия п. 1 для семи различных значений силы тока через электромагнит в диапазоне от 0,5 до 4 А с шагом 0,5 А. Результаты занесите в таблицы, построенные аналогично табл. 4.23.1.

Задание 2. Исследование зависимости угла поворота плоскости поляризации от величины магнитной индукции

1. Поместите один из светофильтров на пути пучка света. Расположите образец между скрещенными поляризатором и анализатором. Для этого поверните плоскость анализатора на угол 90° относительно плоскости поляризатора. На экране должно наблюдаться максимальное затемнение.

2. С помощью источника питания установите значение силы тока через электромагнит, равное 0,5 А. На экране будет наблюдаться просветление пятна. Повернув плоскость анализатора, получите максимальное затемнение. Зафиксируйте положение анализатора (положение 1). С помощью переключателя измените направление магнитного поля на противоположное. Вращая плоскость поляризатора в обратную сторону, заново получите максимальное затемнение пятна на экране. Снова зафиксируйте положение анализатора (положение 2). Определите угол $2\Delta\varphi$ между первым и вторым положениями плоскости анализатора.

3. Повторите действия п. 2 для семи различных значений силы тока через электромагнит в диапазоне от 0,5 до 4 А с шагом 0,5 А. Результаты занесите в табл. 4.23.2.

Таблица 4.23.2

$$\lambda =$$

I , А								
$2\Delta\varphi$, град.								
$\langle B \rangle$, мТл								

4. Повторите задания пп. 1–3 для пяти различных светофильтров. Данные занесите в таблицы, построенные аналогично табл. 4.23.2.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным, полученным в задании 1, для каждого значения силы тока I постройте график зависимости величины магнитной индукции B в зазоре от расстояния x . Вычислите среднее значение $\langle B \rangle$ при каждом значении силы тока через электромагнит. Постройте график зависимости $\langle B \rangle$ от I .

2. На основе полученных в задании 2 результатов для каждого значения длины волны постройте график зависимости угла поворота $\Delta\varphi$ от среднего значения индукции магнитного поля в зазоре $\langle B \rangle$. Считая зависимость – линейной, найдите угловой коэффициент прямой и определите постоянную Верде $V(\lambda)$ образца для каждой длины волны. Длина образца $l = 30$ мм.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сравните полученную зависимость угла поворота плоскости поляризации от величины индукции магнитного поля с теоретически ожидаемой зависимостью (см. формулу (4.23.1)). Сделайте вывод о соответствии (4.23.1).

2. Используя данные п. 2 задания 2, постройте график зависимости постоянной Верде V от длины волны света λ .

3. Сравните полученную экспериментальную зависимость постоянной Верде от длины волны света с эмпирической формулой (4.23.2). При построении эмпирической зависимости (4.23.2) показатель преломления света можно считать постоянным и равным 1,82. Сделайте вывод о применимости формулы (4.23.2).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое эффект Фарадея?
2. В чем состоит феноменологическое объяснение эффекта Фарадея?

3. При каких условиях угол поворота плоскости поляризации линейно зависит от величины магнитной индукции?
4. От каких величин зависит постоянная Верде?
5. Постройте качественный график зависимости постоянной Верде от длины волны света.
6. Что такое линейно-поляризованный свет? Как его можно получить?
7. Как следовало бы модифицировать данную лабораторную работу, чтобы магнитное поле можно было считать однородным?
8. Для чего в данной работе используется анализатор?
9. Что измеряют с помощью датчиков Холла?
10. Зачем в данной работе используются светофильтры?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 4. Волны. Оптика. М.: Астрель, АСТ, 2003.
2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2006.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. М.: Физматлит, 2006.

Дополнительная

1. Бутиков Е.И. Оптика. СПб.: Невский диалект, 2003.
2. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. М.: Лань, 2007.
3. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.
4. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т. 2. М.: Дрофа, 2003.
5. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк А.М. Основы физики. Курс общей физики. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. М.: Физматлит, 2001.

Работа 4.24

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Цель: изучение особенностей распространения светового луча в оптоволокне; определение числовой апертуры оптоволокна; измерение времени распространения света по волокну и определение скорости света в нем.

Оборудование: две оптические скамьи; шесть модулей, в которых размещаются полупроводниковый (диодный) лазер, две фокусирующие линзы, детектор излучения и два держателя оптоволокна; оптоволокно (1 км); блок питания и усиления; двухканальный осциллограф.

ВВЕДЕНИЕ

Оптическое волокно представляет собой нить из оптически прозрачного материала (стекла или пластика) и используется для переноса света внутри себя посредством эффекта полного внутреннего отражения. *Волоконная оптика* – раздел прикладной науки, изучающей и описывающей свойства таких волокон. Изобретение лазеров сделало возможным построение волоконно-оптических линий передачи, превосходящих по своим характеристикам традиционные проводные средства связи, поскольку кабели на базе оптических волокон позволяют передавать информацию на большие расстояния с более высокой скоростью передачи данных, чем в электронных средствах связи. Еще одним существенным преимуществом оптической связи является отсутствие при передаче влияния наводок и шумов электрической и магнитной природы, что позволяет осуществлять так называемую оптическую развязку.

Оптическое волокно имеет круглое сечение и состоит из двух частей: сердцевины и оболочки. Кроме того, для механической защиты и для поглощения падающих волн оптическое волокно покрыто защитным слоем. Для обеспечения полного внутреннего отражения показатель преломления сердцевины несколько выше показателя преломления оболочки. Например, если показатель преломления оболочки равен 1,462, то показатель преломления серд-

цевины – 1,465. Луч света, направленный в сердцевину, будет распространяться по ней, испытывая многократные отражения от границы раздела «серцевина – оболочка». Диаметр сердцевины может отличаться в зависимости от типа волокна.

Показатель преломления n_k определяет отношение скорости света c в вакууме к скорости распространения света v в сердцевине оптического волокна:

$$n_k = \frac{c}{v}. \quad (4.24.1)$$

Оптические волокна могут быть *одномодовыми* и *многомодовыми*. Диаметр сердцевины одномодовых волокон составляет от 7 до 9 мкм. Благодаря малому диаметру достигается передача по волокну лишь одной моды электромагнитного излучения, за счет чего исключается влияние дисперсионных искажений.

Многомодовые волокна отличаются от одномодовых диаметром сердцевины, который составляет 50 мкм. Из-за большого диаметра сердцевины по многомодовому волокну распространяется несколько мод излучения – каждая под своим углом, из-за чего импульс света испытывает дисперсионные искажения и из прямоугольного превращается в колоколоподобный. Многомодовые волокна подразделяются на *ступенчатые* и *градиентные*. В ступенчатых волокнах показатель преломления от оболочки к сердцевине изменяется скачкообразно. В градиентных волокнах это изменение происходит иначе – показатель преломления сердцевины плавно возрастает от края к центру. Это приводит к явлению рефракции в сердцевине, благодаря чему снижается влияние дисперсии на искажение оптического импульса. Профиль показателя преломления градиентного волокна может быть параболическим, треугольным или ломаным.

Рассмотрим модель оптического волокна в виде диэлектрика, имеющего круглое поперечное сечение и состоящего из центральной части с коэффициентом преломления n_k , и оболочки с коэффициентом преломления n_m , причем $n_m < n_k$ (рис. 4.24.1). Показатели преломления сердцевины и оболочки считаются равномерно распределенными, и граница находится между сердцевиной и оболочкой. Направление луча определяется углом θ , под которым луч входит в волокно.



Рис. 4.24.1

Существует предельный угол полного внутреннего отражения, θ_c , на границе между сердцевинной и оболочкой оптического волокна, при котором

$$\cos \theta_c = \frac{n_m}{n_k}. \quad (4.24.2)$$

Данному углу полного внутреннего отражения должен соответствовать угол падения θ_e , для которого выполняется закон преломления:

$$\frac{\sin \theta_e}{\sin \theta_c} = \frac{n_k}{n_0}. \quad (4.24.3)$$

Отсюда

$$\theta_e = \arcsin \left(\frac{n_k}{n_0} \sin \theta_c \right). \quad (4.24.4)$$

Используя уравнения (4.24.2) и (4.24.4) и полагая для воздуха $n_0 = 1$, получим:

$$\theta_e = \arcsin \left(\sqrt{n_k^2 - n_m^2} \right). \quad (4.24.5)$$

Таким образом, все падающие лучи, направления которых ограничены конусом с углом раствора θ_e , вследствие полного внутреннего отражения будут распространяться по волокну.

Характеристику оптического прибора, описывающую его способность собирать свет, называют *апертурой*. В зависимости от типа оптической системы эта характеристика может быть линейным или угловым размером. В настоящей работе будет определяться числовая апертура A , которая определяется синусом апертурного угла:

$$A = \sin \theta_e = \sqrt{n_k^2 - n_m^2}. \quad (4.24.6)$$

Именно эта величина наиболее полно определяет способность оптического волокна передавать световой сигнал. Для экспериментального определения числовой апертуры можно измерить зависимость интенсивности излучения от его направления на выходе из оптического волокна. Пример такой зависимости показан на рис. 4.24.2. Кривая на рисунке не симметрична относительно нулевого угла из-за возможного несоосного расположения оптического волокна и входящего пучка. Определив значения углов θ_1 и θ_2 , для которых интенсивность излучения уменьшается в e^2 раз, числовая апертура определяется как

$$A = \sin \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right). \quad (4.24.7)$$

Теоретическое значение A может быть определено по формуле (4.24.6) при значениях n_k и n_m равными, соответственно, 1,465 и 1,462.

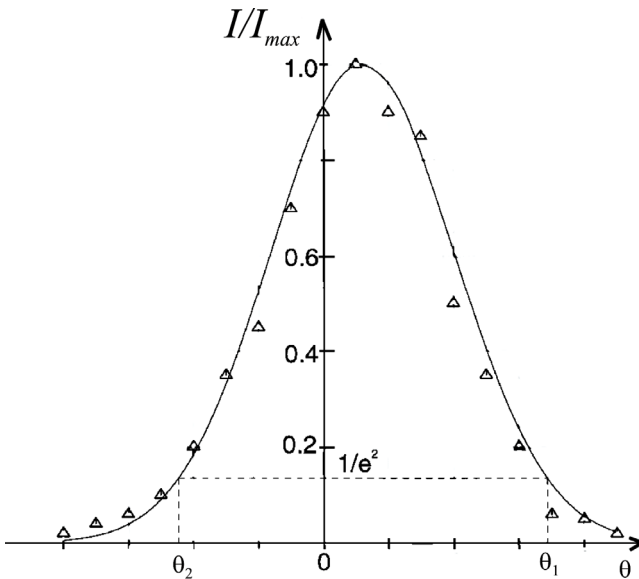


Рис. 4.24.2

Попадая в центральную часть волокна, лучи света распространяются винтообразно. Это становится очевидным, если спроектировать распространяющийся луч на $x\phi$ -плоскость поперечного сечения волокна. При этом направление распространения света по волокну считается направлением вдоль оси z . Тогда периодическое движение луча в $x\phi$ -плоскости можно рассматривать, как возникновение стоячих волн. Такие стоячие волны называют *осциллирующими*, или *простыми модами*. Так как эти моды возникают в $x\phi$ -плоскости, т.е. перпендикулярно к оси z , их также называют *поперечными*. Моды, возникшие по оси z , называют *продольными*.*

Нахождение распределения электрического поля по сечению оптического волокна является достаточно сложной задачей, требующей знания математического аппарата специальных функций, в частности функций Бесселя и Хенкеля. В настоящем описании ограничимся иллюстрацией на рис. 4.24.3 зависимости модуля напряженности $E(r, \phi)$, выражающейся через функцию Бесселя.

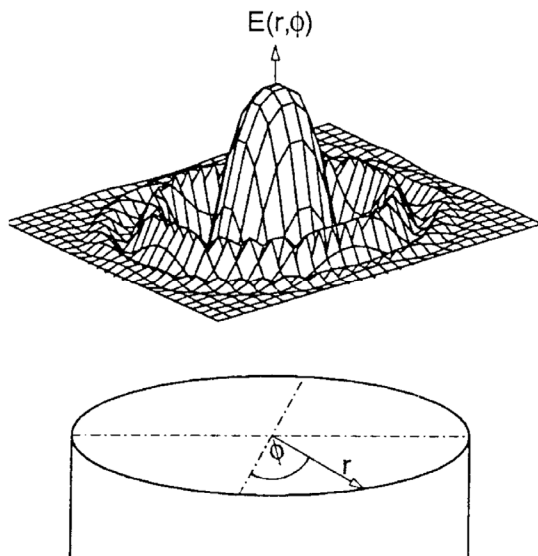


Рис. 4.24.3

* Обратим внимание, что в безграничном однородном и изотропном диэлектрике или в вакууме могут распространяться только поперечные электромагнитные волны.

Радиус волокна определяет порядок мод. В радиальном направлении волокна наблюдается главный максимум при $r=0$ и при удалении от него – максимумы или минимумы, которые также называют *узлами*. Видно, что число узлов определено диаметром волокна. Если волокно изготовлено таким образом, что по нему распространяется только основная волна, оно называется *одномодовым*. Во всех других случаях говорят о многомодовом волокне. В зависимости от области применения волокна используется один или другой его тип.

Измерение времени распространения света в волокне при известной длине последнего позволяет по формуле (4.24.1) определить значение данного показателя преломления n_k .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Лабораторная установка показана на рис. 4.24.4, а принципиальная схема дана на рис. 4.24.5.

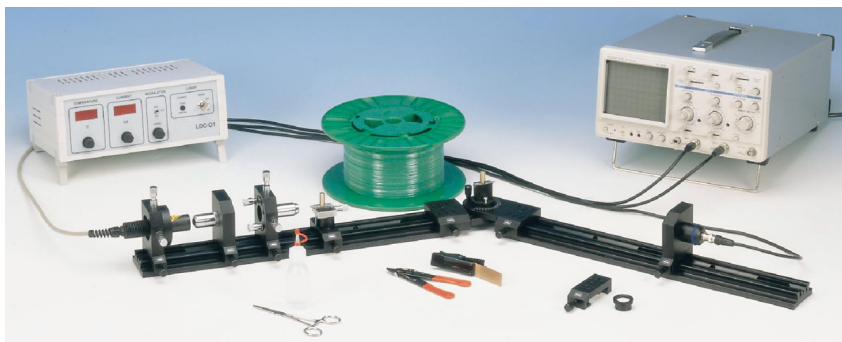


Рис. 4.24.4

Вся установка включает в себя несколько модулей, обозначенных на схеме заглавными буквами латинского алфавита.

А – лазерный диод, установленный на регулируемом в двух плоскостях держателе. В нем же находятся холодильник Peltier и термистор для измерения температуры лазерного диода. Лазерный диод излучает максимальную мощность 50 мВт.

В – объектив микроскопа, фокусирующий излучение лазера.

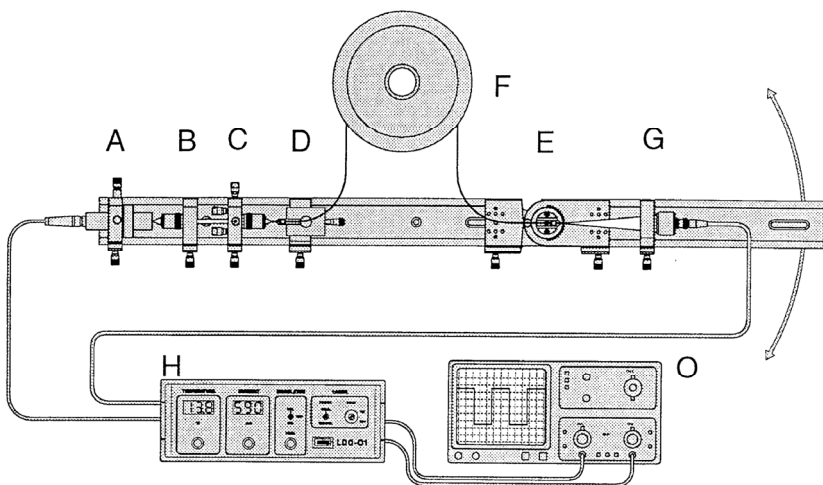


Рис. 4.24.5

С – аналогичен модулю В, но с тонкой регулировкой держателя по осям X , Y и углам Θ и Φ . В модуле установлен объектив с меньшим фокусным расстоянием для наиболее эффективного попадания лазерного излучения в волокно.

Д – держатель волокна, расположенный на некотором расстоянии от модуля С в направлении распространения луча так, чтобы торец оптического волокна находился в фокусе объектива С.

Ф – одномодовое или многомодовое оптическое волокно длиной 1000 м и намотанное на барабан.

Е – второй держатель волокна. Держатель снабжен устройством, позволяющим измерять угловую зависимость выходной мощности волокна.

Г – приемник излучения (фотодатчик с PIN-фотодиодом), соединенный с предусилителем блока управления.

Н – блок питания и управления лазером с предусилителем LDC01. На переднюю панель блока выведены кнопки регулировки тока лазера; включения модуляции амплитуды излучения генератором сигналов специальной формы: прямоугольными и треугольными импульсами; регулировки частоты следования импульсов; регулировки усиления сигнала фотодатчика.

О – двухканальный осциллограф НМ1500-2 с полосой пропускания 150 МГц, на который через блок управления подаются на

первый канал сигнал с фотодатчика, на второй канал – сигнал модулирующий излучение лазера.

Описание осциллографа HM1500-2. Для успешного выполнения лабораторной работы необходимо иметь навыки работы с осциллографом HM1500-2, являющимся достаточно сложным современным измерительным средством, сочетающим аналоговые и цифровые методы измерений. Изображение передней панели осциллографа показано на рис. 4.24.6.

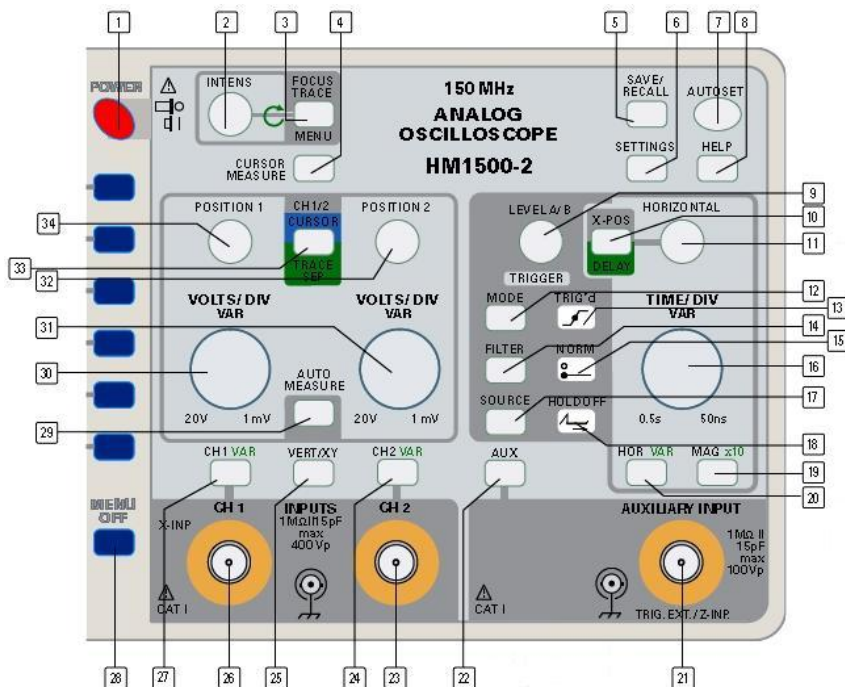


Рис. 4.24.6

Приведем управляющие элементы передней панели осциллографа и определим их назначение:

1 – POWER (кнопка включения питания);

2 – INTENS (многофункциональный регулятор, который при отсутствии на экране осциллографа функциональных и контекстных меню выполняет роль регулировки яркости принимаемого сигнала, а в случае выведенного контекстного меню позволяет производить выборку нужной функции);

3 – FOCUS TRACE MENU (нажатие данной кнопки выводит меню выделения базового канала для интенсивности сигнала, но в настоящей работе не применяется);

4 – CURSOR MEASURE (нажатие данной кнопки выводит меню курсоров для измерения амплитудных и временных характеристик, в настоящей работе используются две функции данного меню, для измерения угловой зависимости интенсивности излучения, выходящего из оптического волокна, в контекстном меню ручкой «INTENS» выделяется «voltage»; после удаления меню на экране появляются два горизонтальных курсора, расстояние между которыми в цифровом виде выводится в верхней части экрана; для измерения временных параметров в контекстном меню выбирается «time»; после удаления меню на экране появляются два вертикальных курсора, расстояние между которыми в численном виде выводится в верхней части экрана);

5 – SAVE/RECALL (выводит меню записи, но в работе не используется);

6 – SETTINGS (меню настройки, но в работе не используется);

7 – AUTOSET (автоматическая настройка, но в работе не используется);

8 – HELP (текст разъяснения, но в работе не используется);

9 – LEVEL A/B (осуществляет регулировку опорного сигнала, и стабилизирует изображение исследуемого сигнала);

10 – X-POS DELAY (изменяет функции горизонтальной регулировки сигнала, но в работе не используется);

11 – X-POS (регулировка горизонтального положения сигнала);

12 – MODE (выводит меню синхронизации, но в работе не используется);

13 – TRIG'd (светодиодный индикатор, светящийся постоянно или мигающий в зависимости от пускового сигнала);

14 – FILTER (позволяет менять режим запуска сигнала синхронизации в зависимости от исследуемого сигнала, позволяет получать устойчивые изображения передних и задних фронтов импульсных сигналов, но в работе не используется);

15 – NORM (индикатор автоматической синхронизации);

16 – TIME/DIV VAR (регулировка временного масштаба сигнала при чувствительности по оси X);

17 – SOURCE (выводит меню селекции типа синхронизации, но в работе не используется);

18 – HOLD-OFF (подсветка экрана, но в работе не используется);

19 – MAG x10 (увеличивает масштаб по оси времени в 10 раз, но в работе не используется);

20 – HOR VAR (выводит на экран меню временной развертки, но в работе не используется);

21 – AUXILIARY INPUT (вспомогательный канал, но в работе не используется);

22 – AUX (выводит меню вспомогательного канала, но в работе не используется);

23 – INPUT CH2 (вход второго канала);

24 – CH2 VAR (выводит на экран меню второго канала, но в работе не используется);

25 – VERT/XY (выводит на экран меню усилителя по вертикали, но в работе не используется);

26 – INPUT CH1 (вход первого канала);

27 – CH1 VAR (выводит на экран меню первого канала, но в работе не используется);

28 – MENU OFF (нажатие данной кнопки убирает меню с экрана);

29 – AUTO MEASURE (в активированном режиме нажатие данной кнопки выводит на экран меню измерений, но в работе не используется);

30, 31 – VOLTS/DIV VAR (осуществляют изменения чувствительности по напряжению первого и второго каналов соответственно);

32 – POSITION 2 (при отсутствии выведенных на экран курсоров осуществляет регулировку положения по вертикали сигнала, принимаемого вторым каналом; в случае выведенных курсоров осуществляет регулировку положения второго курсора);

33 – CH1/2–CURSOR–TRACE SEP (выводит меню селекции каналов, но в работе не используется);

34 – POSITION 1 (при отсутствии выведенных на экран курсоров осуществляет регулировку положения по вертикали сигнала, принимаемого первым каналом; в случае выведенных курсоров осуществляет регулировку положения первого курсора).

Внимание! При работе с осциллографом запрещается манипуляция с управляющими элементами, не используемыми в лабораторной работе. Включение и настройка лазера осуществляется только дежурным сотрудником или преподавателем лаборатории.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Не допускайте попадания прямого лазерного излучения на сетчатку глаз. При работе с источниками когерентного излучения (лазерами), даже малой интенсивности, требуется неукоснительно соблюдать меры безопасности, исключая поражение органов зрения. Связано это, прежде всего, с тем, что когерентное излучение может быть достаточно точно сфокусировано в малой области, размеры которой определяются дифракционными эффектами и могут иметь размер порядка длины волны. При попадании луча лазера в глаз может сложиться именно такая ситуация, когда хрусталик глаза фокусирует луч в малой области на сетчатке. В этом случае когерентное излучение даже маломощного лазера может создать в локальной области интенсивности, вполне достаточные для разрушения тканей глаза. Поэтому категорически запрещается «заглядывать» в луч лазера, а также вносить в него блестящие или какие-либо зеркально отражающие свет предметы. Даже многократно отраженное излучение лазера не теряет свойства когерентности и представляет опасность для глаз.

Особую опасность представляет ИК-лазер, используемый в этой работе, поскольку его излучение невидимо и положение пучка может быть обнаружено только с помощью индикаторной полоски.

2. Проявляйте особую осторожность при обращении с оптическим волокном. Не допускается обрыв и механическое повреждение волокна.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Определение порогового тока лазера

1. Поместите фотодатчик в держатель G.
2. Включите на блоке управления модуляцию треугольными импульсами. Установите ток лазера равным 200 мА.
3. Выведите на экран вертикальные курсоры.
4. Совместите первый курсор с началом импульса модуляционного сигнала, а второй курсор – с максимумом импульса модуляционного сигнала. Запишите полученное значение τ_1 .
5. Совместите первый курсор с началом импульса модуляционного сигнала, а второй курсор – с началом импульса сигнала с фотодатчика. Запишите полученное значение τ_2 .

6. Повторите измерения при различных значениях тока лазера 220 и 240 мА.

Задание 2. Измерение угловой зависимости интенсивности выходящего из оптического волокна излучения

1. Тщательно подготовленные концы оптического волокна закрепите на держателях D и E.

Внимание! Выполняется только дежурным сотрудником.

2. Держатель G с PIN-фотодиодом поместите на правый рельс на расстоянии, не слишком далеко от держателя E, положение которого определяется точкой вращения.

3. Включите блок управления лазером. Установите ток лазерного диода 200 мА. Включите режим внутренней модуляции прямоугольными импульсами. Установите коэффициент усиления равным 10.

4. Плавной регулировкой положения держателя D добейтесь максимального сигнала модулированного лазерного излучения на экране осциллографа. Изменяя чувствительность по напряжению первого канала получите наибольший размер сигнала с фотодатчика на экране осциллографа.

5. Выведите на экран курсоры измерения напряжения.

6. Переместите первый курсор в положение минимума сигнала, а второй курсор в положение максимума сигнала. Запишите полученное значение напряжения.

7. Изменяя угловое положение фотодатчика с интервалом в 1° снимите зависимость напряжения на фотодатчике V от угла θ в интервале от -10° до $+10^\circ$. Данные занесите в табл. 4.24.1.

Таблица 4.24.1

θ , град.	-10	-9	-8	-7	-6	-5	...
V , мВ							
V , мВ							
V , мВ							
$\langle V \rangle$, мВ	...	...	...	...	...	...	...

Проделайте не менее трех серий измерений согласно п. 7.

Задание 3. Измерение времени распространения света в оптическом волокне

1. Меняя угловое положение фотодатчика, добейтесь максимальной амплитуды сигнала.

2. Увеличивая чувствительность осциллографа по оси X , получите на экране наиболее полное изображение переднего фронта сигнала с фотодатчика. Время нарастания сигнала с генератора модуляции много меньше соответствующего времени лазерного сигнала. Поэтому на втором канале передний фронт сигнала будет выглядеть в виде резкой ступеньки в начале координат.

3. Выведите на экран вертикальные курсоры.

4. Совместите первый курсор с началом импульса модуляционного сигнала, а второй курсор – с началом импульса сигнала с фотодатчика. Запишите в самостоятельно подготовленную таблицу полученное значение времени t_1 .

5. Повторите измерение по п. 4, изменив положение второго курсора, поместив его на уровне половины максимальной амплитуды сигнала фотодатчика. Запишите полученное значение времени t_2 .

6. Аккуратно извлеките фотодатчик из держателя G и поместите его на специальный держатель, расположенный вне оптической скамьи вблизи модуля C .

7. Меняя положение фотодатчика, добейтесь максимального сигнала лазерного излучения.

8. Повторите измерения согласно пп. 3–5. Запишите в самостоятельно подготовленную таблицу полученные значения времен t'_1 и t'_2 .

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. Определите пороговый ток полупроводникового лазера как

$$I_t = I_0 \frac{\tau_2}{\tau_1},$$

где $I_0 = 200$ мА.

2. По полученным в задании 2 данным постройте график зависимости относительной интенсивности лазерного излучения от угла θ . По формуле (4.24.7) рассчитайте числовую апертуру.

3. Вычислите время распространения света в оптическом волокне по формуле:

$$t_0 = \frac{(t_1 - t'_1) + (t_2 - t'_2)}{2}.$$

Определите скорость распространения света в оптическом волокне и, воспользовавшись формулой (4.24.1), найдите показатель преломления n_k .

ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении к работе должны быть указаны:

- 1) значение порогового тока I_t с погрешностью (разброса);
- 2) время распространения света в оптическом волокне, скорость распространения света в оптическом волокне и показатель преломления n_k .
- 3) значения числовой апертуры A , найденной из графика и рассчитанной по формуле (4.24.6).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют оптическим волокном?
2. Какие типы оптических волокон вы знаете?
3. Какое физическое явление лежит в основе конструирования оптического волокна?
4. Что такое апертура оптической системы?
5. Что такое апертура оптического волокна?
6. Дайте определение продольным и поперечным модам.
7. Почему в оптическом волокне показатель преломления оболочки должен быть меньше показателя преломления сердцевины?
8. Чем отличается многомодовое оптоволокно от одномодового?
9. Какая скорость – фазовая или групповая – определяется по времени распространения импульса света в многомодовом оптическом волокне?
10. Оцените, при какой длине оптического волокна выходящий пучок считать гауссовым?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1986.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 4. Волны. Оптика. М.: АСТ, 2001.

Дополнительная

1. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика. Теория и практика. М.: КУДИЦ-Пресс, 2008.

СОДЕРЖАНИЕ

Основные правила работы в лаборатории кафедры общей физики	3
Методические рекомендации	6
Работа 4.6. Интерференция микроволн	13
Работа 4.7. Дифракция и поляризация микроволн	23
Работа 4.8. Поле излучения рупорной антенны.....	40
Работа 4.9. Определение фокусных расстояний собирающих и рассеивающих линз.....	52
Работа 4.10. Исследование дисперсии стеклянной призмы.....	62
Работа 4.11. Изучение явления интерференции в опыте с бипризмой Френеля	72
Работа 4.12. Кольца Ньютона.....	80
Работа 4.13. Зоны Френеля и зонная пластинка	88
Работа 4.14. Определение когерентности и ширины линий спектра при помощи интерферометра Майкельсона	94
Работа 4.15. Дифракция на щели и неопределенность Гейзенберга.....	109
Работа 4.16. Дифракция света на кромке и щели	118
Работа 4.17. Изучение дифракции на множестве щелей и дифракционной решетке	128
Работа 4.18. Определение интенсивности дифракции на одной щели и системах двойных щелей	143
Работа 4.19. Изучение дифракции на щели и проволоке.....	152
Работа 4.20. Поляризация четвертьволновыми пластинками.....	164
Работа 4.21. Поляриметрия	171
Работа 4.22. Изучение закона Малюса	184
Работа 4.23. Эффект Фарадея.....	193
Работа 4.24. Изучение свойств оптического волокна	201

Редактор М.В. Макарова

Подписано в печать 15.11.2011. Формат 60×84 1/16

Печ. л. 13,5. Уч.-изд. л. 14,5. Тираж 1700 экз.

Изд. № 1/19. Заказ № 11.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42