

Лабораторная работа О78
ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА СИСТЕМЕ ЩЕЛЕЙ
И ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ

Авторы
А.Г. Андреев, А.В. Козырев, Ю.М. Шавруков

Москва
МГТУ имени Н.Э. Баумана
2015

Цель работы. Наблюдая дифракцию когерентного монохроматического излучения He-Ne лазера, изучить особенности дифракционных картин, получаемых на различных дифракционных объектах, и проверить справедливость соотношений, приводимых в теоретической части описания.

ВВЕДЕНИЕ

Волновая природа света наиболее ярко проявляется в явлениях интерференции и дифракции волн [1]. Именно исследования интерференции и дифракции света в XIX веке убедили окончательно исследователей в волновой природе света. В силу единой природы эти явления очень близки, и их разделение иногда весьма условно. Под интерференцией мы подразумеваем изменение интенсивности колебаний при сложении когерентных волн. Иногда, например, при измерениях на ультразвуке – амплитуды колебаний. Как правило, рассматривается интерференция плоских или сферических волн. Пространственное ограничение волны в направлении, перпендикулярном распространению, при интерференции мало или им можно пренебречь. Для дифракции существенно ограничение пучка и связанное с этим возникновение колебаний в области геометрической тени. Другое определение дифракции – любое отклонение от прямолинейного распространения света, не связанное с отражением, преломлением или распространением в оптически неоднородной среде. Более точное с физической точки зрения определение дифракции как интерференции в ограниченных пучках [2]. Это определение подчеркивает естественную связь интерференции и дифракции. Следует отметить, что интерференцию и дифракцию можно наблюдать не только для электромагнитных колебаний различных диапазонов, но и акустических звуковых, ультразвуковых колебаний, сейсмических волн, волн на границе раздела сред и т.д.

Напомним, что мы рассматриваем распространение возмущений малой амплитуды, в которых отклонение от положения равновесия описывается гармоническими функциями:

$$\sin(\psi), \cos(\psi), \exp(i\psi),$$

где ψ – фаза волны. Например, для плоской волны, распространяющейся в направлении оси z - $\psi = \omega \cdot t - k \cdot z$, где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – круговая частота, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Размерность амплитуды колебаний определяется физической природой колебаний. В оптике, как правило, измеряется не амплитуда E_c электромагнитных колебаний E_c , а величина пропорциональная интенсивности I электромагнитных колебаний $I \sim E_c^2$. Например, потемнение

фотопленки, напряжение на фотоэлементе или фотоэлектронном умножителе (ФЭУ), сигнал с передающей телевизионной трубки (видикон), сигнал с матрицы современного фотоаппарата и т.д. [2].

В работе дифракционная картина наблюдается на достаточно большом расстоянии от дифракционных объектов, которыми являются щель, система щелей, дифракционная решетка. Ширина щелей, период дифракционной решетки много меньше их длины. При этих условиях интеграл Гюйгенса-Френеля (см. ДОПОЛНЕНИЕ) принимает вид:

$$E_o(x_o) = \frac{\exp(ikR)}{\sqrt{i\lambda R}} \cdot \Phi_m(\varphi) \quad (B.1)$$

Здесь $x_o = R \cdot \operatorname{tg}(\varphi)$ – расстояние от точки наблюдения от центра дифракционной картины, R – расстояние от центра дифракционного объекта до плоскости наблюдения дифракционной картины. Для $\Phi_m(\varphi)$ имеем:

$$\Phi_m(\varphi) = E_c \cdot \int \exp(-ikx \cdot \sin\varphi) \cdot dx \quad (B.2)$$

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В этом разделе использованы следующие обозначения:

b - ширина щели;

s - период дифракционной решетки;

N - число щелей в дифракционной решетке, освещенных когерентным лучом He-Ne лазера.

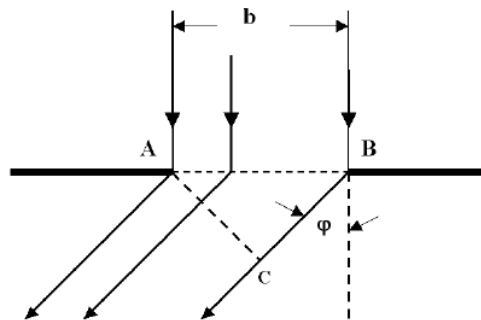


Рис. 1

На рис.1 приведена схема дифракции на одиночной. Для одиночной щели геометрическая разность хода $d_1 = CB$ для лучей от краев щели (точки A и B) равна:

$$d_1 = b \cdot \sin(\varphi)$$

Для оптической разности хода, определяемой разностью фаз $\delta_1 = \phi_A - \phi_B$ $\delta_1 = \phi_A - \phi$ имеем:

$$\delta_1 = kd_1 = \frac{2\pi}{\lambda} b \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

Геометрическая разность хода от двух соседних щелей равна:

$$d_2 = s \cdot \sin(\varphi)$$

А соответствующая разность фаз:

$$\delta_2 = \frac{2\pi \cdot d_2}{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot s \cdot \sin(\varphi)}{\lambda} \quad (2)$$

Для одиночной щели функция $\Phi_m(\varphi)$ (см. I.4) принимает вид:

$$\Phi_m(\varphi) = E_\varphi \int_{-b/2}^{b/2} \exp(-ikx \cdot \sin(\varphi)) \cdot dx$$

В результате интегрирования получаем:

$$\Phi_m(\varphi) = E_\varphi b \frac{\sin(0,5kb \sin(\varphi))}{0,5kb \sin(\varphi)}$$

Интенсивность возмущения пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. Для интенсивности I_φ получаем:

$$I_\varphi = I_c \frac{\sin^2(0,5kb \sin(\varphi))}{(0,5kb \sin(\varphi))^2}$$

Здесь $I_c = I_o b^2 \cdot \frac{1}{R\lambda}$ интенсивность в центре ($\varphi = 0$) исследуемой дифракционной картины, расположенной в дальней зоне (I.3). I_o – интенсивность возмущения в плоскости дифракционной решетки.

Дифракционные решетки, используемые в данной лабораторной работе, представляют собой набор N строго идентичных щелей с периодом s , равномерно освещенных когерентным пучком. Зависимость интенсивности в дальней зоне интерференции N идентичных, расположенных на s постоянным шагом друг от друга когерентных точечных источников имеет вид:

$$I_\varphi \propto \frac{E_\varphi^2 \cdot \sin^2(N \cdot 0.5 \cdot \delta_2)}{\sin^2(0.5 \cdot \delta_2)} \quad (3)$$

Распределение интенсивности при дифракции на одной щели будет:

$$E_\varphi^2 \propto \frac{\sin^2(0.5 \cdot \delta_1)}{(0.5 \cdot \delta_1)^2} \quad (4)$$

Окончательно для дифракции на решетке из N щелей получаем:

$$\begin{aligned} I_\varphi &\propto \frac{\sin^2(0.5 \cdot kb \cdot \sin \varphi)}{(0.5 \cdot kb \cdot \sin \varphi)^2} \cdot \frac{\sin^2(0.5 \cdot Nks \cdot \sin \varphi)}{\sin^2(0.5 \cdot ks \cdot \sin \varphi)} = \\ &= \frac{\sin^2(0.5 \cdot \delta_1)}{(0.5 \cdot \delta_1)^2} \cdot \frac{\sin^2(N \cdot 0.5 \cdot \delta_2)}{\sin^2(0.5 \cdot \delta_2)} \end{aligned} \quad (5)$$

Напомним еще раз – здесь $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, b – ширина щелей, s – расстояние между щелями, N – число когерентно освещенных щелей.

Первый сомножитель в этом выражении обычно называется множителем щели $I_{щ}$, второй – множителем решетки $I_{реш}$. При наблюдении дифракции на одиночной щели положение минимумов определяется обращением в ноль числителя в (4) или, что то же самое, при обращении в ноль первого сомножителя в (5).

$$\sin \varphi_h = \frac{h \cdot \lambda}{b} \quad (h=1,2,3,\dots) \quad (6)$$

Положение максимумов при дифракции на одиночной щели определяется соотношением:

$$\sin \varphi_h = \frac{2h+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{b} ; \quad (h=1,2,3,\dots) \quad (7)$$

Положения максимумов дифракции на системе двух идентичных щелей определяются выражением:

$$4 \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot s \sin \varphi \right) = 0 \quad (8)$$

Это выражение обращается в ноль при значениях углов, для которых

$$\sin \varphi_k = \frac{2k+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{s} ; \quad (k=0,1,2,3,\dots) \quad (9)$$

Для большого числа щелей в решетке интенсивность дифрагированного излучения в максимумах в N^2 раз больше, чем интенсивность при дифракции лучей на одиночной щели в том же направлении:

$$I \propto N^2 \quad (10)$$

Главные максимумы порядка k наблюдаются в направлениях:

$$\sin \varphi_k = \frac{k \cdot \lambda}{s} \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (11)$$

На рисунке 2 приведены измерения интенсивности I дифракции на трех щелях: $b = 0,1\text{мм}$ и $s=0,25\text{мм}$, $N = 3$. Расстояние между дифракционной решеткой и фотодетектором $L=107\text{ см}$. Пунктирной линией обозначены результаты дифракции на единичной щели той же ширины $b = 0,1\text{мм}$. Для сопоставления результатов измерений дифракции одиночной щели и трёх щелей максимальные значения графически приравнены. С левой стороны графика в относительных единицах SkT (Skalenteilen - нем. деление шкалы) две шкалы. Пунктирной линией обозначена шкала для одиночной щели. По оси x указано положение щели приемного устройства в мм . Центральному дифракционно-

му максимуму нулевого порядка соответствует отсчет по шкале 36 мм. Вся дифракционная картина занимает ± 8 мм симметрично относительно центрального максимума. Расстояние от дифракционной решетки до приемного устройства равно $l_M = 1000$ мм. В этих условиях приближенное соотношение $\sin(\varphi) = \operatorname{tg}(\varphi) = x/R$ выполняется с высокой точностью.

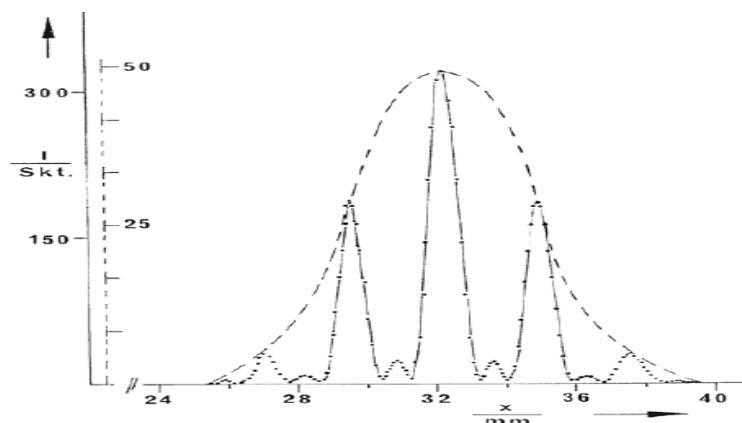


Рис. 2

Между главными максимумами k -го и $k+1$ -го порядка наблюдаются $N-1$ добавочных минимумов и $N-2$ добавочных максимума. Напомним, что N - число щелей в решетке. Добавочные минимумы и максимумы определяют ширину спектральных линий, разрешающая способность дифракционных решеток. В реальных, рабочих дифракционных решетках N очень велико, порядка 1000-10000 когерентно освещенных щелей. В этих условиях наблюдать добавочные максимумы практически невозможно. Добавочные максимумы возможно наблюдать в демонстрационных решетках, где всего несколько 3 – 5 щелей.

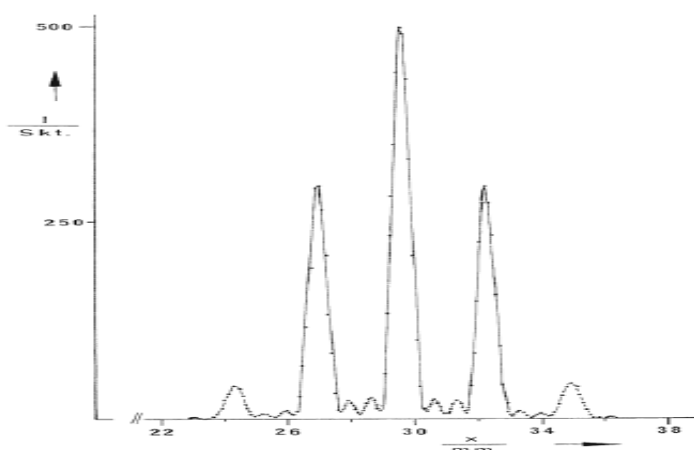


Рис. 3

На рисунке 3 приведено распределение интенсивности дифрагированных лучей на решетке из 4 щелей с теми же параметрами b и s , как и на рисунке 2.

Экспериментальная установка

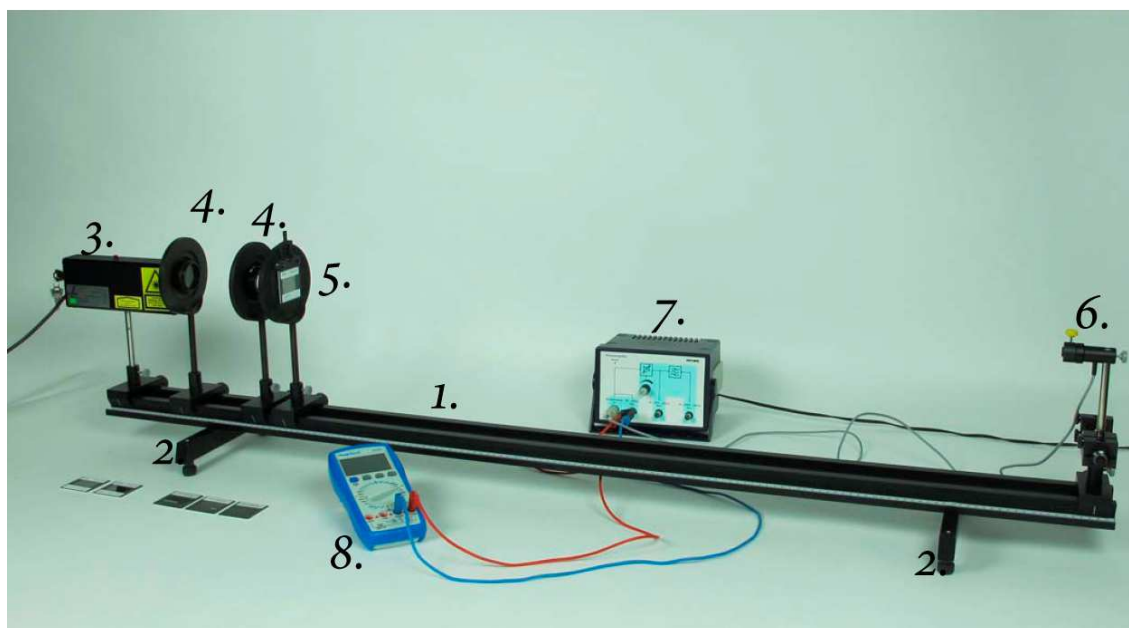


Рис. 4

Опыты по дифракции света на различных объектах выполняются на установке, которая включает в себя следующие элементы.

1. Оптическая скамья длиной 1500 мм.
2. Две опоры оптической скамьи с регулировочными винтами.
3. Гелий-неоновый лазер мощностью 1 мВт на длине волны 632,8 нм, включаемый в сеть 220 В и закрепленный с помощью стержневой стойки на подвижной опоре.
4. Две линзы в оправках, закрепленные на держателе с подвижными опорами (фокусные расстояния линз +20 мм и +100 мм).
5. Держатели объектов дифракции («слайдов») на подвижной опоре.
6. Кремниевый фотоприемник с микрометрическим механизмом перемещения, установленный на подвижной опоре.
7. Универсальный измерительный усилитель с адаптером питания и кабелем передачи напряжения от фотодетектора.

8. Измерительный прибор 2010 (мультиметр) и два провода длиной 500 мм.

Для удобства настройки оптической схемы оптическая скамья имеет шкалу с миллиметровыми делениями, а на лицевой стороне подвижных опор имеются светлые риски. Типичное положение подвижных опор на скамье (по положению риски) следующее (указаны расстояния от края скамьи):

- лазер – 2,5 см;
- линза ($f = +20$ мм), вплотную придвинутая к выходному отверстию лазера – 14,5 см;
- линза ($f = +100$ мм) 26,5 см;
- держатель дифракционных объекты – 33 см;
- фотоприемник на подвижной опоре – 147,5 см.

Используемые дифракционные объекты (системы щелей и решетки) имеют размеры, существенно превышающие диаметр пучка лазерного излучения ($\approx 0,5$ мм). Чтобы лазерный пучок имел возможно большую область взаимодействия с дифракционным объектом, приходится применять простейший расширитель лазерного пучка. Действие его основано на том, что параллельный узкий пучок излучения лазера, пройдя через короткофокусную линзу, собирается в точку в ее фокальной плоскости, а фокальная плоскость длиннофокусной линзы совмещается с фокальной плоскостью короткофокусной линзы. Таким образом, после прохождения длиннофокусной линзы получается достаточно широкий слегка расходящийся световой пучок. Пятно от него на слайде объектов имеет диаметр 3-4 мм. Уменьшение интенсивности освещения расширенным лазерным пучком затрудняет настройку измерительного устройства схемы, так как на темной поверхности диафрагмы фотоприемника при высокой внешней освещенности дифракционная картина плохо видна. В таких случаях используется либо лист белой бумаги в качестве экрана, либо осуществляется притемнение фотоприемника от внешней засветки.

Воздействие внешнего освещения, ухудшающее точность измерений, в лабораторной установке ослабляется применением в качестве фотоприемника кремниевого фотодиода, максимум спектральной чувствительности которого (900 нм) смещен в инфракрасную область с учетом того, что излучение лазера имеет длину волны в длинноволновой области видимого участка спектра.

Таким образом, без дополнительных технических приемов можно оценивать распределение интенсивности дифракционной картины на экране, если отсутствует прямое солнечное излучение или световой поток от расположен-

ной вблизи лампы накаливания. Люминесцентные и светодиодные источники освещения помещения не оказывают заметного влияния на точность измерений.

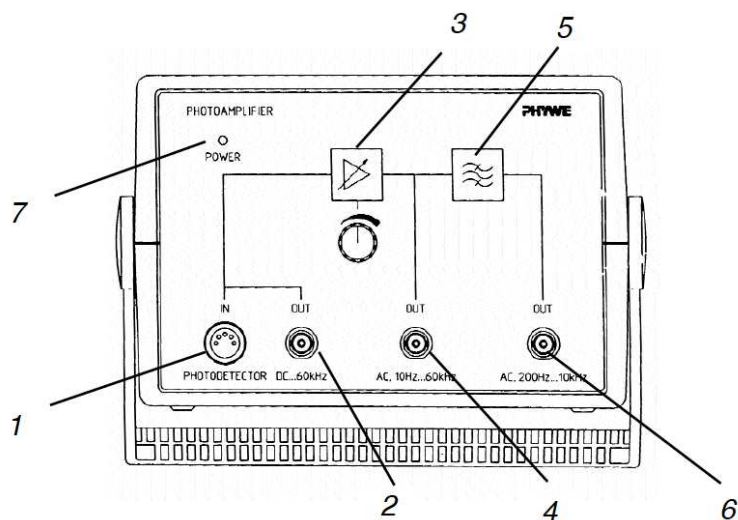


Рис. 5

На рисунке 5 изображен универсальный фотоусилитель (N08785-99), применяемый в лабораторной установке, который может быть использован в нескольких режимах (обработка сигнала с постоянной составляющей, усиление напряжения с фотодиода без постоянной составляющей и использование полосового фильтра). В данной лабораторной работе сигнал с фотодетектора (N08735-00) по низкочастотному кабелю поступает на разъем (1) фотоусилителя, и без регулировки усиления с разъема ... (2).. 60 кГц через переходник (N07542 штепсель BNC/4 мм гнездо) подается на гнезда «COM» и (V, Ω, Hz) мультиметра 2010.

ВНИМАНИЕ! Для проведения измерений поставить переключатель пределов и режимов измерения (ручка с круговой шкалой) в положение для измерения напряжения 20 В или 2 В, кнопкой «POWER» включить питание мультиметра и кнопкой DC/AC включить режим измерения по постоянному току (на дисплее появится символ DC).

В комплекте деталей лабораторной установки имеются слайды со следующими дифракционными объектами:

1. Три единичные щели шириной $b = 0,1; 0,2; 0,4$ мм.
2. Четыре системы щелей с параметрами:
 - Ширина щели $b=0,1$; расстояние между центрами щелей $s=0,25$ мм; число щелей $N=2$.
 - $b=0,1$; $s=0,25$ мм; $N=3$.
 - $b=0,1$; $s=0,25$ мм; $N=4$.
 - $b=0,1$; $s=0,25$ мм; $N=5$.

3. Дифракционные решетки с числом штрихов на 1 мм длины:
4; 8; 10; 50.

ВНИМАНИЕ! При работе с дифракционными объектами держать слайды и заправлять их в пазы держателя можно только касаясь пластиковой обоймы, чтобы не оставлять следов от пальцев на щелях и решетках.

Заменяя объект наблюдения, придерживайте стойку с опорой, чтобы не нарушить настройку установки. Перед проведением измерений убедитесь, что освещенная расширенным лазерным пучком область находится примерно посередине соответствующего дифракционного объекта.

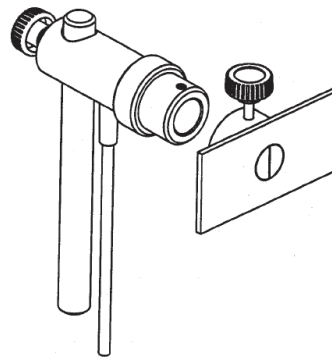


Рис. 6

Узел фотодетектора (рисунок 6) представляет собой фотодиод, размещенный в корпусе, кабель, передающий сигнал фотодиода на блок фотоусилителя и щелевую диафрагму переменной ширины.

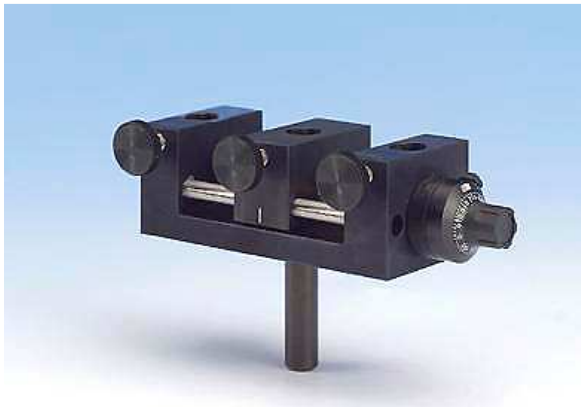


Рис. 7а. Подвижное основание для фотодетектора.

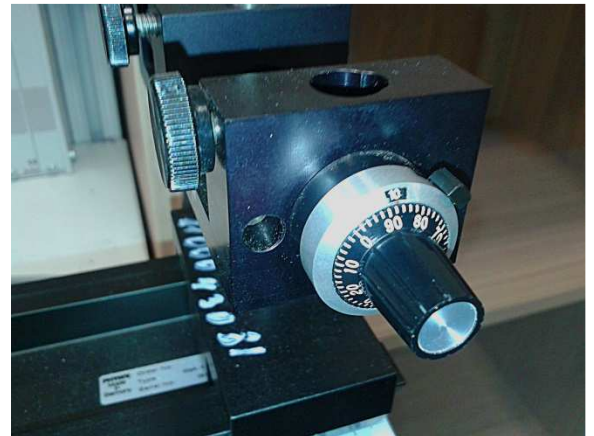


Рис. 7б. Измерительное устройство положения фотодиода.

Определение перемещения фотодиода (рисунок 7). В формулах, описывающих распределение интенсивности дифракционной картины, пространственной координатой считают $\sin\varphi$. Из соотношений

$$b \cdot \sin\varphi \approx \pm 0,5\lambda(2k+1) \text{ и} \\ s \cdot \sin\varphi = \pm m\lambda,$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$ и $m = 0, 1, 2, 3 \dots$ соответственно порядки максимумов при дифракции на щели и решетке, можно заметить, что при $b = 0,1 \text{ мм}$ у щели и $s = 10^{-4} \text{ м}$ у решетки максимумы с номерами 2 обнаруживаются на достаточно малых углах, для которых $\varphi \approx \sin\varphi \approx \tan\varphi = x/L$, где x – линейная координата максимума первого порядка, отсчитываемая от центральных максимумов, а L – расстояние от дифракционного объекта до экрана. В установке лабораторной работы $L \approx 1 \text{ м}$, поэтому в расчетных соотношениях $\sin\varphi$ можно заменить на координату x , измеренную *в метрах*. Однако непосредственно измерения удобно осуществлять, если координату щели фотодетектора определять в миллиметрах.

Отсчетное устройство представляет собой неподвижную шкалу с миллиметровыми делениями, расположенную на опоре фотодетектора перпендикулярно оси оптической системы. Перемещение основания фотодетектора относительно шкалы осуществляется микрометрическим винтом, который вращается рукояткой, расположенной в центре круговой шкалы с делениями, оцифрованными от 0 до 90 (50 делений по 0,01 мм). Количество оборотов этой рукоятки индицируется числом (от 0 до 20) в окошечке, расположенном в верхней части обоймы поворотной шкалы. Двадцати оборотам микрометрического винта соответствует смещение фотодетектора на 10 мм или, что равноценно, один оборот рукоятки винта смещает фотодетектор на 0,5 мм.

Напоминаем, что интенсивность световой волны измеряется фотоприемником и регистрируется в виде выходного напряжения в В на дисплее мультиметра 2010.

Изучение дифракции света на одиночной щели.

Из формулы (4) теоретической части для распределения интенсивности дифрагированного на щели излучения в зависимости от угла дифракции φ , следует, что минимумы интенсивности наблюдаются на тех углах, для которых выполняется равенство

$$b \cdot \sin\varphi = \pm \lambda k. \quad (12)$$

Здесь b – ширина щели в непрозрачном экране, λ – длина волны излучения, а k – порядок минимума, причем k принимает целочисленные значения 1, 2, 3, ... Знаки \pm говорят о том, что минимумы симметрично расположены справа и слева относительно нулевого максимума, соответствующего $\varphi = 0$.

На установке имеются слайды с тремя одиночными щелями, размер b которых составляет 0,1 мм, 0,2 мм и 0,4 мм. Из формулы (12) видно, что самый

широкий центральный максимум будет у щели шириной 0,1мм. Учитывая сказанное выше о геометрии оптической схемы, будем считать величину $\sin\varphi$ численно равным координате x в m соответствующей точки экрана (дифракционной картины). Выполняя эксперимент, желательно проверить подтверждение формулы (6) и (7) на предлагаемой установке до 2-го минимума, а это значит, что диапазон изменения координаты x составляет около 25 мм. При шаге измерений даже 0,02мм процедура измерения становится утомительной. Поэтому предлагается провести эксперимент следующим образом.

1. В держатель слайдов поместить белый экран, включить лазер и отъюстировать с помощью линз установку так, чтобы на экране в держателе слайдов получилось светлое пятно диаметром 3-4мм.

2. Убрав экран из держателя слайдов, поставить на пути расширенного пучка щель шириной $b=0,1$ мм. Подстроить небольшими перемещениями лазера, линз и фотоприемника установку так, чтобы центр дифракционной картины приходился на щель фотоприемника.

3. Установить на мультиметре 2010 переключатель на измерение напряжения 2В, включить питание мультиметра кнопкой "POWER", перевести, если нужно, в режим измерения постоянного напряжения, нажав кнопку DC/AC до исчезновения на дисплее символа AC (слева вверху) и включить в сеть вилку адаптера фотоусилителя.

4. Слегка перемещая щель фотоприемника по дифракционной картине поворотом микрометрического винта опоры фотоприемника, находим положение, соответствующее максимальной интенсивности. Это значение координаты щели фотоприемника обозначим x_0 и ему будет соответствовать нулевой угол дифракции ($\varphi=0$). Величину x_0 , записываем в таблицу 1а.

Для упрощения процедуры измерений имеет смысл записывать в таблицу показания в виде числа оборотов (в окошечке измерителя) плюс значение от 0 до 98 по круговой шкале. Обращайте внимание на момент перехода числа оборотов через значение 20, и к предыдущему значению числа оборотов добавляйте новое число, обозначенное в окошечке шкалы.

Истинная координата x в мм получается делением суммы числа оборотов и показаний круговой шкалы на два, пример:

14,66 соответствует $x=7,33\text{мм}$

При дальнейшем вращении винта можно получить:

$$20+2,36 = 22,36 \text{ соответствует } x = 11,18\text{мм}$$

5. Поворачивая рукоятку винта перемещения щели фотоприемника в сторону возрастания значений координаты, определяем координату первого минимума x_1 , первого максимума x_1^* , второго минимума x_2 , второго максимума x_2^* , и заносим значения этих координат и соответствующие им показания прибора 2010 в таблицу 1а.

6. Аналогичные измерения по указанию преподавателя могут быть выполнены при вращении рукоятки винта в другую сторону т.е. при смещении щели фотоприемника в другую сторону от положения x_0 . Данные заносятся в таблицу 2а.

7. Провести измерения по п.п. 4-6 для щелей с размерами $b=0,2$ мм и $0,4$ мм. Данные измерений занести в табл. 1б, 1в и 2б, 2в.

При выполнении экспериментов с одиночными щелями для каждой из щелей между минимумами и максимумами дифракционной картины фиксируются показания мультиметра 2010 и координаты «х» 2^x-3^x точек, нужные для построения графиков.

Для щелей шириной $0,2$ мм и $0,4$ мм диапазон значений выходных напряжений фотоприемника становится большим, и может потребоваться в процессе измерений переход на другой предел измерения мультиметра.

Таблица 1а ($b=0,1$ мм)

Щель приемника смещается вправо

	0				1				1^*				2				2^*			3
Показания шкалы																				
$X, \text{мм}$																				
$U, \text{В}$																				

U – напряжение на выходе фотодиода, пропорциональное интенсивности излучения, падающего на него.

Ширина щели $b, мм$	0,1	0,1	0,1	0,1
Расстояния между центрами щелей $s, мм$	0,25	0,25	0,25	0,25

Опыты рекомендуется провести с числом щелей 3 и 4.

Для трех щелей зафиксировать координаты трех максимумов (не считая нулевого) и трех минимумов, а также значения напряжений в этих точках и убедиться в соответствии полученных результатов и теории в том, что число вторичных максимумов на две единицы меньше числа щелей, а число вторичных минимумов на одну единицу меньше числа щелей.

Выполнить аналогичные измерения для 4-х щелей.

Изучение дифракции света на дифракционных решетках.

В установке имеются слайды с дифракционными решетками со следующими числами штрихов на мм длины: 4, 8, 10 и 50. В эксперименте целесообразно использовать решетку с 4 и 8 штрихами на мм или периодами $s = 0,25 \cdot 10^{-3} м$ и $s = 0,125 \cdot 10^{-3} м$ соответственно.

Поставить слайд с выбранной решеткой в держатель, убедиться в образовании дифракционной картины на экране фотоприемника и, перемещая щель приемника микрометрическим винтом, зафиксировать координаты x максимумов, отмечая соответствующую интенсивность в таблицах 3 и 4.

Смещение приемника вправо

Таблица 3, $s=0,25 \cdot 10^{-3} м$.

	X_1^*	X_2^*	X_3^*	X_4^*	X_5^*
$X, мм$					
$U, В$					

Таблица 4, $d=0,125 \cdot 10^{-3} м$.

	X_1^*	X_2^*	X_3^*	X_4^*	X_5^*
$X, мм$					
$U, В$					

Обработка результатов измерений.

1. Построить графики распределения максимумов дифракционной картины

2. Проверить формулу $s \cdot \sin\varphi = k\lambda$, полагая $\sin\varphi = x(m)$, а $\lambda = 632,8$ нм для использованных в опыте дифракционных решеток.

Контрольные вопросы

1. Что такое дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера?
2. Как найти условие наблюдения минимумов при дифракции на одиночной щели?
3. Объяснить принцип действия расширителя лазерного луча.
4. Почему прямое солнечное излучение или свет лампы накаливания затрудняет проведение эксперимента?
5. Почему интенсивности максимумов одного порядка при дифракции света на системе 4-х щелей меньше, чем в случае с дифракционной решеткой с периодом $0,25 \cdot 10^{-3}$ м?
6. Почему для получения достоверных данных передвижения фотоприемника нужно осуществлять медленно?

ДОПОЛНЕНИЕ:

МЕТОД ГЮЙГЕСА-ФРЕНЕЛЯ РАСЧЕТА КАРТИНЫ ДИФРАКЦИИ

Приближенный метод расчета дифракционной картины основан на принципе Гюйгенса-Френеля, который предполагает, что каждый элемент волнового фронта является источником вторичных сферических волн, огибающая всех вторичных волн через интервал времени Δt позволяет восстановить волновой фронт. Возмущение в точке наблюдения можно представить как результат взаимного влияния всех точек поверхности волнового фронта.

Математическим выражением рассматриваемого подхода является интеграл Гюйгенса-Френеля:

$$E(\xi_o, t) = \iint_{\Sigma} \frac{K(\alpha)}{r(\xi, \xi_o)} E_m(\xi) e^{i[\omega t - kr(\xi, \xi_o)]} \cdot dS_{\xi}, \quad (Д.1)$$

Здесь:

- $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число;

- $E(\xi_o, t)$ – волновое возмущение, т.е. напряженность электромагнитного поля в точке наблюдения ξ_o в момент времени t ;
- \iint_{Σ} - интеграл по всей поверхности волнового фронта Σ , наблюдаемой из точки ξ_o ;
- $r(\xi, \xi_o)$ – расстояние между точкой интегрирования ξ на поверхности волнового фронта и точкой наблюдения ξ_o ;
- $E_m(\xi)$ – амплитуда возмущения на поверхности волнового фронта в точке ξ ;
- $K(\alpha)$ – медленно меняющийся размерный коэффициент, зависящий от угла дифракции α , т.е. угла между нормалью к поверхности волнового фронта в точке интегрирования ξ и направлением из этой точки в точку наблюдения ξ_o . Используются различные аппроксимации этой зависимости, например, $K(\alpha) = \frac{i}{2\lambda} [1 + \cos(\alpha)]$. Здесь $i = e^{i\pi/2}$ - поправка фазы вторичной волны. $K(\pi) = 0$ - амплитуда обратной вторичной волны равна нулю. Часто при наблюдении оптической дифракции $\alpha \ll 1$, в этом случае $K(\alpha) \cong \frac{i}{\lambda}$.

Очевидно, что зависимость от времени можно искать в виде:

$$E(\xi_o, t) = E_o(\xi_o) e^{i\omega t}$$

здесь $E_o(\xi_o)$ - амплитуда волнового возмущения в точке наблюдения. Интеграл Френеля (Д.1) часто записывают для амплитуды волнового возмущения, опуская временной множитель.

В зависимости от расстояния точки наблюдения до объекта дифракции выделяют две области: область дифракции Френеля, или ближняя зона, и область дифракции Фраунгофера, или дальняя зона. В области дифракции Френеля при изменении расстояния до объекта наблюдается закономерная смена интерференционных максимумов и минимумов. На больших расстояниях от объекта, в области дифракции Фраунгофера, формируется устойчивая угловая зависимость амплитуды волнового возмущения. Примерное значение границы между двумя областями дифракции определяется значением параметра $p = d^2 / z\lambda$, где d – характерный размер объекта (например, ширина щели, диаметр или радиус круглого отверстия или диска), z - расстояние от объекта до точки наблюдения, λ – длина волны. Ближней зоне соответствует значение $p > 1$, дальней зоне - $p < 1$. Значение параметра p практически равно числу наблюдаемых зон Френеля.

Для дальней зоны на расстоянии R от дифракционного объекта интеграл Френеля амплитуды возмущения может быть записан в виде:

$$E_o(\xi_o) = \frac{\exp(ikR)}{i\lambda R} \cdot \Phi_m(\vartheta, \varphi) \quad (Д.2)$$

Здесь $\Phi_m(\vartheta, \varphi)$ – интеграл по поверхности волнового фронта по координатам x и y , где x и y – координаты в плоскости волнового фронта, взаимодействующего с дифракционным объектом. Причем $z = R$.

$$\Phi_m(\vartheta, \varphi) = \iint_{\Sigma} \exp(-ikx \cdot \sin\varphi -iky \cdot \sin\theta) \cdot E_m(x, y) \cdot d\sigma$$

Размерность $\Phi_m(\vartheta, \varphi)$ равна размерности амплитуды возмущения на площадь.

Дифракционным объектом может являться щель или система параллельных щелей, ширина b и расстояния s между центрами которых много меньше длины щелей $L_{щ}$. Этот случай следует рассматривать как одномерный. В интеграле Гюйгенса-Френеля (Д.1) сферические вторичные волны следует заменить выражением для цилиндрических волн. В дальней зоне выражение, аналогичное (Д.2), будет иметь вид:

$$E_o(x_o) = \frac{\exp(ikR)}{\sqrt{i\lambda R}} \cdot \Phi_m(\varphi) \quad (Д.3)$$

Предполагая, что на дифракционный объект падает плоская волна $E_m(x) = E_\varphi = const$, получаем для $\Phi_m(\varphi)$ выражение:

$$\Phi_m(\varphi) = E_c \cdot \int \exp(-ikx \cdot \sin\varphi) \cdot dx \quad (Д.4)$$

Интеграл берется по доступным участкам первичного волнового фронта. Размерность $\Phi_m(\varphi)$ равна размерности амплитуды возмущения на длину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик В.С., Литвинов О.С. Электромагнитные волны и оптика. Учеб. пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. - 448с.
2. Алешкевич В.А. Оптика- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, 320с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика - М.: Лань, 2007. 495с.
4. Иродов И.Е. Волновые процессы. Учеб. пособие для вузов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 1999 – 256 с.