

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Кафедра экспериментальной физики

Исследование дифракции света на системе щелей

Методические указания к лабораторной работе

М. П. Коробков

Санкт-Петербург
2010

Лабораторная работа № 3.15

Исследование дифракции света на системе щелей

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение явления дифракции световых волн на узкой плоскопараллельной щели и на дифракционной решетке; экспериментальная проверка выполнимости условий для максимумов и минимумов дифракции; определение опытным путем длины волны излучения и периода дифракционной решетки.

ЗАДАЧИ

1. Измерить распределение интенсивности света в дифракционной картине от одинарной щели. Определить координаты первых минимумов интенсивности и, на основе полученного значения рассчитать ширину щели.
2. Измерить распределение интенсивности для дифракционных картин от наборов щелей с кратностью от 2 до 5. Определить отношения интенсивности главных максимумов в дифракционных картинах.
3. Для прозрачных дифракционных решеток с различными периодами определить положение максимумов различных порядков дифракции и при помощи полученного значения рассчитать длину волны используемого лазера.

ВВЕДЕНИЕ

Дифракция волн (лат. diffractus — буквально разломанный, переломанный) — явление, которое можно рассматривать как отклонение от законов геометрической оптики при распространении волн. Первоначально понятие дифракции относилось только к огибанию волнами препятствий, но в современном, более широком толковании, с дифракцией связывают весьма широкий круг явлений, возникающих при распространении волн в неоднородных средах, а также при распространении ограниченных в пространстве волн. Дифракция тесно связана с явлением интерференции. Более того, само явление дифракции зачастую трактуют как частный случай интерференции (интерференция вторичных волн).

Дифракция волн наблюдается независимо от их природы и может проявляться:

- в преобразовании пространственной структуры волн. В одних случаях такое преобразование можно рассматривать как «огибание» волнами препятствий, в других случаях — как расширение угла распространения волновых пучков или их отклонение в определенном направлении;

- в разложении волн по их частотному спектру;
- в преобразовании поляризации волн;
- в изменении фазовой структуры волн.

Дифракционные эффекты зависят от соотношения между длиной волны и характерным размером неоднородностей среды, либо неоднородностей структуры самой волны. Наиболее сильно они проявляются при размерах неоднородностей сравнимых с длиной волны. При размерах неоднородностей существенно превышающих длину волны (на 3-4 порядка и более), явлением дифракции, как правило, можно пренебречь. В последнем случае распространение волн с высокой степенью точности описывается законами геометрической оптики. С другой стороны, если размер неоднородностей среды много меньше длины волны, то в таком случае вместо дифракции часто говорят о явлении рассеяния волн.

Различают два вида дифракции: дифракция Френеля (когда $\frac{S}{\lambda L} \sim 1$), где S – площадь той части волнового фронта, которая пропускается отверстием или перекрывается препятствием, L – расстояние до точки наблюдения от препятствия, λ – длина волны) и дифракция Фраунгофера (когда $\frac{S}{\lambda L} \ll 1$). Если источник света и точка наблюдения находятся от препятствия достаточно далеко, так что можно считать падающие и дифрагированные волны плоскими, и в этом случае имеет место дифракция Фраунгофера.

Для точного расчета интенсивности света в дифракционной картине необходимо решать дифференциальные уравнения электромагнитной теории Максвелла с граничными условиями, которые определяются физическими свойствами экранов, препятствий и других неоднородностей среды. Из-за объективных математических сложностей решения существуют лишь для ограниченного числа случаев.

Простейшее объяснение явления дифракции может быть основано на принципе Гюйгенса-Френеля. Согласно этому принципу, волновой фронт представляется в виде совокупности большого числа вторичных когерентных источников, излучающих вторичные волны в сторону распространения волны. В этом случае образование дифракционной картины является результатом интерференции излучений от вторичных источников, а интенсивность в каждой точке экрана зависит от разностей фаз между волнами, приходящими в эту точку от вторичных источников.

На рис. 1 показано характерное распределение интенсивности в дифракционной картине от одной узкой щели при падении на нее плоской световой волны в случае, когда

расстояние от щели до экрана L значительно превышает ширину щели b (дифракция Фраунгофера). Результат интерференции волн от вторичных источников в некоторой точке экрана зависит от разности фаз между практически параллельными световыми лучами, идущими от вторичных источников, расположенных на открытом участке щели AB . Эта разность фаз, в свою очередь, определяется разностью хода между лучами.

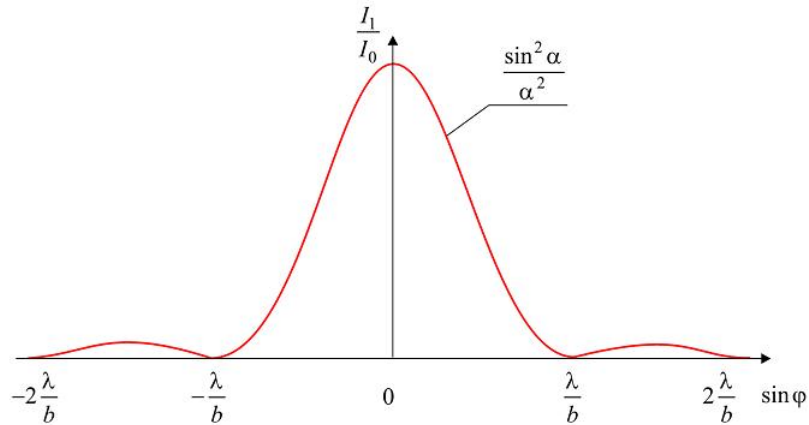


Рис. 1

Строгий анализ явления интерференции излучения от вторичных источников (см. раздел «Литература») приводит к следующему распределению интенсивности в дифракционной картине от одиночной узкой щели:

$$I(\varphi) = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)^2} \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность в середине основного максимума, b — ширина щели, λ — длина волны излучения. Из формулы (1) следует, что минимумы интенсивности на дифракционной картине ($I(\varphi) = 0$) наблюдаются при условии:

$$\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right) = 0$$

то есть при углах

$$\sin(\varphi_{\text{мин}}) = \pm \frac{\lambda}{b} n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

Целое число n называется порядком минимума.

Из рис. 1 следует, что $\text{tg } \varphi = \frac{x}{L}$, и, поскольку при малых углах $\text{tg } \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi$, то условие

минимума (2) можно записать в виде

$$x_{\text{мин}} = \pm \frac{\lambda L}{b} n, \quad (3)$$

где x_{\min} — координата минимума на дифракционной картине.

Между минимумами расположены максимумы, координаты которых определяются из

$$\text{условия } \frac{\partial I(\varphi)}{\partial \varphi} = 0.$$

Из этого условия следует, что максимумы при дифракции плоских волн на одной щели определяются соотношением:

$$b \sin(\varphi_{\max}) = m' \lambda$$
$$m' = 1.43, 2.46, \dots$$

Система из N лежащих в одной плоскости одинаковых параллельных узких щелей ширины b , разделенных непрозрачными промежутками ширины a , называется дифракционной решеткой. Расстояние $d = a + b$ называется периодом или постоянной дифракционной решетки. Интерференция вторичных волн от соседних щелей решетки приводит к появлению на экране распределения интенсивности света, которое описывается следующим соотношением:

$$I(\varphi) = I_0 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot b \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot b \sin \varphi\right)^2} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi N}{\lambda} \cdot d \sin \varphi\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot d \sin \varphi\right)}, \quad (4)$$

где b - ширина щели; d - расстояние между щелями; N - число щелей.

Здесь первая дробь характеризует распределение интенсивности в результате дифракции плоской волны на каждой одиночной щели, а множитель

$$\frac{\sin^2\left(\frac{\pi N}{\lambda} \cdot d \sin \varphi\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot d \sin \varphi\right)}$$

учитывает интерференцию между пучками, исходящими от всех щелей. I_0 - интенсивность света в направлении $\varphi = 0$, т.е. в центре дифракционной картины. Можно отметить, что $I_0 \sim (Nb)^2$ пропорционально открытой части падающего волнового фронта

Из анализа выражения (4) можно сделать следующие выводы:

1. Положение главных минимумов в спектре дифракционной решетки определяется соотношением:

$$\sin(\varphi_{\min}) = \frac{\lambda}{b} m,$$
$$m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (5)$$

2. Положение главных максимумов определяется соотношением:

$$\sin(\varphi_{\max}) = \frac{\lambda}{d} m \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots), \quad (6)$$

3. Положение побочных минимумов определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{\pi N}{\lambda} \cdot d \sin \varphi\right) &= 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot d \sin \varphi\right) &\neq 0, \\ d \sin(\varphi_{\min}) &= \frac{\lambda}{N} m' \\ m' &= \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm(N-1) \end{aligned} \quad (7)$$

Число дополнительных минимумов между двумя ближайшими главными максимумами равно $N-1$. В результате интерференции дифрагированных волн поток энергии распределяется, в основном, вблизи направлений, соответствующих главным максимумам.

Распределение интенсивности электромагнитных волн для трех щелей графически показано на Рис.2. По оси абсцисс отложены значения $\sin \varphi$, по оси ординат отложены значения интенсивности относительно его максимального значения. Распределение потока соответствует дифракции на трех щелях ($N = 3$) при условии $b = 3a$.

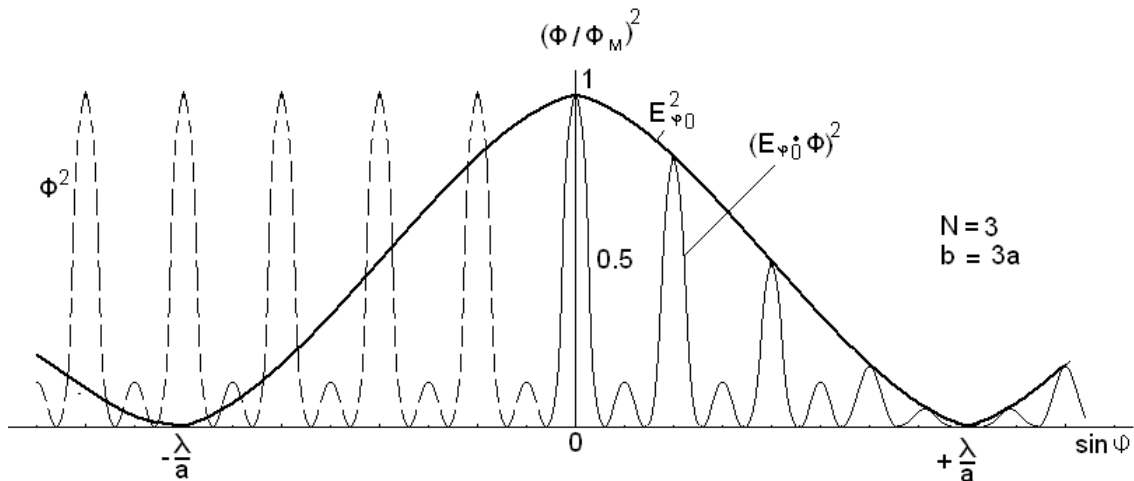


Рис. 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Общий вид экспериментальной установки показан на Рис. 3.

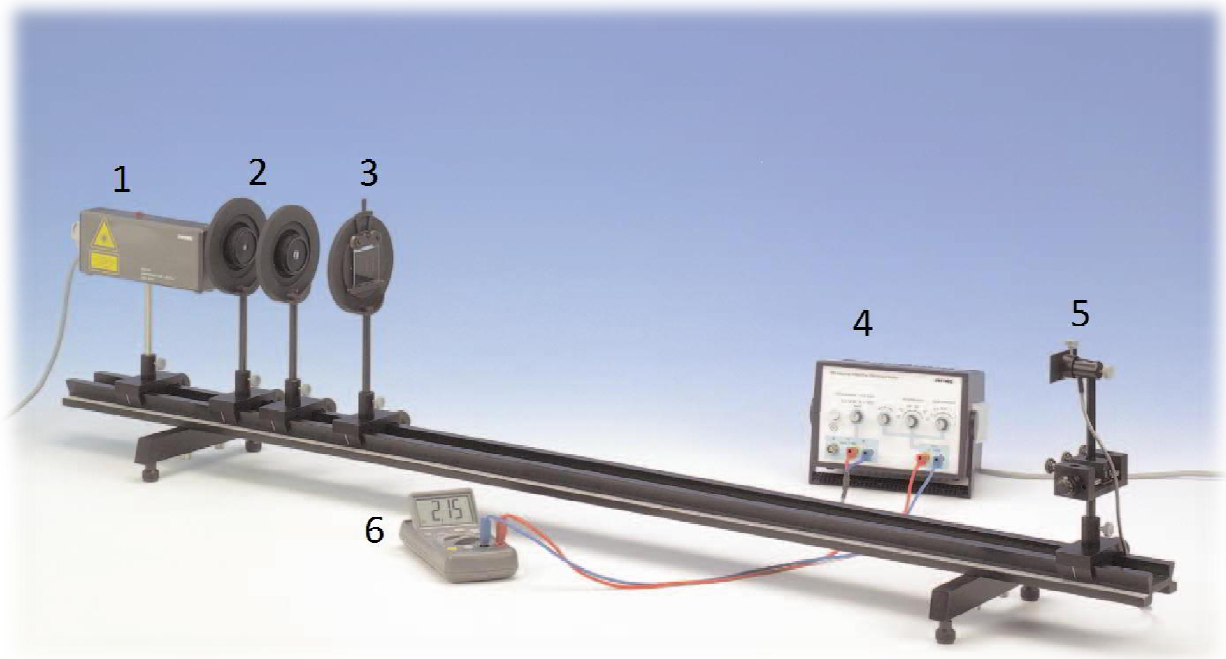


Рис. 3

На оптической скамье располагаются: источник световых волн — газовый гелий–неоновый лазер (1) с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм, рейтеры с коллимирующими линзами (2) и перемещаемый вдоль скамьи держатель (3), на котором закрепляются дифракционная щель или дифракционная решетка и узел регистрации на оптическом столике (5). Оптический столик снабжен неподвижной шкалой, вдоль которой с помощью регулировочного винта может перемещаться экран прорезью для фотодатчика. Фотодатчик подсоединен к усилителю-преобразователю электрического сигнала (4). После усиления сигнал преобразуется в цифровую форму мультиметром (6), показания которого пропорциональны интенсивности света, падающего на фотодатчик. Таким образом, измерительная система позволяет фиксировать пространственные положения дифракционных максимумов и минимумов, а также измерять относительные интенсивности света в различных точках дифракционной картины.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Получите у лаборанта принадлежности к установке: ключ для запуска лазера, наборы щелей и дифракционных решеток. Дифрагирующие объекты требуют аккуратного обращения с ними. У решеток и щелей есть только два допустимых месторасположения: либо в чехле в контейнере с остальными принадлежностями, либо в держателе на оптической скамье. Категорически воспрещается касаться руками или какими-либо

предметами рабочих поверхностей объектов измерений, брать их следует только за оправы.

2. Расположите компоненты установки на следующих расстояниях на оптической скамье:

лазер — 2,5 см;

линза с фокусным расстоянием $f=20$ мм — 14,5 см;

линза с фокусным расстоянием $f=100$ мм — 27,5 мм;

держатель для дифрагирующих объектов — 33 см;

передвижное устройство с фотоприемником — 147,5 см.

Включите лазер.

**Категорически запрещается смотреть в прямой лазерный луч
или его зеркальное отражение,
а также располагать любые отражающие предметы на пути лазерного луча!**

Перед проведением эксперимента во избежание нежелательных колебаний интенсивности лазер и измерительный усилитель прогрейте в течение 15 мин. Подключите фотодатчик ко входу 10^4 Ом измерительного усилителя-преобразователя (при измерениях используйте коэффициент усиления 10^3 - 10^5). Мультиметр должен находиться в режиме измерения постоянного напряжения. В процессе измерений при изменении коэффициента усиления обязательно проверяйте нулевой уровень сигнала усилителя и при необходимости корректируйте его, перекрывая лазерный луч каким-либо непрозрачным предметом.

Вращая маховик с круговой шкалой на передвижном устройстве, расположите фотоприемник в середине зоны его возможного перемещения. Расширенный и коллимированный при помощи линз лазерный луч должен равномерно освещать всю площадь входного окна фотоприемника. При необходимости произведите точную юстировку установки, аккуратно поворачивая лазер в его держателе.

3. Аккуратно установите в держатель диафрагму с одинарными щелями. Убедитесь по виду дифракционной картины, что диафрагма находится в вертикальном положении. Сместив ее в держателе в горизонтальном направлении, осветите одну из щелей (удобнее начать измерения со щели с максимальной шириной).

4. Плавно вращая регулировочный винт на узле регистрации, перемещайте входное окно фотоприемника вдоль дифракционной картины, одновременно регистрируя значение интенсивности света с помощью мультиметра. Ввиду того, что интенсивность света меняется в дифракционной картине в больших пределах, может потребоваться изменение коэффициента усиления преобразователя. При превышении значением сигнала уровня 10 В следует уменьшить коэффициент усиления. Шаг по пространственной координате

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Произведите нормировку профиля интенсивности на максимальное значение и заполните последний столбец Таблицы 1. Постройте график профиля относительной интенсивности дифракционной картины от одиночной щели (в качестве переменной выберите угол дифракции). С помощью соотношения (3) найдите для каждого зарегистрированного минимума значение ширины щели. Значение длины волны лазера считайте заданным. Рассчитайте погрешность данной величины по формулам нахождения погрешностей прямых многократных измерений.
2. По табличным данным постройте график профиля интенсивности дифракционной картины от набора щелей. Для каждого зарегистрированного главного максимума произведите расчет относительной интенсивности с помощью соотношения (4) и запишите результат расчета в отчет. Произведите сравнение расчетного значения с результатами измерений.
3. По данным Таблицы 2 и формуле (5) найдите длину волны для каждого максимума в дифракционном спектре решетки. Ввиду малости угла дифракции можно считать $\sin(\varphi_m) \approx \Delta x_m / L$. Рассчитайте погрешность длины волны по формулам нахождения погрешностей прямых многократных измерений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление дифракции? Каким образом на основании принципа Гюйгенса – Френеля можно объяснить образование дифракционной картины при прохождении световой волны через узкую щель?
2. Рассчитайте величину угла φ для минимума первого порядка при дифракции света с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм на плоскопараллельной щели шириной $d = 0,05$ мм.
3. Рассчитайте величину угла φ для главного максимума второго порядка в случае дифракционной решетки с периодом $d = 8$ мкм, если длина волны $\lambda = 0,63$ мкм.
4. Как будут изменяться положения максимумов на дифракционной картине от узкой щели, если передвигать щель ближе к экрану, не изменяя положений экрана и источника?

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. Наука. 1978 . Гл. XVIII.
2. Г. С. Ландсберг. Оптика. Наука. 1975. §§39,46.
3. А. Матвеев. Оптика. Высшая школа. 1985. Гл.6.
4. Н. И. Калитеевский. Волновая оптика. Наука.1978. Гл. V