

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ**  
для студентов специальностей 060811, 060815, 240400, 290300, 290600, 290700,  
290800, 291000, 2911000, 550100.

**Лабораторная работа №55**

**ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА  
ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКЕ**

Казань

2015

Составитель: Л. И. Маклаков

Под редакцией В. В. Алексеева

УДК 539.433

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов дневного и заочного отделений специальностей 060811, 060815, 240400, 290300, 290600, 290700, 290800, 291000, 2911000, 550100 / Казанский государственный архитектурно-строительный университет; Составитель Л. И. Маклаков. Под редакцией В. В. Алексеева.  
Казань, 2015 г. с. 9

В работе рассмотрено явление дифракции света, дифракционная решётка.  
Описано устройство и принцип работы прибора.

Стр. 9, рис. 5

Рецензент доцент кафедры молекулярной физики  
Казанского госуниверситета

Пименов Г. Г.

© Казанский государственный  
архитектурно-строительный  
университет, 2015 г.

## ВОЛНЫ

**Волной** называют процесс распространения колебаний в пространстве. Геометрическое место точек, до которых дошли колебания, называется **фронтом волны**. Фронт волны представляет собой поверхность, которая разделяет область, в которой происходят колебания, от области, где их ещё нет. Форма фронта волны может быть различной. Простейшими являются плоские и сферические волны, в которых фронт волны или плоскость, или сфера.

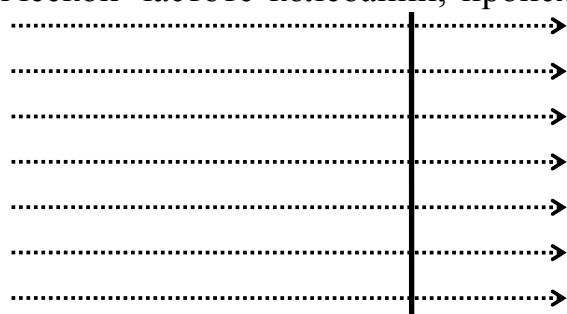
Линии, вдоль которых распространяются волны, называют **лучами**. В изотропных средах лучи перпендикулярны к фронту волны. На рис. 1 показаны сечения плоских и сферических волн. Фронт волны обозначен сплошной линией, а лучи — пунктирной.

При распространении плоской волны энергия волны не рассеивается в пространстве. Поэтому амплитуда колебаний остается постоянной. В случае сферической волны амплитуда колебаний убывает по мере удаления от источника колебаний.

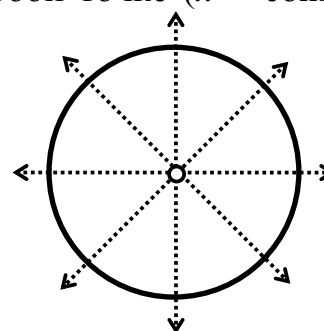
Зависимость колеблющейся величины (смещение точки от положения равновесия, напряжённость электрического и индукция магнитного поля и т.д.) от пространственных координат и времени называется **уравнением волны**:  $\xi = f(x, y, z, t)$ . Уравнение плоской монохроматической волны, т.е. волны, в которой во всех её точках совершаются гармонические колебания определённой частоты, распространяющейся вдоль координатной оси  $x$ , записывается в виде:

$$\xi = A \cos(\omega t - kx + \alpha), \quad (1)$$

где  $A$  и  $\omega$  — амплитуда и циклическая частота волны, равная амплитуде и циклической частоте колебаний, происходящих в любой точке ( $x = \text{const}$ ) волны



Плоская волна



Сферическая волна

Рис. 1

соответственно,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число, показывающее сколько длин волн укладывается на отрезке длиной  $2\pi$  метров,  $(\omega t - kx + \alpha)$  — фаза волны, равная фазе колебаний в различных её точках,  $(-kx + \alpha)$  — начальная фаза волны, равная фазе колебаний в момент времени  $t = 0$ ,  $\lambda$  — длина волны, т.е. расстояние между двумя точками волны, в которых колебания происходят с разностью фаз, равной  $2\pi$  радиан.

При своём распространении волна через некоторую поверхность переносит энергию, зависящую от времени. *Среднее значение энергии, переносимой волной в единицу времени через единичную поверхность, перпендикулярную к направлению распространения*, называют **интенсивностью волны**. Интенсивность волны  $I$ , как показывают расчёты, пропорциональна квадрату её амплитуды, т.е.  $I \sim A^2$ .

## ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Об этом свидетельствуют резкие тени, отбрасываемые непрозрачными предметами при освещении их точечными источниками света. Однако если размеры препятствий становятся сравнимыми с длиной волны, то прямолинейность распространения света (и вообще любых волн) нарушается.

*Явление огибания световыми волнами препятствий* называется **дифракцией света**. Различают два вида дифракции — дифракция сферических (дифракция Френеля) и плоских (дифракция Фраунгофера) волн.

## ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА

*Дифракционной решёткой* называют систему узких параллельных щелей одинаковой ширины, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Дифракционные решётки изготавливаются с помощью делительной машины, наносящей штрихи (царапины) на стекле или другом прозрачном материале. Там, где проведена царапина, материал становится непрозрачным, а промежутки между ними остаются прозрачными и играют роль параллельных щелей.

Обозначим через  $a$  ширину щели, а через  $b$  — ширину непрозрачного участка. Величина  $d = a + b$  называется постоянной дифракционной решётки.

Пусть на дифракционную решётку ДР перпендикулярно к её плоскости падает параллельный пучок монохроматического света, т.е. плоская монохроматическая световая волна. Все щели дифракционной решётки, согласно принципу Гюйгенса — Френеля, излучают вторичные когерентные волны, которые распространяются по всевозможным направлениям. Выберем одно из них, составляющее угол  $\varphi$  с направлением падающего света. Его называют углом дифракции. С помощью линзы  $L$  эти световые волны собираются на экране  $\mathcal{E}$ , расположенном в фокальной плоскости линзы. При этом на нём возникает светлая или темная полоса, проходящая через точку  $P$  (рис. 2, на котором показаны поперечное сечение дифракционной решётки плоскостью чертежа и лучи, проходящие через края щелей).

Теория расчёта дифракционной картины, даваемой дифракционной решёткой, достаточно сложна. Поэтому рассмотрим её упрощенный вариант. Дифракционная картина, возникающая на экране Э, обусловлена дифракцией света на отдельных щелях и многолучевой интерференцией, большого числа световых пучков, исходящих из щелей дифракционной решётки.

Выясним, при каких углах дифракции  $\varphi$  наблюдается усиление при многолучевой интерференции. Из рис. 2 видно, что между световыми волнами, прошедшими через любые соседние щели, появляется геометрическая разность хода  $\Delta x$ , между первой и третьей щелью —  $2\Delta x$ , первой и четвёртой —  $3\Delta x$  и т.д. Разность хода  $\Delta x$ , как ясно из чертежа, равна

$$\Delta x = d \sin \varphi. \quad (2)$$

Из теории интерференции известно, что если геометрическая разность хода двух когерентных волн до точки их наложения равна целому числу длин волн, т.е.

$$\Delta x = m\lambda, \quad (3)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , то в точке наложения волн наблюдается их усиление. Условие (3), записанное для света, идущего от двух соседних щелей, справедливо и для световых пучков, исходящих из всех щелей решетки, поскольку если  $\Delta x$  содержит целое число длин волн, то и  $2\Delta x$ ,  $3\Delta x$  и т.д. также содержат целое число длин волн. Поэтому световые пучки, распространяющиеся из всех щелей в данном направлении, при наложении будут усиливать друг друга. Подставив выражение (3) в (2), находим условие максимумов света, прошедшего дифракционную решётку. Его называют главным дифракционными максимумами:

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (4)$$

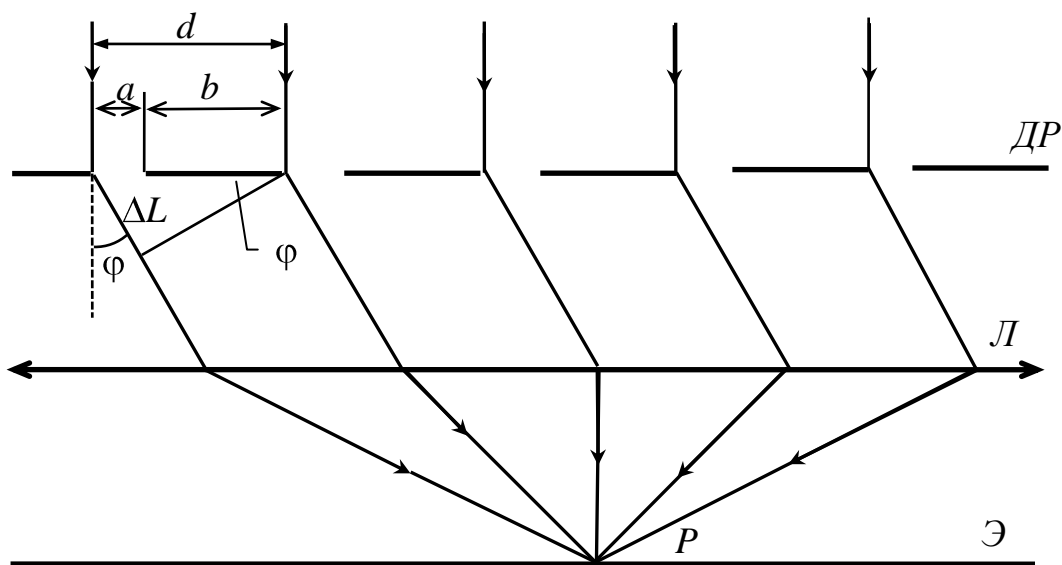


Рис. 2

где  $m$  — порядок главного дифракционного максимума.

Кроме главных максимумов, вследствие дифракции света на отдельных щелях возникает большое число дифракционных максимумов, разделённых дифракционными минимумами. Эти максимумы называют дополнительными. Интенсивность дополнительных максимумов значительно меньше, чем у главных. Поэтому они не играют заметной роли и лишь создают довольно равномерный слабый фон. На этом фоне выступают узкие и резкие главные максимумы, в которых концентрируется практически весь дифрагированный свет. Таким образом, дифракционная картина, возникающая на экране Э (рис. 2), имеет вид резких ярких узких параллельных полос, имеющих цвет падающего света, разделённых достаточно широкими тёмными промежутками. Из формулы (4) можно найти максимальный порядок  $m_{\max}$  главных максимумов. Наибольший угол дифракции не может превышать  $90^\circ$ , т.е.  $\varphi_{\max} = 90^\circ$ . Тогда  $\sin\varphi_{\max} = 1$  и  $m_{\max} = d/\lambda$ . Из равенства (4) также вытекает еще одно важное следствие, а именно, что дифракционная решётка способна разлагать сложный свет в спектр аналогично стеклянной призме. Действительно, если дифракционную решётку освещать белым светом, т.е. световыми волнами с длиной волны в вакууме от 400 до 750 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ), то центральный максимум ( $m = 0$ ) будет иметь вид белой полосы, а остальные представляют собой полосы конечной ширины, имеющие радужную окраску. Таким образом, образуется дифракционный спектр. Такой вид дифракционной картины легко объясняется.

При  $m = 0$  из выражения (4) следует, что  $\varphi = 0$  для всех длин волн. В силу этого происходит наложение волн всех цветов в одном месте экрана, что и приводит к появлению белой дифракционной полосы. Если же  $m \neq 0$ , то угол дифракции  $\varphi$  зависит от длины волны  $\lambda$ . В силу этого различные монохроматические световые волны распространяются под разными углами и собираются в различных местах экрана, образуя сплошной спектр.

Одной из важнейших характеристик дифракционной решётки является угловая дисперсия, определяющая угловое расстояние между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны на 1 нм. Чем больше угловая дисперсия, тем более растянут спектр и тем дальше друг от друга отстоят спектральные линии, что очень важно для оптических исследований. Если угловое расстояние двух спектральных линий, отличающихся по длине волны на  $d\lambda$ , равно  $d\varphi$ , то угловая дисперсия  $D$  равна

$$D = d\varphi/d\lambda. \quad (5)$$

С точки зрения математики, угловая дисперсия — это производная угла дифракции по длине волны  $\lambda$ . Дифференцируя (4) по  $\lambda$ , получаем для дифракционной решетки:

$$d \cdot \cos\varphi \cdot (d\varphi/d\lambda) = m, \quad D = d\varphi/d\lambda = m/(d \cdot \cos\varphi).$$

Из последней формулы следует, что для получения высокой дисперсии

необходимо брать решётки с малым  $d$ , т.е. с большим числом штрихов (щелей), приходящихся на 1 мм. В современных спектральных приборах используются решётки с 600 и 1200 штрихов на 1 мм, в лучших приборах — до 4800 штрихов на 1 мм.

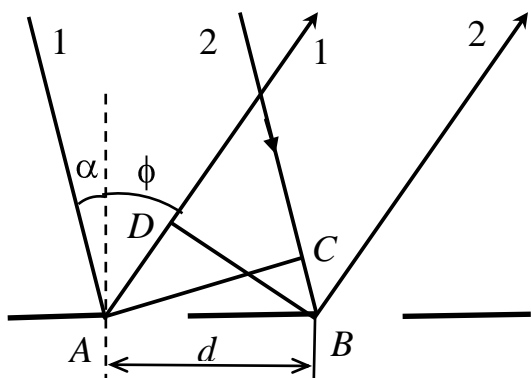


Рис. 3

Кроме описанной выше дифракционной решётки, используемой на пропускание света, существуют решётки отражательного типа. Для них условие главных дифракционных максимумов также описывается уравнением (4). Рассмотрим случай, когда параллельный пучок света (плоская волна) падает не перпендикулярно на отражающую дифракционную решётку, а под некоторым углом падения  $\alpha$  и дифрагирует под углом  $\phi$  (рис. 3, на котором показано поперечное сечение решётки плоскостью чертежа и два луча, проходящие через края соседних штрихов).

До отражения второй луч отстанет от первого на расстояние  $BC$  ( $AC$  — фронт падающей волны, представляющий собой плоскость, перпендикулярную к падающим лучам). Аналогично после отражения первый луч опережает первый на расстояние  $AD$  ( $BD$  — фронт дифрагированной волны, т.е. плоскость, перпендикулярная к дифрагированным лучам). Следовательно, геометрическая разность хода световых волн, проходящих через края соседних штрихов, равна  $\Delta x = AD - BC$ . Из прямоугольных треугольников  $ABC$  и  $ADB$  видно, что  $BC = d \cdot \sin \alpha$  и  $AD = d \cdot \sin \phi$ . Поэтому  $\Delta x = d(\sin \phi - \sin \alpha)$  и условие главных максимумов запишется:

$$d(\sin \phi - \sin \alpha) = m\lambda. \quad (6)$$

Из этой формулы следует, что центральный максимум ( $m = 0$ ) наблюдается при угле  $\phi = \alpha$ , т.е. при зеркальном отражении света.

### Описание лабораторной установки.

#### Вывод рабочей формулы.

Лабораторная установка состоит из источника света — ртутной лампы (1), блока питания к ней, дифракционной решётки (2), укрепленной на гониометрическом круге, и зрительной трубы (3) для наблюдения спектра. Вид оптической части сверху изображён на рис. 4. Угол между падающим и дифрагирующим лучом в данной установке всегда постоянен. Каким же об-

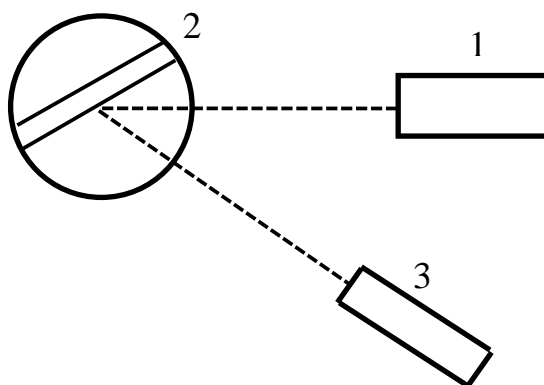


Рис. 4

разом в данном случае определить углы  $\alpha$  и  $\phi$ , которые входят в формулу (6)?

Рассмотрим сначала случай, когда свет просто отражается от дифракционной решётки как от зеркала ( $\alpha = \phi = \gamma$ ,  $m = 0$ ). В этом случае угол падения  $\gamma$  равен углу отражения (рис. 5) и в зрительной трубе видна интенсивная полоса белого света. Повернём решётку на некоторый угол  $\delta$  (рис. 6). Тогда, как видно из

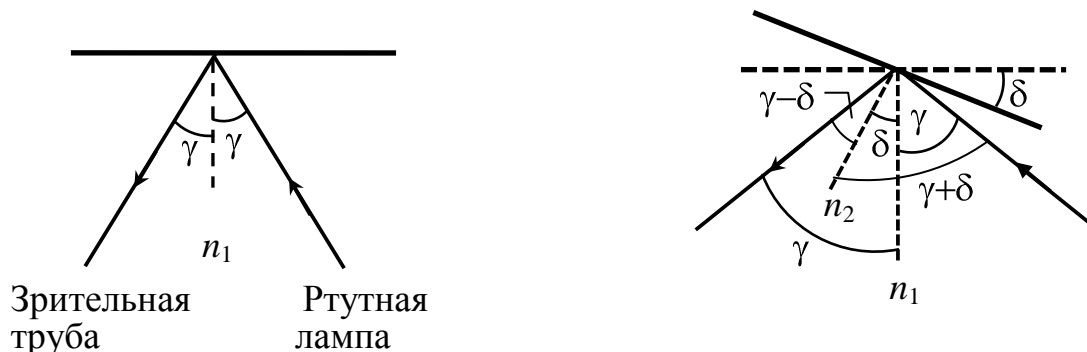


Рис. 5

чертежа, угол дифракции  $\gamma + \delta$ , а угол дифракции  $\gamma - \delta$ . Следовательно, условие максимума дифракции (6) с учётом того, что  $\alpha = \gamma + \delta$ , а  $\phi = \gamma - \delta$ , записывается:

$$d[\sin(\gamma - \delta) - \sin(\gamma + \delta)] = m\lambda \quad (7)$$

или, упростив по известной тригонометрической формуле,

$$2d\cos\gamma \cdot \sin\delta = m\lambda, \quad (8)$$

где углы  $\gamma$  и  $\delta$  можно определить с помощью гониометрического круга,  $n_1$  и  $n_2$  — нормали к дифракционной решётке в начальном и повернутом положении.

## ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Подключите источник ртутной лампы к розетке 220 вольт.
2. На блоке питания ртутной лампы поставьте тумблер «Сеть» в положение «Вкл», тумблер «лампа ДРШ» в положение «Вкл». Если ртутная лампа не загорелась, нажмите кнопку «пуск». Дайте прогреться ртутной лампе 2 — 3 мин.
3. Плавно вращая решётку и глядя в зрительную трубу, найдите белое изображение щели. Подстройте резкость, двигая окуляр зрительной трубы вперёд-назад.
4. Поставьте изображение в середину шкалы, которая видна в зрительной трубе (например, на деление 3). Снимите отсчёт угла по нониусной шкале. Этот угол и есть двойной угол падения  $2\gamma$ , а наблюдаемый случай изображён на рис. 5. Решётка в данном случае действует как обычное отражающее зеркало. В этом случае наблюдается нулевой порядок спектра, т.е.  $m = 0$  в уравнениях (6), (7) и (8).
5. Поворачивая решётку в том же направлении, найдите фиолетовую бли-



жайшую линию (это первый порядок спектра, т.е.  $m = 1$ ) и поставьте в то же место шкалы, что и белую. Снимите отсчёт по нониусной шкале  $\gamma_1$ . Разница  $\delta_1 = \gamma_1 - 2\gamma$  и даёт требуемое значение  $\delta_1$ , которое необходимо для расчётов по формуле (8). Данные заносите в таблицу в графы  $\gamma_i$  и  $\delta_i$ . Поворачивая решётку в ту же сторону, можно наблюдать третий порядок спектра ( $m = 3$ ). Кроме того, если вернуть решётку в первоначальное положение, т.е. к белой линии, и поворачивать решетку в обратную сторону, то можно опять увидеть спектр 1-го, 2-го, 3-го и т.д. порядка. Пронаблюдайте эти спектры, не пройдя измерения углов.

6. Отключите установку, проделав в обратном порядке пункты 2 и 1.
7. По формуле (8) рассчитайте длину волны каждой линии, учитывая, что решётка имеет 600 штрихов на 1 мм; т.е.  $d = 1/600$  мм. Все данные занесите в таблицу.
8. Найдите среднее значение длины волны  $\lambda$  для фиолетовой линии, наблюдаемой в спектре первого и второго порядков. То же проделайте для зелёной и жёлтой линий.

| Цвет       | $m$ | $\gamma_i$ | $\delta_i = \gamma_i - 2\gamma$ | $\sin\delta_i$ | $\lambda_i$ , нм |
|------------|-----|------------|---------------------------------|----------------|------------------|
| Фиолетовый | 1   |            |                                 |                |                  |
| Зелёный    |     |            |                                 |                |                  |
| Жёлтый     |     |            |                                 |                |                  |
| Фиолетовый | 2   |            |                                 |                |                  |
| Зелёный    |     |            |                                 |                |                  |
| Жёлтый     |     |            |                                 |                |                  |

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется волной, фронтом волны и лучами?
2. Напишите уравнение плоской монохроматической волны. Каковы её характеристики?
3. Что называется интенсивностью волны. Как она связана с амплитудой волны?
4. Дайте понятие дифракции волн. Когда она проявляется заметным образом?
5. В чём заключается принцип Гюйгенса — Френеля?
6. Рассмотрите дифракцию света на дифракционной решётке.
7. Каков принцип разложения света в спектр с помощью дифракционной решётки?