

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Цель работы: определить постоянную дифракционной решетки при нормальном падении света и падении под углом при освещении ее лазерным излучением и сравнить с паспортным значением.

Приборы и принадлежности: лазерный источник света, дифракционная решетка, поворотный стол, экран-линейка.

Объект измерений: дифракционная картина.

Средства измерений: линейки.

1. Теоретическая часть

Свет проявляет себя как волна в различных ситуациях, связанных с его распространением и взаимодействием с окружающей средой. Одним из таких проявлений является дифракция.

Дифракция – это явление отклонения волн от прямолинейного распространения при прохождении через малые отверстия или вблизи резких границ препятствий.

Дифракцию можно наблюдать от узкой щели, игольного ушка, тонких волокон ткани или волоса, на кромке лезвия или CD-диске, а также при помощи специальных оптических устройств, например, дифракционной решетки.

В общем случае **дифракционная решетка** представляет собой периодическую систему из большого числа микроскопических штрихов, нанесенных на плоскую или вогнутую поверхность. Различают решетки пропускающие и отражающие, амплитудные и фазовые (рис. 1).

В пропускающих решетках непрозрачные параллельные штрихи расположены на прозрачном экране на одинаковом расстоянии друг от друга, в отражающих – штрихи нанесены на зеркальную поверхность. В амплитудных решетках периодически меняется коэффициент пропускания (или отражения), то есть непрозрачный штрих чередуется с прозрачной (или отражающей)

щелью, что вызывает изменение амплитуды падающей волны. У фазовых решеток штрихи имеют специальную форму, отличную от прямоугольной, что приводит к периодическому изменению фазы световой волны.

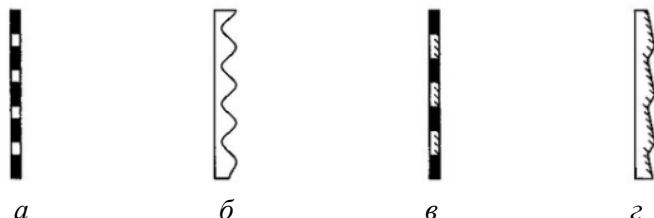


Рис. 1. Виды дифракционных решеток:

a – амплитудная пропускающая, *б* – фазовая пропускающая,
в – амплитудная отражающая, *г* – фазовая отражающая

В настоящей работе используется плоская амплитудная пропускающая дифракционная решетка (далее – дифракционная решетка, ДР). Параметрами дифракционной решетки являются: a – ширина непрозрачных штрихов, b – ширина прозрачных щелей, расстояние $d = a + b$, которое называется **периодом** или **постоянной дифракционной решетки** (рис. 2). Постоянную дифракционной решетки иначе можно определить как расстояние между серединами соседних щелей.

Если известно число штрихов решетки N , приходящихся на 1 мм длины, то период решетки определяют как $d = 1/N$ мм.

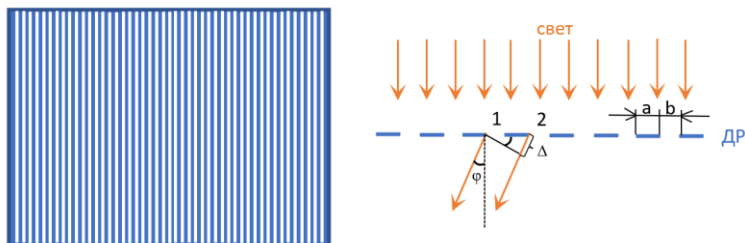


Рис. 2. Дифракционная решетка

Главное свойство дифракционной решетки заключается в отклонении падающего на нее пучка лучей на разные углы в зависимости от длины волны света.

Рассмотрим случай, когда параллельный пучок света с длиной волны λ падает на решетку нормально (рис. 2). При этом на достаточно большом расстоянии от решетки можно наблюдать дифракционную картину; картину можно видеть и на конечном расстоянии с помощью выпуклой линзы на плоском экране, помещенном в ее фокусе. В этом случае говорят о дифракции Фраунгофера.

Из-за малой ширины щелей каждую щель можно представить как вторичный точечный источник сферических волн, распространяющихся во всех направлениях с одинаковой интенсивностью. Эти волны от N когерентных источников интерферируют между собой. На рис. 2 показаны только два из множества пучков лучей, идущих от двух соседних щелей 1 и 2 под углом φ и продифрагировавших в этом направлении.

В результате такой взаимной многолучевой интерференции от N щелей решетки распределение интенсивности света в дифракционной картине будет представлять собой чередование главных дифракционных максимумов, между которыми располагаются побочные дифракционные максимумы и минимумы (рис. 3).

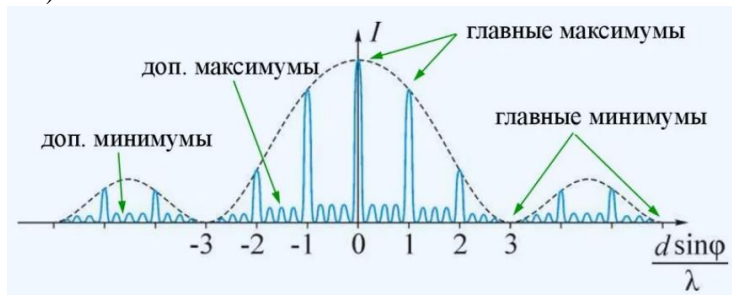


Рис. 3. Дифракционная картина от 5 щелей ($N = 5$)

Главные максимумы. Они образуются, когда для всех щелей решетки выполняется условия максимума интерференции. В этом случае разность хода Δ лучей от соседних щелей в некоторой точке экрана равна целому числу длин волн (**условие главных максимумов**):

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (1)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – порядок главного максимума (порядок дифракции).

Максимум 0-го порядка ($m = 0$) – один, он находится по центру дифракционной картины (угол дифракции $\varphi = 0$). Остальных максимумов по два.

Максимальный наблюдаемый порядок главного максимума (порядок дифракции) определяется из условия $\sin \varphi_{\max} = 1$:

$$m_{\max} = \frac{d}{\lambda}.$$

Главные минимумы. Условие главных минимумов для решетки с шириной щели b :

$$b \sin \varphi = 2k \frac{\lambda}{2},$$

где $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Это условие соответствует минимуму интерференции от одной щели, поэтому не зависит от числа щелей в дифракционной решетке.

Добавочные минимумы. Между двумя любыми главными дифракционными максимумами находится $(N - 1)$ добавочных минимумов. Условие их образования в дифракционной картине от N щелей записывается в виде:

$$d \sin \varphi = \pm \frac{k}{N} \lambda,$$

где k – любое целое число, кроме $N, 2N, 3N$ и т.д., то есть не кратное N . В этих направлениях φ колебания от отдельных щелей взаимно гасят друг друга.

Добавочные максимумы. Между добавочными минимумами располагаются $(N - 2)$ добавочных максимума, интенсивность которых значительно сильно меньше интенсивности главных максимумов: она не превышает $1/22$ интенсивности ближайшего главного максимума. Эти добавочные максимумы соответствуют усилению излучения от одной части щелей, но гашению его излучением от другой части.

Чем больше щелей в решетке, тем больше добавочных минимумов будет образовываться между соседними главными максимумами, поэтому главные максимумы будут более интенсивными

и острыми, а добавочные максимумы станут практически неразличимыми.

Дифракционную картину можно получать, используя разные источники света (освещенную щель или лазер), и наблюдать как глазом (выступает в роли линзы, формируя мнимое изображение), так и на экране (рис. 4).

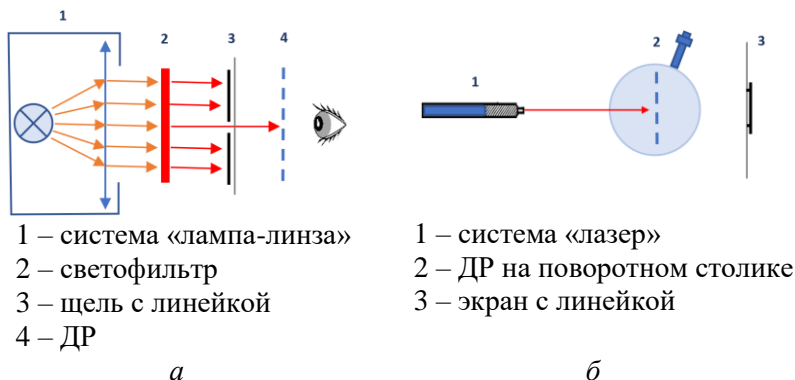


Рис. 4. Схема наблюдения дифракции с источниками:
а – лампа; *б* – лазер

При направлении на дифракционную решетку белого света все максимумы, кроме нулевого, разложатся в спектр (рис. 5).

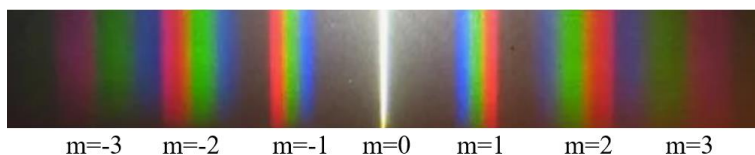


Рис. 5. Спектры дифракционной решетки

С увеличением порядка дифракции спектры становятся шире и начинают накладываться друг на друга. При использовании светофильтра в дифракционной картине остаются только максимумы, соответствующие длине волны пропускания фильтра.

2. Методика проведения измерений и описание установки

В настоящей работе дифракция наблюдается согласно схеме на рис. 4, б. Установка выглядит как показано на рис. 6 и состоит из следующих элементов:

- 1 – линейка-экран для наблюдения и измерения параметров дифракционной картины,
- 2 – плоская амплитудная прозрачная дифракционная решетка,
- 3 – поворотный стол,
- 4 – лазерный источник излучения,
- 5 – блок питания лазера,
- 6 – винт рейтера для перемещения держателя с экраном.

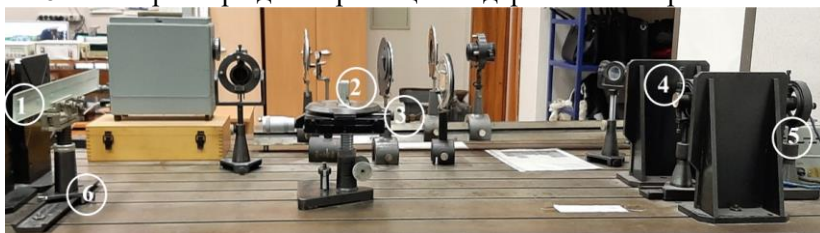


Рис. 6. Фотография установки

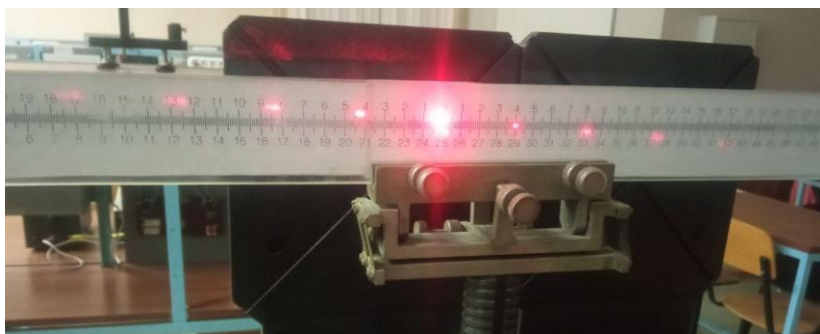


Рис. 7. Дифракционная картина
на экране с измерительной шкалой

Источником узконаправленных параллельных световых волн является газовый гелий-неоновый (*He-Ne*) лазер 4 (рис. 6), питающийся от источника 5 и излучающий когерентный монохроматический свет в красной области спектра длиной $\lambda = 0,6328$ мкм. Диаметр луча лазера – 2 мм. Луч лазера падает на дифракционную

решетку **2**, укрепленную на поворотном предметном столике, позволяющем с помощью винтов **3** необходимым образом изменять положение решетки в пространстве с точностью $\pm 5'$. Паспортное значение периода дифракционной решетки равно 1/100 мм.

Дифракционная картина в виде красных полос, чередующихся с промежутками нулевой интенсивности, наблюдается на полупрозрачном плоском экране с миллиметровой шкалой **1**, закрепленном в держателе рейтера. Положение экрана в пространстве регулируется верхними винтами держателя и перемещением держателя вдоль рейтера с помощью винта **6**.

В работе необходимо определить постоянную дифракционной решетки при нормальном падении света и при падении света под углом и сравнить его с паспортным значением периода.

Если известна длина волны падающего на решетку света, то период решетки можно определить, основываясь на формуле главных максимумов (1):

$$d = \frac{m\lambda}{\sin \varphi}.$$

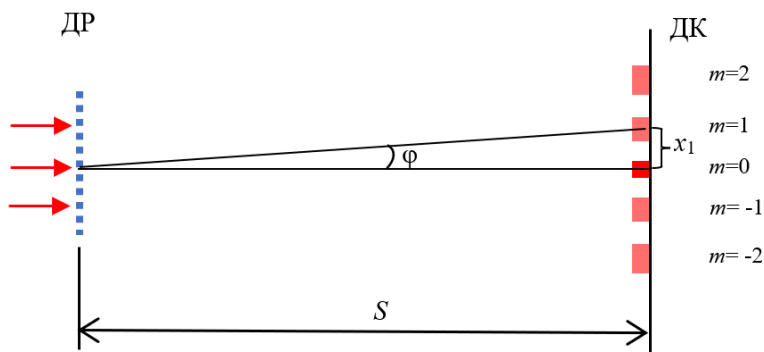


Рис. 8. Схема дифракционных максимумов

При наблюдении дифракционной картины на значительном расстоянии от дифракционной решетки углы дифракции для небольших порядков спектров будут малы. Поэтому можно считать, что:

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_m}{S}. \quad (2)$$

Тогда формула для периода дифракционной решетки примет вид:

$$d = \frac{m\lambda S}{x_m}, \quad (3)$$

где m – порядок максимума, λ – длина волны, S – расстояние от ДР до дифракционной картины (ДК), x_m – расстояние между центральным максимумом и максимумом m -го порядка (рис. 8).

3. Порядок выполнения работы

а) проведение измерений в лаборатории

1. Наблюдение дифракции и измерения параметров дифракционной картины при нормальном падении света на дифракционную решетку.

- 1.1. Отрегулируйте положение дифракционной решетки **2** на поворотном столе **3** так, чтобы микрометрический винт поворотного столика был выставлен на ноль.
- 1.2. Используя линейку, измерьте расстояние L от решетки **2** до экрана **1** и занесите данные в таблицу 1.
- 1.3. Включите источник питания лазера **5** и с помощью лаборанта или заведующего лабораторией проверьте по блику, что дифракционная решетка перпендикулярна оптической оси установки (лазерному лучу).
- 1.4. На полученной на экране-линейке **1** картине проверьте, чтобы центр нулевого главного максимума совпадал с нулевым делением шкалы на линейке. При необходимости переместите держатель с экраном-линейкой **1** с помощью винта **6**.
- 1.5. Измерьте с помощью линейки на экране **1** расстояния x_m от центра нулевого главного максимума до центра m -го главного максимума для $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$, то есть влево и вправо от нулевой отметки на линейке до центров красных полос (пятен). Занесите данные в таблицу 1.

2. Наблюдение дифракции и измерения параметром дифракционной картины при косом падении света на дифракционную решетку.

- 2.1. Поворачивая предметный столик **3** с помощью микрометрического винта, установите значение угла падения лазерного луча на дифракционную решетку $\beta_1 = 30^\circ$ (рис. 9). Наблюдайте, как при этом изменяются в дифракционной картине количество, расположение, ширина и интенсивность главных максимумов.
- 2.2. Проверьте, чтобы центр нулевого главного максимума совпадал с нулевым делением шкалы на линейке. При необходимости снова переместите держатель с экраном-линейкой **1** с помощью винта **6**.
- 2.3. Измерьте с помощью линейки на экране **1** расстояния $x_{m\beta}$ от центра нулевого главного максимума до центра m -го главного максимума для $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3$, занесите данные в таблицу 2.
- 2.4. Установите значение угла падения лазерного луча на дифракционную решетку $\beta_2 = 45^\circ$. Повторите пп. 2.2–2.3 регулировок и измерений уже для $m = \pm 1, \pm 2$. Занесите данные в таблицу 2.
- 2.5. Покажите таблицы 1 и 2 с измеренными значениями преподавателю.

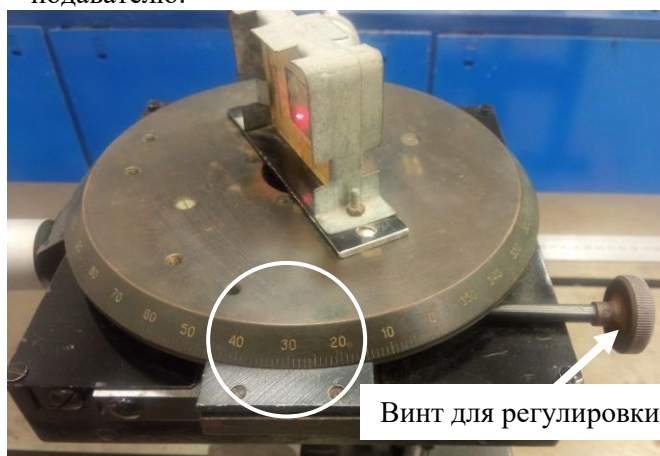


Рис. 9. Установка дифракционной решетки под углом 30° к падающему излучению

Таблица 1

Измерения при нормальном падении света на решетку

m	x_m , MM	x_{mcp} , MM	$\text{tg}\varphi_{\text{max}m}$	$\sin\varphi_{\text{max}m}$	d , M	d_{cp} , M
+1						
−1						
+2						
−2						
+3						
−3						
+4						
−4						
$\lambda = 0,6328 \text{ MKM}$			$L =$		$d = 1/100 \text{ MM}$	

Таблица 2

Измерения при косом падении света на решетку

$\beta_1 = 30^\circ$				$\cos \beta_1 =$			
m	$x_{m\beta}$, MM	$x_{m\beta cp}$, MM	$tg\varphi_{\max\beta m}$	$\sin\varphi_{\max\beta m}$	$d_{\beta 1}$, M	$d_{\beta 1cp}$, M	
+1							
−1							
+2							
−2							
+3							
−3							
$\beta_2 = 45^\circ$				$\cos \beta_2 =$			
m	$x_{m\beta}$, MM	$x_{m\beta cp}$, MM	$tg\varphi_{\max\beta m}$	$\sin\varphi_{\max\beta m}$	$d_{\beta 2}$, M	$d_{\beta 2cp}$, M	
+1							
−1							
+2							
−2							

б) обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений, полученных в таблицах 1 и 2, выполняется одинаково, за исключением п. 5 и п. 6.

1. Вычислите значения $x_{\text{тспр}}$ и $x_{\text{тбспр}}$ для каждого значения m по формулам:

$$x_{\text{тспр}} = \frac{x_{\text{тсправ}} + x_{\text{тлев}}}{2} \text{ и } x_{\text{тбспр}} = \frac{x_{\text{тбсправ}} + x_{\text{тблев}}}{2}.$$

2. Вычислите тангенсы углов дифракции по формулам:

$$\text{tg}\varphi_{\text{max } m} = \frac{x_{\text{тспр}}}{L} \text{ и } \text{tg}\varphi_{\text{max } \beta m} = \frac{x_{\text{тбспр}}}{L}.$$

3. Для малых углов дифракции согласно условию (2):

$$\sin\varphi_{\text{max } m} \approx \text{tg}\varphi_{\text{max } m} \text{ и } \sin\varphi_{\text{max } \beta m} \approx \text{tg}\varphi_{\text{max } \beta m}.$$

Поэтому продублируйте в таблицах 1 и 2 столбцы со значениями тангенсов и синусов углов дифракции для главных максимумов.

4. Рассчитайте постоянную дифракционной решетки для каждого заданного значения m по формуле (3), внесите результаты в таблицу 1. *Не забывайте учитывать единицы измерения величин!* По полученным значениям найдите $d_{\text{ср}}$:

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4}.$$

Эффективные периоды решетки $d_{\beta 1\text{ср}}$ и $d_{\beta 2\text{ср}}$ для случая косоуго падения рассчитайте по аналогии.

5. Для случая нормального падения света:

- 5.1. Вычислите относительную погрешность определения постоянной дифракционной решетки $d_{\text{ср}}$:

$$\delta d = \frac{\Delta d}{d_{\text{ср}}} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta x_m}{x_{\text{тспр}}},$$

где $\Delta \lambda \approx 0$, ΔL и Δx_m – приборные погрешности измерения этих величин, равные цене деления измерительных шкал, а для $x_{\text{тспр}}$ взять минимальное значение ($m = 1$).

- 5.2. Вычислите абсолютную погрешность определения d :

$$\Delta d = \delta d \cdot d_{\text{ср}}.$$

- 5.3. Запишите результат расчета в виде:

$$d = d_{\text{ср}} \pm \Delta d.$$

Сравните полученное значение постоянной решетки со значением на приборе ($d = 1/100$ мм).

6. Для случая косоуго падения света:

- 6.1. Вычислите теоретическое значение эффективного периода решетки для β_1 и β_2 по формуле:

$$d_{\beta i} = d \cos \beta_i.$$

- 6.2. Сравните полученные значения с экспериментальными значениями эффективного периода решетки.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление дифракции света?
2. Что представляет собой дифракционная решетка? Какие виды решеток вы знаете?
3. Что называется периодом решетки?
4. Какова схема наблюдения дифракции света на решетке по методу Фраунгофера?
5. Какие оптические явления определяют формирование дифракционной картины, полученной от решетки?
6. Как будет меняться дифракционная картина от одной и той же решетки при использовании различных светофильтров?
7. Какой вид имеет дифракционная картина при освещении решетки белым светом?
8. Как изменяется угловое расстояние между спектральными линиями при изменении периода дифракционной решетки и порядка спектра?
9. Как будет выглядеть дифракционная картина от двух щелей?
10. Изменяются ли главные максимумы по ширине и положению, если увеличить ширину светового пучка, падающего нормально на решетку? И если изменятся, то как?
11. На щель падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ . Ширина щели 4λ . Под каким углом наблюдается второй главный дифракционный минимум?
12. На дифракционную решетку с периодом $1/500$ падает нормально свет с длиной волны 500 нм. Какой наибольший порядок спектра (порядок дифракции) можно получить?

Рекомендуемая литература

В качестве литературы по дифракционным решеткам можно рекомендовать [1, §130], по вопросам дифракции Фраунгофера [2, §179–180]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань, 2022. 500 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2006. 560 с.