

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей и технической физики

ФИЗИКА
ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА
НА РЕШЕТКЕ

*Методические указания к лабораторным работам
направлений и всех форм обучения*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 535 (073)

ФИЗИКА. Дифракция Фраунгофера на решетке: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *А.Ю. Грабовский, А.Ю.Егорова, Е.С. Ломакина*. СПб, 2021. 26 с.

В методических указаниях сформулированы: теория, методические указания и алгоритм выполнения учебно-исследовательских работ, рассмотрены вопросы экспериментального изучения дифракции света в параллельных лучах (дифракции Фраунгофера) на системах из трех и четырех щелей и на дифракционных решетках и определения на основе полученных дифракционных картин длины волны излучения и ширины щелей.

Предназначены для студентов всех направлений подготовки и специальностей и всех форм обучения.

Научный редактор профессор *А.С. Мустафаев*

Рецензент профессор *А.А. Кудрявцев* (АО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации»)

ИНТЕНСИВНОСТЬ ДИФРАКЦИИ НА МНОЖЕСТВЕ ЩЕЛЕЙ

Цель работы

Экспериментальное изучение дифракции света в параллельных лучах (дифракции Фраунгофера) на системах из трех и четырех щелей и на дифракционных решетках. Определение на основе полученных дифракционных картин длины волны излучения и ширины щелей.

Теоретическое введение

Дифракция (от лат. diffractus - преломленный) в первоначальном смысле - огибание волнами препятствий, в современном, более широком смысле - любые отклонения при распространении волн от законов геометрической оптики при распространении света в среде с резкими неоднородностями. Причина дифракции, как и интерференции, - суперпозиция волн, которая приводит к перераспределению интенсивности. Если число интерферирующих источников конечно, то говорят об интерференции волн. При непрерывном распределении источников говорят о дифракции волн.

Дифракция проявляется у волн любой природы. Но в пределе при $\lambda \rightarrow 0$ законы волновой оптики переходят в законы геометрической оптики, поэтому отклонения от законов геометрической оптики оказываются тем меньше, чем меньше длина волны.

Дифракция света ограничивает разрешающую способность спектральных и зрительных приборов. В результате дифракции каждая спектральная линия в спектральном приборе представляется серией максимумов определенной ширины, и, чтобы прибор мог различить («разрешить») две спектральные линии, необходимо, чтобы соответствующие им максимумы не сливались в один.

Принцип Гюйгенса-Френеля

Строгое решение любой дифракционной задачи для световых волн сводится к нахождению решения уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями. В оптике большое значение имеет приближенное решение дифракционных задач, основанное на принципе Гюйгенса-Френеля:

1. Каждая точка, до которой доходит волна, служит источником вторичных сферических волн, огибающая которых дает положение волнового фронта в следующий момент времени (Х. Гюйгенс, 1678 г.).

2. Амплитуда результирующей волны в любой точке пространства может быть найдена как результат интерференции всех вторичных волн, с учетом их фаз и амплитуд (О. Френель, 1818 г.).

Принцип Гюйгенса-Френеля является основным постулатом волновой теории, объясняющим механизм распространения света и, в частности, дифракции света. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждый элемент волновой поверхности S (рис.1), достигнутый в данный момент времени световой волной, служит источником вторичной сферической волны. Волновое возмущение в точке P , созданное источником P_0 , можно рассматривать как результат интерференции вторичных элементарных волн, излучаемых каждым элементом dS волновой поверхности S .

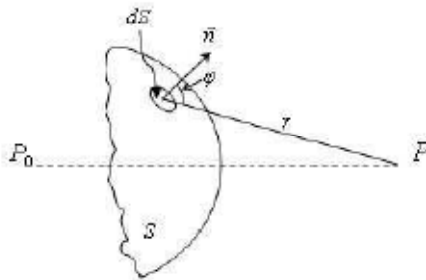


Рис. 1. К принципу Гюйгенса-Френеля

Амплитуда вторичных волн пропорциональна амплитуде первичной волны a_0 , проходящей в точку A , площади элемента dS , убывает с возрастанием угла φ между нормалью к поверхности S и

направлением излучения вторичной волны на точку P . Поскольку амплитуда вторичной сферической волны убывает с расстоянием от источника по закону $1/r$, то вклад в волновое возмущение в точке P , вносимый элементом dS , запишется в виде:

$$dE = K(\varphi) \frac{a_0 dS}{r} \cos(\omega t - kr + a_0) \quad (1)$$

где $K(\varphi)$ - функция, описывающая уменьшение амплитуды вторичных волн с увеличением угла φ , $(\omega t + a_0)$ - фаза колебаний в точке расположения элемента dS , $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число.

Результирующее колебание в точке P представляется интегралом:

$$E = \int_S K(\varphi) \frac{a_0 dS}{r} \cos(\omega t - kr + a_0). \quad (2)$$

Эта формула является аналитическим выражением принципа Гюйгенса - Френеля. Вычисление этого интеграла в общем случае - трудная задача. В случаях, если в задаче существует симметрия, амплитуду результирующего колебания можно найти методом зон Френеля, не прибегая к вычислению интеграла. Если рассматривается дифракция сферических или плоских волн и при этом точка наблюдения находится на конечном расстоянии от преграды, то явления такого рода называют дифракцией Френеля. Если источник света и точка наблюдения расположены от преграды настолько далеко, что лучи, падающие на преграду, и лучи, идущие в точку наблюдения, образуют практически параллельные пучки, то говорят о дифракции Фраунгофера. Можно ввести количественный критерий, позволяющий определить, какой тип дифракции имеет место в том или ином случае. Пусть на преграду, характерный размер которой b , падает излучение с длиной волны λ , а точка

наблюдения находится на расстоянии l от преграды. Если $\frac{b^2}{\lambda l} \ll 1$,

наблюдается дифракция Фраунгофера. Если $\frac{b^2}{\lambda l} \sim 1$, наблюдается

дифракция Френеля. Если $\frac{b^2}{\lambda} \gg 1$, свет распространяется по законам геометрической оптики.

Между дифракцией Френеля и дифракцией Фраунгофера нет принципиальной разницы, одна непрерывно переходит в другую. Для практического осуществления дифракции Фраунгофера точечный источник света помещают в фокус собирающей линзы. В этом случае после преломления в линзе получается параллельный пучок света (применение лазера в качестве источника света позволяет обойтись без линзы). Этот пучок дифрагирует на каком-либо препятствии. Дифракционная картина наблюдается в фокальной плоскости линзы, поставленной на пути дифрагированного света.

Дифракция Фраунгофера на щели

Строгое решение задач дифракции на основе принципа Гюйгенса - Френеля обычно связано с большими математическими трудностями, но в ряде случаев амплитуда колебания в точке наблюдения может быть найдена достаточно просто.

Рассмотрим длинную щель ширины b (рис. 2). Если длина щели во много раз больше её ширины, то такую щель можно считать бесконечно длинной. На щель падает плоская световая монохроматическая волна длиной λ . За щелью расположена собирающая линза, в фокальной плоскости которой находится экран, плоскость экрана параллельна плоскости щели. Параллельный пучок лучей после прохождения щели распространяется под различными углами к первоначальному направлению. Линза собирает параллельные пучки лучей в определенной точке фокальной плоскости (на экране). Разобьем щель на так называемые зоны Шустера (аналог зон Френеля), имеющие вид полос, параллельных ребру щели, равной ширины Δx так, чтобы разность хода от краев этих зон была равна $\lambda/2$ (рис. 3)

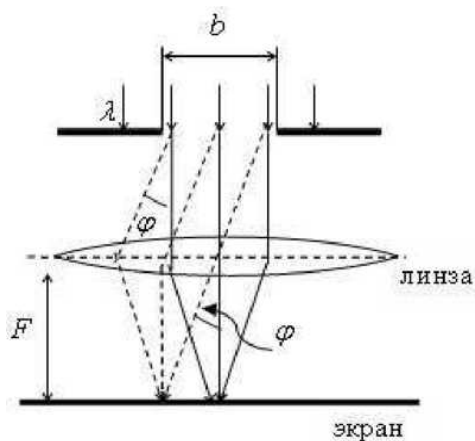


Рис. 2. Схема дифракции Фраунгофера на щели

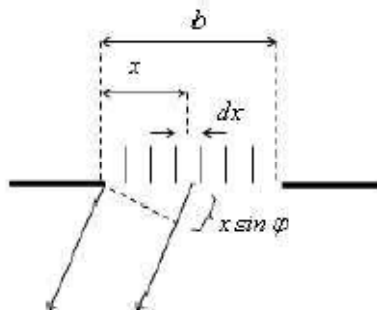


Рис. 3. К выводу формулы зависимости интенсивности света от угла дифракции при дифракции Фраунгофера на щели

Каждая из этих полосок может рассматриваться как источник волн, причем фазы этих волн одинаковы, поскольку плоскость щели совпадает с фронтом падающей плоской волны. Амплитуды этих волн тоже одинаковы, поскольку все полоски имеют одинаковую площадь. Тогда амплитуда волн a_0 в формуле (1) одинакова для всех точек щели и равна

$$a_0 = \frac{A_0}{b},$$

где A_0 - амплитуда, возбуждаемая в данной точке экрана всеми зонами. Поскольку угол φ обычно невелик, можно считать коэффициент $K(\varphi)$ в формуле (1) постоянным. Учтем, что площадь полосы пропорциональна её ширине: $dS \sim dx$, и для плоских волн множитель $1/r$ в формуле (1) отсутствует. Волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ , от выделенной зоны, приобретают по сравнению с волнами, идущими от края щели дополнительную разность хода равную $x \sin \varphi$. Линза не вносит дополнительной разности хода, поэтому световое возмущение в точке экрана от выделенной зоны можно представить в виде:

$$dE_\varphi = \frac{A_0}{b} dx \cos(\omega t - kx \sin \varphi). \quad (3)$$

Действие всей щели найдем, проинтегрировав выражение (3) по всей ширине щели:

$$E_\varphi = \int_0^b \frac{A_0}{b} \cos(\omega t - kx \sin \varphi) dx = A_0 \frac{\sin\left(\frac{bk \sin \varphi}{2}\right)}{\frac{bk \sin \varphi}{2}} \cos\left(\omega t - \frac{1}{2} kb \sin \varphi\right).$$

Амплитуда этой волны A_φ равна:

$$E_\varphi = A_0 \frac{\sin\left(\frac{bk \sin \varphi}{2}\right)}{\frac{bk \sin \varphi}{2}} = A_0 \frac{\sin\left(\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}}.$$

Поскольку интенсивность $I_\varphi \sim A_\varphi^2$, то для интенсивности света получим следующее выражение:

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}\right)^2}. \quad (4)$$

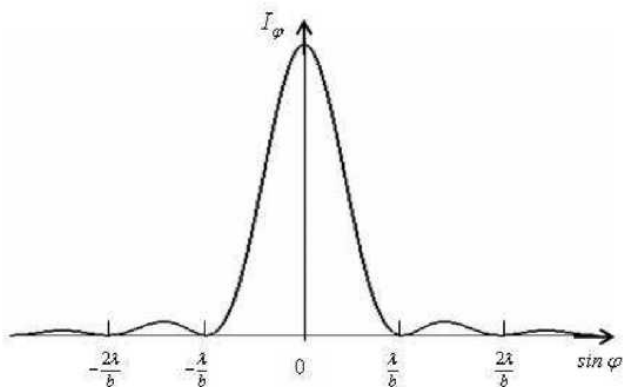


Рис. 4. Дифракция Фраунгофера на щели. Зависимость интенсивности от угла дифракции

Зависимость интенсивности I_φ от угла φ представлена на рис. 4. Из равенства нулю числителя выражения (4) получим условие для определения минимумов интенсивности:

$$b \sin \varphi = \pm k\lambda, \text{ где } k=1, 2, 3 \dots \quad (5)$$

Поскольку $|\sin \varphi| \leq 1$, то из предыдущей формулы следует, что общее число минимумов ограничено условием:

$$k \leq \frac{b}{\lambda}.$$

Максимум интенсивности наблюдается для угла $\varphi=0$ (центральный максимум). Положение следующих побочных максимумов не может быть найдено по строгой аналитической формуле. Численный расчет дает следующие значения углов:

$$b \sin \varphi_1 = \pm 1,43\lambda - \text{максимумы 1-го порядка,}$$

$$b \sin \varphi_2 = \pm 2,46\lambda - \text{максимумы 2-го порядка,}$$

$$b \sin \varphi_3 = \pm 3,47\lambda - \text{максимумы 3-го порядка,}$$

Приближенная формула для определения положения дифракционных максимумов имеет вид:

$$b \sin \varphi = \pm (k + 1/2)\lambda, \text{ где } k=1, 2, 3 \dots$$

Яркость побочных максимумов значительно ниже яркости центрального.

Дифракционная картина будет симметрична относительно оптической оси линзы, центральный максимум всегда лежит против оптического центра линзы.

Дифракция на нескольких щелях. Дифракционная решетка

Дифракционные явления Фраунгофера имеют большое практическое значение, лежат в основе принципа действия многих спектральных приборов, в частности, дифракционных решёток. В последнем случае для наблюдения светового поля «в бесконечности» используются линзы или вогнутые дифракционные решетки (соответственно, экран ставится в фокальной плоскости).

Дифракционная решетка - оптический прибор, представляющий собой совокупность большого числа регулярно нанесенных штрихов (щелей, бороздок, канавок). Мы будем рассматривать решетки, состоящие из одинаковых равноотстоящих друг от друга щелей. Такие решетки называются прозрачными (рис. 5). Расстояние между серединами соседних щелей называется периодом решетки d .

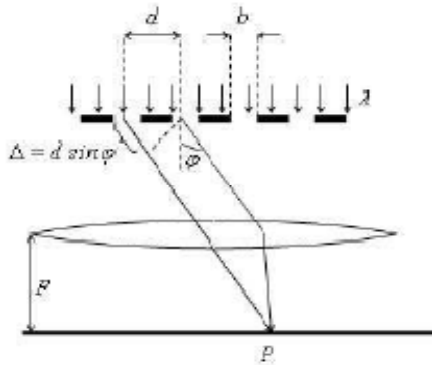


Рис. 5. Схема дифракции Фраунгофера на прозрачной дифракционной решетке

Расположим собирающую линзу параллельно плоскости решетки, в фокальной плоскости линзы поместим экран (рис. 5). При падении на решетку плоской монохроматической волны происходит дифракция света, распределение интенсивности в результате дифракции на каждой щели будет соответствовать рис. 4, причем центральный максимум для всех N щелей будет лежать

против оптического центра линзы. Колебания, приходящие в точку P от различных щелей, когерентны, поэтому колебание в точке P представляет собой результат интерференции N когерентных колебаний с одинаковой амплитудой A_φ . Друг относительно друга эти колебания будут сдвинуты по фазе на одну и ту же величину δ . Интенсивность такой многолучевой интерференционной картины определяется выражением:

$$I = I_\varphi \frac{\sin^2\left(\frac{N\delta}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (6)$$

где I_φ определяется формулой (4).

Как видно из рис. 5, оптическая разность хода Δ от соседних щелей равна:

$$\Delta = d \sin \varphi,$$

тогда разность фаз равна:

$$\delta = \frac{2\pi \cdot \Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi.$$

С учетом данного выражения и формулы (4) для I_φ получим зависимость интенсивности I от угла φ при дифракции на решетке из N щелей:

$$I = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}\right) \sin^2\left(\frac{N\pi d \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{b\pi \sin \varphi}{\lambda}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi d \sin \varphi}{\lambda}\right)} \quad (7)$$

Зависимость интенсивности I от угла φ представлена на рис. 6.

Первый множитель в (7) обращается в нуль при значениях углов, которые определяются из условия (5): в этих направлениях интенсивность, создаваемая каждой из щелей равна нулю, поэтому равна нулю и результирующая интенсивность. Если разность хода

лучей Δ от соседних щелей в некоторой точке экрана равна целому числу длин волн, то эти лучи усиливают друг друга, и образуются главные дифракционные максимумы, определяемые из условия:

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda, \text{ где } m=1, 2, 3 \dots \quad (8)$$

Значение m определяет порядок главного максимума, максимальное значение m ограничено условием:

$$m \leq \frac{b}{\lambda}.$$

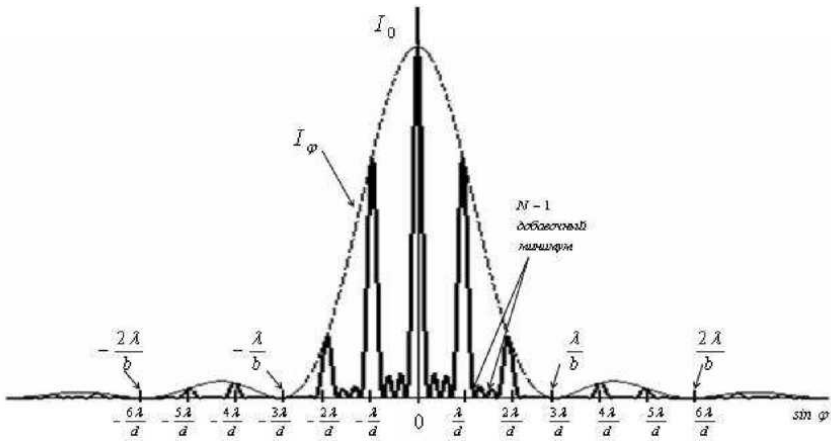


Рис. 6. Зависимость интенсивности света от угла дифракции при дифракции Фраунгофера на решетке из четырех щелей, $d/b = 3$. Указаны положения главных дифракционных максимумов. Пунктиром указано распределение интенсивности I_φ при дифракции на одной щели и отмечено положение дифракционных минимумов

Поскольку для направлений, определяемых условием (8), колебания от отдельных щелей складываются, то амплитуда результирующего колебания A равна:

$$A = A_\varphi N,$$

соответственно интенсивность I главных максимумов в N^2 раз больше интенсивности I_φ , создаваемой в направлении φ отдельной щелью:

$$I = I_\varphi N^2.$$

Против оптического центра линзы находится самый яркий центральный максимум.

Между каждыми двумя главными максимумами лежат $(N-1)$ добавочных минимумов, определяемые из условия:

$$d \sin \varphi = \pm \left(m\lambda \pm \frac{p\lambda}{N} \right), \text{ где } p=1, 2, \dots, (N-1). \quad (9)$$

Соответственно между двумя главными максимумами находятся $(N-2)$ слабых вторичных максимума (рис. 6).

Если отношение d/b равно отношению двух целых чисел:

$$\frac{d}{b} = \frac{m}{k},$$

то направления на главные максимумы порядков $m, 2m, 3m$ и т.д. совпадают с направлениями на минимумы порядка $k, 2k, 3k$ и т.д., которые обусловлены дифракцией на одной щели. В этом случае соответствующие главные максимумы отсутствуют.

Угловое расстояние между главным максимумом и ближайшим к нему добавочным минимумом (угловая ширина максимума) $\Delta\varphi$ равно

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{Nd \cos \varphi}.$$

При не очень больших углах дифракции (небольших порядках m) $\cos \varphi \approx 1$, тогда угловая ширина максимума практически не зависит от порядка спектра:

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{Nd}.$$

Из этой формулы следует, что угловая ширина главных максимумов тем меньше, чем больше величина Nd . Если период решетки d задан, то угловая ширина главных максимумов уменьшается с ростом числа щелей N , поэтому дифракционная картина для решеток с большим числом штрихов представляет собой набор резких главных максимумов, располагающихся симметрично относительно яркого центрального максимума. Добавочные минимумы и вторичные максимумы практически не наблюдаются.

Если источником света является излучение лазера, то

благодаря высокой степени пространственной и временной когерентности этого излучения, можно наблюдать дифракцию Фраунгофера на щели или на дифракционной решетке без использования линзы. Для этого экран надо размещать на большом расстоянии от преграды. Тогда лучи, приходящие в точку P экрана от различных зон щели или решетки будут практически параллельны (рис. 7). Центр дифракционной картины лежит в направлении падения исходного пучка лучей. Все сделанные ранее выводы относительно особенностей дифракционных картин в этом случае остаются справедливыми.

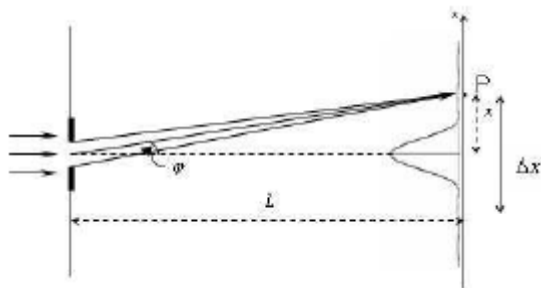


Рис. 7. Схема наблюдения дифракции Фраунгофера без использования линзы

Измеряя расстояние x от центра картины до точки P экрана (рис. 7), можно найти углы дифракции:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{L}, \quad (10)$$

При малых углах дифракции, а именно это имеет место в случае больших L , можно считать:

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi \quad (11)$$

Тогда с учетом условий (10), (11) получим координаты минимумов для дифракции на щели:

$$x_{\min} = \pm k \frac{\lambda L}{b}, \quad (12)$$

и координаты главных максимумов для дифракции на решетке:

$$x_{\max} = \pm m \frac{\lambda L}{d}. \quad (13)$$

Используя полученные выражения можно определять параметры щелей и решеток, если известна длина волны излучения λ , либо находить длину волны излучения по известным значениям b и d . Для определения λ измеряют расстояние Δx_m между симметричными главными максимумами порядка m при дифракции на решетке, из (13) получим:

$$\lambda = \frac{d}{2L} \frac{\Delta x_m}{m}. \quad (14)$$

Для ширины щели b , измеряя расстояние Δx_k между симметричными главными дифракционными минимумами, получим из (12):

$$b = \frac{2k}{\Delta x_k} \lambda L. \quad (15)$$

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка показана на рис. 8. На оптической скамье 1 укреплен гелий-неоновый лазер 2. С помощью собирающей линзы 3 (фокусное расстояние $F=20$ мм) и собирающей линзы 4 (фокусное расстояние $F=100$ мм) формируют достаточно широкий параллельный пучок лазерного излучения, который падает на исследуемый дифракционный объект 5 (на дифракционную решетку или диафрагму с набором щелей), укрепленный в вертикальном держателе.

Внимание! Запрещается трогать руками оптические поверхности линзы, источника и экран. Все перемещения вдоль оптической скамьи следует производить, двигая приборы за металлические рейтеры.

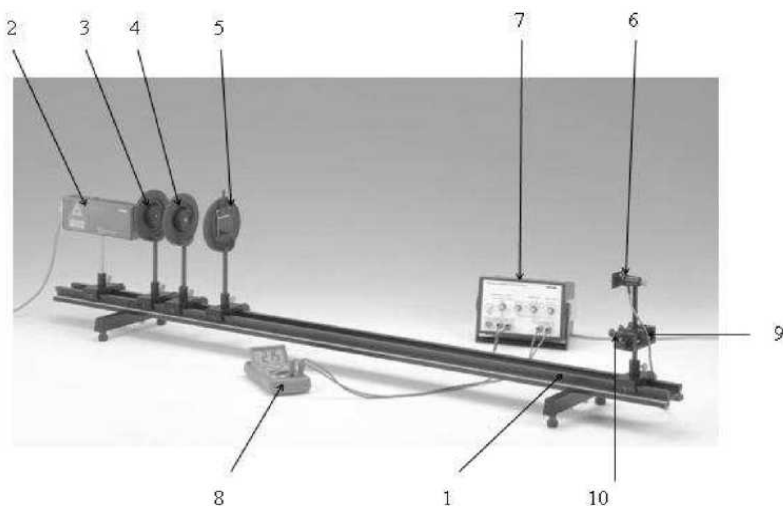


Рис. 8. Схема экспериментальной установки: 1 - оптическая скамья, 2 - гелий-неоновый лазер, 3 - собирающая линза (фокусное расстояние $F=20\text{мм}$), 4 - собирающая линза (фокусное расстояние $F=100\text{мм}$), 5 - держатель с дифракционным образцом, 6 - фотоэлемент, 7 - усилитель электрических сигналов, 8 - мультиметр, 9 - скользящая горизонтальная платформа, 10 - микрометрические винты

Далее излучение падает на фотоэлемент 6, в котором под воздействием излучения возникает фотоЭДС. Таким образом, об относительной интенсивности дифракционной картины можно судить по величине фотоЭДС, возникающей в цепи фотоэлемента. Для этого сигнал с фотоэлемента поступает сначала на усилитель 7, а затем на цифровой мультиметр 8. Фотоэлемент 6 укреплен на скользящей платформе 9, которая может перемещаться в горизонтальной плоскости перпендикулярно оптической скамье с помощью микрометрических винтов 10. Положение платформы определяется по показаниям шкалы микрометрических винтов.

Таблица 1

Порядок выполнения работы

№ дифракционной решетки, число штрихов/мм	$d \pm \Delta d$, м	$L \pm \Delta L$, м

Внимание! При работе на установке соблюдайте осторожность и не допускайте попадания лазерного излучения в глаза!

Работу следует делать в строгом соответствии с нижеизложенным порядком выполнения и в объеме, предусмотренном индивидуальным заданием.

Перед выполнением работы внимательно ознакомьтесь с описанием шкалы микрометрического винта: от того, насколько правильно произведен отсчет по шкале, зависит качество полученных результатов!

Описание шкалы микрометрического винта

На шкале микрометрического винта в окошке над круговой шкалой указано полное число оборотов винта, сделанное после прохождения ближайшего нулевого отсчета (см. рис. 9, 10, 11). При вращении винта вправо, по часовой стрелке, показания шкалы растут, при вращении влево, против часовой стрелки, показания уменьшаются. **Один полный оборот микрометрического винта соответствует перемещению фотоэлемента в горизонтальном направлении на 0,5 мм.** Числа оборотов (число в окошке шкалы) может принимать значение от 0 до 20. **После совершения 20 полных оборотов показания обнуляются и начинаются заново.**

Круговая шкала имеет 50 делений. **Поворот винта на 1 деление круговой шкалы соответствует перемещению фотоэлемента в горизонтальном направлении на 0,01 мм.** Обратите внимание, что деления на круговой шкале занумерованы числами 0, 10, 20, ... 90 через каждые 5 делений. Таким образом, при повороте винта, например, от деления с номером 10 до деления с номером 20, фотоэлемент перемещается на расстояние $5 \cdot 0,01 = 0,05$ мм.

Покажем, как определить положение фотоэлемента на нескольких примерах. Пусть начальному положению фотоэлемента соответствуют показания шкалы микрометрического винта на рис. 9.

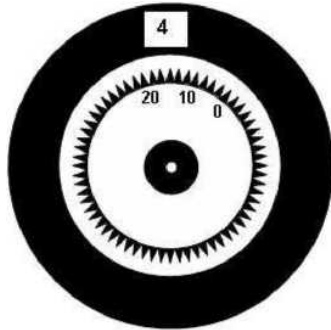


Рис. 9. К определению положения фотоэлемента

Найдем полное число оборотов, сделанное после прохождения ближайшего нуля шкалы (число в окошке) - 4. Найдем номер того деления круговой шкалы, которое находится напротив окошка - 8. Именно 8, а не 13, поскольку между делением с номером 0 и делением с номером 10 находятся только 5 делений!

Тогда положение x_1 относительно ближайшего нуля шкалы определится следующим образом:

$$x_1 = (4:2) * 1 \text{ мм} + (10:2 + 3) * 0,01 \text{ мм} = 2 \text{ мм} + 8 * 0,01 \text{ мм} = 2,08 \text{ мм}.$$

Пусть следующему положению фотоэлемента соответствуют показания шкалы микрометрического винта на рис. 10.

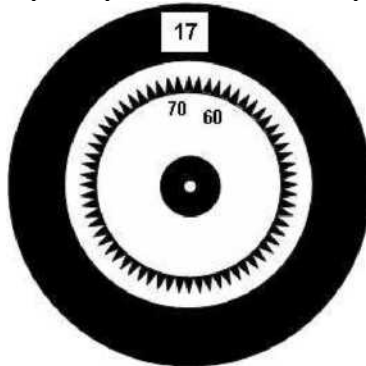


Рис. 10. К определению положения фотоэлемента

Если при переходе от первого положения ко второму винт вращался только вправо, и число оборотов ни разу не достигло 20 (показания в окошке шкалы не обнулялись), то положение

фотоэлемента x_2 определим следующим образом: $x_2 = (17:2) * 1 \text{ мм} + (60:2+4) * 0,01 \text{ мм} = 8,5 \text{ мм} + 34 * 0,01 \text{ мм} = 8,5 \text{ мм} + 0,34 \text{ мм} = 8,84 \text{ мм}$. Таким образом, между первым и вторым положениями фотоэлемент переместился в горизонтальном направлении на расстояние $\Delta x = x_2 - x_1 = 8,84 \text{ мм} - 2,08 \text{ мм} = 6,76 \text{ мм}$. Пусть следующему положению фотоэлемента соответствуют показания шкалы микрометрического винта на рис. 11.

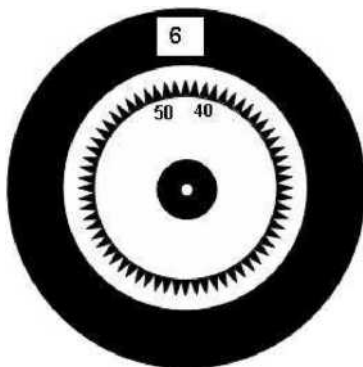


Рис. 11. К определению положения фотоэлемента

Если при переходе от второго положения к третьему винт вращался только вправо, и число оборотов один раз достигло 20, то следует к значению числа оборотов в окошке добавить 20, тогда положение фотоэлемента x_3 определим следующим образом:

$$x_3 = ((20+6):2) * 1 \text{ мм} + (40:2+3) * 0,01 \text{ мм} = 13 \text{ мм} + 23 * 0,01 \text{ мм} = 13,23 \text{ мм}.$$

Таким образом, между вторым и третьим положениями фотоэлемент переместился в горизонтальном направлении на расстояние $\Delta x = x_3 - x_2 = 13,23 \text{ мм} - 8,84 \text{ мм} = 4,39 \text{ мм}$.

Изучение дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке

1. Включить лазер 2 и усилитель 7 (рис. 8), оборудование должно прогреться в течение 15 минут.

2. Закрепить в держателе 5 соответствующую индивидуальному заданию дифракционную решетку. Плоскость решетки должна быть перпендикулярна плоскости лазерного пучка.

3. Держатель с фотоэлементом 6 поставить и закрепить на оптической скамье 1 на расстоянии L , указанном в индивидуальном

задании.

4. Занести в таблицу 1 данные экспериментальной установки, а именно: число штрихов на 1 мм длины решетки, расстояние L . Рассчитайте и внесите в таблицу 1 период решетки d .

5. Включить мультиметр. Прикрыв входное отверстие фотоэлемента листом белой бумаги, получите на листе дифракционную картину. Медленно вращая микрометрический винт 10 против часовой стрелки, сместить входную щель фотоэлемента в положение, соответствующее крайнему левому (если смотреть на экран вдоль луча) дифракционному максимуму, который еще хорошо виден (обычно это 2-ой или 3-ий максимум от центра). Убрать лист. Выбрать удобный предел измерения напряжения. Записать в таблицу 3 номер m данного главного дифракционного максимума.

6. Наблюдая за показаниями вольтметра и медленно вращая микрометрические винты в одну и другую сторону, добиться такого положения, при котором напряжение максимально. Это и будет положение, соответствующее данному главному дифракционному максимуму. Записать значение x_m по показаниям микрометрической шкалы (см. «Описание шкалы микрометрического винта») в таблицу 3.

7. Вращая микрометрический винт строго вправо, по часовой стрелке (показания шкалы микрометрического винта должны возрастать), и наблюдая за показаниями вольтметра, поместить фотоэлемент в положение, соответствующее соседнему, $m-1$, максимуму. В соответствии с п. 6, определить точное положение максимума и записать в таблицу 3 значение x_{m-1} .

8. Повторяя процедуру, изложенную в п.п. 6 и 7, определить положения остальных главных максимумов. Положение самого яркого центрального максимума в таблицу 3 не записывать.

Внимание! При переходе к каждому последующему максимуму винт нужно вращать строго вправо, по часовой стрелке, при этом фотоэлемент движется от левого края дифракционной картины к правому. Внимательно следите за показаниями шкалы микрометрического винта в окошке, не забывайте добавлять к значению числа оборотов 20, столько раз, сколько эти показания

обнулялись с начала измерений! Значения x_m , которые вы вносите в таблицу по мере перемещения фотоэлемента, должны только возрастать.

Таблица 2

$\pm m$	x_{+m} , мм	x_{-m} , мм	Δx_m , мм	$\Delta x_m/m$, мм	λ_m , мкм
Средние значения					$\bar{\lambda}$, мкм $\Delta\lambda$, мкм

Исследование зависимости интенсивности света от угла дифракции при дифракции Фраунгофера на системе из нескольких параллельных щелей

1. Закрепить в держателе 5 соответствующую индивидуальному заданию диафрагму с набором щелей. Плоскость диафрагмы должна быть перпендикулярна плоскости лазерного пучка.

2. Прикрыв входное отверстие фотоэлемента листом белой бумаги, получить на листе дифракционную картину. Найти яркий центральный максимум и, медленно вращая микрометрический винт 10, сместить фотоэлемент в положение, соответствующее центральному дифракционному максимуму. Убрать лист. Добиться максимальных показаний вольтметра и записать полученное значение, а это будет максимальное значение напряжения - V_{\max} , в таблицу 4 в качестве нулевого отсчета ($n=0$).

3. Медленно вращая микрометрический винт с шагом $h=0,2$ мм, т.е. поворачивая винт каждый раз на 20 делений круговой шкалы (например, от деления с номером 10 до деления с номером 50, поскольку на шкале занумерованы каждые 5 делений), записывать в таблицу 3 показания вольтметра. Измерения проводить до тех пор, пока фотоэлемент не пройдет положение, соответствующее третьему главному дифракционному максимуму. Число измерений может достигать нескольких десятков.

Таблица 3

№ п/п	0	1	2...
V , В			
V/V_{\max}			

Обработка результатов измерений

Определение длины волны лазерного излучения

1. Пользуясь результатами таблицы 3, вычислить по формуле (14) значения длины волны излучения для каждого значения m порядка дифракционного максимума. Результаты занести в таблицу 3.

2. Найти и записать в таблицу 3 среднее значение длины волны $\bar{\lambda}$ по формуле

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \lambda_m}{m_{кр}}, \quad (16)$$

где $m_{кр}$ - порядок крайнего дифракционного максимума.

3. Оценить погрешность измерения $\Delta\lambda$. Для оценки принять погрешность измерения $\Delta\lambda$ равной погрешности измерения длины волны $\Delta\lambda_1$ для первого ($m=1$) порядка спектра. Относительная погрешность в этом случае вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta(\Delta x_1)}{\Delta x_1}, \quad (17)$$

где погрешность измерения положения первого максимума принять равной $\Delta(\Delta x_1)=0,02$ мм.

Теперь можно найти абсолютную погрешность:

$$\Delta\lambda \approx \Delta\lambda_1 = \delta\lambda_1. \quad (18)$$

4. Окончательный результат представить в виде:

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda.$$

Определение ширины щелей

1. По результатам таблицы 3 построить график распределения интенсивности. По оси абсцисс откладывать значения координаты x точки. Значения координаты можно определить по формуле:

$$x = nh,$$

где n - номер измерения, $h = 0,2$ мм - шаг измерения. Выбрать следующий масштаб: в 1 см 1 мм. По оси ординат откладывать

нормированные значения напряжения V/V_{max} , выбрать следующий масштаб: в 1 см - 0,1 мм. Построить огибающую графика.

2. Пользуясь огибающей графика, определить расстояние $\Delta x_k/2$ между центральным максимумом и главными минимумами первого и второго порядков ($k=1, 2$). Полученное расстояние следует умножить на 2, чтобы получить расстояние между симметрично расположенными минимумами, которое входит в формулу (15). Результаты занести в таблицу 5.

3. Вычислить по формуле (15) ширину щелей для каждого значения k . Значения длины волны определено ранее.

4. Вычислить средние значения \bar{b} , пользуясь формулой, аналогичной (16). Поскольку точность определения положения минимума по огибающей графика не превышает 10%, погрешность измерения Δb равна:

$$\Delta b \approx 0,1\bar{b}.$$

Результаты занести в таблицу 4.

5. Окончательный результат представить в виде:

$$b = \bar{b} \pm \Delta b.$$

Таблица 4

k	Δx_k , мм	$\Delta x_k/k$	b_k , мкм
1			
2			
.			
Средние значения		\bar{b} , мкм;	Δb , мкм

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление дифракции?
2. Как формулируется принцип Гюйгенса-Френеля?
3. Каково условие получения дифракционных минимумов при дифракции Фраунгофера на одной щели?
4. Каково условие получения дифракционных максимумов при дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке?
5. Как в работе определяется длина волны лазерного излучения?
6. Как в работе определяется ширина щели?

Индивидуальные задания

Задание 1

1. Дайте определение дифракции, сформулируйте принцип Гюйгенса- Френеля. Нарисуйте примерную картину дифракции Фраунгофера на решетке из трех щелей, если $\frac{d}{b} = \frac{5}{2}$.

2. Используя дифракционную решетку с числом штрихов 4 мм^{-1} , экспериментально изучите дифракционную картину и определите длину волны лазерного излучения, расстояние $L=120 \text{ см}$.

3. Используя диафрагму с 3 щелями, исследуйте зависимость интенсивности от угла дифракции. Постройте график распределения интенсивности, определите ширину щели b .

Задание 2

1. Дайте определение дифракции, сформулируйте понятие дифракции Френеля и Фраунгофера. Нарисуйте примерную дифракционную картину при дифракции Фраунгофера на решетке из четырех щелей, $\frac{d}{b} = 4$.

2. Используя дифракционную решетку с числом штрихов 8 мм^{-1} , экспериментально изучите дифракционную картину и определите длину волны лазерного излучения, расстояние $L=110 \text{ см}$.

3. Используя диафрагму с 4 щелями, исследуйте зависимость интенсивности от угла дифракции. Постройте график распределения интенсивности, определите ширину щели b .

Задание 3

1. Дайте определение дифракционной решетки. Приведите формулу для определения положения главных дифракционных максимумов. Объясните метод определения длины волны излучения с помощью дифракционной решетки.

2. Используя дифракционную решетку с числом штрихов 10 мм^{-1} , экспериментально изучите дифракционную картину и определите длину волны лазерного излучения, расстояние $L=120 \text{ см}$.

3. Используя диафрагму с 3 щелями, исследуйте зависимость интенсивности от угла дифракции. Постройте график распределения интенсивности, определите ширину щели b .

Задание 4

1. Дайте определение дифракции. Перечислите характерные особенности дифракционной картины при дифракции Фраунгофера на щели, приведите формулу для определения положения дифракционных минимумов.

2. Используя дифракционную решетку с числом штрихов 50 мм^{-1} , экспериментально изучите дифракционную картину и определите длину волны лазерного излучения, расстояние $L=90 \text{ см}$.

3. Используя диафрагму с 4 щелями, исследуйте зависимость интенсивности от угла дифракции. Постройте график распределения интенсивности, определите ширину щели b .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савельев И.В.* Курс физики. Т.2. М.: Лань. 2004. С. 381-384, 400-415.

2. *Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

3. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Наука. 1976. С. 150-155, 172-179, 198-203.

4. *Литвинов О.С., Горелик В.С.* Электромагнитные волны и оптика: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. 448 с. ил. (Физика в техническом университете / Под ред. Л.К. Мартинсона, А.Н.Морозова)

5. *Трофимова Т.И.*, Курс физики: учеб. пособие для вузов / Таисия Ивановна Трофимова. – 11-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 560 с. ISBN 5-7695-2629-7.

6. *Ташлыкова-Бушкевич И.И.* Физика: учебник. В 2 ч. Ч.2. Оптика. Квантовая Физика. Строение и Физические свойства вещества/ И.И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. Минск: Высшая школа, 2014. 232 с.: ил. ISBN 987-985-06-2506-9.

СОДЕРЖАНИЕ

Теоретическое введение.....	3
Принцип Гюйгенса-Френеля.....	4
Дифракция Фраунгофера на щели.....	6
Дифракция на нескольких щелях. Дифракционная решетка.....	10
Описание экспериментальной установки.....	15
Порядок выполнения работы.....	16
Описание шкалы микрометрического винта.....	17
Изучение дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке.....	19
Исследование зависимости интенсивности света от угла дифракции при дифракции Фраунгофера на системе из нескольких параллельных щелей.....	21
Обработка результатов измерений.....	22
Определение длины волны лазерного излучения.....	22
Определение ширины щелей.....	22
Контрольные вопросы.....	23
Индивидуальные задания.....	24
Библиографический список.....	25

ФИЗИКА
ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА
НА РЕШЕТКЕ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов всех направлений подготовки и всех форм обучения*

Сост.: *А.Ю. Грабовский, А.Ю.Егорова, Е.С. Ломакина*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *А.Ю. Грабовский*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 05.04.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,5. Усл.кр.-отг. 1,5. Уч.-изд.л. 1,2. Тираж 75 экз. Заказ 281.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2