

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

Кафедра общей физики

Н.И.МОНАХОВА, А.И.ФИШМАН

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ОБЩЕГО
ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА ПО ОПТИКЕ.
ДИФРАКЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ.**

Казань – 2020

*Принято на заседании кафедры общей физики
Протокол № 6 от 16 апреля 2020г.*

Рецензент:

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптики и нанофотоники
Института физики КФУ **М. Э. Сибгатуллин**

Монахова Н.И., Фишман А.И.

Экспериментальные задачи общего физического практикума по оптике.

**Дифракционные явления / Н.И.Монахова, А.И.Фишман – Казань: Казан. ун-т,
2020. – 26с.**

Методическое пособие «Экспериментальные задачи общего физического практикума по оптике. Дифракционные явления» предназначено для студентов физических и нефизических специальностей.

Описаны лабораторные работы физического практикума общего курса физики, раздел «Оптика», по теме «Дифракция света». К каждой работе даны подробные описания установок, краткая теория, порядок выполнения исследований и список вопросов для обсуждения с преподавателем, работа над которыми поможет глубже понять смысл полученных результатов.

© Монахова Н.И., Фишман А.И., 2020

© Институт физики Казанского
(Приволжского) федерального
университета, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Изучение дифракции Френеля на круглом отверстии и полуплоскости.....	4
Задание 1. Определение длины волны излучения лазерного источника по дифракционной картине.....	7
Задание 2. Наблюдение дифракционной картины на полуплоскости.....	8
Изучение дифракции Фраунгофера на одной и двух щелях и дополнительных экранах.....	9
Задание 1. Наблюдение и анализ дифракционной картины от одной щели.....	14
Задание 2. Наблюдение дифракционной картины от двух щелей и измерение расстояния между щелями.....	15
Задание 3. Наблюдение дифракционной картины на дополнительных экранах.....	16
Изучение отражательной дифракционной решетки.....	17
Задание 1. Подготовка гониометра к измерениям.....	24
Задание 2. Определение длин волн излучения в спектре газоразрядной ртутной лампы с помощью отражательной дифракционной решетки.....	24

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРЕНЕЛЯ НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ И ПОЛУПЛОСКОСТИ

Цель работы: освоить методы наблюдения и анализа френелевских дифракционных картин от различных препятствий.

Если на пути сферической световой волны поместить небольшой непрозрачный экран с круглым отверстием на расстоянии a от точечного источника S , то на другом сплошном экране, расположенном на расстоянии b от отверстия, будет наблюдаться дифракционная картина в виде чередующихся темных и светлых концентрических колец (рис.1).

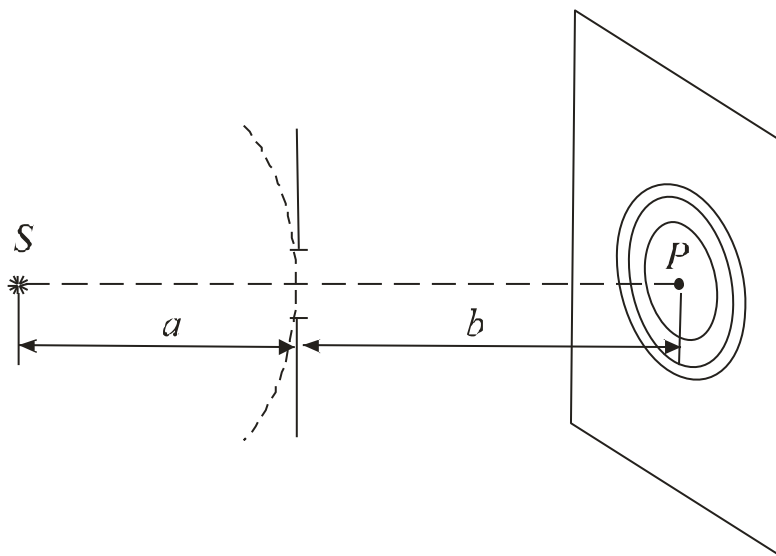


Рис.1

Для определения амплитуды (и соответствующей интенсивности) световой волны в точке P экрана (точка P находится на прямой, проходящей через источник S и середину отверстия), необходимо сложить амплитуды волн, приходящих от всех открытых зон Френеля, используя метод векторных диаграмм.

Радиус m -той зоны Френеля $r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m\lambda$. Если радиус отверстия r_0 окажется равным радиусу m -й зоны Френеля r_m , то можно определить число зон Френеля m , открываемых данным отверстием: $m = \frac{r_0^2}{\lambda} \frac{(a+b)}{ab}$. Видно, что число открытых зон Френеля зависит не только от r_0 , но и от расстояний a и b . Меняя эти расстояния, можно изменять число зон, открываемых отверстием r_0 . Если окажется, что $\Delta m = 1$, то в центре дифракционной картины светлое пятно сменится на темное или наоборот, темное - на светлое.

Метод векторных диаграмм позволяет наглядно объяснить распределение интенсивности и при дифракции Френеля на полуплоскости и щели. Остановимся на анализе дифракционной картины от этих преград более подробно.

В этом случае волновой фронт целесообразно разбивать не на кольцевые зоны, как это делалось для круглых препятствий, а на полосатые зоны. Ограничимся случаем, когда волновой фронт плоский. Пусть плоскость волнового фронта АВ перпендикулярна плоскости чертежа (рис.2).

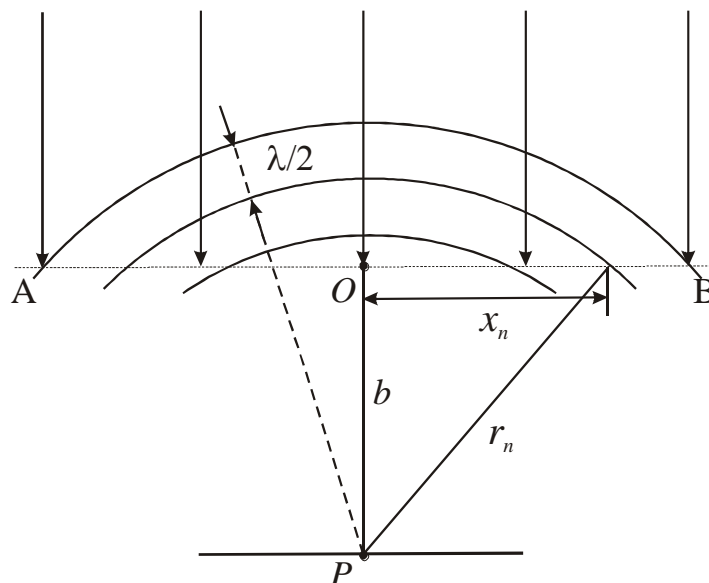


Рис.2

Расстояние от точки наблюдения P до фронта АВ обозначим через b . Проведем цилиндрические коаксиальные поверхности, ось которых проходит через точку P перпендикулярно плоскости рисунка, а радиусы увеличиваются на $\lambda/2$, т.е. равны $b, b+\lambda/2, b+2\lambda/2, \dots$. Тогда волновой фронт АВ разобьется на прямоугольные полосы, которые называются зонами Шустера. Зоны Шустера отсчитываются вправо и влево от центральной точки O . Таким образом, центральная зона оказывается состоящей из двух зон. Из рис.2 видно:

$$r_n^2 = b^2 + x_n^2, \quad (1)$$

где r_n и x_n - расстояния от края n -й зоны до точки P и точки O , соответственно. Аналогично для зоны с номером $n-1$ можно записать: $r_{n-1}^2 = b^2 + x_{n-1}^2$. Тогда

$$r_n^2 - r_{n-1}^2 = x_n^2 - x_{n-1}^2 = (r_n + r_{n-1})(r_n - r_{n-1}) \approx 2b \frac{\lambda}{2} = b\lambda. \quad (2)$$

Из этого соотношения следует: $x_n^2 = b\lambda + x_{n-1}^2$. Отсюда легко могут быть найдены все x_n . Т.к. $x_0 = 0$, то $x_1 = \sqrt{b\lambda}$, $x_2 = \sqrt{2b\lambda}$, ..., $x_n = \sqrt{nb\lambda}$. Ширины зон Шустера Δx_n будут равны: $\sqrt{b\lambda}$, $(\sqrt{2}-1)\sqrt{b\lambda}$, $(\sqrt{3}-\sqrt{2})\sqrt{b\lambda}$... $(\sqrt{n}-\sqrt{n-1})\sqrt{b\lambda}$. Они монотонно убывают $\Delta x_1 : \Delta x_2 : \Delta x_3 : \Delta x_4 \dots = 1 : 0,41 : 0,32 : 0,27 : \dots$.

Для расчета результирующей амплитуды в точке P , как и в случае зон Френеля, применим графический метод сложения амплитуд. Каждую зону Шустера разобьем на узкие полоски (подзоны) способом, аналогичным разбиению фронта на зоны Шустера, т.е. внося постоянную разность фаз для волн, идущих от соседних подзон. Колебания, возбуждаемые в точке наблюдения такими подзонами, на векторной диаграмме изобразятся векторами ΔA_i , длина которых вначале резко убывает (вследствие значительного отличия площадей первых подзон), а затем становится почти одинаковой. Если перейти к пределу, устремив к нулю ширину каждой подзоны, то вместо ломаной получится плавная кривая, называемая спиралью Корню (рис.3).

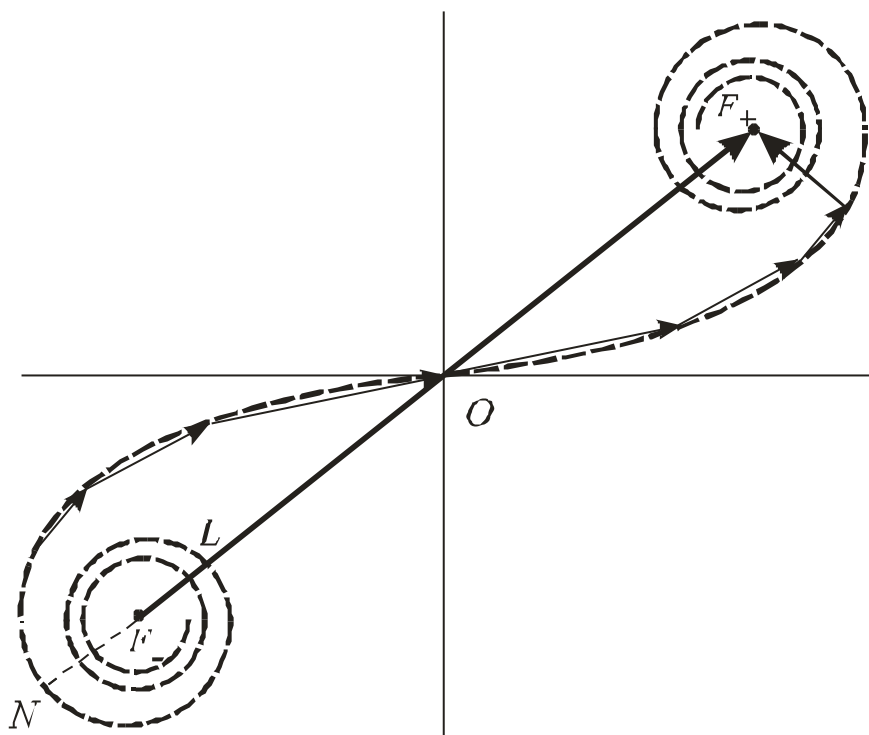


Рис.3

Она состоит из двух симметричных ветвей, обвивающихся вокруг фокусов F_+ и F_- . Верхняя ветвь дает вклад в результирующую амплитуду вторичных волн, идущих от правой половины волнового фронта, а нижняя – от левой. При полностью открытом волновом фронте амплитуда световой волны в т. P изображается вектором $F.F_+$.

Рассмотрим теперь дифракционную картину на полуплоскости. Обозначим через $a_0 = |F.F_+|$ и $I_0 \sim a_0^2$ амплитуду и интенсивность волны при полностью открытом волновом фронте, соответственно.

Когда точка P находится на границе геометрической тени (координата $x=0$), для нее открыта только правая половина волнового фронта. Колебание в ней представится вектором $OF_+ = 1/2 F.F_+$. Ему соответствует амплитуда $\frac{a_0}{2}$ и интенсивность $I_0/4$ (рис 4).

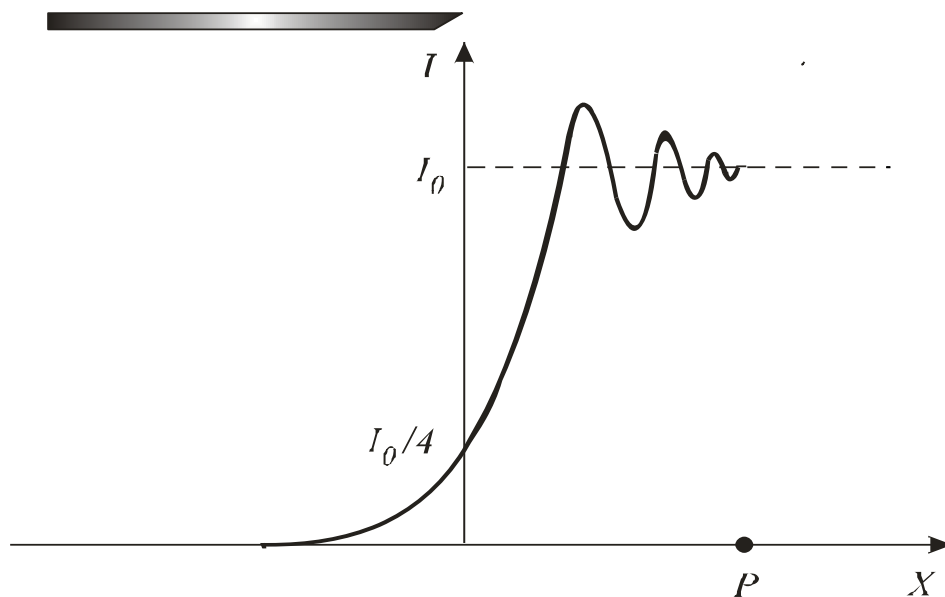


Рис.4.

При смещении точки P в область геометрической тени полуплоскость станет закрывать все большее число зон правой половины волнового фронта. Поэтому начало результирующего вектора будет перемещаться по правой ветви, приближаясь к F_+ . В результате амплитуда и интенсивность колебания в точке P будет монотонно стремиться к нулю.

Если точка P смещается от границы геометрической тени вправо, в дополнение к правой части волнового фронта будет открываться все возрастающее число зон левой части фронта. При этом начало результирующего вектора амплитуды будет скользить по левой ветви спирали в направлении к F_- . В результате амплитуда проходит через ряд максимумов (первый из них равен длине отрезка NF_+) и минимумов (первый соответствует длине отрезка LF_+) (рис.3). Зависимость интенсивности света I от расстояния x , показана на рис.4.

Задание 1. Определение длины волны излучения лазерного источника по дифракционной картине.

Принадлежности: лазер, короткофокусная линза Л1, пластина с круглыми отверстиями О, линза Л2, экран Э.

Соберите установку на оптической скамье для наблюдения дифракции на круглом отверстии и отъюстируйте ее. Для этого:

1. На одном конце оптической скамьи установите лазер, а на другом - экран Э. Включите лазер и добейтесь, чтобы луч распространялся вдоль оптической скамьи. Отметьте крестиком на листе бумаги, укрепленном на экране, точку падения лазерного луча.

2. Установите перед лазером короткофокусную линзу Л1 ($f = 1\text{см}$) так, чтобы центр светлого пятна на экране совпадал с крестиком.
3. Перед линзой (на расстоянии 10 – 15 см от линзы) поместите пластинку с круглыми отверстиями, предварительно измерив диаметр 3-го и 4-го отверстий с помощью компаратора. Введя в луч одно из указанных отверстий, добейтесь появления дифракционной картины на экране вблизи крестика. После чего закрепите пластинку в рейтере.
4. Перемещая пластинку с отверстиями вдоль оптической скамьи, оставляя неизменным расстояние от линзы до экрана ($\sim 85\text{см}$), добейтесь появления в центре картины темного пятна. Для облегчения наблюдения дифракционной картины на экране воспользуйтесь линзой Л2, как лупой. Измерьте расстояния a_1 и b_1 (см. рис.1, a_1 следует отсчитывать от заднего фокуса линзы Л1 до экрана с отверстиями).
5. Продолжайте перемещать отверстие, наблюдая за изменением освещенности в центре экрана, до появления следующего темного пятна (в этом случае число зон Френеля, открываемых отверстием, изменяется на $\Delta m = 2$). Измерьте a_2 и b_2 .
6. По формуле $\lambda = \frac{r_0^2}{\Delta m} \left[\frac{(a_1 + b_1)}{a_1 b_1} - \frac{(a_2 + b_2)}{a_2 b_2} \right]$ определите длину волны лазера и оцените погрешность измерений.
7. Повторите эксперимент для другого отверстия.

Задание 2. Наблюдение дифракционной картины на полуплоскости.

Принадлежности: лазер, короткофокусная линза Л1, пластина – полуплоскость ППл, экран Э.

1. Для наблюдения дифракции на полуплоскости, соберите установку, оптическая схема которой подобна той, которая использовалась в задании 1, заменив диафрагму с отверстиями на полуплоскость (ППл).

Зарисуйте полученную дифракционную картину и объясните ее.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Явление дифракции света.
2. Принцип Гюйгенса–Френеля.
3. Классификация дифракционных явлений. Дифракция Френеля и Фраунгофера.
4. Дифракция Френеля на круглом отверстии. Зоны Френеля. Метод векторных диаграмм.
5. Дифракция Френеля на щели и полуплоскости. Зоны Шустера. Спираль Корню.
6. Сформулируйте цель работы, опишите экспериментальную часть и обсудите результаты.

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА НА ОДНОЙ И ДВУХ ЩЕЛЯХ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭКРАНАХ

Цель работы: освоить методы наблюдения и анализа фраунгоферовых дифракционных картин от различных препятствий.

I. Дифракция Фраунгофера на одной щели.

Пусть плоская монохроматическая волна падает нормально на узкую длинную щель. Чтобы наблюдать дифракцию Фраунгофера мы должны либо удалить экран на бесконечность (тогда в каждой точке экрана соберутся лучи, идущие параллельным пучком), либо на пути дифрагировавших лучей поставить линзу, и экран расположить в фокальной плоскости линзы. Линза будет собирать в разных точках фокальной плоскости лучи, дифрагировавшие под разными углами φ и идущие параллельными пучками (рис.1).

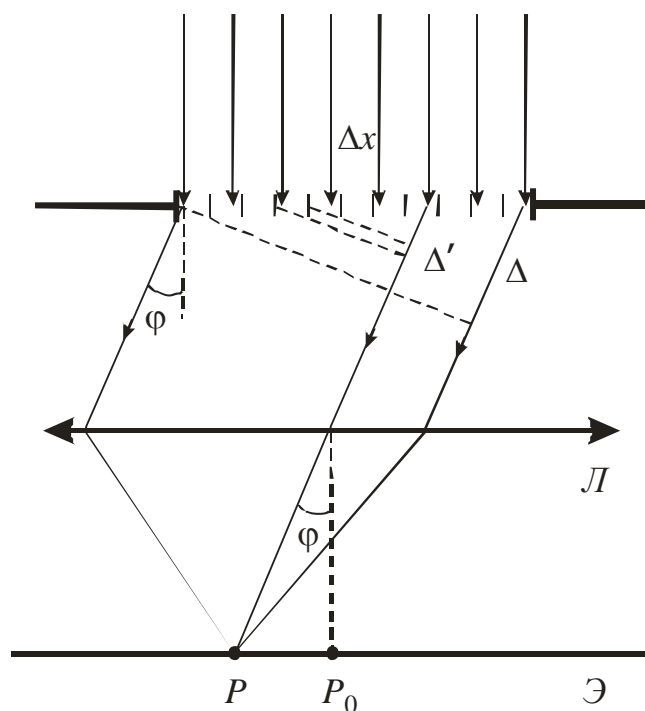


Рис.1

Ширину щели обозначим через b . Для расчета дифракционной картины используем метод векторных диаграмм. Разобьем щель (открытую часть волновой поверхности) на узкие одинаковые зоны-полоски ширины Δx , параллельные прямолинейным краям щели. Колебания, приходящие в точку P от каждой зоны-полоски, будут иметь одинаковую амплитуду ΔE , поскольку площади зон одинаковы и лучи идут параллельным пучком. Разность хода между крайними лучами зависит от угла дифракции φ и равна $\Delta = b \sin \varphi$ (рис.1). Соответственно, разность хода между лучами, идущими от соседних зон $\Delta' = \Delta x \cdot \sin \varphi$.

Так как $\Delta x = \text{const}$, то разность фаз δ между колебаниями, приходящими в точку P от соседних зон-полосок, будет также одинакова: $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$.

Следовательно, при графическом сложении амплитуд колебаний в точке P , мы получим цепочку векторов ΔE_i , одинаковых по модулю и повернутых друг относительно друга на один и тот же угол (рис.2а).

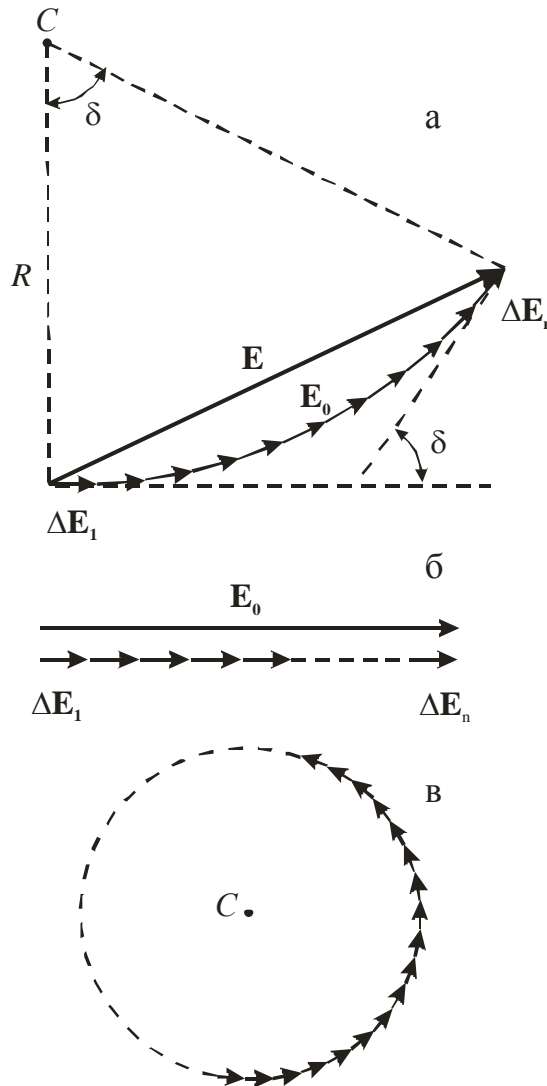


Рис.2

Результирующая амплитуда изобразится вектором E – хордой дуги окружности с центром в точке C . Для точки P_0 (рис.1) эта цепочка образует прямую, что соответствует максимальной амплитуде E_0 . (рис.2б)

Если разность хода крайних лучей $\Delta = \lambda$, то их разность фаз $\delta = 2\pi$, цепочка оказывается замкнутой и амплитуда результирующего колебания $E = 0$. (рис.2в). Это первый минимум дифракционной картины, представляющей собой симметричную относительно середины систему чередующихся светлых и темных полос, параллельных щели.

Результирующая амплитуда равна нулю и тогда, когда разность фаз $\delta=2\pi m$, где $m = \pm 2, \pm 3 \dots$. Цепочка при этом замыкается после m оборотов, практически не меняя своей длины E_0 . Таким образом, условие минимумов дифракционной картины $b \sin \varphi = m\lambda$, где $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$.

Найдем интенсивность света I на экране в зависимости от угла дифракции φ . Результирующую амплитуду колебаний E в точке P легко определить из рис.2а. Если радиус дуги обозначить через R , то $E = 2R \sin \frac{\delta}{2}$, а длина дуги $E_0 = R\delta$, где

$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} b \sin \varphi$. Выразив $R = \frac{E_0}{\delta}$ и подставив в E , получаем:

$$E = E_0 \frac{\sin \frac{\delta}{2}}{\frac{\delta}{2}} \quad (1)$$

Поскольку интенсивность волны I пропорциональна квадрату амплитуды, то:

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

График зависимости I от $\sin \varphi$ изображен на (рис.3).

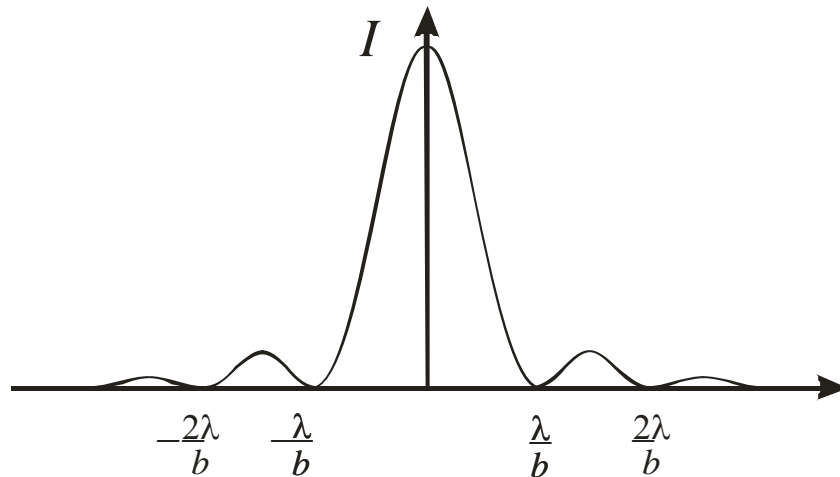


Рис.3

II. Дифракция Фраунгофера на двух щелях.

Возьмем 2 узкие щели шириной b , разделенные непрозрачным промежутком a , и направим на них нормально параллельный пучок света (рис.4). Введем величину $d = a+b$.

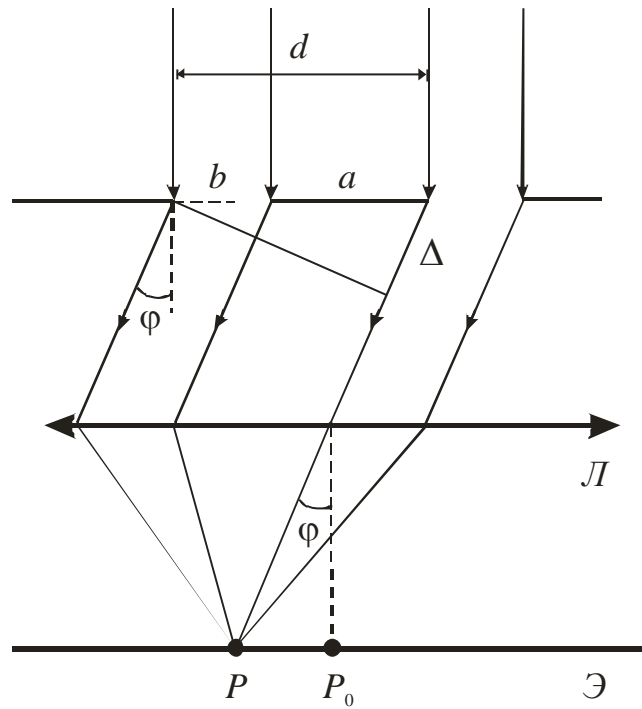


Рис.4

Если *поочередно* закрывать одну из щелей, то на экране будет наблюдаться *одна и та же* дифракционная картина (рис.3), местоположение которой определяется положением линзы, а не щели.

Если открыть обе щели одновременно, то получающаяся картина будет зависеть от когерентности излучения, идущего от соседних щелей. В отсутствие когерентности дифракционные картины от каждой щели наложились бы друг на друга и интенсивность увеличилась бы в 2 раза. При освещении щелей когерентным светом, волны от соседних щелей интерферируют друг с другом и дифракционная картина резко меняется.

В направлениях, в которых каждая щель давала минимум ($\sin\varphi = m\lambda/b$), света не будет и при двух, и более щелях. Эти минимумы называются главными. Таким образом, условие главных минимумов можно записать в виде:

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

Если оптическая разность хода волн, идущих от щелей ($\Delta = d\sin\varphi$), равна целому числу длин волн, то волны интерферируют на максимум. Эти максимумы называются главными. Условие главного максимума можно записать в виде:

$$d\sin\varphi = m\lambda, \text{ где } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (4)$$

Следует заметить, что число главных максимумов, находящихся между первыми главными минимумами, зависит от величины отношения d/b .

В направлениях, для которых выполняется условие

$$d\sin\varphi = m\lambda/2, \quad (5)$$

где $m = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$ наблюдаются минимумы интенсивности. Эти минимумы называются добавочными. Они возникают в результате интерференции волн, пришедших в точку P от двух щелей. Добавочный минимум располагается между двумя главными максимумами.

Распределение интенсивности в дифракционной картине от двух щелей при $d/b = 3$ представлено на рис 5. Пунктирной кривой показано распределение интенсивности, при дифракции на одной щели.

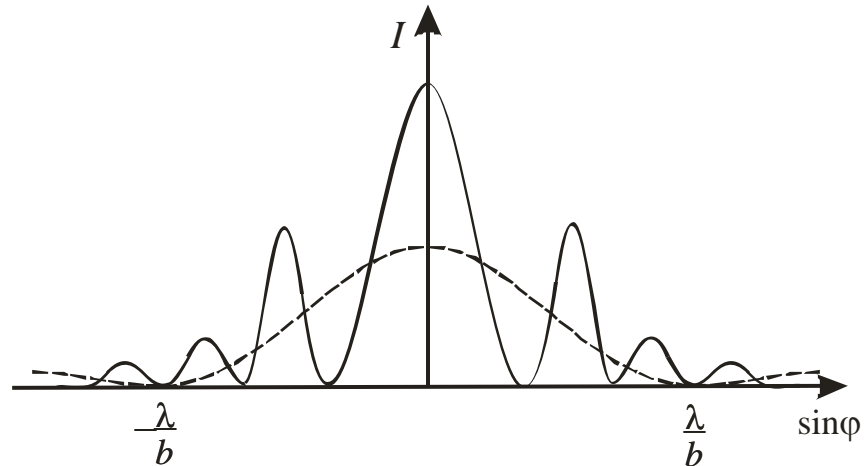


Рис.5

Теорема Бабине.

Обычно теорема Бабине формулируется для случая фраунгоферовой дифракции. Эта теорема связывает дифракционные картины, наблюдаемые от дополнительных экранов в фокальной плоскости линзы.

Дополнительными экранами называются такие экраны, которые совместно перекрывают волновой фронт. Например, если в непрозрачной преграде имеется щель, то дополнительным к ней экраном является непрозрачная прямолинейная полоска, ширина которой равна ширине щели.

Согласно теореме Бабине, фраунгоферовы дифракционные картины от дополнительных экранов в фокальной плоскости линзы одинаковы везде, за исключением самого фокуса.

Доказать теорему можно, опираясь на принцип Гюйгенса-Френеля.

Если бы на пути параллельных лучей не было бы препятствия, то световое поле в фокальной плоскости линзы было бы всюду равно нулю, за исключением фокуса линзы.

Пусть вектор-амплитуда дифрагированной в некотором направлении волны для данного экрана равна E_1 , а для дополнительного к нему экрана в этом же направлении E_2 . В отсутствие обоих экранов амплитуды волн для всех направлений, кроме направления первоначальной волны, равны нулю. Следовательно, по принципу Гюйгенса – Френеля

получим, что $E_1 + E_2 = 0$, откуда $E_1 = E_2$. Так как регистрируется интенсивность света $I (I \sim E^2)$, то получаем, что $I_1 = I_2$.

В данной работе экспериментально изучаются дифракционные френгоферовы картины от одной щели, двух щелей и тонкой нити.

Принадлежности: гелий-неоновый лазер, диафрагма с одной щелью, диафрагма с двумя щелями, диафрагма с тонкой нитью, экран.

Задание 1. Наблюдение и анализ дифракционной картины от одной щели.

Внешний вид экспериментальной установки показан на рис.6.

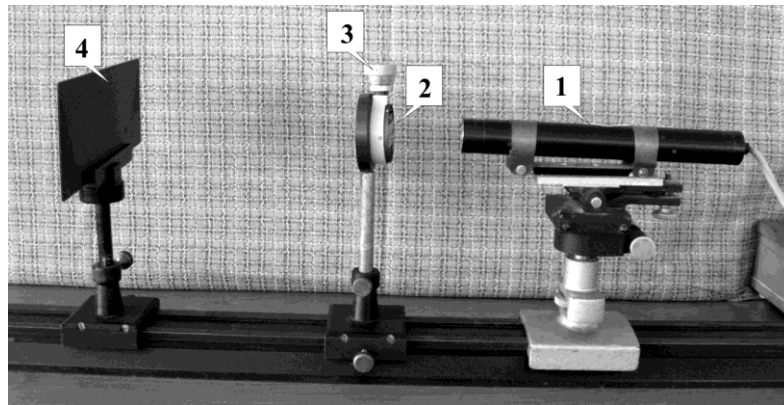


Рис.6

Свет от лазера (1) направляется на диафрагму (2) с вертикальной щелью, ширина которой может меняться с помощью микрометрического винта (3). Дифракционная картина наблюдается на экране (4), на котором закрепляется миллиметровая бумага.

1. Направьте пучок света от лазера вдоль оптической скамьи. Отметьте на экране положение светлого пятна. Эта точка будет являться центром дифракционной картины.
2. На оптической скамье установите диафрагму с одной щелью таким образом, чтобы плоскость щели была перпендикулярна оси лазерного пучка. На экране должна быть видна дифракционная картина, симметричная относительно отмеченной точки.
3. Микрометрическим винтом (3) установите такую ширину щели, при которой отчетливо видна дифракционная картина. Измерьте на экране расстояния X_{11} , X_{22} , X_{33} ... (т.е. расстояния между первыми минимумами справа и слева от центрального максимума, вторыми и третьими, соответственно), расстояние от плоскости щели до экрана l (рис.7).

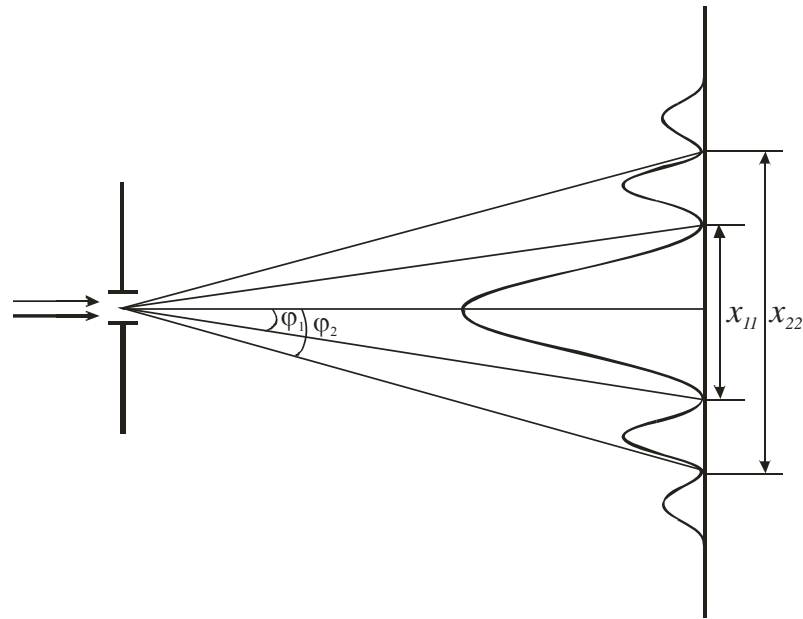


Рис.7

4. Вследствие малости углов, можно принять, что $\sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi$. Записывая условие минимума (3) в виде: $b \frac{X_{mm}}{2l} = m\lambda$ (здесь $m = 1, 2, 3 \dots$), получим: $X_{mm} = \frac{2l\lambda}{b} m$.

Постройте график зависимости X_{mm} от m . Убедитесь в линейности этой зависимости и из ее наклона определите ширину щели b . Длина волны излучения гелий-неонового лазера $\lambda = 633$ нм.

Задание 2. Наблюдение дифракционной картины от двух щелей и измерение расстояния между щелями.

Диафрагма с двумя щелями представляет собой раздвижную щель. Её ширину можно менять микрометрическим винтом. В середине щели натянута тонкая нить толщиной a . Эта нить разбивает щель на две равные щели с толщинами b .

1. Замените на оптической скамье диафрагму с одной щелью на диафрагму с двумя щелями. Установите плоскость щелей перпендикулярно к направлению лазерного пучка и перемещением щели в горизонтальном направлении, перпендикулярно оптической скамье, получите симметричную дифракционную картину.
2. Осторожно уменьшите ширину щели до размеров, когда дифракционная картина исчезнет.
3. Медленно увеличивайте ширину щели и внимательно следите за изменением характера дифракционной картины. Добейтесь, чтобы на экране получилась дифракционная

картина, изображенная на рис.5 (между двумя первыми минимумами должно быть 5 максимумов). В этом случае $d/b=3$.

4. Измерьте углы дифракции, соответствующие главным минимумам, и вычислите ширину щели b из условия (3).
5. Зная, что $a+b=d$ и $d/b=3$, вычислите расстояние между щелями a .
6. Изобразите примерную дифракционную картину при соотношении $d/b=2$. Получите на экране подобную дифракционную картину и вычислите расстояние между щелями a . Сравните результаты, полученные по разным дифракционным картинам.

Задание 3. Наблюдение дифракционной картины на дополнительных экранах.

В качестве дополнительных экранов используются одинарная щель и диафрагма с тонкой нитью.

1. На оптической скамье установите диафрагму с тонкой нитью, и получите на экране четкую дифракционную картину.
2. Измерьте расстояние X_{33} и X_{44} между третьими и четвертыми минимумами.
3. Вместо диафрагмы с нитью закрепите на оптической скамье щель и, меняя ее ширину, получите точно такую же дифракционную картину, которая наблюдалась от нити (чтобы расстояния X_{33} и X_{44} были бы такими же, как и в случае дифракции от нити).
4. Определите ширину щели методом, описанным в упражнении 1. Согласно теореме Бабине, толщина нити должна быть равна ширине щели.
5. Для сравнения определите толщину контрольного отрезка нити с помощью микрометра.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Явление дифракции света.
2. Принцип Гюйгенса–Френеля.
3. Классификация дифракционных явлений. Дифракция Френеля и Фраунгофера.
4. Дифракция Фраунгофера на одной и двух щелях.
5. Теорема Бабине.
6. Сформулируйте цель работы, опишите экспериментальную часть и обсудите результаты.

ИЗУЧЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Цель работы: изучение фраунгоферовой дифракции света на периодических структурах.

Задача исследования: изучение отражательной дифракционной решетки и определение с ее помощью длин волн излучения в спектре газоразрядной ртутной лампы.

В дифракционной картине, возникающей при прохождении света через *амплитудную* дифракционную решетку, основная часть энергии дифрагированного света сосредоточена в спектре нулевого порядка. Только малая часть падающего света попадает в какой-либо один порядок, отличный от нуля. Если такая решетка используется в качестве диспергирующего устройства в спектральном приборе, то это является существенным недостатком. Сконцентрировать большую часть энергии дифрагированного света в спектре порядка $m \neq 0$ можно, если *в пределах одного штриха* создать дополнительную разность хода (дополнительную разность фаз). Это можно сделать, в частности, приданием штрихам определенного профиля. Такие решетки, принцип действия которых основан на изменении фазы волны, называются *фазовыми* решетками.

В данной работе изучается отражательная фазовая дифракционная решетка. Отражательные решетки являются более совершенными диспергирующими устройствами, чем призмы и прозрачные решетки. Материалы призм и прозрачных решеток обладают селективным поглощением света, чего нет у отражательных решеток. Отражательная решетка с профилированным штрихом является фазовой решеткой: она практически не влияет на модуль амплитуды световой волны, а вносит периодическое изменение в ее фазу.

Плоские дифракционные решетки изготавливаются на слое мягкого металла (например, алюминия), нанесенного методом испарения в вакууме на точную плоскую поверхность стеклянной заготовки. В этом случае можно обеспечить одинаковое расположение граней для всех штрихов (канавок) решетки. Нарезание канавок решетки сводится к выдавливанию их на мягком металле при помощи специально заточенных алмазных резцов. При этом получается пилообразный профиль, представленный на рис. 1. Решетка с таким профилем позволяет сконцентрировать световую энергию в заданном порядке дифракции m , значительно снизив интенсивность нулевого порядка. Рассмотрим подробнее действие такой решетки.

На рис.1 приняты следующие обозначения:

ψ – угол падения на решетку (отсчитывается от нормали N к плоскости решетки);

φ – угол дифракции (отсчитывается от нормали N к плоскости решетки);

α - угол падения на отдельный элемент (отсчитывается от нормали к поверхности элемента N');

β - угол дифракции от отдельного элемента (также отсчитывается от нормали к поверхности элемента N');

i – угол наклона грани зеркального элемента, «угол блеска»;

b – ширина зеркального элемента;

d – постоянная решетки.

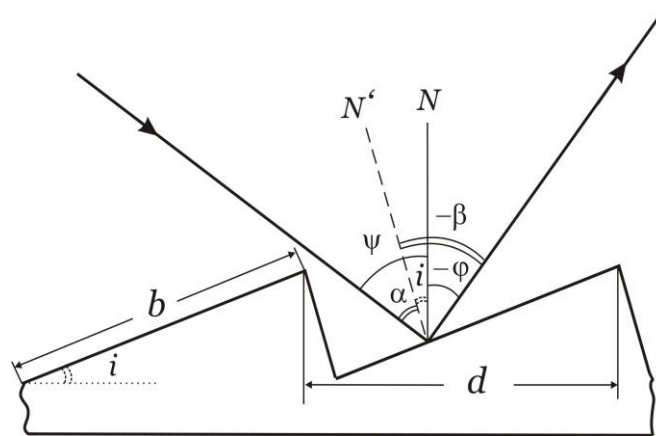


Рис. 1

Введем правило знаков для углов: угол считается положительным, если он отсчитывается от нормали против часовой стрелки и отрицательным, когда отсчет угла производится по часовой стрелке. В соответствии с этим углы β и φ отрицательны (на рисунке указаны знаки этих углов). Кроме того, все порядки спектров (m) и дифракционных минимумов (k) положительны, если они расположены от нулевого порядка против хода часовой стрелки.

Дифракционная картина, получаемая от решетки, является результатом дифракции света на отдельных зеркальных элементах и последующей многолучевой интерференции возникших волн.

Для получения максимальной концентрации света в нужном дифракционном порядке следует таким образом перераспределить световую энергию, чтобы: 1) центральный дифракционный максимум, даваемый отдельным зеркальным элементом, представляющий по существу регулярное отражение от зеркального элемента при $\alpha = -\beta$, совпадал бы с направлением на главный дифракционный максимум порядка $m \neq 0$; 2) спектр нулевого порядка решетки при этом попал бы в направлении минимума от отдельного зеркального элемента. Рис.2 схематически иллюстрирует принцип перераспределения энергии в спектре: пунктирная линия показывает распределение интенсивности при дифракции на одном элементе. При условиях, которые мы получим

ниже, максимум огибающей можно сдвинуть и совместить его с заданным порядком m (на рисунке $m = 2$).

Такое перераспределение световой энергии может быть обеспечено соответствующим выбором угла наклона грани зеркального элемента i , т.е. «угла блеска».

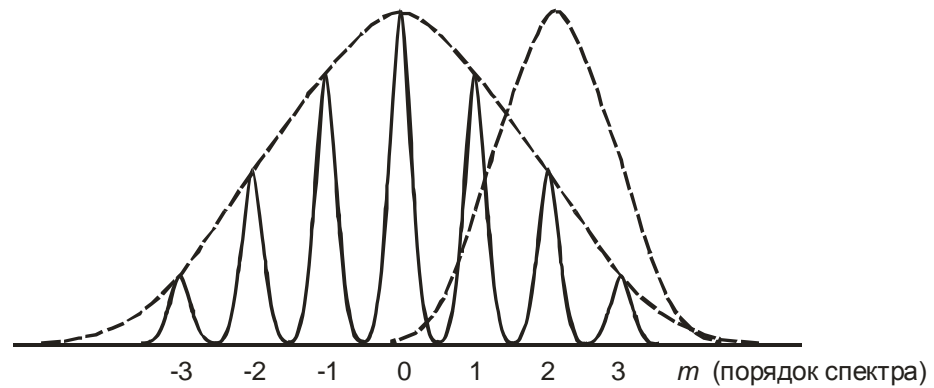


Рис.2

Как вычислить угол i , если заданы угол падения ψ , порядок спектра m и длина волны λ , чтобы выполнилось первое требование?

Рассмотрим один зеркальный элемент. Вторичные волны от его двух *произвольных* участков A' и C' (рис. 3) дают нулевой максимум интерференции в направлении $\alpha = -\beta$. Действительно, в этом случае разность хода между лучами, отраженными от участков A' и C' , равна: $\Delta' = C'D' - A'B' = 0$ (т.к. $C'D' = A'B'$).

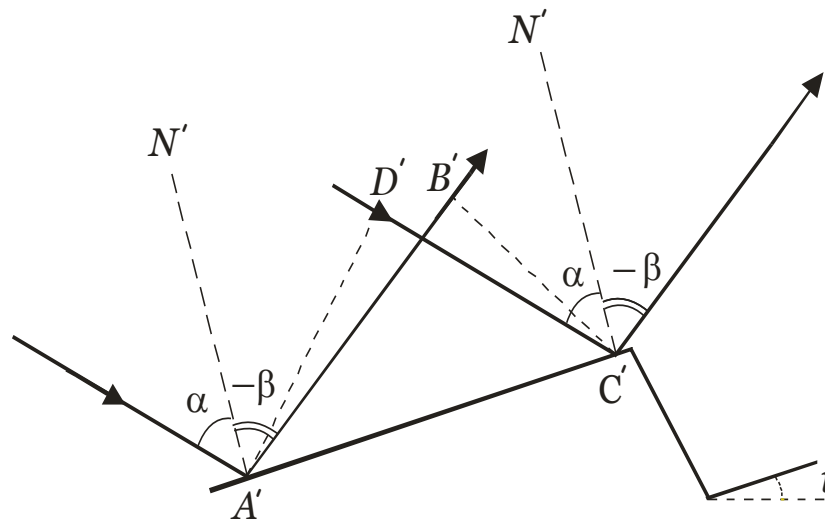


Рис.3

Поскольку грань штриха наклонена на угол i , то с нормалью к грани N' угол падения составляет (рис.1):

$$\alpha = \psi - i, \quad (1)$$

а угол дифракции равен:

$$-\beta = -\varphi + i. \quad (2)$$

Так как $\alpha = -\beta$, то:

$$\varphi = 2i - \psi \quad (3)$$

Направления на главные максимумы дифракционной решетки определяются условием

$$d (\sin\varphi + \sin\psi) = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), получим:

$$2 \cos(\psi - i) \sin i = \frac{m\lambda}{d}$$

Это условие позволяет вычислить угол i , при котором будет выполнено первое требование.

Рассмотрим условия выполнения второго требования.

Направления на минимум при дифракции от одного зеркального элемента имеет вид:

$$b (\sin\alpha + \sin\beta) = k\lambda \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

Из условия наблюдения главных максимумов дифракции (4) следует, что нулевой порядок спектра наблюдается в направлении:

$$\varphi = -\psi. \quad (6)$$

Подставляя (1) и (2) в (5), и учитывая (6), получим (например, для $k = -1$):

$$2 \cos\psi \sin i = \frac{\lambda}{b} \quad (7)$$

Это соотношение позволяет при известном наклоне зеркального элемента i вычислить его ширину b .

В соответствии с вычисленными значениями для i и b может быть заточен алмазный резец и установлен при нарезке решетки, чтобы канавка решетки имела определенный профиль.

Приборы и принадлежности: отражательная дифракционная решетка, гониометр (прибор для точных измерений углов), газоразрядная ртутная лампа с источником питания.

Экспериментальная установка.

Дифракционная решетка, применяемая в данной работе, представляет собой реплику (отпечаток) с оригинальной гравированной решетки. Ее параметры указаны на оправе решетки.

Решетка устанавливается на гониометре ГС-5. Схема и фотография гониометра ГС-5 приведены на рис. 4 и 5. Прибор состоит из следующих основных узлов (рис. 4 и 5): зрительной трубы (1), служащей для наблюдения преломленных или отраженных лучей, коллиматора 2 для создания параллельного пучка лучей, столика 3 для установки

исследуемого объекта и отсчетного устройства для измерения углов поворота зрительной трубы (в него входят лимб 10, оптический микроскоп 4 и оптический микрометр).

Зрительная труба гониометра представляет собой телескопическую систему с длиннофокусным объективом и короткофокусным окуляром. Окуляр снабжен вертикальной нитью, с помощью которой можно фиксировать интересующую нас

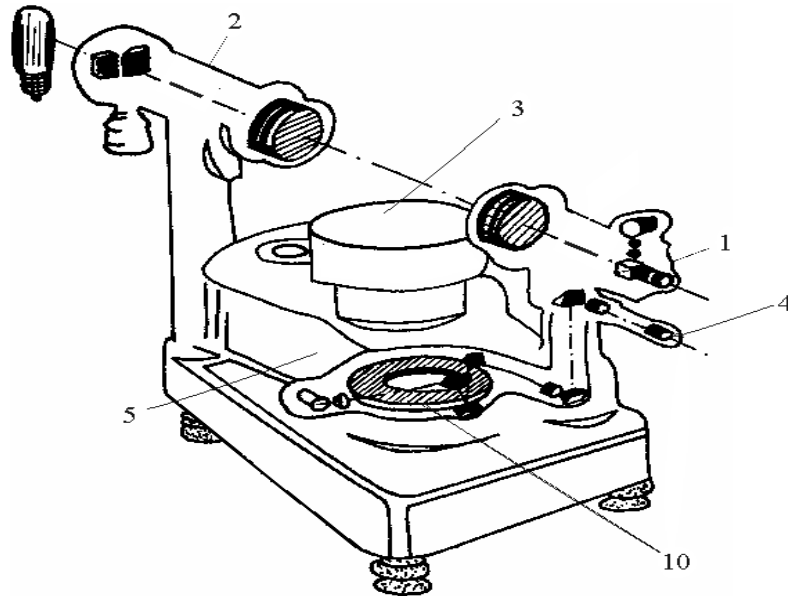


Рис. 4

спектральную линию. Для спектральных исследований на столик гониометра 3 ставится дифракционная решетка, которую нужно осветить параллельным пучком лучей. Для создания такого пучка служит коллиматор 2. Он представляет собой трубу, которая неподвижно крепится к основанию. На одном конце коллиматора находится объектив, а на другом – узкая щель, помещенная в фокальной плоскости объектива. Щель освещается ртутной лампой, которая даёт линейчатый спектр (спектр ртути прилагается к прибору). Параллельные пучки лучей, выходящие из объектива коллиматора, преломляются объективом зрительной трубы и дают в его фокальной плоскости изображение щели. Если зрительная труба сфокусирована на бесконечность, в нее будет видно резкое изображение щели.

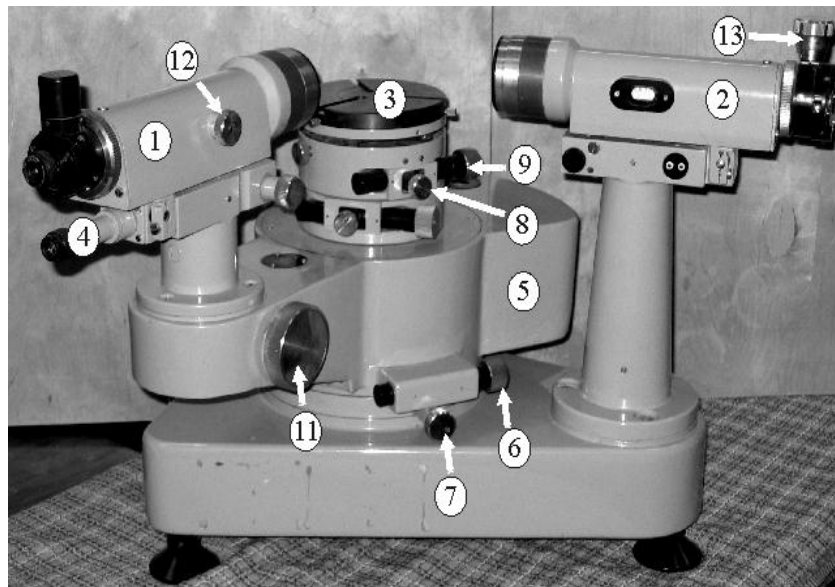


Рис. 5

Зрительная труба 1 и микроскоп 4, крепятся к подвижному основанию 5. Если винт 7 отпустить, то основание можно легко повернуть рукой на большой угол. При закрученном винте 7 основание 5 можно точно повернуть на небольшой угол вращением микрометрического винта 6. При юстировке гониометра зрительная труба поворачивается относительно неподвижного столика 3. Столик закрепляется винтом 8. Точное вращение столика осуществляется микрометрическим винтом 9 при зажатом винте 8.

Для измерения угла поворота зрительной трубы используется отсчетное устройство, состоящее из лимба 10, оптического микрометра и микроскопа 4. Поле зрения отсчетного микроскопа представлено на рис. 6.

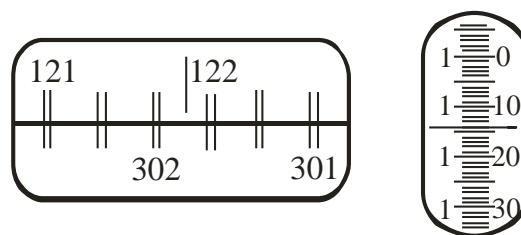


Рис. 6

При включенной подсветке гониометра в левом окне видны изображения диаметрально противоположенных участков лимба и вертикальный индекс. Цена деления лимба $20'$. Лимб 10 жестко связан с неподвижным основанием. Поэтому при повороте зрительной трубы отсчеты по лимбу меняются.

В правом окне видно изображение шкалы оптического микрометра. Перемещение шкалы на 600 делений смещает верхнее изображение штрихов лимба относительно нижнего на $10'$. Поэтому цена деления шкалы равна $10'/600 = 1''$.

Чтобы снять отсчет по лимбу, необходимо повернуть маховичок 11 оптического

микрометра настолько, чтобы верхние и нижние изображения штрихов лимба в левом окне точно совместились (как показано на рис.6).

Число градусов будет равно *ближайшей левой* от вертикального индекса цифре (в показанном примере это 121°).

Число десятков минут равно *числу интервалов*, заключенных между верхним оцифрованным двойным штрихом, который соответствует отсчитанному числу градусов, и нижним двойным штрихом, отличающимся от верхнего на 180° . В показанном примере между 121° и 301° располагается пять интервалов, следовательно, число десятков минут равно 5.

Число единиц минут отсчитывается по вертикальной шкале в правом окне по левому ряду чисел (в примере оно равно 1), а число десятков секунд – по той же шкале по правому ряду чисел (равно 1).

Число единиц секунд равно числу делений между штрихами, соответствующими отсчету десятков секунд и неподвижным горизонтальным индексом. Таким образом, положение, показанное на рис.6, соответствует отсчету $121^\circ 51' 14''$.

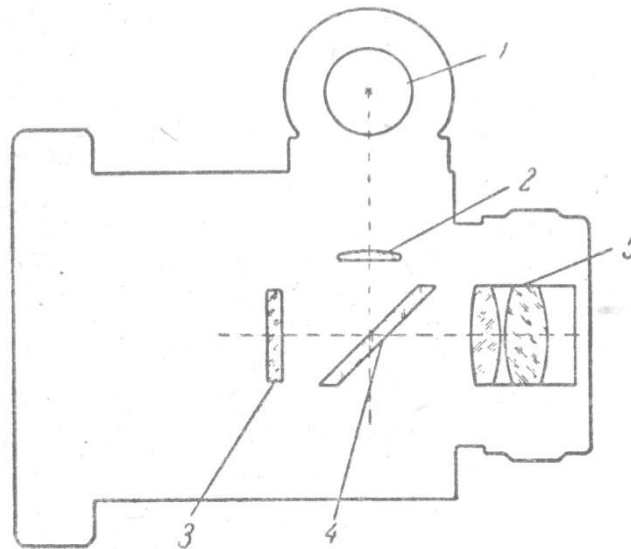


Рис. 7

Зрительная труба снабжена автоколлимационным окуляром Гаусса (рис.7).

Свет от лампочки 1, пройдя матовую пластинку 2, отражается от плоскопараллельной пластинки 4, проходит через пластинку 3 с нанесенным на ней крестом, находящуюся вблизи фокальной плоскости окуляра 5 и, пройдя объектив зрительной трубы, попадает на плоскую зеркальную поверхность объекта, установленного на столике гониометра.

Труба установлена на бесконечность, если в поле зрения окуляра видно резкое изображение креста. Действительно, в этом случае плоскость креста и его изображения

совпадают, а это может быть только тогда, когда обе эти плоскости совпадают с фокальной плоскостью объектива трубы. При этом отражающая поверхность объекта должна быть строго перпендикулярна к оптической оси трубы.

Задание 1. Подготовка гониометра к измерениям.

1. *Юстировка зрительной трубы.* Зрительная труба гониометра фокусируется на бесконечность. Для этого нужно, поворачивая зрительную трубу, навести ее на какой-либо значительно удаленный объект (например, на здание за окном) и, вращением винта 12 добиться его четкого изображения.
2. *Фокусировка коллиматора.* Включить ртутную лампу, помещенную перед щелью коллиматора. Осветив щель коллиматора, наблюдать ее изображение в зрительную трубу. Вращая винт коллиматора (он на рисунках не показан, но его расположение аналогично винту 12 на зрительной трубе) добиться максимальной резкости изображения щели.
3. *Выбор ширины щели.* Вращением винта 13 следует подобрать ширину щели коллиматора такой, чтобы линии в спектре были по возможности, более узкими, но достаточной яркости. При постоянном сужении щели, линии сначала сужаются, не меняя яркости, а, начиная с некоторого предела, ширина линии перестает уменьшаться, зато яркость быстро падает. На этом пределе (так называемая “нормальная ширина щели”) и следует остановиться.

Установив гониометр, следует показать качество его юстировки преподавателю или лаборанту и только после этого приступить к измерениям.

Задание 2. Определение длин волн излучения в спектре газоразрядной ртутной лампы с помощью отражательной дифракционной решетки

1. Поместите дифракционную решетку на столик 3 гониометра. Отпустите винт 7 и поверните зрительную трубу так, чтобы оптические оси коллиматора и зрительной трубы составляли угол близкий к 90° . Закрепите винт 7.
2. Определите направление нормали к плоскости решетки. Для этого:
 - а) отпустите винт 8 и, осторожно поворачивая столик 3, расположите решетку так, чтобы ее плоскость была приблизительно перпендикулярна оптической оси зрительной трубы.
 - б) Слегка поворачивая столик с решеткой около этого положения, получите в поле зрения зрительной трубы изображение светлого креста.
 - в) Закрепите положение решетки зажимным винтом 8 и сфокусируйте изображение креста

при помощи винта 12.

- г) Вращая микрометрический винт 9, точно совместите изображение светлого креста с перекрестием окуляра и произведите отсчет угла γ_N по лимбу. Этот отсчет дает направление нормали к плоскости решетки.
3. Отпустите винт 8 и, поворачивая столик с дифракционной решеткой, найдите в поле зрения зрительной трубы изображение нулевого максимума. Положение нулевого максимума определяется равенством $\psi = \varphi$ (рис.1) и представляет собой изображение щели.
 4. Закрепите винт 8 и сфокусируйте изображение нулевого максимума при помощи винта 12.
 5. Вращая микрометрический винт 9, точно совместите изображение нулевого максимума с перекрестием окуляра. Снимите γ_0 - угловое положение нулевого максимума.
 6. Отпустите винт 7. Осторожно поворачивая зрительную трубу в сторону уменьшения угла между оптическими осями зрительной трубы и коллиматора, найдите первую спектральную линию в первом порядке.
 7. Это изображение сфокусируйте при помощи винта 12 (вследствие хроматической аберрации линия может быть не резкой).
 8. Закрепите винт 7 и, вращая микрометрический винт 6, точно совместите изображение первой спектральной линии в первом порядке с перекрестием окуляра. Произведите отсчет γ_1 .
 9. Повторите пункты 6 – 8 для всех линий в спектре первого порядка и снимите отсчеты $\gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n$.
 10. Вычислите:

$$|\psi| = |\gamma_N - \gamma_0|,$$

$$|\varphi_i| = |\gamma_N - \gamma_i|,$$

11. Зная число штрихов на одном миллиметре решетки и учитывая правило знаков, найдите по формуле (4) длины волн спектральных линий, для которых проведены измерения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дифракция света, принцип Гюйгенса – Френеля.
2. Классификация дифракционных явлений (дифракция Френеля и Фраунгофера).
3. Дифракция Фраунгофера на одной щели.
4. Дифракция Фраунгофера на N щелях. Дифракционная решетка. Амплитудные и фазовые дифракционные решетки.
5. Дифракционная решетка как спектральный прибор. Вывести выражения для угловой дисперсии, линейной дисперсии и разрешающей способности дифракционной решетки.

6. Начертите оптическую схему установки и объясните назначение ее элементов.
7. Обсудите полученные экспериментальные результаты.