

Содержание

1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
2.1. Дифракция света.....	4
2.2. Дифракционная решетка.....	5
2.3 Оптические характеристики дифракционной решётки	10
3. Требования по технике безопасности	12
4. Экспериментальная часть.....	12
4.1. Приборы и принадлежности.....	12
4.2. Описание установки.....	13
4.3. Выполнение работы	16
4.4. Дополнение. Устройство нониуса	18
5. Контрольные вопросы	19
Список литературы.....	20

Лабораторная работа № 65

Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

1. Цель работы

1.1. Ознакомиться с явлением дифракции света, теорией и устройством амплитудной пропускающей дифракционной решетки.

1.2. Ознакомиться с методикой получения спектров с помощью дифракционной решетки.

1.3. Экспериментально определить длины волн в спектре испускания паров натрия.

2. Теоретическая часть

2.1. Дифракция света

Под дифракцией света понимают всякое отклонение от прямолинейного распространения света, если оно не может быть истолковано как результат отражения, преломления или изгибания световых лучей в средах с непрерывно меняющимся показателем преломления. В частности, дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Объяснение дифракции света основано на принципе Гюйгенса-Френеля, согласно которому каждая точка фронта световой волны является источником вторичных когерентных сферических волн. Результат сложения этих волн и даёт наблюдаемую дифракционную картину. В этом смысле нет принципиального различия между интерференционной и дифракционной картинами. В силу исторических причин распределение интенсивности, появляющееся вследствие сложения вкладов от конечного числа отдельных дискретно расположенных когерентных точечных источников, обычно называется интерференционной картиной. Распределение интенсивности, вызванное сложением вкладов от расположенных «непрерывно» друг за другом когерентных источников, называют дифракционной картиной.

В зависимости от формы фронта световой волны различают дифракцию Френеля и дифракцию Фраунгофера. Дифракция Френеля

наблюдается в непараллельных лучах света (в частности фронт световой волны может иметь сферическую форму). Дифракция Фраунгофера наблюдается в параллельных лучах, когда фронт волны плоский. В данной работе рассматривается дифракция плоских волн, т.е. дифракция Фраунгофера. Дифракционные явления Фраунгофера имеют в оптике значительно большее практическое значение, чем дифракционные явления Френеля.

2.2. Дифракционная решетка

Простейшая одномерная амплитудная дифракционная решетка представляет собой систему из большого числа N одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей, лежащих в одной плоскости и разделенных непрозрачными промежутками одинаковой ширины. При прохождении такой дифракционной решетки меняется только амплитуда световой волны (свет пропускают только прозрачные участки, а непрозрачные участки его полностью задерживают, таким образом, амплитуда прошедшего света меняется скачком от максимального значения до нуля, фаза при этом остаётся неизменной). Оптическая схема действия такой решетки показана на рис. 2.1. Величина $d = a + b$ называется периодом или постоянной дифракционной решетки (b – ширина непрозрачных, a – прозрачных промежутков).

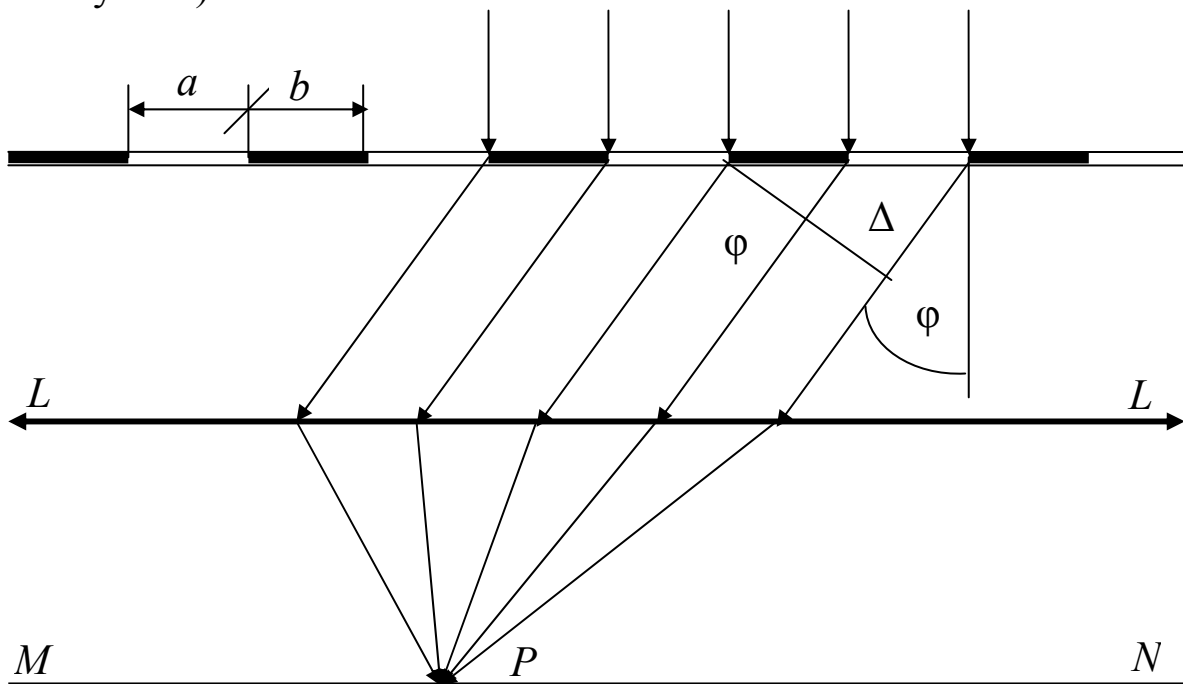


Рис. 2.1

Пусть плоская монохроматическая волна с длиной λ падает нормально на дифракционную решетку. Параллельно плоскости решетки располагаются собирающая линза LL , в фокальной плоскости которой помещается экран MN , на котором ведется наблюдение. Поэтому все щели решетки излучают вторичные волны в одной фазе. Кроме дифракции от отдельных щелей происходит сложение колебаний от каждой из них, т.е. происходит интерференция многих пучков. Если число щелей N , то интерферируют между собой N пучков.

Все дифрагировавшие под углом φ лучи соберутся в фокальной плоскости линзы в точке P . Пусть A_i – вектор амплитуды колебания, создаваемого в точке P i -ой щелью. Разность хода Δ между лучами от соседних щелей равна

$$\Delta = d \sin \varphi. \quad (2.1)$$

Этой разности хода соответствует разность фаз

$$\delta = 2\pi\Delta / \lambda. \quad (2.2)$$

Поскольку свет от каждой из щелей дифрагирован под одним и тем же углом φ (рис. 2.1), то амплитуда колебаний от каждой из щелей будет одинакова, т.е.

$$|A_1| = |A_2| \dots = |A_n| = |A|. \quad (2.3)$$

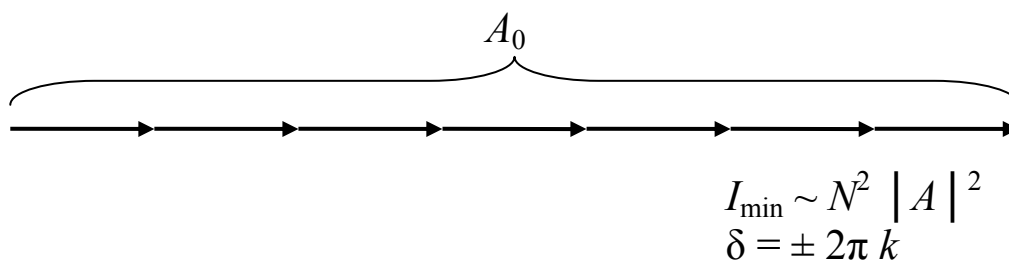
Результат сложения колебаний от всех щелей изобразится вектором A_0 , которой является замыкающей ломаной линии, образованной векторами амплитуд A_i . Вектор A_0 максимальный в тех случаях, когда все векторы A_i направлены в одну сторону. Это возможно в тех случаях, когда

$$\delta = \pm 2\pi k, \quad \text{где } k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.4)$$

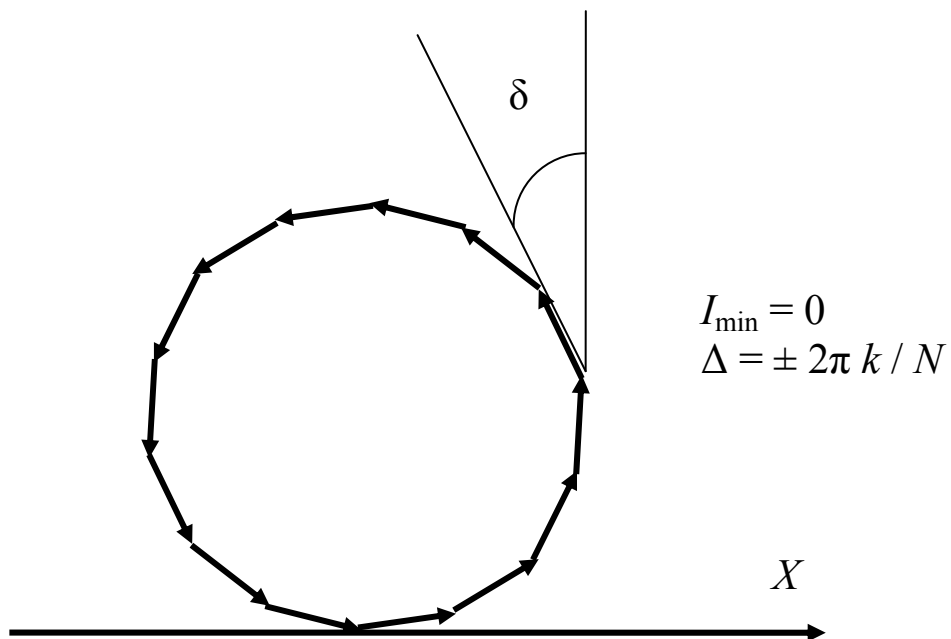
Этот случай показан на рис. 2.2, а. Из рис. видно, что если учесть условие (2.3), то можно записать

$$A_0 = N A. \quad (2.5)$$

a)



б)



в)

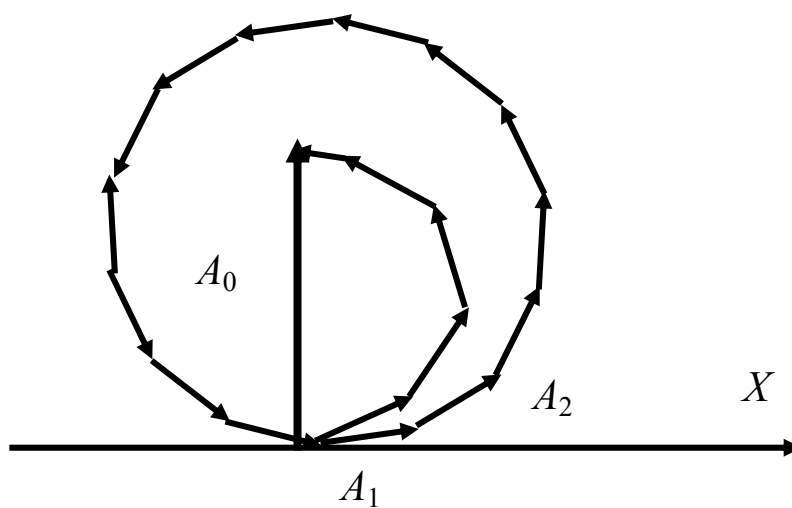


Рис. 2.2

Помня, что интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, получаем

$$I_{\max} \sim |A_0|^2 = N^2 |A|^2. \quad (2.6)$$

Вектор A_0 становится равным нулю, когда последний из векторов A_n располагается в том же направлении, что и первый A_1 . Так как соседние векторы A_i образуют между собой один и тот же угол δ , а всего векторов N , из этого условия можно получить

$$N\delta = \pm 2\pi k, \quad (2.7)$$

откуда

$$\delta = \pm 2\pi k / N. \quad (2.8)$$

Этот случай показан на рис. 2.2, б. Ясно, что в этом случае интенсивность света равна нулю, т.е. $I_{\min} = 0$. При $k = 0, N, 2N, 3N, \dots$ условие минимума (2.8) переходит в условие максимума (2.4). Из этого следует, что минимумы $I_{\min} = 0$ располагаются в $(N-1)$ раз чаще чем, максимумы $I_{\max} \sim N^2 |A|^2$. Между каждыми двумя соседними минимумами должно быть по одному вторичному максимуму. Эти максимумы возникают, когда ломаная линия, образованная векторами A_n , частично налагаясь сама на себя, не замыкается, т.е. последний из векторов A_i примыкает к первому A_1 . Один из таких возможных случаев показан на рис. 2.2, в. Из сравнения рис. 2.2, а и 2.2, в видно, что интенсивность вторичных максимумов значительно меньше главных максимумов, определяемых условием (2.4).

Итак, при интерференции N пучков одинаковой амплитуды возникает ряд одинаковых по интенсивности главных максимумов с $I_{\max} \sim N^2 |A|^2$. Между соседними главными максимумами располагается $(N-1)$ минимумов с $I_{\min} = 0$. Кроме того, между соседними минимумами располагается вторичный максимум, интенсивность которого значительно меньше. Всего таких вторичных максимумов $(N-2)$. Положение таких максимумов, согласно (2.1), (2.2) и (2.4) определяется из условия

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad (2.9)$$

положение минимумов

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda / N, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots,$$

кроме

$$k = N, 2N, \dots \quad (2.10)$$

В приведенных выше рассуждениях не учтено, что амплитуды A_i зависят от угла дифракции φ . Поэтому из-за того, что лучи, дифрагировавшие от каждой из щелей под разными углами, дают колебания различной амплитуды, величина главных максимумов будет различной. Это иллюстрирует рис. 2.3, на котором показано распределение интенсивности без учета зависимости амплитуды A_i от угла φ (рис. 2.3, а), зависимость интенсивности от угла при дифракции на одной щели (рис. 2.3, б) и реальное распределение интенсивности при дифракции (рис. 2.3, в). График (рис. 2.3, в) является результатом перемножения функций (рис. 2.6, а и рис. 2.3, б). Следует, однако, учесть, что на рис. 2.3, б интенсивность увеличена в N^2 раз, поскольку в случае дифракции на N щелях интенсивность в N^2 раз больше, чем в случае дифракции на одной щели (см. формулу (2.6)).

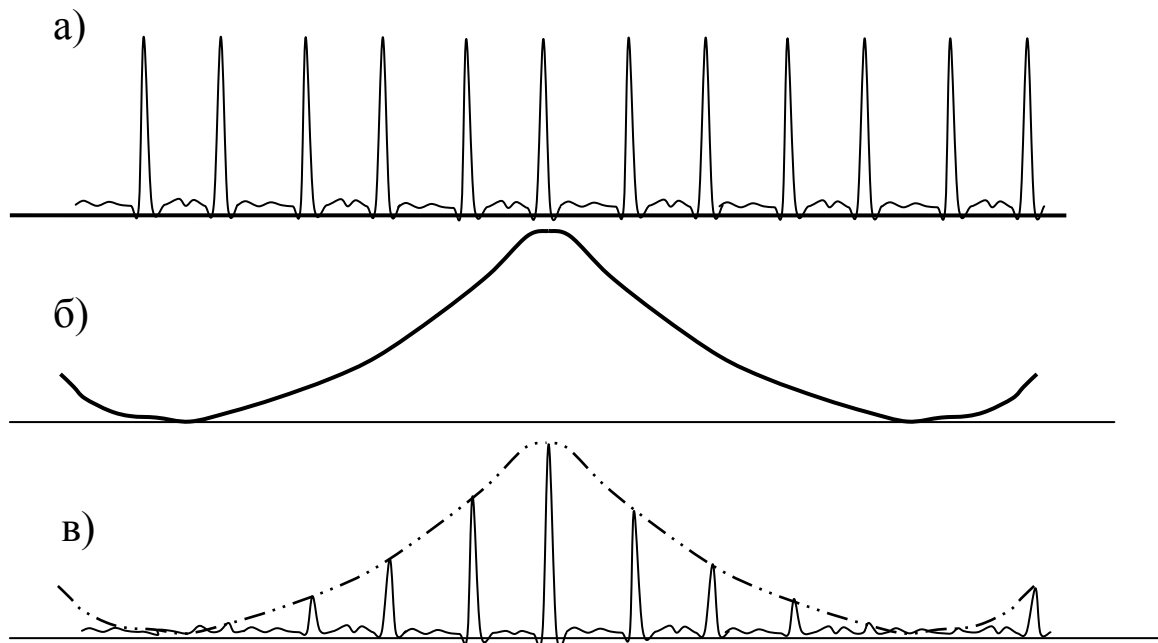


Рис. 2.3

2.3 Оптические характеристики дифракционной решётки

Дифракционные решетки используются, в основном, для анализа спектрального состава излучения. Качество получаемого с помощью решетки спектра зависит, в конечном счете, от постоянной дифракционной решетки d и общего числа штрихов N , т.е. размеров самой решетки. Вместо постоянной дифракционной решетки d удобнее пользоваться обратной величиной, выражающей число штрихов на единицу длины решетки (для видимой области спектра обычно на 1 мм). Лучшие нарезные решетки, т.е. решетки, изготовленные методом механического нанесения штрихов на подложку, для видимой области спектра содержат до 1200 и более штрихов на 1 мм ($d \approx 0,8$ мкм). Общее число щелей у таких решеток достигает $2 \cdot 10^5$ и более (размер решетки 150×150 мм). В настоящее время используются решетки, изготовленные голографическим методом. Число штрихов в таких решетках достигает 6000 на 1 мм ($d \approx 0,16$ мкм).

Оптические свойства решетки характеризуются угловой и линейной дисперсией решетки и ее разрешающей силой.

Угловая дисперсия определяет угловое расстояние между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны на единицу

$$D = d\varphi / d\lambda, \quad (2.11)$$

где $d\varphi$ – угловое расстояние между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $d\lambda$. Из условия главного максимума (2.9) можно дифференцируя, получить

$$d \cos \varphi d\varphi = k d\lambda,$$

откуда

$$D = d\varphi / d\lambda = k / d \cos \varphi, \quad (2.12)$$

где k – порядок спектра, d – период решетки, φ – угол дифракции.

Линейная дисперсия $D_{\text{лин}}$ определяет линейное расстояние на экране между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны на единицу

$$D_{\text{лин}} = dl / d\lambda = FD, \quad (2.13)$$

где F – фокусное расстояние линзы, используемой для проектирования дифракционной картины на экран. Смысл всех величин, входящих в выражения (2.12) и (2.13), ясен из рис. 2.4.

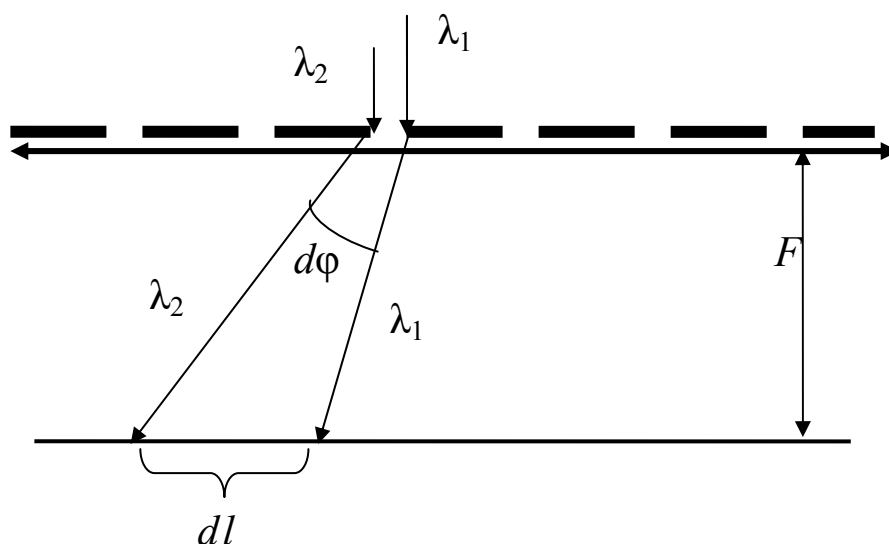


Рис. 2.4

Разрешающая сила R определяет способность дифракционной решетки разделять (разрешать) спектральные линии, мало отличающиеся по длине. За меру разрешающей способности принимают величину

$$R = \lambda / d\lambda, \quad (2.14)$$

где λ – длина волны, около которой производится измерения, $d\lambda$ – меньшая разница в длинах волн двух еще разрешаемых спектральных линий. Величина $d\lambda$ обычно определяется условием Рэля – две близкие спектральные линии считаются разрешенными, если главный максимум одной из них совпадает с первым вторичным максимумом другой (рис. 2.5). В этом случае разрешающая способность решетки будет

$$R = k \cdot N, \quad (2.15)$$

где k – порядок спектра, N – общее число щелей в решетке.

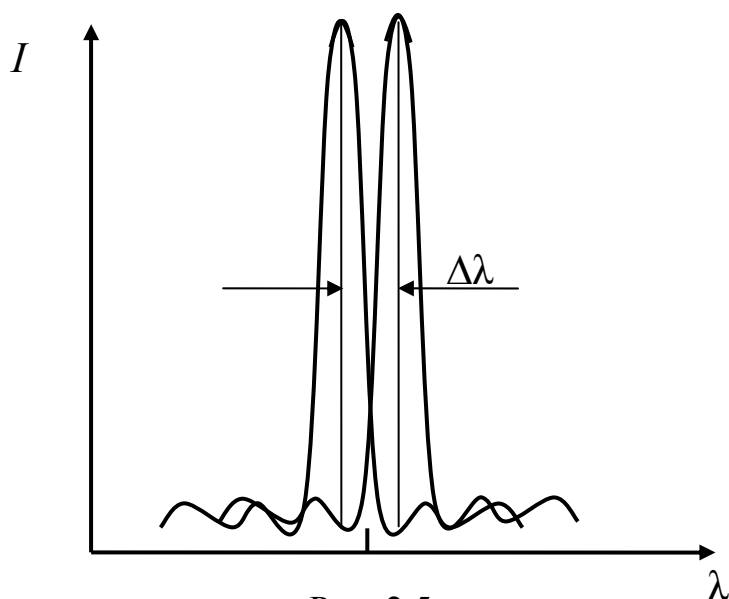


Рис. 2.5

3. Требования по технике безопасности

Питание экспериментальной установки осуществляется от бытовой сети 220 В, к которой установка подсоединяется обычной двухполюсной вилкой. Все токоведущие части установки закрыты, что исключает случайное прикосновение к ним.

При выполнении работы необходимо:

- 1) внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
- 2) проверить изоляцию токоведущих проводов, о замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю;
- 3) не загромождать рабочее место посторонними предметами;
- 4) не оставлять без присмотра работающую лабораторную установку;
- 5) по окончании работы выключить установку, отсоединить шнур питания от сети и привести в порядок своё рабочее место.

4. Экспериментальная часть

4.1. Приборы и принадлежности

В работе используется следующее оборудование:

- 1) дифракционная решетка;
- 2) гониометр;
- 3) натриевая лампа;
- 4) блок питания.

4.2. Описание установки

Схема экспериментальной установки и её внешний вид показаны на рис. 4.1 и 4.2.

Она состоит из основания, на котором жёстко закреплена круговая шкала (проградуирована в градусах) и коллиматорная труба 3 с регулируемой щелью 2 (винт сбоку щели позволяет изменять её ширину). Источник линейчатого спектра 1 (натриевая лампа) устанавливается напротив щели 2 так, чтобы щель была равномерно освещена (блок питания лампы на рис. 4.2 не показан). На основании также подвижно закреплена зрительная труба 8, в которую вставлен окуляр 10 со шкалой (добиться резкого изображения шкалы можно перемещая его в оправе). Зрительная труба жёстко скреплена с измерительной шкалой с нониусом 7 и поворачивается вместе с ней. Подвижные линзы 6 позволяют измерять углы с точностью до $1'$. Поворачивая трубку окуляра, можно наблюдать линии в спектре при различных углах дифракции. Совмещая наблюдаемую линию в спектре с вертикальной линией шкалы и производя затем отсчёт по измерительной шкале с нониусом, можно измерить значение угла с точностью до $1'$ (нониус и работа с ним описаны в приложении).

Дифракционная решётка в оправе 5 устанавливается на предметный столик гониометра 4 перпендикулярно оси коллиматорной трубы 3.

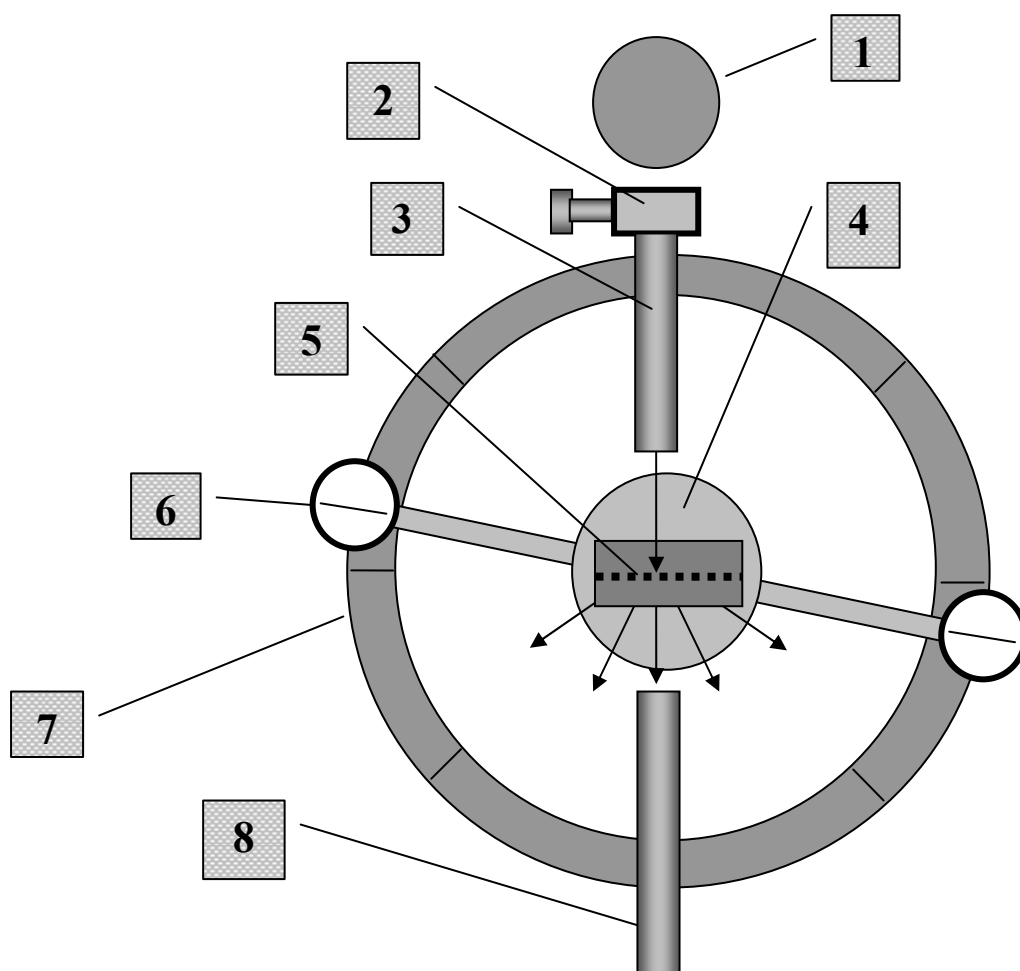


Рис. 4.1

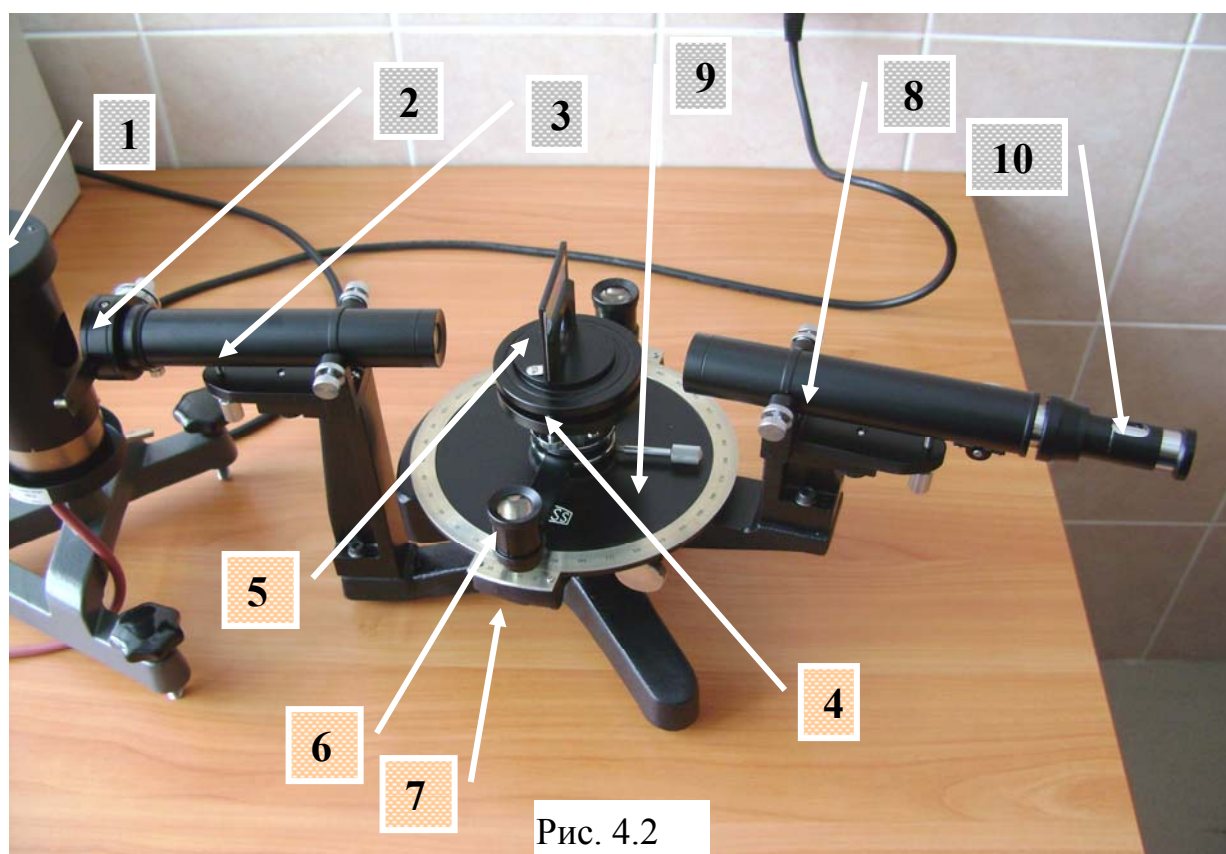


Рис. 4.2

Внимание! Гониометр является точным измерительным прибором, требующим очень аккуратного обращения. Категорически запрещается ударять по гониометру и прилагать значительные усилия при вращении ручек!

Оптическая схема опыта показана на рис. 4.4.

Щель S_p , находящаяся в фокальной плоскости коллиматорной трубы, освещается натриевой лампой. Параллельный пучок лучей, выйдя из коллиматора, падает нормально на дифракционную решетку и разлагается ею в спектр нескольких порядков. Изображение щели, получаемое в фокальной плоскости объектива зрительной трубы, рассматривается в окуляре, в фокальной плоскости которого находятся вертикальная и горизонтальная визирные линии, служащие для проведения измерений. Таким образом, в окуляре получается четкое изображение спектра (рис. 4.3).

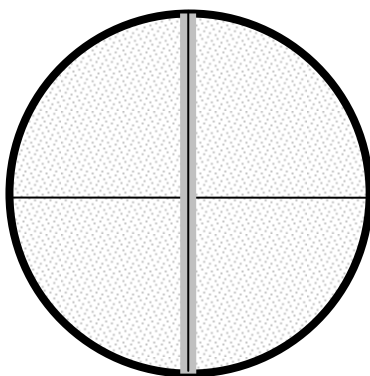


Рис. 4.3

Отсчет угла производится при совмещении изображения средней вертикальной визирной линии с центром исследуемой линии спектра (рис. 4.3).

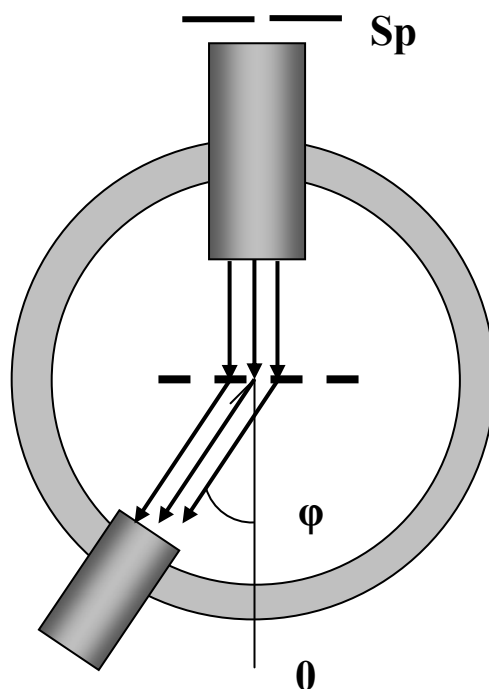


Рис. 4.4

4.3. Выполнение работы

1. Установить коллиматор 3 (рис. 4.1) и зрительную трубу 8 вдоль одной оси.

2. Включить натриевую лампу 1 и дать ей прогреться в течение $2\div 3$ минут.

3. Вращением против часовой стрелки винта щели установить ширину щели такой, чтобы она пропускала достаточно света, и её было бы хорошо видно в зрительную трубу.

4. Установить натриевую лампу напротив щели 2 в положение наибольшей освещённости. Освещённость щели контролировать, наблюдая её в зрительную трубу.

5. Вращением по часовой стрелке регулировочного винта щели установить её ширину возможно меньшей, но такой, чтобы её яркость была достаточной для наблюдения.

6. Вращением фокусировочного винта на зрительной трубе 8, добиться резкого изображения щели, при этом оси коллиматора и зрительной трубы должны совпадать. Добиться также резкого изображения шкалы в окуляре 10.

7. Установить на предметный столик 4 дифракционную решетку 5 так, чтобы её плоскость была перпендикулярна оси коллиматора (закрепить винтом предметный столик гониометра, чтобы исключить его вращение).

8. Установить зрительную трубу так, чтобы центральный нулевой максимум был резко виден (при необходимости сфокусировать).

9. Совместить вертикальную визирную линию в окуляре с изображением нулевого максимума. Для плавного совмещения визирной линии с линией спектра нужно зажать винт, предотвращающий вращение зрительной трубы (горизонтальный внизу справа) и, плавно вращая винт поворота зрительной трубы (горизонтальный винт внизу слева) и наблюдая в зрительную трубу, совместить вертикальную визирную линию с наблюдаемой линией спектра. При необходимости подрегулировать по уровню предметный столик с решёткой (три вертикальных винта под столиком) и направление зрительной трубы по горизонтали (вертикальный винт непосредственно под ней) так, чтобы спектральные линии были расположены по всей высоте зрительного поля.

10. Снять показания по левому и правому отсчётным устройствам с нониусом, используя подвижные линзы (показания должны отличаться на 180°) (рис. 4.5).

11. Найти угловое положение нулевого максимума $\varphi_0 = \frac{\varphi_{\text{л}} - \varphi_{\text{п}}}{2}$,

где $\varphi_{\text{л}}$ и $\varphi_{\text{п}}$ – отсчёты по левому и правому отсчётным устройствам.

12. Поворачивая зрительную трубу влево, а затем вправо от нулевого максимума, наблюдать синюю, голубую, зелёную, красную линии спектра излучения натриевой лампы в первом порядке ($k = 1$). Повторяя измерения пп. 9-10, найти угловое положение каждой из них. Данные занести в таблицу.

13. Определить углы дифракции $\varphi = \frac{\varphi_{\text{л}} - \varphi_{\text{п}}}{2}$ для каждой из них.

14. Выключить натриевую лампу.

15. По формуле $\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$ вычислить длины волн линий спектра натрия (используемая в этой работе решётка имеет 600 штрихов на мм). Результаты вычислений занести в таблицу.

16. Определить абсолютную и относительную погрешности проведённых измерений.

порядок спектра	линия	$\varphi_{\text{л}}$	$\varphi_{\text{п}}$	угол дифракции φ , град	длина волны λ , нм
$k = 1$	синяя				
$k = 1$	голубая				
$k = 1$	зелёная				
$k = 1$	красная				

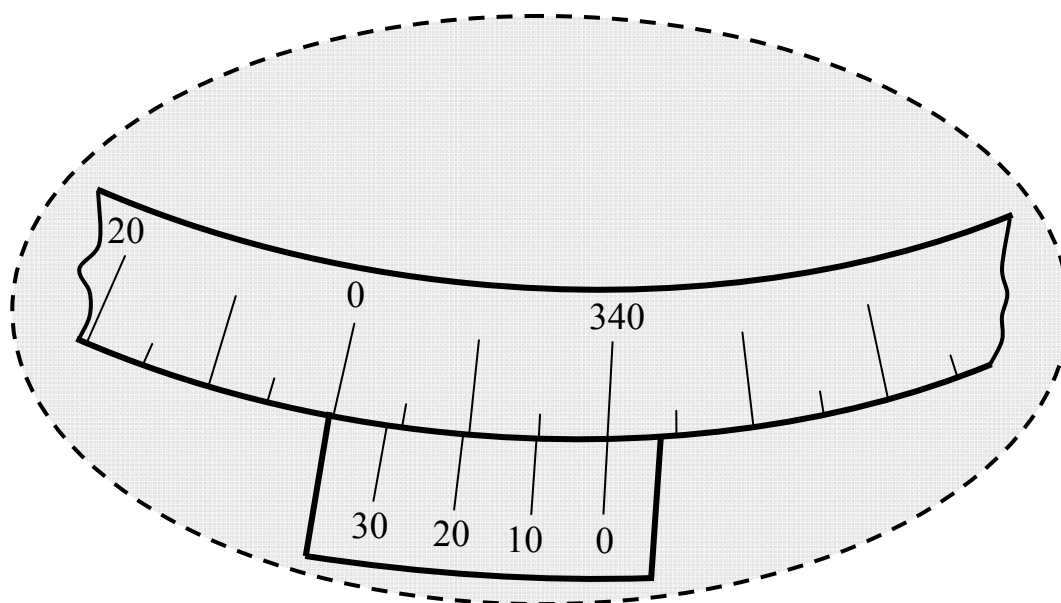


Рис. 4.5

4.4. Дополнение. Устройство нониуса

Нониус – вспомогательная шкала, при помощи которой отсчитывают доли делений основной шкалы измерительного прибора. Прототип современного нониуса предложен французским математиком П. Вернье, поэтому нониус часто называют **верньером**. Нониус получил название по имени португальца П. Нуниша (P. Nunes, латинизированное имя Nonius).

Линейный и круговой нониусы показаны на рис. 4.6. Линейный нониус используется в штангенциркуле, угломерный – в гониометре в этой работе (рис. 4.5).

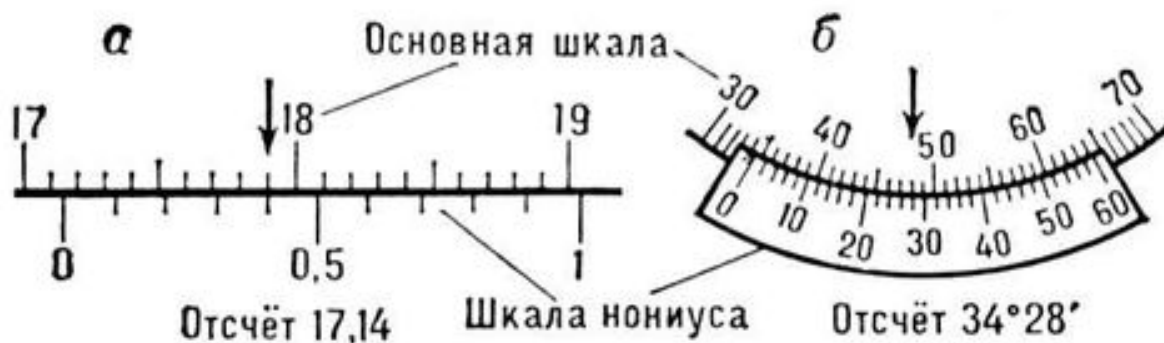


Рис. 4.6

Применение линейного нониуса основано на разнице интервалов деления основной шкалы и длина шкалы нониуса (целое число его делений) точно укладывается в определённом целом числе делений основной шкалы. При совпадении нулевой отметки нониуса с какой-либо отметкой L основной шкалы результат измерения A соответствует величине, определяемой отметкой L ; при несовпадении нулевой отметки нониуса с L значение $A = L + k i$, где k – число делений нониуса от нулевого до совпадающего со штрихом основной шкалы; i – наименьшая доля деления основной шкалы, которую можно оценить с помощью нониуса (обычно $i = 0,1$; $0,05$ или $0,02$ мм). Принцип отсчёта по угломерному нониусу, применяемому в ряде оптико-механических приборов, такой же, как и по линейному нониусу. Применение нониусов пояснено рис. 4.6.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое дифракция света и в чём её отличие от интерференции?
2. Сформулируйте и объясните принцип Гюйгенса – Френеля.
3. В чём сущность метода зон Френеля?
4. Преимущества и недостатки метода зон Френеля.
5. Объясните появление максимумов и минимумов при дифракции на одной щели.
6. Графический метод сложения амплитуд, его суть.
7. Принцип действия амплитудной дифракционной решётки, выведите условие главных максимумов.
8. Как влияют период дифракционной решётки и её размер на дифракционную картину?

9. Угловая и линейная дисперсии дифракционной решётки, от чего они зависят и как влияют на дифракционную картину?
10. Что такое разрешающая сила дифракционной решётки, чем она определяется и как влияет на дифракционную картину?
11. Нарисуйте оптическую схему опыта.

Список литературы

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 2007.
2. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. – М.: Academia, 2007.
3. *Трофимова Т.И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2007.
4. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – М.: Физматлит, 2003.