

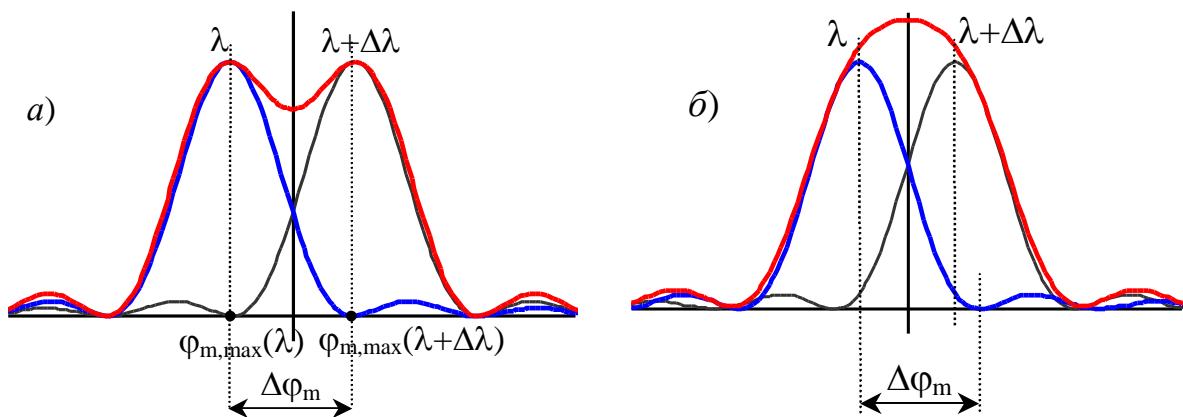


Лабораторный практикум по ФИЗИКЕ

ОПТИКА

Задача № 136

Изучение дифракционной решетки и
определение длины световой волны



МОСКВА 2026

Изучение дифракционной решетки и определение длины световой волны

Цель работы. Измерение основных спектральных характеристик дифракционной решетки.

Идея эксперимента. Излучение от ртутной лампы, имеющей линейчатый спектр, падает на дифракционную решетку. В зрительную трубу гониометра наблюдаются дифракционные максимумы нескольких порядков для различных длин волн. Измерение углов дифракции позволяет рассчитать характеристики дифракционной решетки, а также определить спектр излучения ртутной лампы.

Теория

Дифракционная решётка - это оптический прибор, представляющий собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (канавок, щелей) одинаковой формы, нанесённых на плоскую или вогнутую оптическую поверхность. Дифракционные решетки используют в спектральных приборах для пространственного разложения электромагнитного излучения в спектр, т.е. по длинам волн.

Решетки подразделяют на *плоские* (штрихи нанесены на плоскую поверхность) и *вогнутые* (штрихи на вогнутой, обычно сферической, поверхности). Решетки бывают отражательные и прозрачные. Решетки, у которых штрихи наносятся на зеркальную (обычно металлическую) поверхность, а наблюдение ведётся в отражённом свете, называют *отражательными*. У прозрачных решеток штрихи наносятся на поверхность прозрачной (обычно стеклянной) пластинки (или вырезаются в виде узких щелей в непрозрачном экране), а наблюдение ведётся в проходящем свете. В современных спектральных приборах применяются главным образом отражательные дифракционные решетки.

В настоящей работе изучаются свойства плоской прозрачной дифракционной решетки. В такой решетке прозрачные участки (щели) одной и той же ширины b чередуются с непрозрачными участками, также одинаковыми по ширине. Суммарную ширину прозрачного и непрозрачного участков называют *периодом* (или *постоянной решетки*) и обозначают d ($d > b$).

Пусть плоская монохроматическая световая волна (длина волны λ) падает нормально на плоскую дифракционную решетку, имеющую N штрихов (рис. 1). В соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля каждый участок волнового фронта в плоскости щелей становится источником вторичных когерентных сферических волн, распространяющихся во всех направлениях. Если за дифракционной решеткой поместить собирающую линзу, то в каждой точке фокальной плоскости соберутся лучи, испускаемые вторичными источниками под одним и тем же углом ϕ к нормали, называемым *углом дифракции*.

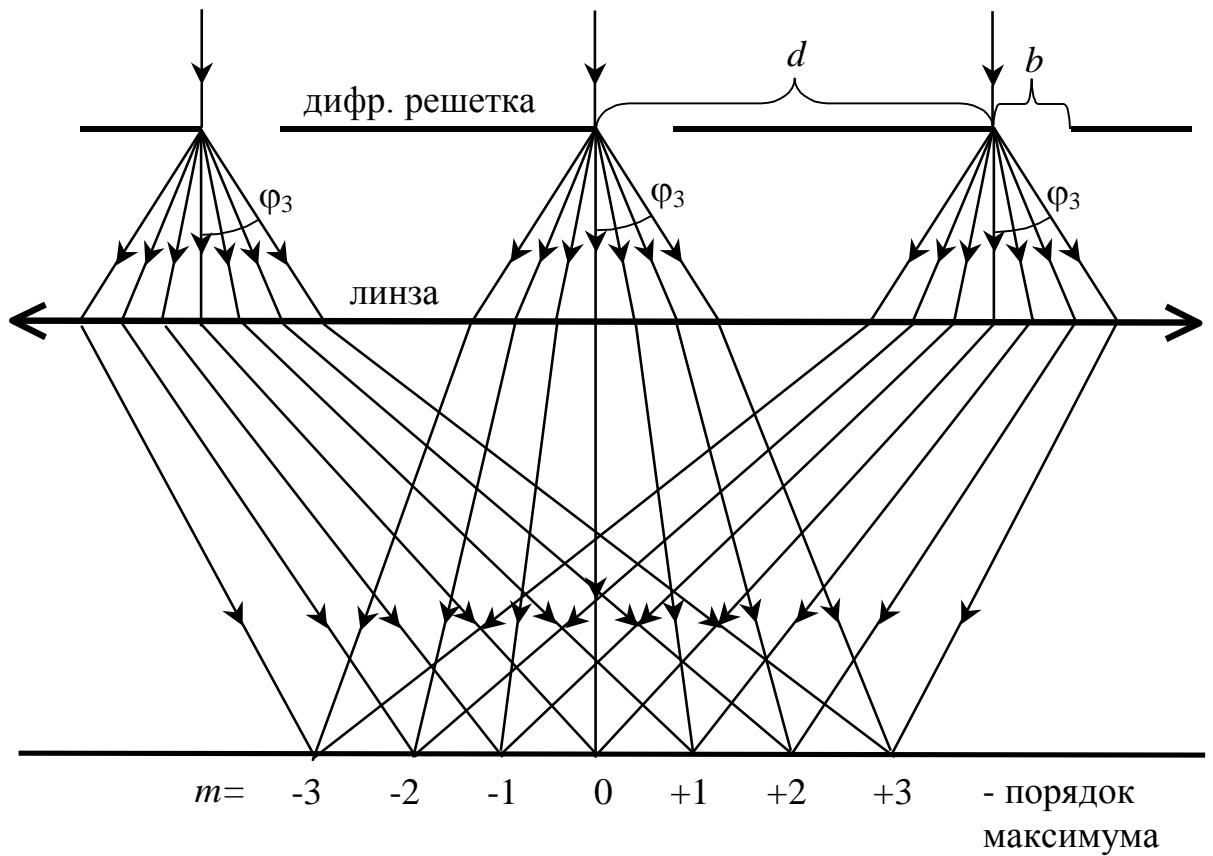


Рис. 1. Формирование дифракционной картины в фокальной плоскости линзы

Расчеты показывают, что интенсивность дифракционной картины, наблюдаемой в фокальной плоскости линзы, в зависимости от угла дифракции задается формулой:

$$I(\phi) = I_0 \cdot \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2, \quad (1)$$

где $u = k \cdot \frac{b \cdot \sin \phi}{2} = \pi \cdot \frac{b \cdot \sin \phi}{\lambda}$;

$$\delta = k \cdot \frac{d \cdot \sin \phi}{2} = \pi \cdot \frac{d \cdot \sin \phi}{\lambda};$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ - волновое число.}$$

Формулу (1) можно представить как произведение двух сомножителей: *дифракционного*

$$I_{\text{дифр}}(\phi) = I_0 \cdot \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2, \quad (2)$$

описывающего дифракцию на одной щели шириной b , и *интерференционного*

$$I_{\text{унт}}(\phi) = \left(\frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2, \quad (3)$$

описывающего интерференцию N когерентных пучков, идущих от щелей решетки.

На рис.2 показан вид дифракционной картины на $N=4$ щелях.

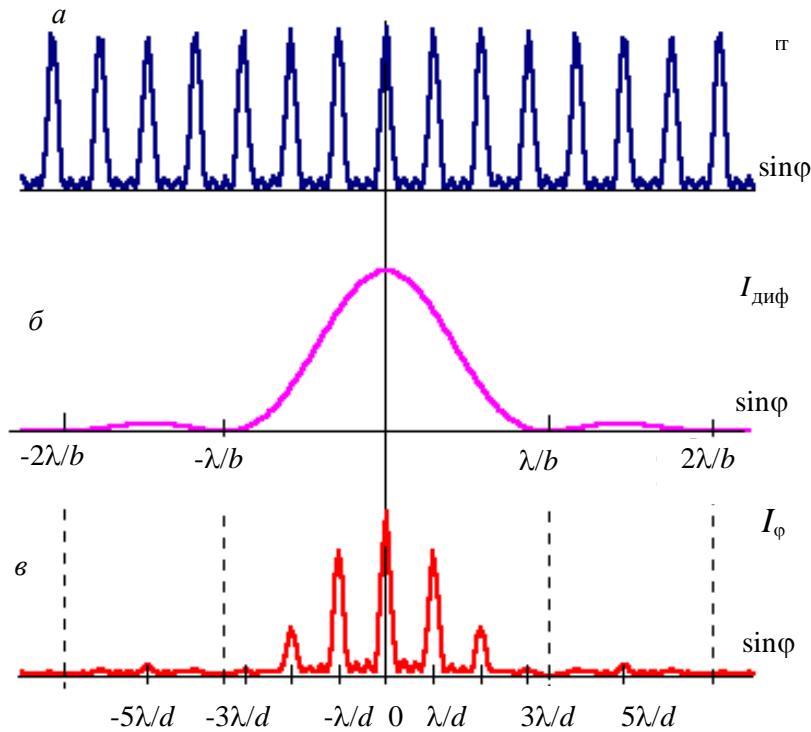


Рис. 2. Дифракция Фраунгофера на четырех щелях:
а — интерференционный сомножитель (3),
б — дифракционный сомножитель (2),
в — общий вид дифракционной картины (1).

Местоположение главных дифракционных максимумов, соответствующих максимальным значениям $I_{\text{ум}}(\varphi)$, определяется из условия:

$$\delta = \pi \cdot m,$$

или

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

Между главными максимумами находятся $N-2$ дополнительных максимумов существенно меньшей интенсивности.

При выполнении условия (4) интерференционный сомножитель (3) стремится к N^2 . Современные дифракционные решетки характеризуются большим числом щелей (или штрихов): до тысячи и более штрихов на один миллиметр ширины решетки. Поэтому при освещении решетки монохроматическим светом дифракционная картина представляет собой набор ярких максимумов, местоположения которых удовлетворяют уравнению (4).

Условие (4) можно легко получить из геометрического построения (рис. 3). Волны от вторичных источников, расположенных в соседних щелях, при распространении в направлении φ будут иметь разность хода Δs , равную

$$\Delta s = d \cdot \sin\varphi.$$

Если разность хода будет кратна длине волны излучения

$$\Delta s = d \cdot \sin\varphi = m\lambda,$$

то волны от всех щелей будут приходить в точку наблюдения с разностью фаз

$$\Delta\phi = k \cdot \Delta s = 2\pi m$$

и, следовательно, усиливать друг друга. Полученное соотношение совпадает с условием (4).

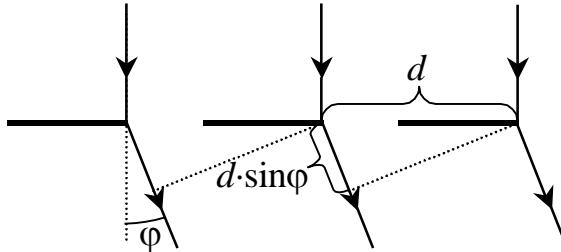


Рис. 3. К расчету разности хода при нормальном падении плоской волны на дифракционную решетку

Таким образом, при падении плоской монохроматической волны на дифракционную решетку в фокальной плоскости линзы, установленной за решеткой, будет формироваться дифракционная картина в виде отдельных ярко освещенных полосок, параллельным штрихам решетки (рис. 1). Эти полосы называют дифракционными максимумами m -го порядка ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$).

Если в качестве источника света использовать лампу с линейчатым спектром (излучаются несколько длин волн), то центральный максимум нулевого порядка ($m = 0$) будет представлять собой светлую ахроматическую полосу, так как условие максимума (4) выполнено сразу для всех длин волн. Максимумы $\pm m$ -го порядков, расположенные слева и справа от центрального, для различных длин волн будут соответствовать различным углам дифракции $\Phi_m(\lambda)$. При этом чем меньше длина волны, тем меньше угловое расстояние между максимумами соседних порядков.

С ростом числа щелей решетки дифракционные максимумы становятся более узкими и резкими. Если на решетку падает излучение сложного спектрального состава, то для каждой длины волны получится свой набор дифракционных максимумов и, следовательно, излучение будет разложено в спектр. Максимально возможный порядок дифракции определяется из условия:

$$\sin \Phi_m = m \frac{\lambda}{d} \leq 1,$$

откуда

$$m_{\max} = \left[\frac{d}{\lambda} \right],$$

где квадратные скобки означают, что берется целая часть отношения.

Одной из важных характеристик дифракционной картины является угловая ширина $\Delta\Phi_m$ дифракционного максимума m -го порядка, т.е. угол между направлениями на максимум и на ближайший к нему минимум, в котором интенсивность, вычисляемая по формуле (1), равна нулю (рис. 4). Из выражения (3) нетрудно заметить, что ближайшие к главному максимуму минимумы определяются из соотношения:

$$\delta_{m,\min} = \pi \cdot \left(m \pm \frac{1}{N} \right),$$

или

$$d \cdot \sin \varphi_{m,\min} = \left(m \pm \frac{1}{N} \right) \lambda. \quad (5)$$

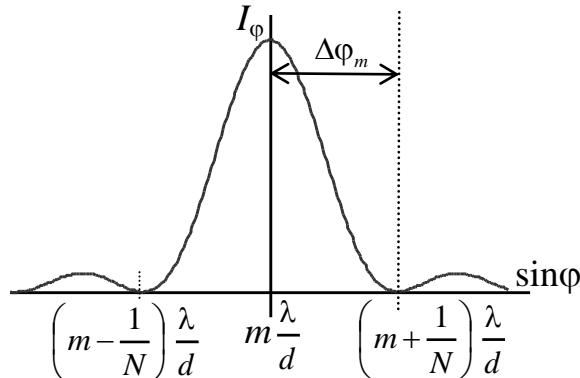


Рис. 4. К определению угловой ширины дифракционного максимума

Другими словами, при переходе от максимума к ближайшему минимуму порядок дифракции изменяется на $\delta m = \frac{1}{N}$. Тогда выражение для угловой ширины максимума можно получить, взяв дифференциал от обеих частей условия (4) по переменным φ_m и m :

$$\begin{aligned} d \cdot \delta(\sin \varphi_m) &= \delta m \cdot \lambda; \\ d \cdot \cos \varphi_m \cdot \Delta\varphi_m &= \frac{1}{N} \cdot \lambda; \\ \Delta\varphi_m &= \frac{\lambda}{Nd \cdot \cos \varphi_m} \end{aligned} \quad (6)$$

или

$$\Delta\varphi_m = \frac{\lambda}{L \cdot \cos \varphi_m}$$

где $L = Nd$ - ширина дифракционной решетки. При малых углах дифракции $\cos \varphi_m \approx 1$ и

$$\Delta\varphi_m \approx \frac{\lambda}{L},$$

т.е. угловая ширина не зависит от порядка максимума, а определяется шириной решетки.

Основными спектральными характеристиками дифракционной решетки являются:

1) **Угловая дисперсия** $D_\phi = \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}$, характеризующая изменение углового

положения дифракционных максимумов с изменением длины волны излучения. Угловую дисперсию можно найти, взяв дифференциал от обеих частей условия (4) по переменным φ_m и λ :

$$d \cdot \delta(\sin \varphi_m) = m \cdot \delta \lambda;$$

$$d \cdot \cos\varphi_m \cdot \delta\varphi_m = m \cdot \delta\lambda; \\ D_\varphi = \frac{\delta\varphi_m}{\delta\lambda} = \frac{m}{d \cos\varphi_m}. \quad (7)$$

Если углы дифракции φ_m малы, то $\cos\varphi_m \approx 1$, и угловая дисперсия

$$D_\varphi \approx \frac{m}{d}$$

не зависит от длины волны.

2) **Разрешающая способность** $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$, определяемая как отношение

длины волны λ к $\Delta\lambda$ - наименьшей разности длин волн двух спектральных линий, которые могут быть *разрешены*, т.е. наблюдаются раздельно (рис. 5). В соответствии с *критерием Рэлея* две линии λ и $(\lambda + \Delta\lambda)$ разрешены, если угловое расстояние между главными максимумами одного и того же порядка для этих длин волн не меньше угловой ширины $\Delta\varphi_m$ главного максимума:

$$\varphi_{m,\max}(\lambda + \Delta\lambda) - \varphi_{m,\max}(\lambda) \geq \Delta\varphi_m.$$

Это означает, что в предельном случае максимум m -го порядка для длины волны $(\lambda + \Delta\lambda)$ совпадает с минимумом, ближайшим к максимуму того же порядка для длины волны λ , т.е.

$$\varphi_{m,\max}(\lambda + \Delta\lambda) = \varphi_{m,\min}(\lambda).$$

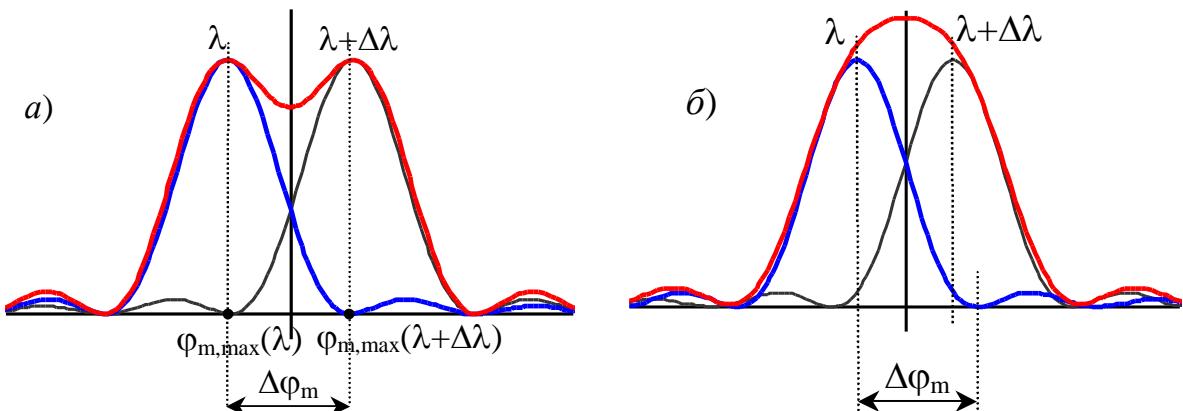


Рис. 5. К определению разрешающей способности:
а) спектральные линии разрешены; б) спектральные линии не разрешены.

Из (4)-(5) следует:

$$d \sin(\varphi_{m,\max}(\lambda + \Delta\lambda)) = m(\lambda + \Delta\lambda) = d \sin(\varphi_{m,\min}(\lambda)) = \left(m + \frac{1}{N}\right)\lambda.$$

Отсюда получаем:

$$m(\lambda + \Delta\lambda) = \left(m + \frac{1}{N}\right)\lambda; \\ R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN = \frac{d \sin \varphi}{\lambda} N = \frac{L \cdot \sin \varphi}{\lambda}. \quad (8)$$

Высокая разрешающая способность дифракционной решетки создается за счет большого числа штрихов N , так как порядок дифракции m мал (обычно спектральные приборы работают в первом порядке дифракции).

Рассмотрим случай наклонного падения плоской волны на дифракционную решетку. Из рис. 6 следует, что условие дифракционных максимумов в этом случае запишется в виде:

$$\Delta s = d \cdot (\sin \psi - \sin \theta) = m\lambda, \quad (9)$$

где θ - угол падения плоской волны на решетку;

ψ - угол дифракции.

Представляя угол дифракции в виде:

$$\psi = \theta + \varphi,$$

и записывая (при условии $\varphi \ll 1$):

$$\sin \psi = \sin(\theta + \varphi) = \sin \theta \cdot \cos \varphi + \sin \varphi \cdot \cos \theta \approx \sin \theta + \sin \varphi \cdot \cos \theta$$

получим:

$$d \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi = m\lambda. \quad (10)$$

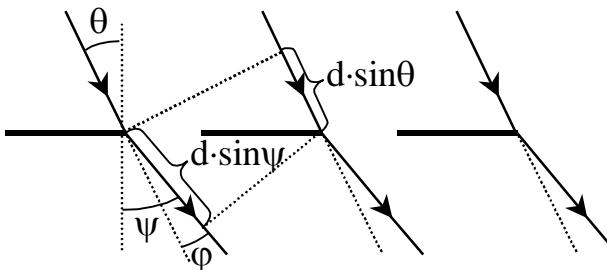


Рис. 6. К расчету разности хода при наклонном падении плоской волны на дифракционную решетку

Сравнивая полученное соотношение (10) с (4), заметим, что при малых углах дифракции ($\varphi \ll 1$) наклонное падение плоской волны на решетку эквивалентно уменьшению периода решетки до $d_\theta = d \cdot \cos \theta$. Таким образом, с ростом угла падения θ углы дифракции $\varphi_{\theta,m}$ для направлений на максимумы m -го порядка также увеличиваются:

$$\varphi_{\theta,m} = m \frac{\lambda}{d \cdot \cos \theta} > m \frac{\lambda}{d} = \varphi_m.$$

Следовательно, углы дифракции минимальны в случае нормального падения плоской волны на дифракционную решетку (это условие будет использовано в дальнейшем при настройке экспериментальной установки).

Угловая дисперсия решетки при наклонном падении также возрастет и станет равной (при условии $\varphi \ll 1$):

$$D_{\varphi,\theta} \approx \frac{m}{d \cdot \cos \theta}.$$

Разрешающая способность решетки (8) останется неизменной.

В настоящей задаче определяются постоянная решетки d и длины волн излучения ртутной лампы по непосредственному измерению углов дифракции

на гониометре-спектрометре ГС-5. Кроме того, рассчитываются угловая дисперсия и разрешающая способность решетки.

Экспериментальная установка

Описание прибора. Гониометр-спектрометр ГС-5 (рис. 7) служит для измерения двугранных углов оптическим методом с точностью до $5''$. Он состоит из следующих основных узлов: основания 1, коллиматора 2, корпуса 3 со зрительной трубой 4 и отсчетным микроскопом 5, поворотного столика 6 и скрытого под корпусом лимба. На основании 1 стационарно размещена колонка коллиматора и осевая система с вертикальной осью, вокруг которой могут вращаться корпус 3, столик 6 и лимб.

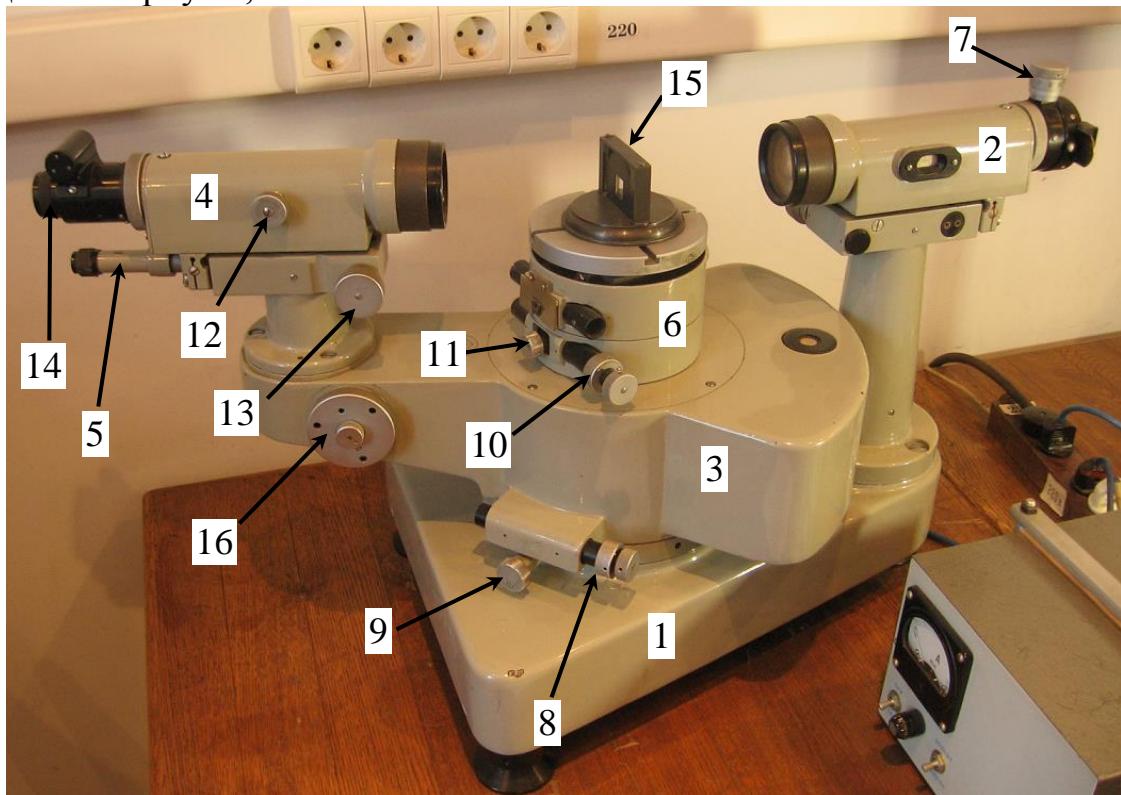


Рис. 7. Схема гониометра-спектрометра ГС-5.

Коллиматор 2 служит для создания параллельного пучка света. На торце коллиматора, обращенном к источнику света, имеется входная щель 7, ширину которой можно регулировать с помощью микрометрического винта, а высоту – специальной пластинкой типа «ласточкин хвост». С помощью бокового винта (на рис.7 находится за коллиматором) осуществляется настройка оптической схемы так, чтобы щель оказалась в фокальной плоскости системы линз (объектива) коллиматора. Наклон коллиматора в вертикальной плоскости можно изменять, вращая винт, находящийся под трубой коллиматора.

Корпус 3 вместе со зрительной трубой 4 может свободно вращаться относительно основания. Плавное перемещение корпуса осуществляется от руки, для точного поворота корпуса предусмотрен микрометрический винт 8, расположенный в нижней части корпуса. Под микрометрическим винтом 8

расположен перпендикулярно к нему зажимной винт 9, фиксирующий положение корпуса 3.

Столик 6, как и корпус 3, также может свободно вращаться относительно основания. Плавное вращение столика осуществляется от руки, для точного поворота предусмотрен микрометрический винт 10, расположенный в нижней части корпуса. Под микрометрическим винтом расположен перпендикулярно к нему зажимной винт 11, фиксирующий положение столика 6. Установка столика горизонтально производится двумя винтами сбоку столика.

Конструкция зрительной трубы 4 идентична конструкции коллиматора 2. Фокусировка зрительной трубы производится с помощью винта 12 сбоку трубы. Положение зрительной трубы в вертикальной плоскости можно изменять, вращая винт 13, находящийся внизу около объектива трубы. На торце зрительной трубы, обращенном к наблюдателю, расположен окуляр 14. При правильной настройке гониометра в окуляре наблюдается четкое изображение входной щели 7. Так как фокусные расстояния коллиматора 2 и зрительной трубы 4 одинаковы, то размер изображения входной щели точно равен размеру входной щели.

Чуть ниже окуляра зрительной трубы расположен окуляр отсчетного микроскопа 5, применяемого для измерения углового положения зрительной трубы относительно расположенного на столике исследуемого объекта – дифракционной решетки 15 в оправе. В поле зрения микроскопа видны одновременно два изображения: шкалы лимба и шкалы микрометра. Стеклянный лимб с делениями установлен на вертикальной оси прибора в ее нижней части и подсвечивается закрепленной там же электрической лампочкой. Выключатель лампочки расположен с левой стороны основания 1. Шкала лимба вращается при повороте как корпуса 3 со зрительной трубой, так и столика 6.

Поле зрения отсчетного микроскопа приведено на рис. 8. В левом окне наблюдаются изображения диаметрально противоположных участков лимба – прямое и перевернутое – и вертикальная риска в центре. В правом окне наблюдаются вертикальная шкала оптического микрометра и горизонтальная риска в центре.

Чтобы снять отсчет по лимбу, необходимо, вращая маховичок 16, совместить двойные штрихи на верхней и нижней шкалах в левом окне. Необходимо быть ***предельно внимательным*** и при вращении следить одновременно и за шкалой в правом окне. Диапазон вращения маховичка ограничен и соответствует показаниям в правом окне от 0.00 до 10.00. Поэтому, если показания приближаются к любому из предельных значений, а совмещения штрихов в левом окне не происходит, следует изменить направление вращения маховичка.

Помните!

**Вращение маховичка 16 проводится без каких-либо усилий.
Ни в коем случае не допускается выход за пределы указанного**

выше диапазона значений! Это может привести к выходу из строя отсчетного микроскопа!

После совмещения двойных штрихов в левом окне **число градусов** будет равно ближайшему видимому **слева** от вертикальной риски числу (на рис.8 это число 187). После этого на нижней (перевернутой) шкале левого окна следует найти число, отличающееся от верхнего на 180 (на рис.8 это число 7). **Число десятков минут** равно числу интервалов, заключенных между верхним и нижним штрихами, соответствующими найденным числам (на рис.8 число интервалов между штрихами 187 и 7 равно 4).

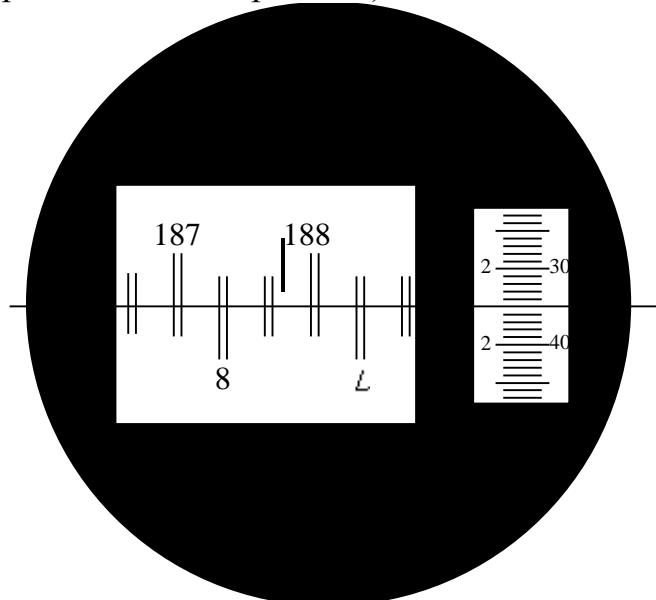


Рис. 8. Поле зрения отсчетного микроскопа 8.

Число единиц минут отсчитывается в правом окне по левому ряду чисел на шкале микрометра (на рис.8 это число 2). **Число десятков и единиц секунд** – в том же окне по правому ряду чисел и положению горизонтальной риски (на рис.8 это число 35).

Таким образом, указанное на рис. 8 положение соответствует отсчету $187^{\circ} 42' 35''$.

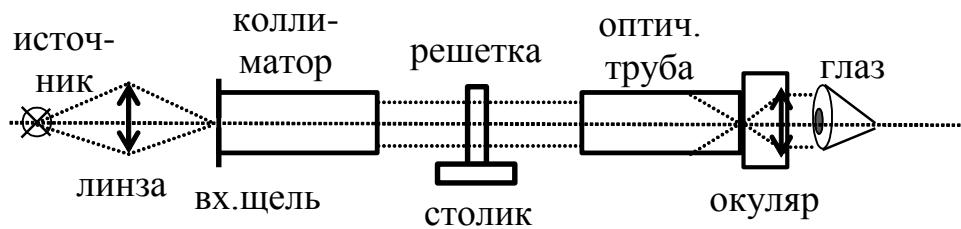


Рис. 9. Оптическая схема установки

Оптическая схема прибора приведена на рис. 9. Излучение протяженного источника фокусируется собирающей линзой на входной щели прибора. Коллиматор формирует почти параллельный пучок с расходимостью $\frac{b}{F}$, где b –

ширина щели, F – фокусное расстояние коллиматора. Оптическая труба имеет такое же фокусное расстояние, как и коллиматор, в итоге в отсутствии решетки на выходе трубы по законам геометрической оптики формируется изображение входной щели такой же ширины b . Это изображение наблюдается глазом через окуляр.

При установке решетки для каждой длины волны (в случае источника с линейчатым спектром) формируется свое изображение щели, чуть уширенное дифракцией на решетке шириной L (напомним, что угловая ширина дифракционного максимума решетки равна $\frac{\lambda}{L}$). Нетрудно заметить, что угловое уширение за счет размера щели существенно превосходит дифракционное уширение. Поэтому реальная разрешающая способность существенно меньше разрешающей способности решетки.

Гониометр требует очень тщательной установки, которая состоит в отдельности из установки оптической трубы на бесконечность, установки оси трубы перпендикулярно к оси вращения прибора и установки коллиматора. Настройка гониометра осуществляется дежурным инженером. Указания по проведению настройки приведены в Приложении.

Описание ртутной лампы. Источником света с линейчатым спектром служит ртутнокварцевая лампа, в которой используется дуговой разряд в парах ртути.

В лампе, наполненной аргоном до давления нескольких миллиметров ртутного столба, имеется некоторое количество ртути, которая во время работы полностью испаряется и дает нужное для данной лампы давление паров ртути. Аргон введен в лампу для начального зажигания разряда. Потенциал зажигания у аргона в присутствии небольшого количества ртутного пара снижается, и лампа в нормальных условиях легко зажигается при включении ее в цепь переменного тока (лампы типа ПРК-2, ПРК-4, ДРС-50).

В момент зажигания дугового разряда через ртутную лампу идет ток силой в несколько ампер, электроды накаляются и становятся источниками электронов, питающих разряд. Температура ртутной лампы повышается, давление паров ртути увеличивается, напряжение на лампе начинает расти, ток падает и свечение, заполняющее сначала все пространство лампы, стягивается в яркий шнур шириной от 2 до 4 мм, идущий по оси трубы. Режим лампы становится устойчивым, когда вся ртуть испарится.

Повторное включение горевшей лампы возможно только после того, как она охладится, и давление паров ртути понизится настолько, что напряжение зажигания разряда станет ниже напряжения цепи, питающей лампу. Для этого обычно требуется не более 10 минут.

В целях предохранения окружающих от ожогов и от действия на глаза ультрафиолетового излучения лампу помещают в специальный кожух с защитным стеклом.

Эксперимент

Включить ртутную лампу и дать ей прогреться в течение 5-10 минут.

Поворачивая рукой корпус 3, установить зрительную трубу 4 гoniометра на линии источник света-коллиматор. Если установка настроена правильно, то в окуляр 14 будет наблюдаться четкое изображение входной щели 7 коллиматора. Для увеличения яркости между лампой и коллиматором установлена собирающая линза, фокусирующая излучение лампы на входной щели. При необходимости положение линзы следует откорректировать.

В случае нечеткого изображения следует провести полную настройку гoniометра (см. Приложение).

В поле зрения окуляра также виден крест, вертикальную линию которого при проведении настройки необходимо совмещать с изображением щели. Для этого, кроме поворота корпуса рукой, можно использовать микрометрический винт 8.

Получения резкого изображения креста добиваются вращением оправы окуляра.

Упражнение 1

Определение постоянной решетки

Для повышения точности измерений необходимо предварительно корректно установить дифракционную решетку.

1. Вращая рукой столик 6, установить его так, чтобы один из винтов регулировки наклона столика находился на линии пучка света от источника к окуляру. Тогда линия, мысленно проведенная от второго винта регулировки наклона к центру столика 6, будет перпендикулярна пучку света. Такая настройка требуется для удобства последующей регулировки наклона дифракционной решетки.

Установить дифракционную решетку 15 строго по центру столика 6 так, чтобы параллельный пучок света от коллиматора падал на нее примерно перпендикулярно. При этом наблюдаемое в окуляр трубы четкое изображение входной щели белого цвета практически не изменится. Это и будет дифракционный максимум нулевого порядка.

2. Сначала следует провести предварительную настройку гoniометра. Вращать рукой корпус 3, например, влево, и наблюдать последовательно фиолетовую, зеленую и двойную желтую линии в спектре первого порядка. Продолжая вращение, наблюдать те же линии в последующих порядках дифракции. Вернуться к нулевому порядку дифракции и пронаблюдать аналогичную последовательность линий при вращении вправо. Если описанная картина не наблюдается, или, например, наблюдаемые линии при повороте сильно смещаются вверх или вниз, следует провести регулировку наклона столика с решеткой.

Теперь надо установить плоскость решетки строго перпендикулярно падающему на нее пучку света от коллиматора. Для этого следует сначала перекрыть пучок света, падающий от лампы на решетку, например, листом

бумаги, чтобы свет лампы не мешал последующей настройке. Включить тумблер освещения на основании гoniометра, при этом загорится лампочка накаливания, расположенная над окуляром прибора. Свет от лампочки попадает в автоколлимационный окуляр Гаусса, смонтированный в оптической трубе. Он формирует слабый пучок света, идущий к решетке. Если решетка установлена правильно (строго перпендикулярно), то после отражения от нее пучок вернется в зрительную трубу, и в окуляр будет наблюдаться слабый отраженный световой «зайчик». Регулировка положения решетки осуществляется поворотом столика вокруг вертикальной оси и вращением винта наклона столика. Отраженный от решетки «зайчик» можно наблюдать непосредственно глазом, смотря мимо корпуса зрительной трубы.

Процесс настройки столика с решеткой требует определенного навыка. Если в течение 5-10 минут не удастся поймать отраженный от решетки «зайчик», то можно ограничиться установкой перпендикулярности «на глаз», при этом точность определения параметров ухудшится.

Если «зайчик» успешно пойман, то при наблюдении в окуляр в «зайчике» наблюдается слабый крест, резкость которого регулируется винтом 12 настройки зрительной трубы на бесконечность.

После такой регулировки следует убрать преграду на пути света, идущего от ртутной лампы, и проверить резкость наблюдаемого в окуляр изображения входной щели, используя винт настройки коллиматора на бесконечность.

Настройка закончена, и в дальнейшем при выполнении упражнений 1 и 2 столик и решетку не перемещать.

3. Вновь вернуться к максимуму нулевого порядка. Наблюдая в отсчетный микроскоп 5, произвести по лимбу отсчет угла β_0 установки зрительной трубы. Результат (градусы, минуты и секунды) записать в таблицу 1.

Навести трубу на фиолетовую линию первого порядка и произвести отсчет $\beta_{1\phi}$. Продолжая вращать трубу в ту же сторону, найти и провести отсчеты зеленой и двойной желтой линии в спектре первого порядка β_{1z} , $\beta_{1ж1}$, $\beta_{1ж2}$. Провести аналогичные измерения в спектрах второго, третьего и последующих порядков¹. Чем выше порядок спектра, тем меньше яркость линии. Результаты измерений записать в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерений.

Порядок <i>m</i>	Цвет линии	Отсчет β_m			Угол дифракции ϕ			ϕ (рад)	$\sin\phi$
		град	мин	сек	град	мин	сек		
0	бел				0	0	0	0	0
1	фиол								
	зел								
	жел1								
	жел2								
2	фиол								

¹ Для ускорения выполнения работы измерения проводятся для всех наблюдаемых линий в спектре (для упражнений 1 и 2).

	зел								
	жел1								
	жел2								
	...								
	...								
-1	фиол								
	зел								
	жел1								
	жел2								
	...								
	...								

4. Такие же установки и отсчеты проделать и по правую сторону от нулевого максимума, вращая трубу в противоположном направлении.

5. Рассчитать углы дифракции $\varphi_m = \beta_m - \beta_0$ для всех наблюдаемых порядков и записать в таблицу. Вычисления углов дифракции провести в градусах, минутах и секундах. Проверить совпадение углов дифракции для случаев поворота трубы в одну и другую стороны, при несовпадении провести дополнительные измерения. После этого для дальнейших расчетов перевести углы дифракции в радианы.

Длина волны зеленой линии в спектре ртути считается известной и равной $\lambda_{\text{зел}}=5461$ А. Построить график зависимости синуса угла дифракции $\sin \varphi_m$ для зеленой линии от порядка m . Найти, используя метод наименьших квадратов (МНК), коэффициент наклона графика. В соответствии с (4), зная $\lambda_{\text{зел}}$, рассчитать постоянную d данной решетки и число $n = \frac{1}{d}$ штрихов на 1 миллиметр ширины решетки. Оценить погрешность. Результаты обработки записать в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты обработки.

	d (мм)	n (мм^{-1})	$\lambda_{\text{зел}}$ (А)	$\lambda_{\text{фиол}}$ (А)	$\lambda_{\text{жел1}}$ (А)	$\lambda_{\text{жел2}}$ (А)	$D_{\varphi,1}$ (рад/мм)	$D_{\varphi,2}$ (рад/мм)	$D_{\varphi,3}$ (рад/мм)	R	$R_{\text{реал}}$
Эксп.			-							-	
Теор.			5461								-

Упражнение 2

Определение неизвестных длин волн спектральных линий, угловой дисперсии и разрешающей способности решетки

Измерения углов дифракции для всех наблюдаемых линий в спектре ртути проведены в Упражнении 1, в этом упражнении проводится обработка результатов.

1. Для каждой из наблюдаемых линий построить на одних осях график зависимости синуса угла дифракции $\sin \varphi_m$ от порядка m . Рассчитать по МНК коэффициент наклона графика и, в соответствии с (4), найти длину волны

каждой линии излучения (значение постоянной решетки d взять из 1-го упражнения). Оценить погрешность. Результаты обработки записать в таблицу 2. Сравнить найденные длины волн с табличными значениями в спектре ртути (найти самостоятельно).

2. В спектре ртути присутствуют две близко расположенные желтые линии, длины волн λ_1 и λ_2 которых рассчитаны в п.1. Определяя разность углов $\varphi_{1,m}$ и $\varphi_{2,m}$ дифракции для этих линий, рассчитать угловую дисперсию решетки для каждого порядка (разность углов вычисляется в радианах):

$$D_{\varphi,m} = \frac{\varphi_{1,m} - \varphi_{2,m}}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (7a)$$

Сравнить полученный результат с рассчитанным по теоретической формуле (7). Результаты обработки записать в таблицу 2.

3. В наблюдаемом спектре ртути нет двух близко расположенных линий, которые позволили бы экспериментально определить разрешающую способность R решетки. Поэтому ее следует рассчитать по формуле (8). Для этого линейкой измерить ширину решетки и, зная постоянную решетки d , найти число N штрихов на ней. Рассчитать разрешающую способность R решетки для максимально наблюдаемого порядка дифракции. Результат записать в таблицу 2.

4. Можно получить оценку реальной разрешающей способности R_{real} гониометра исходя из следующих соображений. Каждый наблюдаемый в зрительную трубу максимум есть изображение входной щели прибора, лишь незначительно уширенное вследствие дифракции. В этом легко убедиться, наблюдая, к примеру, за изменениями ширины того или иного максимума при изменении ширины щели. Поэтому принято считать, что две линии разрешены, если наблюдаемое в эксперименте расстояние между соответствующими максимумами не меньше ширины изображения отдельной линии.

Установить зрительную трубу на желтый дублет в первом порядке. Произвести отсчеты левого и правого краев изображения каждой из линий дублета, тогда угловые ширины $\delta\varphi_i$ каждой линии будут равны разности отсчетов. Найти среднее значение по двум линиям. Зная рассчитанную по (7a) угловую дисперсию $D_{\varphi,1}$ в первом порядке, найти разность длин волн $\delta\lambda$, соответствующую угловой ширине $\delta\varphi_1$:

$$\delta\lambda = \frac{\delta\varphi_1}{D_{\varphi,1}}.$$

Именно эта разность длин волн и входит в формулу для расчета реальной разрешающей способности R_{real} гониометра:

$$R_{real} = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda \cdot D_{\varphi,1}}{\delta\varphi_1}. \quad (8a)$$

Полученный результат записать в табл. 2.

Технические данные установки. Задача поставлена на гониометре ГС-5; дифракционные решетки могут иметь от 50 до 200 штрихов на мм.

Литература.

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. §46, 47, 50.
2. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. §5.7-5.8.
3. Матвеев А.Н. Оптика. – М.: Высшая школа, 1985. §33.
4. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Наука, 2004. Лекция 16.
5. Бутиков Е.И. Оптика. – СПб.: Невский диалект, 2003. §6.5-6.6.

Контрольные вопросы и задания.

1. Нарисуйте схему наблюдения дифракции Фраунгофера на решетке и объясните способ формирования дифракционной картины.
2. Получите формулу (4) для нахождения положения главных дифракционных максимумов.
3. Как изменяется условие (4) в случае наклонного падения плоской волны на дифракционную решетку?
4. Чему равен максимальный порядок дифракции и где он наблюдается? Изменяется ли максимальный порядок при наклонном падении плоской волны?
5. Получите формулу (6) для нахождения угловой ширины дифракционного максимума.
6. Что называют угловой дисперсией дифракционной решетки? Получите формулу для ее нахождения.
7. Что такое разрешающая способность дифракционной решетки? Получите формулу для ее нахождения.
8. Сформулируйте критерий Рэлея.
9. Какой вид будет иметь дифракционная картина, если на решетку направить расходящийся пучок немonoхроматического света?
10. Поднесите дифракционную решетку к глазу и посмотрите через нее на ртутную лампу и лампу накаливания. Объясните наблюдаемые картины.

Приложение Настройка гониометра

Установка прибора. Гониометр требует очень тщательной установки, которая состоит в отдельности из установки оптической трубы на

бесконечность, установки оси трубы перпендикулярно к оси вращения прибора и установки коллиматора. Вращая установочные винты под основанием прибора, устанавливают его горизонтально по уровню на корпусе.

1) Установка трубы на бесконечность. Устанавливают на глаз столик и трубу горизонтально. Приближенную установку оптической трубы на бесконечность производят с помощью фокусировочного винта трубы, совмещая в окошке сбоку на тубусе трубы метку «0» на неподвижной шкале с меткой «∞» на подвижной шкале. Включают подсветку окуляра и наводят его на резкую видимость креста.

Ставят на столик плоскопараллельную стеклянную пластинку перпендикулярно к линии, соединяющей два установочных винта столика. Вращая столик и изменения наклон трубы или столика, ловят отражение от передней грани плоскопараллельной пластиинки светового пучка, освещдающего крест. Если это отражение расплывчато, то фокусировочным винтом трубы устанавливают его на ясную видимость. В этом случае труба установлена на бесконечность.

2) Установка оси трубы перпендикулярно к оси вращения прибора. Вращая, столик с пластинкой и наклоняя его или трубу, совмещают крест с его отражением. Затем поворачивают столик на 180° и ловят отражение от второй грани пластиинки. Указанного выше совпадения крестов, вообще говоря, не будет. Его восстанавливают, действуя одним из винтов столика и винтом трубы. Первым винтом наклоняют столик на столько, чтобы расстояние между горизонтальной чертой и ее отражением сократилось наполовину, а затем совмещают горизонтальную черту с ее отражением, наклоняя трубу. После этого снова поворачивают столик на 180° и, если кrestы немного расходятся, совмещают их точно таким же методом. Труба установлена перпендикулярно к оси вращения столика, если отражение креста от обеих граней плоскопараллельной пластиинки совпадает с крестом в окуляре. После этого пластиинку снимают со столика.

3) Установка коллиматора. Щель должна находиться в фокальной плоскости, объектива коллиматора. Для этого совмещают в окошке сбоку на тубусе коллиматора «0» и «∞» двух шкал. Затем освещают щель, ловят ее изображение в трубу и, не трогая фокус справочного винта трубы, с помощью фокусировочного винта коллиматора добиваются резкого изображения щели.

Для установления оси коллиматора перпендикулярно к оси вращения столика предварительно уменьшают вертикальный размер щели, вдвигая пластиинку с треугольным вырезом («ласточкин хвост»), а затем, изменения наклон коллиматора, добиваются того, чтобы горизонтальная нить креста в окуляре разделяла щель пополам.

Установка решетки. Когда установка спектрометра закончена, следует установить дифракционную решетку. Для этого, вращая зрительную трубу относительно прибора, наводят крест окуляра на щель, освещенную ртутной лампой, и закрепляют трубу в этом положении; затем ставят на столик решетку так, что бы штрихи ее были вертикальны, т.е. параллельны оси вращения

прибора, а ее плоскость – перпендикулярна к оси коллиматора. Наклоняя и вращая столик, получают в поле зрения изображение окулярного креста, отраженное от плоскости решетки или от стеклянных пластинок, в которых зажата реплика. Совмещает изображение вертикального штриха в окуляре с крестом, а горизонтального штриха – с его изображением, как и в случае установки с плоскопараллельной пластинкой. Наклонять следует *только столик*, а не трубу, т.к. установка спектрометра уже закончена.

Поворачивая столик с решеткой на 180° , проверяют установку решетки. Она считается установленной, если в обоих положениях совмещаются изображения вертикально штриха и щели с центром креста.

В одном из этих двух положений столик с решеткой закрепляют и отсчитывают по лимбу направления на первичный световой пучок. При данной установке решетки это будет также направлением на максимум нулевого порядка.