

Измерение длины волны с помощью отражательной дифракционной решетки.

В данной работе измеряются длины волн ряда спектральных линий ртути видимого диапазона. Измерения проводятся при помощи спектрогониометра и отражательной дифракционной решетки.

1. Дифракционная решетка.

Дифракционная решетка обычно представляет собой стеклянную или металлическую пластинку, на которую нанесены равноотстоящие штрихи. С момента появления дифракционных решеток основным (и доведенным до высочайшего совершенства) способом нанесения штрихов является их нарезка резцом соответствующего качества (например, алмазным) при помощи специальной механической делительной машины. В современной оптической технике применяется также множество других способов, основанных, в частности, на фотохимии (например, голография). Для изготовления вспомогательных решеток невысокого качества («реплик») применяется штамповка.

Расстояние между штрихами в лучших решетках составляет величину порядка микрометра или менее, т.е. оно оказывается одного порядка с длиной электромагнитных волн оптического диапазона спектра (*под оптическим диапазоном понимают видимый и примыкающие к нему ультрафиолетовый и инфракрасный диапазоны спектра электромагнитных волн*). Принципиальное значение для оптической спектроскопии имеет свойство дифракционной решетки отражать излучение не только по условию зеркального отражения, но и в определенных других направлениях. Это свойство обусловлено явлением **дифракции** излучения, которое в применении к нашей задаче мы сейчас рассмотрим. Наше рассмотрение будет основано на принципе Гюйгенса-Френеля [1].

Изменение электромагнитной волны в процессе ее взаимодействия с некоторой поверхностью (границей раздела двух сред) можно представить как результат действия вторичных источников электромагнитных волн, распределенных по этой поверхности и возбуждаемых падающей волной (**Рис.1**).

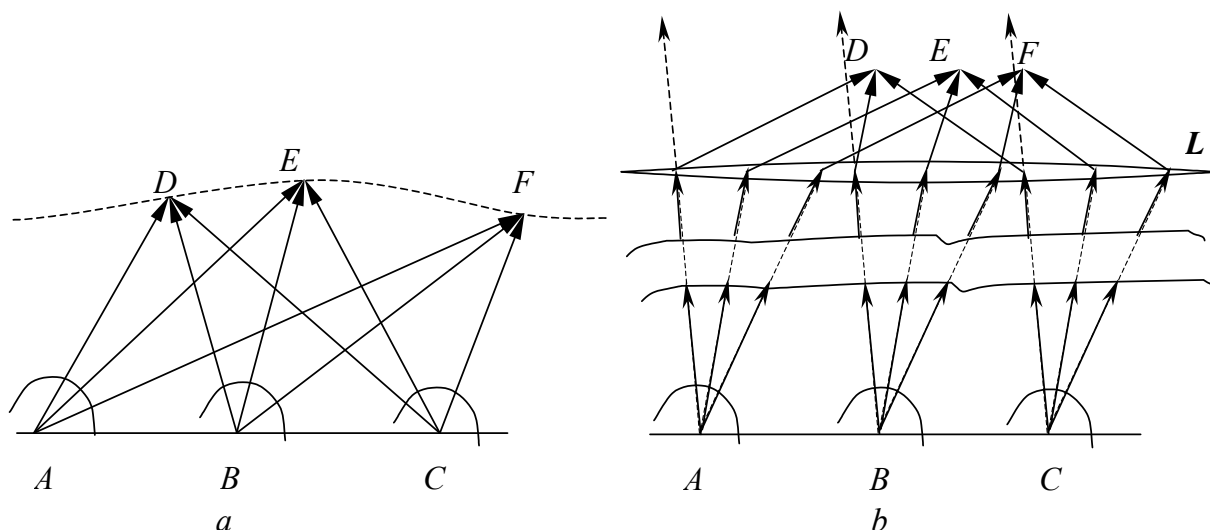


Рис.1. Распространение вторичных волн при дифракции.

a – дифракция при наблюдении в ближней зоне (дифракция Френеля); *b* – дифракция при наблюдении в бесконечности («в параллельных пучках», или Фраунгофера). *L* – объектив.

Описав поведение совокупности этих источников (например, *A, B, C, ...*), т.е., амплитуду, фазу и поляризацию колебаний вектора дипольного момента в каждом из этих источников, мы найдем и свойства возбуждаемых ими вторичных волн.

В зависимости от того, в какой области пространства мы ищем дифракционную картину (в ближней зоне или в бесконечности), рассмотрение подразделяется на случаи дифракции, соответственно, Френеля и Фраунгофера. При описании дифракционных решеток с плоской подложкой рассматривается случай дифракции Фраунгофера¹, поскольку математические выражения для этого случая «дифракции в параллельных пучках» наиболее просты (а, следовательно, проще и обработка спектроскопических данных, получаемых таким путем). Разумеется, наблюдать дифракционную картину в прямом смысле слова в бесконечности затруднительно, поэтому на пути дифрагировавшего пучка устанавливают объектив, а поверхность регистратора (фотопластинки или фотоэлектрического датчика со щелью) устанавливают в фокальной плоскости этого объектива.

Рассмотрим дифракцию плоской монохроматической волны на плоской поверхности, содержащей параллельные равноотстоящие штрихи. Прежде всего, надо договориться, что мы здесь будем понимать под штрихом. В данной работе мы можем ограничиться простейшим рассмотрением, т.е. пренебречь деталями формы и коэффициента отражения поверхности в пределах штриха, а просто первоначально считать каждый штрих очень узкой (много более узкой по сравнению с расстоянием между самими штрихами) и идеально отражающей полоской. Поверхность подложки за пределами штриха, наоборот, будем считать не отражающей излучение (идеально черной). На **Рис.2** показано сечение дифракционной решетки плоскостью, перпендикулярной к ее подложке и к волновому фронту падающей волны. Коллиматор L1 дает параллельный пучок от источника O, освещающий решетку. Дифрагировавший свет попадает в объектив L2, так что наблюдается интерференционная картина в фокальной плоскости объектива (в точке O₁).

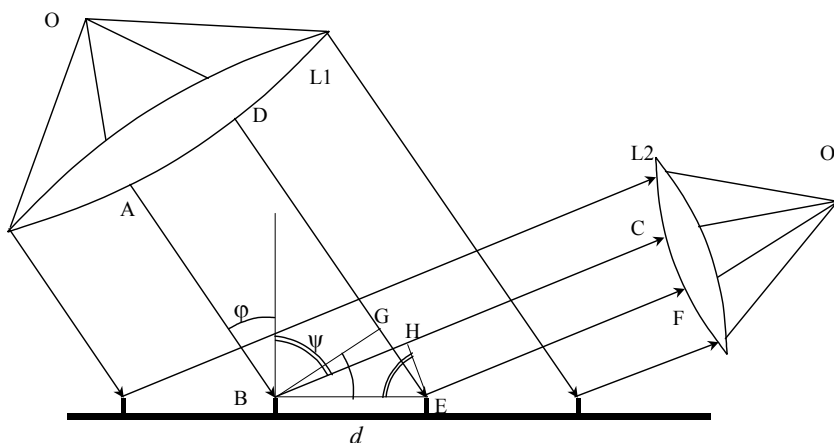


Рис.2

Вторичные источники электромагнитных волн локализованы на поверхности штрихов решетки, т.е. в точках B, E, ... Для нахождения интерференционной картины в точке O₁ надо рассмотреть интерференцию пучков, дифрагировавших в определенном направлении, а именно, в том, которое после фокусировки объективом L2 перейдет в указанную точку O₁. В итоге, наша задача сводится к нахождению оптической разности хода вдоль ломаных линий ABC и DEF, проходящих через два соседних штриха решетки. Тогда мы найдем и разность хода между любыми парами параллельных пучков, т.е. искомую интерференционную картину в точке O₁.

Расстояние между соседними штрихами называется постоянной решетки и равно d , угол падения φ , угол дифракции (угол между нормалью к решетке и направлением дифрагировавших лучей) ψ . На рисунке нетрудно заметить, что вдоль ломаных линий ABC и DEF излучение проходит неодинаковые пути. Расстояния AB и DG от источника до плоскости BG, перпендикулярной падающим на решетку пучкам, одинаковы, и точно так же одинаковы расстояния EF и HC от плоскости EH, перпендикулярной отраженным пучкам, до точки их пересечения. Но отрезки GE и BH различны:

¹Особый случай дифракционных решеток Роуланда, наносимых не на плоскую, а на цилиндрическую поверхность, выходит далеко за рамки данной работы.

$$GE = BE \cdot \sin \varphi = d \sin \varphi$$

$$BH = BE \cdot \sin \psi = d \sin \psi$$

Таким образом, разность путей, пройденных вдоль ломаных ABC и DEF, равна

$$\Delta = BH - GE = d(\sin \psi - \sin \varphi) \quad (1)$$

Если разность хода Δ равна целому числу длин волн света λ , то волны, отраженные от соседних штрихов решетки, придут в точку O_1 в одинаковой фазе и сложатся. Очевидно, что в той же фазе придут в точку O_1 и волны, отраженные от всех других штрихов решетки. Таким образом, в точке O_1 будет наблюдаться максимальная освещенность, если для лучей, приходящих в эту точку, выполнено условие:

$$\Delta = d(\sin \psi - \sin \varphi) = n\lambda \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

Существует (и не очень сложное) строгое математическое доказательство [1] того, что во всех точках, для которых условие (2) не выполнено, света «практически» не будет (соотношение интенсивностей «линии» и «фона» имеет порядок величины $\sim \frac{N^2}{N}$, где N –

полное число штрихов решетки, на которых дифрагирует плоская волна). Здесь мы это доказательство опустим, чтобы не перегружать текст описания, а лишь ограничимся констатацией того факта, что вклады от разных штрихов решетки в полную интерференционную картину в этом случае будут иметь всевозможные (разные) фазы, т.е. в сумме интерференционные члены большей частью взаимно скомпенсируются.

Таким образом, если щель коллиматора освещена монохроматическим светом, то в направлениях, заданных условием (2), будут наблюдаться резкие линии – изображения щели. Если источник не монохроматический, то дифракционные максимумы для разных длин волн будут наблюдаться под разными углами, т.е. свет будет разложен в спектр – сплошной или линейчатый, в зависимости от свойств источника.

Из формулы (2) видно, что интерференционный максимум нулевого порядка ($n = 0$) наблюдается в направлении геометрического отражения: $\psi = \varphi$. Положение этого максимума не зависит от длины волны. По обе стороны от него располагаются спектры первого порядка $n = \pm 1$, затем второго $n = \pm 2$ и т.д., вплоть до углов дифракции, близких к 90° (скользящий луч). Просматривая спектры, начиная от линии нулевого порядка, нетрудно определить, к спектру какого порядка относится та или иная линия, даже несмотря на то, что спектры второго и более высоких порядков почти всегда частично перекрываются.

Для наблюдения спектра и измерения длин волн решетку устанавливают на столик гониометра (описание прибора и правила его юстировки см. в приложении к описанию). Наводя трубу последовательно на изображение щели в неотклоненных лучах (при снятой со столика решетке) на линию нулевого порядка и интересующую нас спектральную линию, можно определить углы φ и ψ . Из Рис.4 видно, что угол α между направлением неотклоненного пучка и направлением на спектральную линию равен

$$\alpha = \pi - (\varphi + \psi)$$

а угол β между направлением на линию и направлением геометрического отражения (в нулевой порядок) равен

$$\beta = \psi - \varphi$$

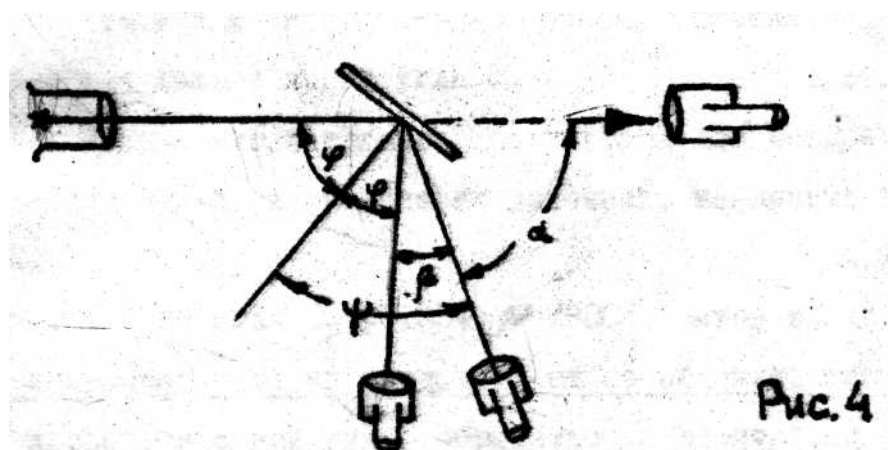
Углы φ и ψ вычисляются из этих уравнений. На практике, однако, этого можно не делать, так как после приведения формулы (2) к виду, удобному для логарифмирования², в нее входят непосредственно углы α и β . Имеем:

$$\sin \psi - \sin \varphi = 2 \cos \frac{\varphi + \psi}{2} \sin \frac{\psi - \varphi}{2} = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2}$$

Таким образом, формула для вычисления длины волны приобретает следующий окончательный вид:

$$\lambda = \frac{2d}{n} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

причем смысл углов α, β полезно запомнить по простой схеме **Рис.4**.



Порядок работы.

Дифракционная решетка представляет собой очень тонкий и дорогой прибор, и с ней нужно обращаться с величайшей осторожностью. Совершенно недопустимо прикасаться *чем бы то ни было* к поверхности решетки и, тем более, протирать ее. Получая решетку у дежурного лаборанта, студент должен проверить состояние ее поверхности (отсутствие царапин, следов пальцев и т.д.) и вернуть ее после работы в том же состоянии.

1. Юстировка гониометра (см. Приложение или [2]). Сфокусировать трубу и установить ее оптическую ось перпендикулярно оси гониометра; сфокусировать коллиматор и установить его оптическую ось перпендикулярно оси гониометра; установить нормальную ширину щели коллиматора; установить на столике решетку; добиться того, чтобы ее плоскость и направление штрихов были параллельны оси гониометра. Повернуть столик с решеткой в такое положение, чтобы можно было наблюдать возможно большее число порядков спектра (разумно поставить решетку под углом φ , близким к 45° , так чтобы с одной стороны от направления геометрического отражения наблюдался только спектр первого порядка, а с другой стороны – также и спектры более высоких порядков).

2. Измерение длин волн. Следует определить направления дифрагировавших лучей для всех линий спектра, отмечая для каждой линии ее цвет, интенсивность и номер порядка. При этом трогать столик и решетку в процессе измерений уже нельзя: угол падения должен оставаться постоянным. По окончании измерений снять решетку со столика и определить

² До появления электронных калькуляторов с длинной разрядной сеткой основным способом вычислений в оптической спектроскопии (с 7...8 значащими цифрами) являлись таблицы логарифмов и механические арифмометры.

направление неотклоненных лучей. Найти для каждой линии углы α и β и вычислить длину волны. В качестве окончательного результата для каждой длины волны следует привести среднее из значений, найденных в разных порядках.

Следует иметь в виду, что требования данной работы подразумевают довольно высокую точность измерений с относительной погрешностью на уровне не хуже $1 \cdot 10^{-6}$, поскольку шкала спектрогониометра позволяет отсчитывать углы с дискретностью порядка 1 угловой секунды. Это означает, что все юстировки и измерения должны проводиться с соответствующим уровнем точности. В частности, безусловно необходимо отсчитывать углы поворота зрительной трубы с компенсацией осевого боя угловой шкалы гониометра (т.е. с усреднением отсчетов по двум отсчетным приспособлениям).

Постоянная решетки $d = 3.333333$ мкм (300.0000 штрихов на миллиметр).

Литература

- [1] Е.И.Бутиков. Оптика. СПб., 1999.
[2]. В.А.Соловьев, В.Е.Яхонтова. Руководство к лабораторным работам по физике: Учеб.пособие. – СПб, Изд.СПб Университета, 1997. Изд.2-е. – 340 с., ил.

Приложение 1.

Устройство спектрогониометра.

Чертеж спектрогониометра ([2], стр.104) приведен на Рис.П1.

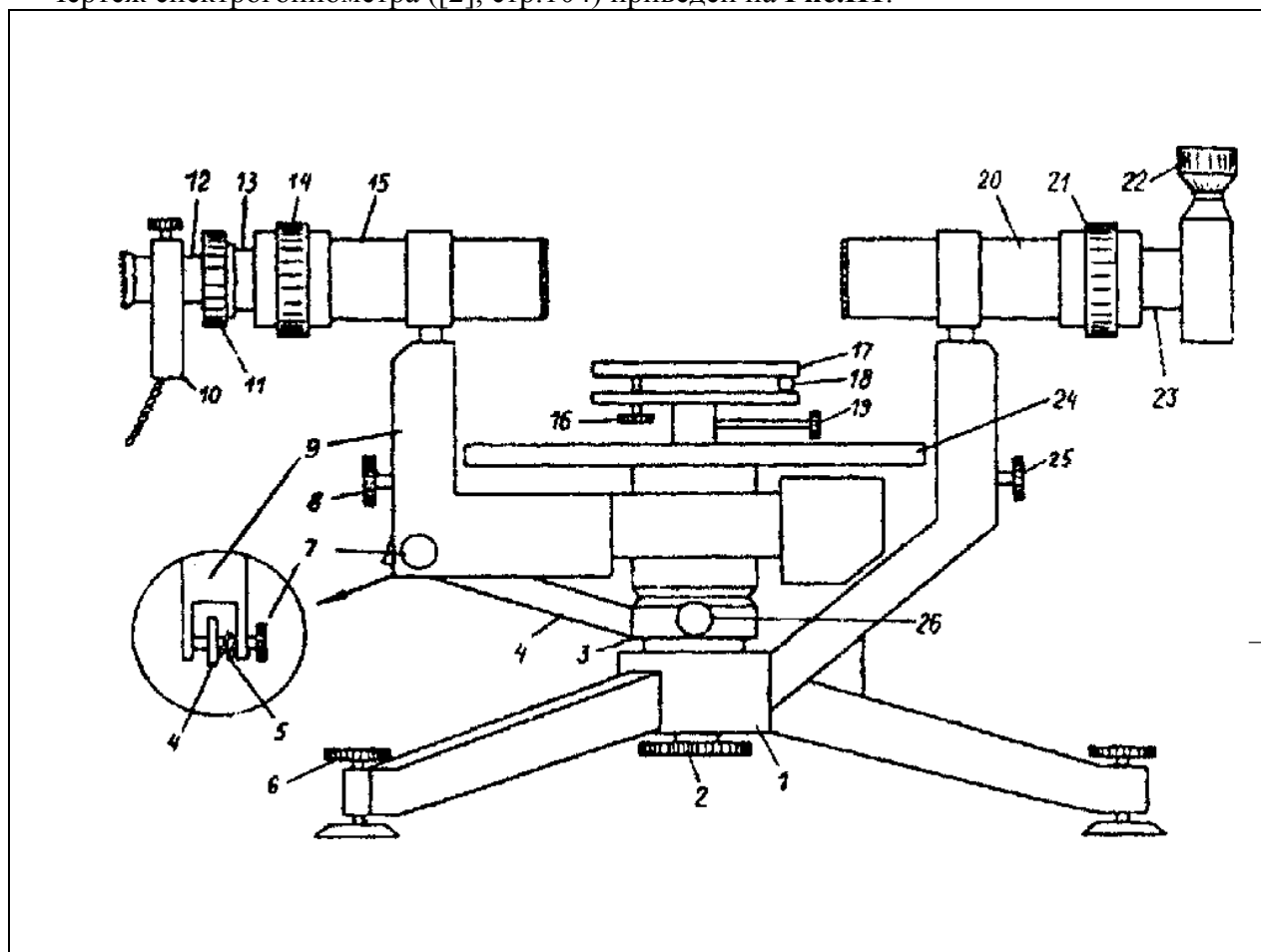


Рис.П1. Конструкция спектрогониометра

К массивной металлической треноге 1 привинчена вертикальная колонка, на которой смонтированы все основные детали гониометра: зрительная труба 15, лимб 24 для отсчета углов поворота трубы, столик 17 для установки призм, дифракционных решеток и т.д.,

коллиматор **20** для создания параллельного пучка лучей. Точно обработанные цилиндрические поверхности снаружи и внутри колонки задают общую вертикальную ось вращения для всех деталей гониометра, поворотом которых задаются измеряемые углы. Зрительная труба смонтирована на кронштейне **9**, который может свободно поворачиваться вокруг общей оси гониометра. Грубо труба устанавливается в нужном направлении рукой (поворачивать можно только за кронштейн, а не за трубу). Плавный поворот трубы в небольших пределах производится винтом **7**, проходящим через резьбовое отверстие в поводке **4**, укрепленном на кольце **3**. Конец винта упирается в одну из щек коробчатого кронштейна **9**, а пружина **5**, вставленная между поводком и другой щекой кронштейна, прижимает кронштейн к поводку. Если кольцо зажать винтом **26**, то при вращении винта **7** кронштейн с трубой поворачивается. При отпущенном винте **26** кольцо свободно вращается вокруг оси гониометра, не мешая грубой наводке трубы ^{*)}. Углы поворота трубы отсчитывают по лимбу с помощью двух нониусов. Винт **8** позволяет изменять наклон трубы и устанавливать ее оптическую ось перпендикулярно оси вращения (у некоторых гониометров труба в целом не наклоняется, а перемещается крест нитей окуляра, фиксирующий направление оптической оси). Точно так же винт **25** позволяет изменять наклон оптической оси коллиматора.

Зрительная труба гониометра представляет собой отсчетную трубу с автоколлимационным окуляром Гаусса. Возможность фокусировки трубы обеспечивается перемещением тубусов (**13** и **12**), в которых смонтированы крест нитей и собственно окуляр. Тубус креста **13** грубо перемещается рукой, а для тонкой наводки служит гайка **14**. Тубус окуляра **12** перемещается гайкой **11**. В кожухе **10** смонтирована лампочка, освещающая пластинку в окуляре Гаусса. Положение лампочки можно регулировать, отпуская зажимной винт кожуха.

Столик **17** укреплен на стержне, вставленном в трубчатую ось, проходящую в канал колонки гониометра. Столик можно поднимать и опускать винтом **2**, а также поворачивать вокруг общей оси гониометра, фиксируя угол поворота винтом **19**. Наклон столика можно изменять с помощью двух регулировочных винтов **16**. Третья точка его опоры (шарик **18**) фиксирована. Столик прижимается к винтам и шарик пружинами, которые на рисунке не показаны. На столик гониометра ставится исследуемый прибор (например, призма или дифракционная решетка), который нужно осветить параллельным пучком лучей. Для создания такого пучка служит коллиматор.

Коллиматор представляет собой трубу, на одном конце которой на выдвижном тубусе **23** помещается узкая щель, а на другом – объектив, превращающий расходящийся пучок лучей от каждой точки щели в параллельный. Фокусировка коллиматора осуществляется перемещением тубуса **23**; для плавной регулировки служит гайка **21**. Ширину щели можно изменять с помощью микрометрического винта **22**. Поворот барабана винта на одно деление изменяет ширину щели на 0.01 мм.

Приложение 2.

Методика юстировки гониометра

([2], стр.55-56, 106-109)

Фокусировка и установка трубы. В гониометре труба должна быть сфокусирована на бесконечность и установлена так, чтобы ее оптическая ось была строго перпендикулярна оси гониометра (т.е. оси вращения трубы и столика). Для фокусировки трубы можно было бы навести ее на какой-либо удаленный предмет, но трубу с автоколлимационным окуляром Гаусса лучше фокусировать при автоколлимационном ходе лучей. Для фокусировки и установки трубы используют плоскопараллельную пластинку с хорошо отражающими (полированными) гранями. Пластинку устанавливают на столике гониометра.

Порядок операций следующий. Прежде всего фокусируют окуляр трубы на крест нитей. После этого освещают крест лампой через боковое отверстие окуляра; лампу нужно устанавливать так, чтобы свет, отраженный от полупрозрачной пластинки, был направлен по

^{*)} Встречаются и другие, хотя в общем, сходные, механизмы тонкой наводки

оси трубы (правильность установки лампы можно проверить, глядя в трубу со стороны объектива). Плоскопараллельную стеклянную пластинку устанавливают на столике так, чтобы ее плоскость была приблизительно перпендикулярна оси трубы, тогда в трубу можно будет видеть пятно отраженного от пластинки света. (Если труба имеет большое увеличение, то при установке отражающей поверхности на глаз отраженный свет обычно не попадает в поле зрения; однако небольшими поворотами и наклонами столика нетрудно найти нужное положение этой поверхности.) После этого находят такое положение объектива (вдвигая или выдвигая тубус), при котором изображение креста нитей в отраженном свете будет резко видно. Затем, поворачивая и наклоняя столик, добиваются совпадения креста нитей с его изображением (при этом, если труба не перпендикулярна оси, то и пластинка оказывается непараллельной оси столика). После этого столик поворачивают на 180° . Очевидно, что после поворота пластинка уже не будет перпендикулярна оси трубы и крест нитей уже не будет совпадать со своим изображением. Изменив наклон трубы, уничтожают **половину** расхождения между положениями креста и его изображения; вторую же половину расхождения уничтожают, изменяя наклон столика. Затем вновь поворачивают столик на 180° и так поступают до тех пор, пока поворот столика не перестанет вызывать расхождение между положениями креста и его изображения. Тогда плоскость пластинки будет параллельна оси столика, а ось трубы – перпендикулярна ей.

Освещение и фокусировка коллиматора. Для освещения щели коллиматора следует направить его на источник света, перемещая треногу гониометра и регулируя ее высоту и наклон установочными винтами-ножками. Оптическая ось коллиматора должна быть направлена в центр источника света, и весь объектив коллиматора должен быть заполнен светом. Это можно проверить, поместив у объектива коллиматора лист бумаги. Осветив щель, наблюдают ее изображение в предварительно (см. предыдущий пункт) сфокусированную на бесконечность зрительную трубу (коллиматор и зрительная труба должны быть установлены объективами "навстречу" друг другу). Вдвигая и выдвигая тубус объектива коллиматора (но не зрительной трубы!), добиваются максимальной резкости изображения щели. Окончательная установка проверяется по отсутствию параллакса (движения изображения при перемещении зрачка глаза относительно окуляра зрительной трубы).

Установка коллиматора. Оптическая ось коллиматора устанавливается перпендикулярно оси гониометра так, чтобы изображение щели симметрично располагалось в поле зрения правильно установленной зрительной трубы. При высокой щели, изображение которой не помещается в поле зрения трубы, эту установку трудно выполнить с большой точностью. Для облегчения задачи поперек щели натянута нить, изображение которой следует совместить с центром креста нитей трубы.

После установки коллиматора следует еще раз проверить заполнение его объектива светом и, если нужно, исправить наклон коллиматора.

Установка решетки. Решетку ставят на столик гониометра так, чтобы ее поверхность была параллельна оси вращения. Для этого наводят трубу с автоколлимационным окуляром поочередно на нее и, действуя регулировочными винтами столика, устанавливают ее перпендикулярно оптической оси трубы (которая, конечно, должна быть уже установлена перпендикулярно оси гониометра).

Затем добиваются параллельности штрихов решетки по отношению к оси гониометра. Для этого необходимо обеспечить, чтобы изображения штрихов в различных порядках дифракции находились на равной высоте в поле зрения. Для более точного выполнения этой юстировки в конструкции гониометра предусмотрена специальная горизонтальная нить, пересекающая щель коллиматора посередине. Штрихи выставлены параллельно оси, если изображение этой нити во всех порядках совмещено с крестом нитей окуляра. После выполнения этой юстировки необходимо скорректировать положение поверхности решетки и повторить эти операции в цикле по методу последовательных приближений, если обнаруживается, что одна из юстировок нарушает другую. Для уменьшения их взаимного влияния следует выставить плоскость решетки на столике перпендикулярно одной из горизонтальных осей, вокруг которых вращается столик при его подъюстировке винтами.