

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

АМПЛИТУДНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Выполнил:
Деревянченко Михаил
Группа:
Б03-106

Долгопрудный, 2023

1. Аннотация

Целью данной работы являются:

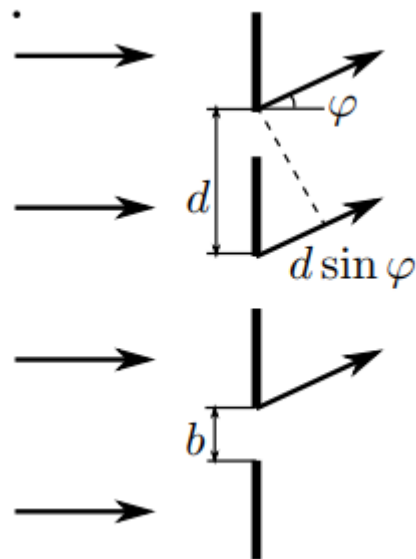
1. Знакомство с работой и настройкой гониометра;
2. Определение спектральных характеристик амплитудной решётки.

2. Теоретические сведения

2.1 Амплитудная дифракционная решетка

Амплитудную решётку можно представить в виде непрозрачного экрана, в котором прорезано большое число N параллельных щелей — штрихов. Постоянство расстояний между штрихами d (период решётки, или шаг решётки) и шириной штриха b должно выдерживаться с большой точностью.

Наблюдение изображения спектра проводится с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность (дифракции Фраунгофера на штрихах решётки). В этом случае амплитуда и интенсивность поля световой волны определяются углом φ между нормалью к решётке и направлением дифрагировавших лучей. Будем считать, что амплитуды всех интерферирующих волн одинаковы, т. е. фиксирована амплитуда падающей волны и постоянна площадь всех штрихов. Интенсивность дифрагированного света максимальна для углов φ_m , при которых волны, приходящие в точку наблюдения от всех щелей, оказываются в фазе:

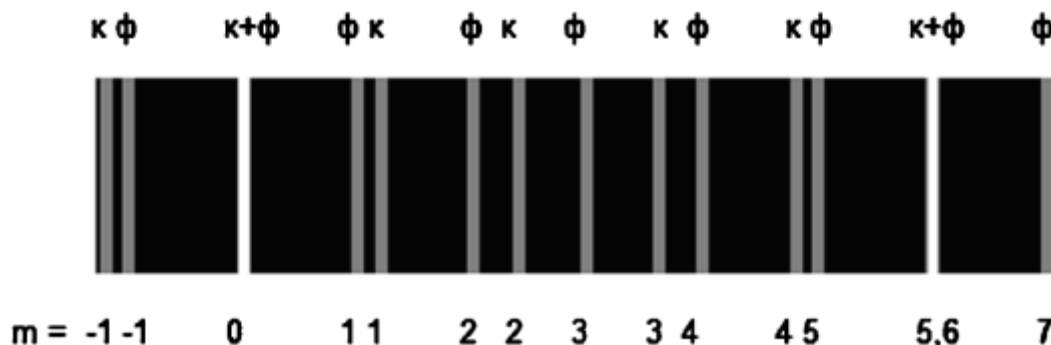


$$d \sin \varphi_m = m \lambda$$

Величина $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ называется порядком спектра.

Рассмотрим качественный пример. Пусть падающее на решётку излучение содержит две спектральные линии одинаковой интенсивности. Одну линию условно назовем «красной», а другую «фиолетовой». Длина волны «красной» линии больше, чем длина волны «фиолетовой». Для угла дифракции $\varphi_0 = 0$ ($m = 0$), когда ось зрительной трубы параллельна оси коллиматора, наблюдается наложение изображений входной щели коллиматора в «красном» и «фиолетовом» цвете друг на друга. При повороте зрительной трубы вокруг решётки в поле зрения возникает «фиолетовая» щель коллиматора, затем «красная» и т. д. Для малых углов дифракции φ_m угловое расстояние между порядками $\varphi_{m+1} - \varphi_m \approx \lambda/d$ пропорционально длине волны, поэтому «фиолетовые»

линии следуют чуть чаще, чем «красные», и возможна ситуация, когда они вновь налагаются друг на друга.



2.2 Угловая дисперсия спектральных приборов

Угловая дисперсия $D(\lambda)$ характеризует угловое расстояние между близкими спектральными линиями:

$$D(\lambda) = \frac{d\varphi}{d\lambda}$$

В современных приборах спектроскопии регистрация изображения спектров проводится не глазом, а линейкой или матрицей чувствительных к свету элементов. Угловая дисперсия позволяет определить минимальное расстояние между ячейками приёмного устройства: если требуется разрешить две спектральные линии с разностью длин волн $\delta\lambda$, то расстояние между элементами приемного устройства должно быть заметно меньше $D \delta\lambda f$, где f — фокусное расстояние объектива зрительной трубы.

Амплитудная решетка.

Выражение для угловой дисперсии дифракционной решётки:

$$D(\lambda) = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi} = \frac{m}{\sqrt{d^2 - (m\lambda)^2}}$$

Дисперсия возрастает с увеличением порядка спектра. Для малых углов дифракции $\varphi \ll 1$ дисперсия пропорциональна порядку спектра: $D \approx m/d$.

2.3 Разрешающая способность

Рассмотрим изображения спектра для двух узких спектральных линий с длинами волн λ и $\lambda + \delta\lambda$. Для минимального значения $\delta\lambda$, которое может быть определено по результатам измерений, вводят важнейшую характеристику спектрального прибора — разрешающую способность:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

Рассмотрим физические ограничения разрешающей способности. Начнём уменьшать размер щели. В начале этого процесса будет уменьшаться интенсивность линий и их ширина. Начиная с некоторого момента будет уменьшаться только интенсивность, а ширина линий изменяться не будет. Достигнут физический предел ширины линии, и он определяется дифракцией света на апертуре решётки.

Для сравнения между собой различных спектральных приборов Релей предложил приравнять полуширину $\delta\phi$ (угловое расстояние между максимумом линии и её первым нулем) и расстояние между линиями $\Delta\phi$. Критерий Релея удобен для различных оценок. Согласно ему для дифракционных решёток разрешающая способность определяется порядком спектра и числом штрихов:

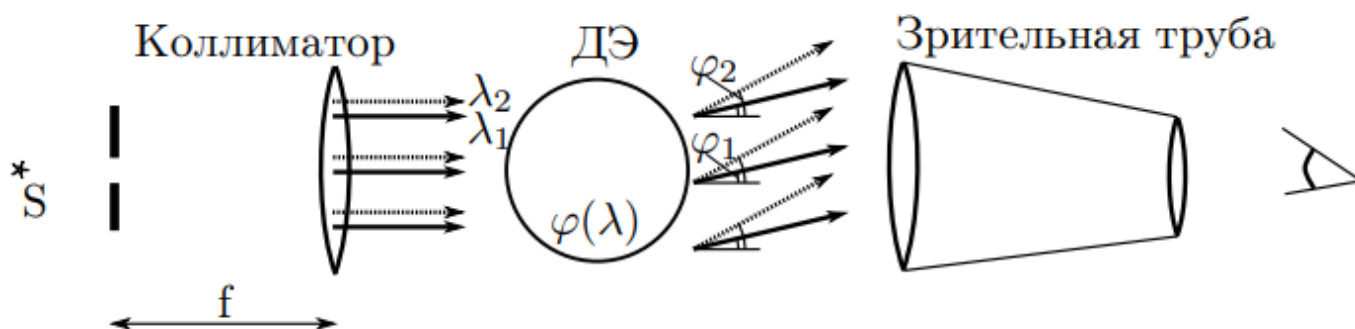
$$R = Nm$$

Здесь под N следует понимать число одновременно работающих штрихов решётки, которое, вообще говоря, не равно суммарному числу штрихов освещённого участка решётки. Число штрихов N определяется качеством реплики, размером источника света и т. д.

3. Экспериментальная установка

Принципиальная схема установки для изучения спектров приведена на рисунке снизу. Свет от источника S попадает на экран, в котором имеется отверстие в виде щели. Экран располагают в фокальной плоскости линзы или системы линз. Коллиматор формирует пучок света, близкий к параллельному. После коллиматора пучок лучей попадает на диспергирующий элемент (ДЭ):

амплитудную или фазовую дифракционную решётку, интерферометр Фабри–Перо или призму. Наблюдаются изображения с помощью зрительной трубы, установленной на бесконечность.



Если удалить из схемы диспергирующий элемент, а коллиматор и зрительную трубу расположить на одной оси, то можно увидеть чёткое изображение входной щели коллиматора.

Диспергирующий элемент перераспределяет интенсивность падающего на него излучения по углам в зависимости от длины волны: каждой монохроматической компоненте излучения с длиной волны λ соответствует один или несколько углов $\varphi(\lambda)$ на выходе прибора, в направлении которых интенсивность прошедшей волны максимальна. Иными словами, диспергирующий элемент пространственно разделяет монохроматические составляющие падающего на него излучения, осуществляя тем самым его физическое разложение по спектру. При известной зависимости $\varphi(\lambda)$ по измеряемому углу поворота φ зрительной трубы можно определить длину волны спектральной линии.

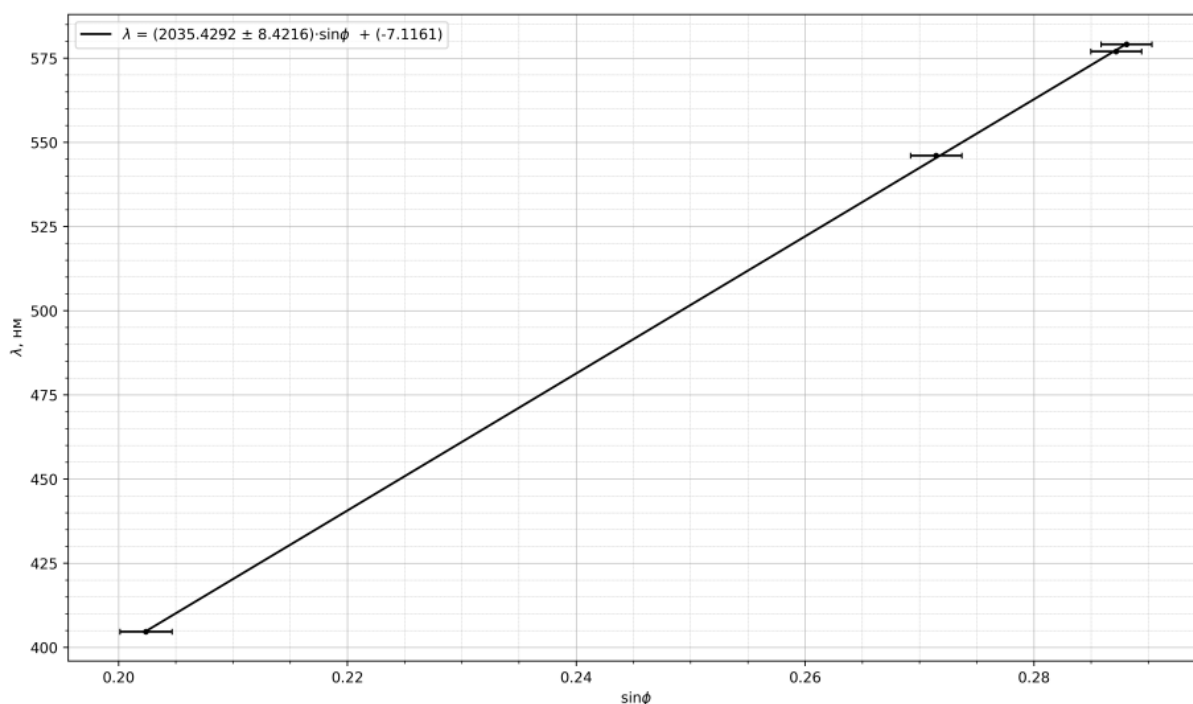
Каждый спектральный прибор предназначен для решения конкретной задачи спектроскопии. Выбор прибора для исследования спектра какого-либо источника должен заключаться в сравнении его характеристик с требуемыми. Наиболее важными характеристиками являются угловая дисперсия, разрешающая способность (о которых написано в теоретических сведениях) и дисперсионная область.

Дисперсионная область (или область дисперсии) — предельная ширина спектрального интервала $\Delta\lambda$ прибора, для которой дифракционные максимумы соседних порядков не перекрываются. Она определяет диапазон длин волн, при которых прибор может быть использован для анализа спектра.

4. Проведение измерений и обработка результатов

В начале проводим настройку/юстировку гониометра. Далее измеряем угловые координаты спектральных компонент ртути первого порядка.

Цвет	$\lambda, \text{нм}$	φ
Фиолетовый	404.7	11°40'36"
Зеленый	546.1	15°45'2 "
Желтый 1	577.0	16°44'21"
Желтый 2	579.1	16°44'35"



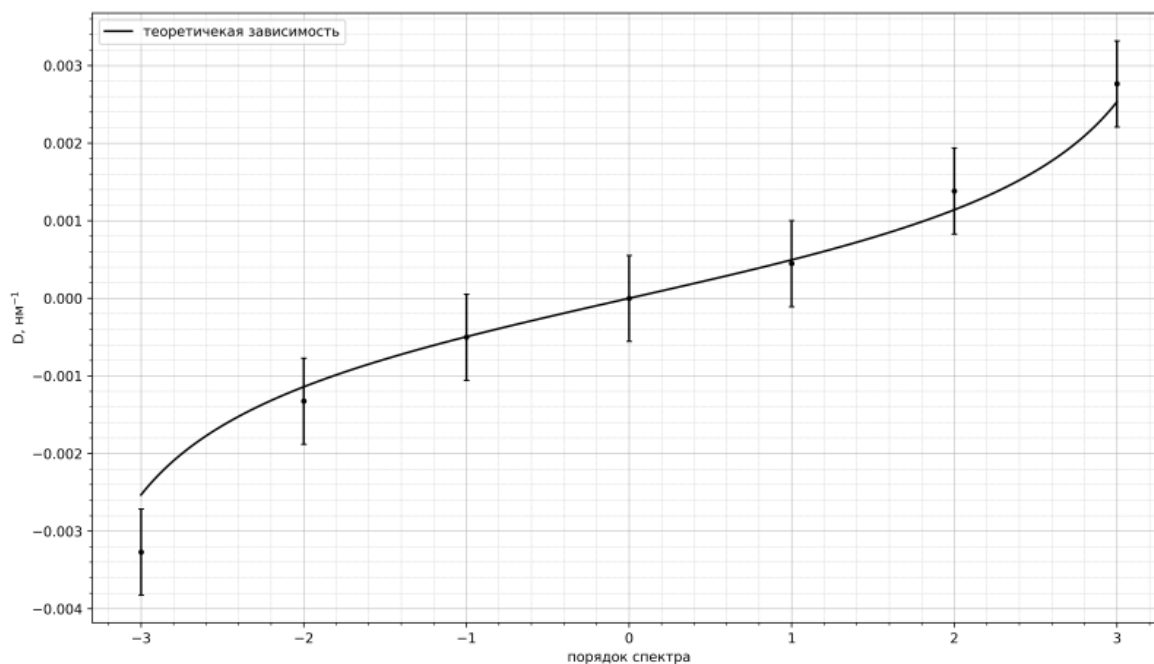
По полученным значениям строим график зависимости λ от $\sin \varphi$, учитывая, что измерения проводились для номера порядка спектра $m = 1$. Он является линейным (что соответствует теории), откуда получаем расстояния между штрихами

$$d = \frac{\lambda}{\sin \varphi} = 2.10 \pm 0.03 \text{ мкм}$$

Далее значения угловой дисперсии в разных порядках спектра. В качестве приращения длины волн возьмём разность длин волн между близкими друг к другу жёлтыми компонентами ртути.

m	φ_1(1 желтая полоса)	φ_2(2 желтая полоса)	dφ
-3	61°24'30"	61°48'6"	-0°23'36"
-2	35°34'21"	35°43'55"	0°9'34"
-1	16°46'22"	16°49'59"	0°3'37"
0	0°0'1"	0°0'1"	0°0'0"
1	16°41'21"	16°44'35"	0°3'14"
2	34°54'41"	35°4'40"	0°9'59"
3	58°35'33"	58°55'30"	0°19'57"

По измеренным данным строим график зависимости угловой дисперсии D от порядка спектра m.



Полученные точки графика(кроме 1) с учетом погрешности ложатся на теоретическую кривую $D(\lambda) = \frac{m}{\sqrt{d^2 - (m\lambda)^2}}$. Неточность может быть связана с неидеальной настройкой положения решетки(она может быть не перпендикулярна столику с маленькой погрешностью, но даже она может внести вклад в итоговый результат).

Наконец, оценим разрешимый спектральный интервал. Измерим координаты границ желтой спектральной линии ртути для порядков m = -1, -2, -3.

m	φ_1	φ_2	$\Delta\varphi$
-3	58°35'1''	58°35'58''	0°0'57''
-2	34°53'49''	34°54'23''	0°0'34''
-1	16°41'52''	16°41'47''	0°0'5''

Усредняя полученные значения получаем $\Delta\varphi = (12 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}$ радиан и $\delta\lambda = (0.240 \pm 0.006)\text{нм}$.
Отсюда получаем разрешающую способность:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = 2409 \pm 57$$

Число эффективно работающих штрихов решётки:

$$N = \frac{R}{m} = (m = 1) = 2409 \pm 57$$

Эффективный размер:

$$L = N * d = 5.00 \pm 0.15 \text{ мм}$$

5. ВЫВОД

В данной работе мы ознакомились с оптическим прибором для исследования спектров - гониометром, исследовали зависимости распределения спектральных линий, вычислили разрешающую способность прибора, угловую дисперсию, характерное число эффективно работающих штрихов.

В работе предполагалось наблюдение фиолетовой, зеленой, желтой, синей и красной линий (спектр ртути), но были замечены только первые 3. Это может быть связано с тем, что последние 2 были довольно сильно смещены по вертикали, что опять же объясняется неидеальной перпендикулярностью решетки и столика. Но несмотря на многочисленные корректировки положения системы и изменения наклона коллиматора и зрительной трубы, их обнаружить не удалось.