

Лабораторная работа 4.4.2 Фазовая дифракционная решётка

Балдин Виктор

19 февраля 2025 г.

1 Аннотация

В данной работе проводится знакомство с работой и настройкой гониометра Г5, определение спектральных характеристик фазовой решётки (эшелетта) и исследование спектра ртутной лампы.

2 Теоретические сведения

В современных спектральных приборах широко используются отражательные решётки с треугольным профилем штриха (рис. 1), они способны концентрировать до 70–80% падающего излучения в рабочий порядок спектра. Отражательная решётка, в которой угол Ω между рабочей гранью и плоскостью решётки не превышает 20° , называется эшелеттом. Для эшелетта, варьируя угол скоса и шаг решётки, получают рабочий порядок $m_p \leq 10$.

Найдём разность хода между лучами на рис. 1. Условие возникновения спектра порядка m :

$$AC - BD = d(\sin \varphi m - \sin \psi) = m\lambda, \quad (1)$$

где ψ – угол падения от нормали к решётке, φ – угол дифракции. Для нулевого порядка $\varphi_0 = \psi$. В отличие от амплитудной решётки, нулевой порядок не будет самым ярким. Угол φ_6 – угол блеска, соответствующий максимуму интенсивности света, равен углу зеркального отражения падающей волны от одной ступеньки:

$$\varphi_6 = \psi + 2\Omega.$$

Для эшелетта рабочим порядком спектра m_p будет то целое число, которое соответствует минимальной ошибке решения уравнения $d \sin \varphi_m - \sin \psi = 0$.

Считая, что эшелетт работает в автоколлимационном режиме, то есть свет падает перпендикулярно рабочей грани решётки ($\psi = -\Omega$) и отражается в обратном направлении ($\varphi = \Omega$), тогда

$$2d \sin \Omega = m_p \lambda_p. \quad (2)$$

В автоколлимационном режиме дифракция на одной ступеньке-зеркальце описывается так же, как и дифракция на отдельной щели амплитудной решётки с максимумом вблизи $\varphi \approx 0$. В отличие от амплитудной решётки, нумерацию порядков для амплитудной решётки, следует сместить на величину m_p .

2.1 Расчётные формулы

Основные формулы, используемые в работе: (1), (2).

3 Оборудование и инструментальные погрешности

Гониометр: $\Delta = \pm 1''$

Эшелетт: $\lambda_p = 500 \text{ nm}$ в 1-м порядке.

Ртутная лампа

4 Ход работы

4.1 Качественные наблюдения

Удерживая эшелетт в вытянутой руке, найдите отражённое изображение нити лампы накаливания, расположенной за вашей спиной. Вращая эшелетт, наблюдайте спектры различных положительных и отрицательных порядков. Определите рабочий порядок, в котором спектр наиболее интенсивен. Отметьте

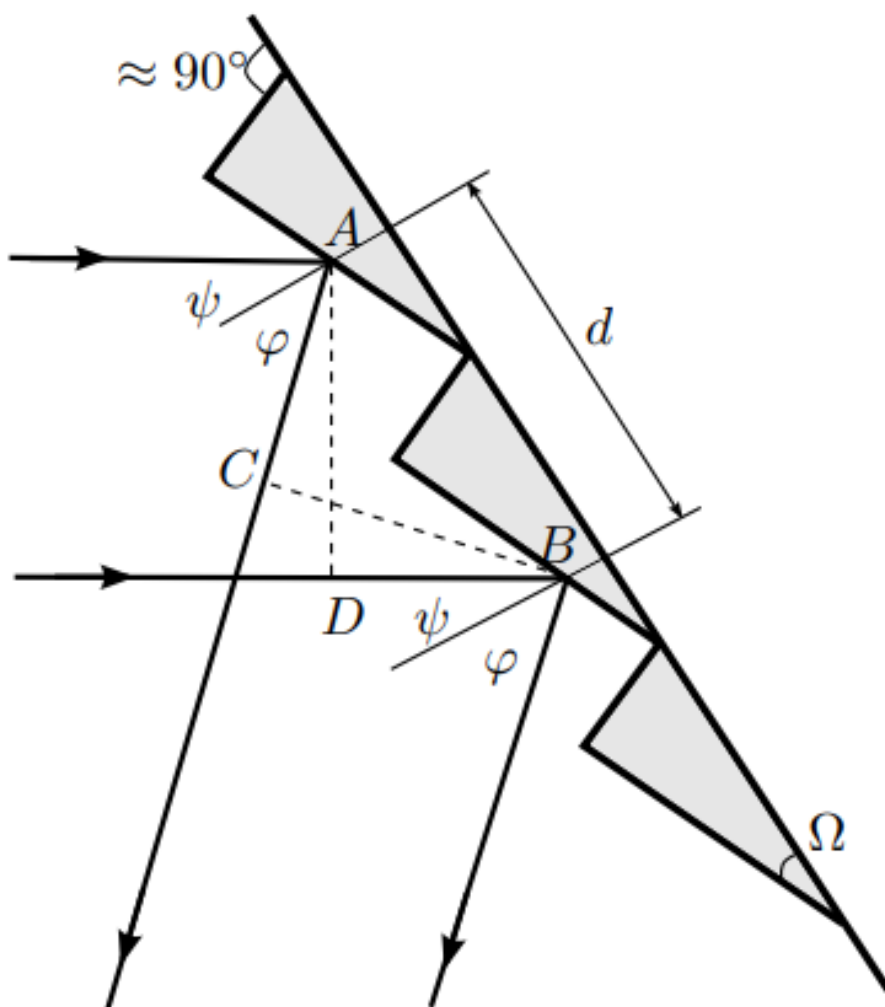


Рис. 1: Профиль фазовой дифракционной решётки; дифракция световой волны

ориентацию направлений: источник света–эшелетт, эшелетт–направление на рабочий спектр. При проведении опытов это будут направления: коллиматор–эшелетт, эшелетт–зрительная труба. Отметьте, в каких порядках спектры начинают перекрываться. Оцените для этих порядков дисперсионную область и сравните её с (4.21) для средней длины волны 500 нм и полуширины 200 нм, что соответствует наблюдению глазом излучения лампы накаливания. Запишите паспортные данные эшелетта: рабочий порядок m , рабочую длину волны λ_p .

4.2 Установка эшелетта

Основание оправы эшелетта и его ступеньки могут быть не перпендикулярны друг другу, поэтому плоскость столика следует немного наклонить.

1. Настройте зрительную трубу на наблюдение входной щели коллиматора, вертикальный размер изображения щели должен быть менее половины поля зрения, рекомендуемый начальный отсчёт угла 180° . Вам известны направления: ось коллиматора–эшелетт–рабочий порядок, поверните алидаду на 120° от начального положения, направление вращения, вправо или влево, должно позволить наблюдать рабочий порядок.
2. Поставьте эшелетт на столик рабочей поверхностью к коллиматору так, чтобы эшелетт был параллелен одному из винтов 8 и перпендикулярен другому. Вращая только верхнюю часть столика, освободив винт 27 (винт 26 закреплён, чтобы не сбился начальный отсчёт угла), найдите ахроматическое (белое) изображение щели коллиматора, отражённое от эшелетта (спектр нулевого порядка). При этом угол падения света на плоскость эшелетта $\psi = (180^\circ - 120^\circ)/2 = 30^\circ$.
3. Винтом 8, перпендикулярным плоскости эшелетта, совместите центр изображения щели с горизонтальным штрихом отсчётного креста окуляра зрительной трубы. Отводя алидаду от коллиматора, найдите изображение линии в дальнем порядке и вторым винтом 8, параллельным плоскости эшелетта, устраните вертикальное расхождение. Вернитесь к ахроматическому изображению и уточните положение винтов 8 по приведённой процедуре. Допустимое вертикальное смещение линий – менее трети радиуса поля зрения.

4.3 Исследование спектра ртутной лампы

1. Подберите ширину входной щели коллиматора, при которой ширина линий жёлтого дублета чуть больше промежутка между линиями двойного штриха зрительной трубы. Установите высоту щели, удобную для измерений (при короткой щели плохо виден двойной штрих, при слишком высокой – мешает кривизна изображения).
2. Для угла падения $\psi = 30^\circ$ измерьте угловые координаты спектральных линий ртути в рабочем порядке. Примерное расположение и относительная яркость основных линий приведены в Приложении (рис. П4.4, табл. 1).
3. Для оценки разрешающей способности спектрального прибора измерьте угловую ширину одной из линий жёлтого дублета (по нулям интенсивности). Ширина щели коллиматора должна быть минимальной, позволяющей провести измерения.
4. Для установленного угла падения $\psi = 30^\circ$ измерьте угловые координаты жёлтого дублета во всех наблюдаемых порядках, положительных и отрицательных. Эти данные позволят оценить дисперсию в различных порядках спектра для фиксированного угла падения.
5. Измерьте угловые координаты линий жёлтого дублета в рабочем порядке для углов падения 45° и 60° . Для больших углов падения есть возможность найти изображение автоколлимационного креста, отражённого от эшелетта. В этом положении ось зрительной трубы перпендикулярна плоскости эшелетта, и можно ввести ещё одно удобное начало отсчёта углов. Например, угол падения света равен углу наблюдения ахроматической полосы, отсчитанному от нового начала. Обратите внимание на появление спектров больших отрицательных порядков при увеличении угла падения света.
6. Эшелетт, ширина штриха которого сравнима с длиной волны, поляризует отражённый свет. Проведите следующий эксперимент. Используя отдельный эшелетт с плотностью штрихов 1200 штрихов/мм (полное число штрихов 180 000, ширина отдельного штриха меньше 1 мкм), а в качестве источника излучения – свет настольной лампы (излучение имеет случайную поляризацию), определите с помощью поляроида преимущественное направление колебания электрического вектора в первом порядке спектра. Как связаны между собой это направление и ориентация штрихов? Объясните этот эффект.

5 Результаты измерений и обработка данных

Все измерения и расчёты в СИ.

Произведём юстировку гониометра и установим начало отсчёта, руководствуясь техническим описанием.11321

Держа эшлет в вытянутой руке, найдём отражение лампы накаливания, вращая эшелет вокруг оси, рассмотрим спектры положительных и отрицательных порядков; определим рабочий порядок; оценим дисперсионную область и сравним её с шириной спектра лампы:

Средние значения:

$$\lambda = 600 \text{ нм}; \quad \Delta\phi = 200 \text{ нм};$$

$$G = \frac{\lambda}{m} = 200 \text{ нм}; \quad \text{Рабочий порядок } m_p = -1.$$

Прделаем дополнительную настройку столика с эшелетом; установим $\psi = 30^\circ$; подберём ширину входной щели так, чтобы хорошо разрешались линии жёлтого дублета (ширина изображения щели чуть больше промежутка между линиями двойного штриха); установим высоту щели, удобную для измерений.

Для угла $\psi = 45^\circ$ измерим угловые координаты спектральных линий ртути в рабочем порядке. Отметим главную координату каждой из описанных линий:

Ахроматический	$93^\circ 10' 30''$	
Фиолетовый	$75^\circ 36' 45''$	4047 \AA
Синий	$74^\circ 23' 45''$	4358 \AA
Голубой	$72^\circ 15' 35''$	4916 \AA
Зелёный	$70^\circ 12' 35''$	5461 \AA
Желтый 2	$69^\circ 3' 25''$	5770 \AA
Жёлтый 1	$68^\circ 58' 35''$	5791 \AA

Для оценки разрешающей способности измерим ширину одной из линий жёлтого дублета и рассчитаем аппаратную полуширину линии $\Delta\lambda$:

$$\text{Ширина линии: } 68^\circ 2' 10'' - 68^\circ 2' 0'' = 10''$$

$$\Delta\lambda = \frac{1}{3} \text{ \AA}; \quad R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{5770}{20} \cdot 60 = 17810$$

Для угла $\psi = 30^\circ$ измерим координаты каждой из жёлтых линий во всех наблюдаемых порядках:

$I_{\text{пол}}$	λ_1	$89^\circ 3' 55''$
	λ_2	$88^\circ 55' 45''$
$I_{\text{отр}}$	λ_1	$39^\circ 50' 55''$
	λ_2	$39^\circ 55' 25''$

Повторим измерения для $\psi = 45^\circ, 60^\circ$:

$I_{\text{отр}}$	λ_1	$68^\circ 58' 35''$
	λ_2	$69^\circ 3' 35''$
$II_{\text{отр}}$	λ_1	$48^\circ 32' 15''$
	λ_2	$48^\circ 40' 50''$

Таблица 1: $\psi = 45^\circ$

$I_{\text{отр}}$	λ_1	$92^\circ 15' 5''$
	λ_2	$92^\circ 20' 15''$
$II_{\text{отр}}$	λ_1	$70^\circ 51' 45''$
	λ_2	$71^\circ 0' 35''$
$III_{\text{отр}}$	λ_1	$50^\circ 51' 5''$
	λ_2	$51^\circ 4' 45''$

Таблица 2: $\psi = 60^\circ$

Зависимость разрешающей силы от ширины пучка:

Натроем зрительную трубу на желтый дублет в рабочем порядке; определим начало отсчёта — момент открытия щели. Крест появляется при $59^{\circ}57'20''$; ширина щели — 3 деления.

Откроем щель пошире; уменьшая ширину щели, добьемся предельного разрешения желтого дублета, оценим число штрихов:

$$n \approx 1600 \text{ штр/мм}; \quad \Delta\lambda = 2\text{Å}.$$

Построим график зависимости $\sin \varphi_m = f(\lambda)$ и по углу наклона определим период эшелета: Угол наклона

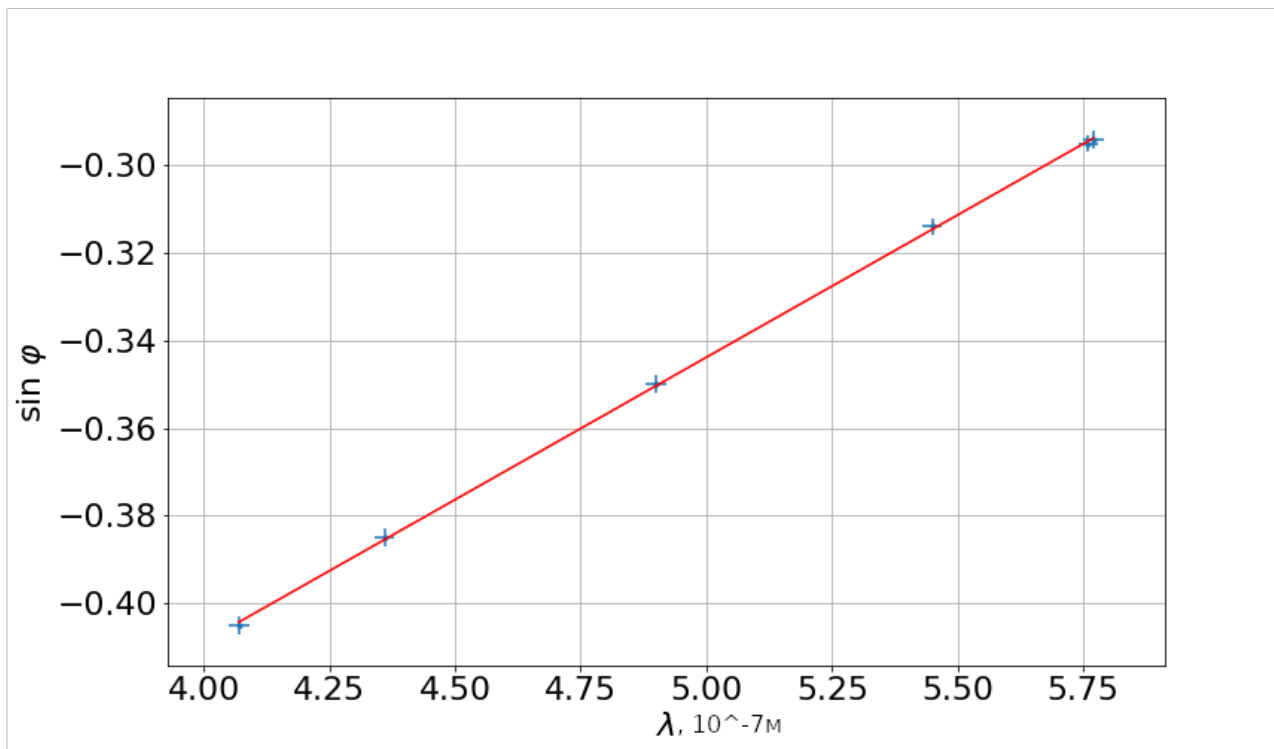


Рис. 2: *

Зависимость $\sin \varphi_m$ от λ

графика $k = (6.5 \pm 0.1) \cdot 10^6$

Число штрихов $n \approx 650 \pm 10$ штр/мм

Период эшелета: $d = \frac{1}{0.65} = 1.53 \pm 0.04$ мм.

Угловая дисперсия в рабочем порядке для жёлтого дублета в угловых секундах на Å:

$$D = 14.3 \frac{\text{угл} \cdot \text{сек}}{\text{Å}}$$

Экспериментальная разрешающая способность:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 2890$$

5.1 Оценка погрешностей

Как и обычно, оценка инструментальных погрешностей проводится по общей формуле (с частными производными); в экспериментах с несколькими измерениями случайные погрешности существенно превалируют над инструментальными.

6 Вывод

Судя по расхождению экспериментальных данных с теоретическими, при снятии показаний гониометра, несмотря на его точность, были допущены ошибки, в частности, при измерении расстояния между жёлтыми спектральными линиями. Отчасти это связано с неудобством снятия показаний.

Тем не менее, удалось с неплохой точностью найти характеристики дифракционной решётки и исследовать спектр ртутной лампы.

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 4 Оптика*, 2004
- [2] Кириченко Н. А. *Принципы оптики*, 2014
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Оптика: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева