

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ИЗУЧЕНИЕ МОНОХРОМАТОРА

Цель работы: знакомство с устройством призмного монохроматора УМ-2, его градуировка, построение дисперсионной кривой, определение неизвестного газа по его спектру.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Спектральные приборы выполняют физическое разложение излучения на монохроматические составляющие. Математически это выполняется с помощью преобразования Фурье.

Спектральные приборы по назначению делятся на несколько типов: *спектрографы, спектрофотометры и монохроматоры*. Спектрографами называются приборы, предназначенные для фотографической регистрации излучения. Спектрофотометры позволяют измерять распределение энергии по частотам (длинам волн). Монохроматором называется спектральный прибор, выделяющий излучение в некотором, обычно довольно узком интервале длин волн $\Delta\lambda$, который можно непрерывно перемещать по спектру.

Главным элементом спектральных приборов является диспергирующий элемент. Диспергирующий элемент (D_3) осуществляет пространственное разделение излучения разных длин волн. В зависимости от типа D_3 выделяют призмные, дифракционные приборы, а также приборы с высокой разрешающей способностью: интерферометры Фабри-Перо, Майкельсона.

Основная схема спектрального прибора выглядит следующим образом.

Камерный объектив L_2 создает реальное изображение входной щели для каждой λ_i в разных местах фокальной плоскости.

Рассмотрим основные характеристики спектральных приборов.

2. *Дисперсия* материала, из которого изготовлена призма

$$D = \frac{dn}{d\lambda}$$

определяет отношение изменения показателя преломления dn при изменении длины волны излучения от λ до $\lambda+d\lambda$ к величине спектрального интервала $d\lambda$.

Угловая дисперсия

$$D_\phi = \frac{d\phi}{d\lambda},$$

где $d\phi$ — изменение угла дисперсии при изменении длины волны света λ на величину $d\lambda$.

Линейная дисперсия $D_l = \frac{dl}{d\lambda}$,

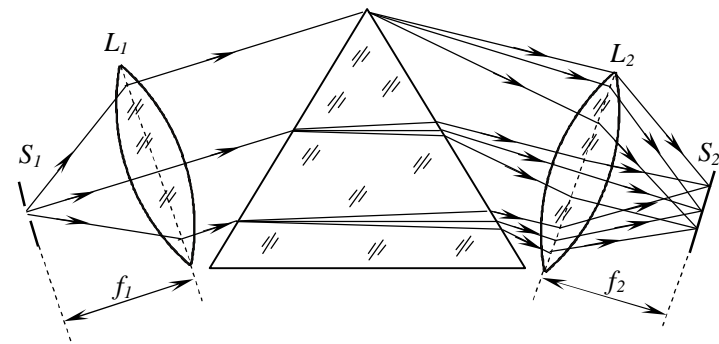


Рис. 5.1. Общая схема спектрального прибора.

Принятые обозначения: L_1 — коллиматорный объектив, S_1 — входная щель, D_3 — диспергирующий элемент, L_2 — камерный объектив, S_2 — выходная щель

где dl — расстояние между центрами монохроматических изображений щели спектральных линий, отстоящих на интервал длин волн $d\lambda$.

Идеальный спектральный прибор — прибор, который не вносит искажения в распределение энергии спектральной линии, попадающей на входную щель. Реальные спектральные приборы вносят существенные изменения в это распределение и как правило приводят к уширению спектральных линий.

Основные причины этого — дифракция света на входной щели, которая имеет конечную ширину, aberrации оптических систем, влияние системы регистрации.

Совокупное действие спектрального прибора характеризуется аппаратной функцией (инструментальным контуром) $f(I)$, $f(\phi)$, или $f(x)$ (рис. 2). Чем более узкая инструментальная

функция, тем меньше искажений вносит прибор. Функцию $f(\lambda)$, $f(\varphi)$, или $f(x)$ принято нормировать к единице, т.е.

$$\int f(x) dx = 1, \int f(\varphi) d\varphi = 1 \text{ или } \int f(\lambda) d\lambda = 1.$$

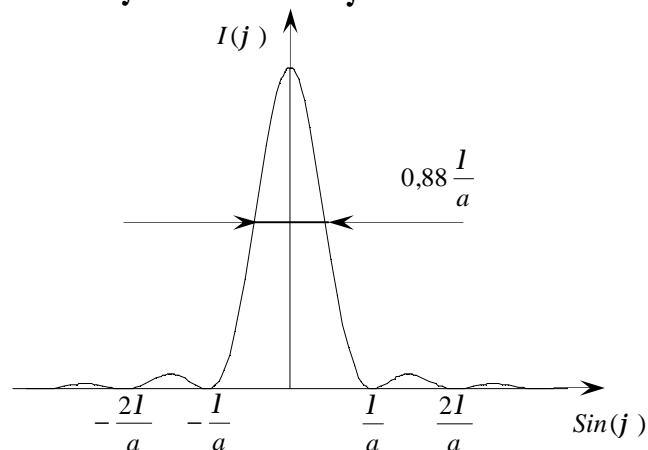


Рис.2. Аппаратная функция спектрального прибора

В призмённом спектрографе изображение щели увеличивается в связи с тем, что пучок, который падает на призму, пространственно ограничен. Уширение возникает, как и в случае дифракции Фраунгофера на оправе линзы или на краях призмы.

Если ширина пучка, падающего на призму равна a , то функция распределения интенсивности будет иметь вид

$$I(a) = I_{\varphi} \frac{\sin^2 \frac{\pi a \sin(\varphi)}{\lambda}}{\left(\frac{\pi a \sin(\varphi)}{\lambda} \right)^2}.$$

Для дифракционной решетки с N щелями вместо a необходимо подставить $Nd = l$, где l — ширина решетки.

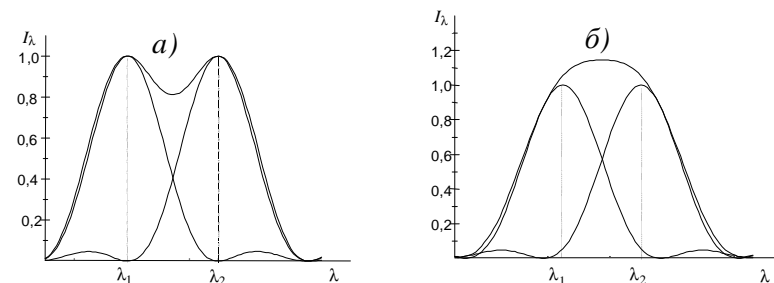


Рис. 3. Дифракционные контуры двух близких спектральных линий, которые могут наблюдаться отдельно (а) и не могут быть разрешены в соответствии с критерием Рэлея (б)

Если спектральная линия описывается контуром $I(\lambda)$, то на выходе спектрального прибора сигнал $F(\lambda)$, будет представлять собой свертку функции $I(\lambda)$ и функции $f(\lambda)$:

$$F(\lambda) = \int_0^{\infty} \varphi(\lambda') I(\lambda - \lambda') d\lambda'.$$

С понятием аппаратной функции связана разрешающая способность спектрального прибора, являющаяся его основной характеристикой. Количественно разрешающая способность определяется отношением

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

где $\delta\lambda$ — минимальная разность длин волн двух близких спектральных линий с длинами волн λ_1 и λ_2 , наблюдающихся с использованием данного спектрального прибора отдельно, $\bar{\lambda}$ — среднее значение длины волны. С помощью аппаратной функции критерий разрешения выражают следующим образом: две спектральные линии будут разрешены (раздельно наблюдаемыми), если расстояние между ними не меньше ширины аппаратной функции на половине высоты ее контура. Наиболее существенное влияние на ширину аппаратной функции оказывает дифракция на ограничивающих световые пучки оправах, конечный размер входной щели, а также aberrации света на оптических элементах прибора.

Явление дифракции света определяет так называемую теоретическую разрешающую способность. Рэлей ввел критерий разрешения дифракционных изображений, который применительно к спектральным приборам формулируется следующим образом: две спектральные линии являются разрешенными, если главный максимум дифракционной картины для первой из них попадает не ближе, чем первый минимум дифракционной картины другой линии. При равной интенсивности спектральных линий ордината точки пресечения составляет 0,4 от максимальной (рис.3). При этом провал интенсивности между линиями составляет 20%. Этого достаточно для визуального раздельного наблюдения линий. Входная щель при этом считается бесконечно узкой. Современная регистрирующая аппаратура и математическая обработка с использованием ЭВМ обеспечивают раздельное наблюдение и более близких спектральных линий с меньшим провалом между ними. Критерий Рэля, таким образом, является условной, но тем не менее удобной мерой для оценки разрешения спектральных линий.

При конечных размерах входной щели происходит дополнительное уширение спектральных линий. Можно показать, что входная щель не будет вносить дополнительного уширения, если ее ширина a удовлетворяет условию:

$$a \leq a_n = \frac{\lambda f_{об}}{D_{об}}, \quad (1)$$

где $f_{об}$, $D_{об}$ – соответственно фокусное расстояние и диаметр объектива коллиматора. Щель, ширина a_n которой удовлетворяет условию (1), называется *нормальной*.

Если ширина входной щели меньше a_n , то разрешающая способность равна теоретической, однако яркость изображения будет меньше. При увеличении ширины входной щели по сравнению с a_n разрешающая способность уменьшается. Поэтому оптимальной является нормальная щель.

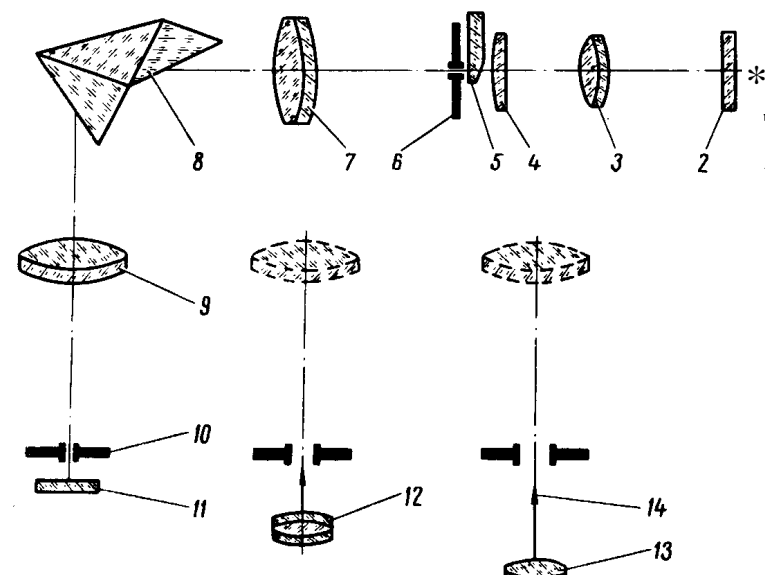


Рис. 4. Оптическая схема монохроматора.

1 – источник света, 2 – защитное стекло кожуха лампы, 3 – конденсор, 4 – защитное стекло щели, 5 – призма сравнения, 6 – щель, 7 – объектив коллиматора, 8 – диспергирующая призма, 9 – объектив зрительной трубы, 10 – съемная выходная щель, 11 – защитное стекло выходной щели, 12 – окуляр 5^x увеличения, 13 – окуляр 10^x увеличения, 14 – указатель в фокальной плоскости зрительной трубы

Практическая часть

Описание призмного монохроматора УМ-2

Среди многообразия спектральных приборов для изучения спектров в настоящее время широко используются призмные спектральные приборы, которые называются спектроскопами (для визуальных наблюдений) или спектрографами (для фотографирования спектров). К числу призмных спектральных приборов относится и изучаемый в этой работе монохроматор УМ-2. Работа призмных спектральных приборов основана на явлении дисперсии света – зависимости коэффициента преломления вещества от

длины волны. Оптическая схема монохроматора изображена на рис. 4.

Свет от источника I преобразуется в параллельный пучок с помощью конденсора 3 и объектива коллиматора 7 , проходит через диспергирующую призму 8 и объектив зрительной трубы 9 , в фокальной плоскости которого образуются спектрально окрашенные изображения щели 6 . Так как свет разных длин волн отклоняется призмой на разные углы, соответственно на объектив 9 будут падать параллельные пучки света разных длин волн под разными углами. Таким образом, в фокальной плоскости объектива 9 для каждой длины волны изображение щели получится в другом месте. Если источник I излучает набор определенных длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$, то спектр будет состоять из отдельных светлых линий, каждая из которых представляет собой изображение щели в свете соответствующей длины волны (линейчатый спектр). Если щель освещается белым светом, в фокальной плоскости объектива 9 получается непрерывная окрашенная полоса (сплошной спектр).

Количественно монохроматор характеризуется следующими параметрами.

2. Фокальная поверхность. Форма фокальной поверхности определяется свойствами диспергирующего элемента и фокусирующей оптики. Форма фокальной поверхности изучаемого монохроматора, вообще говоря, довольно сложна и определяется суммарным действием хроматической аберрации объектива и астигматизма призмы.

Показатель преломления призмы и объектива растет с уменьшением длины волны, следовательно, фокусное расстояние объектива уменьшается по мере продвижения в коротковолновую область. Фокальная поверхность расположена примерно так, как показано на рис.5.

2. Угловая дисперсия. В призмennых монохроматорах диспергирующий элемент обычно устанавливается таким образом, чтобы угол отклонения ϕ был минимальным. Тогда

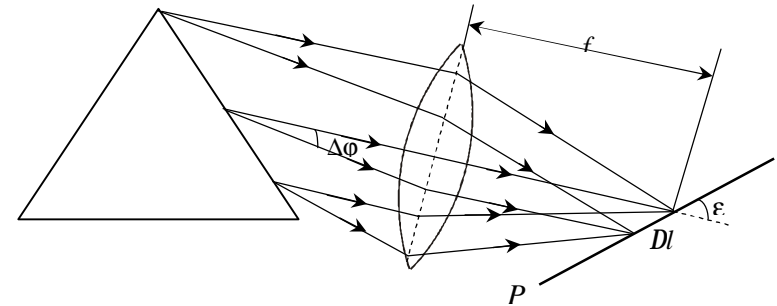


Рис. 6. К определению линейной дисперсии монохроматора

$$D_\phi = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (2)$$

Здесь A – преломляющий угол призмы, ϕ — угол отклонения (угол между направлением луча, падающего на призму, и луча, вышедшего из призмы).

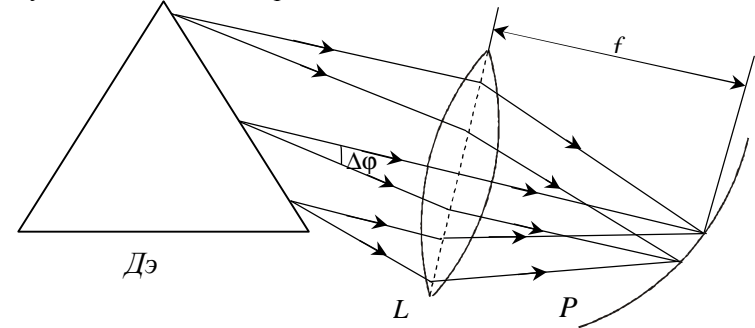


Рис. 5. К определению фокальной поверхности монохроматора

3.

Линейная дисперсия. Так как $dl = \frac{F}{\sin \epsilon} d\phi$ (см. рис.6), то верно следующее соотношение:

$$D_l = \frac{F}{\sin \epsilon} D_\phi, \quad (3)$$

где F – фокусное расстояние объектива зрительной трубы, ε — угол, который образует фокальная поверхность с лучом, падающим из центра объектива.

В случае минимума отклонения:

$$D_l = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \frac{F}{\sin \varepsilon} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (4)$$

Так как преломляющий угол используемой в работе призмы равен $A=60^\circ$, то:

$$D_l = \frac{2}{\sqrt{4 - n^2}} \frac{F}{\sin \varepsilon} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (5)$$

4. Разрешающая способность. Разрешающая способность призмы определяется соотношением:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda}{t \frac{dn}{d\lambda}}. \quad (6)$$

Здесь t — основание призмы. Для вывода этой формулы используется критерий Рэлея.

Упражнение 1. Градуировка монохроматора.

Для градуировки монохроматора используется линейчатый спектр ртутной лампы. Ртутная лампа в защитном кожухе с помощью штатива и рейтера крепится на рельсе.

Для проектирования источника света на щель монохроматора между ними помещают ахроматический конденсор $F=110$ мм с ирисовой диафрагмой. Последняя служит для ограничения световых пучков. При выполнении этой работы величина отверстия в диафрагме должна соответствовать отметке 5 на шкале диаметров.

Порядок выполнения упражнения

1. Установить ширину раскрытия входной щели в пределах 0,01–0,02 мм.

Проверьте, стоит ли на выходном окне кожуха лампы нейтральный светофильтр. Избегайте прямого попадания лучей в глаза и на открытые участки кожи.

2. Повернуть рукоятку затвора в положение «открыто».
3. Сфокусировать объектив на данную спектральную линию.
4. Совместить указатель, освещаемый сменными светофильтрами, с центром спектральной линии.
5. Произвести идентификацию линии по прилагаемой таблице 1.

Таблица 1.

Значения длин волн спектральных линий ртутной лампы в \AA

Спектральная линия	λ , \AA
Темно-красная	6907
Красно-оранжевая первая	6234
Красно-оранжевая вторая	6123
Оранжевая	6073
Желтая первая	5791
Желтая вторая	5770
Ярко зеленая	5461
Темно-зеленая	4916
Ярко-синяя	4358
Синяя средняя	4347,5
Синяя слабая	4339
Фиолетовая слабая	4108
Фиолетовая средняя	4078
Фиолетовая яркая	4047
Фиолетовая темная	3984

6. Записать значение длины волны наблюдаемой линии и соответствующее показание барабана на измерительном барабане в таблицу результатов (табл. 2).
7. Прodelать эту операцию для 10—12 значений длин волн.
8. Построить градуировочный график $\lambda = f(N)$, где N – показания шкалы барабана.

Таблица 2

Градуировка монохроматора

$\lambda, \text{\AA}$					
N (делений барабана)					

Упражнение 2. Изучение зависимости линейной дисперсии монохроматора от длины волны.

На практике вместо линейной дисперсии монохроматора $D_l = \frac{dl}{d\lambda}$ пользуются обычно обратной величиной $D = \frac{1}{D_l}$, размерность которой $\text{\AA}/\text{мм}$. Для простоты рассмотрения будем считать, что фокальная поверхность перпендикулярна лучу, падающему из центра объектива, т.е. $\sin \varepsilon = 1$. Тогда из (4) имеем:

$$D = \frac{1}{D_l} = \frac{\sqrt{4 - n^2}}{2F} \frac{d\lambda}{dn}. \quad (7)$$

Переходя к конечным приращениям, получим:

$$D = \frac{\sqrt{4 - n_{\text{ср}}^2}}{2F} \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}. \quad (8)$$

Пользуясь прилагаемым графиком зависимости показателя преломления от длины волны для стекла (тяжелый флинт), построить график $D(\lambda)$ для семи значений длин волн в области от 4400 \AA до 7400 \AA . Вычисления производить для $\Delta\lambda = 100 \text{\AA}$. Принять $F = 280 \text{ мм}$.

Упражнение 3. Определение неизвестного газа по его спектру.

1. В школьный высоковольтный генератор «Спектр-1» вставить газоразрядную трубку с исследуемым газом.
2. Генератор установить на столике с помощью рейтера, закрепленного на оптическом рельсе.
3. Включить генератор в сеть через выпрямитель, выходное напряжение на котором ручкой регулировки напряжения довести до 8 В. Спроектировать изображение щели генератора на щель монохроматора.

сти до 8 В. Спроектировать изображение щели генератора на щель монохроматора.

4. Произвести сканирование по спектру и с помощью градуировочного графика определить длины волн, на которых излучает исследуемый газ. Записать их.
5. Произвести идентификацию неизвестного газа, используя таблицу 3.

Таблица 3.

Значения длин волн спектральных линий некоторых газов

$\lambda, \text{\AA}$	Элемент	$\lambda, \text{\AA}$	Элемент	$\lambda, \text{\AA}$	Элемент
6738	Kr	6402	Ne	6563	H
6652		6143		4861	
6532		5945		4102	
5911		5852			
5580		5400			
4523		5330			
4481		4849			
4371					
4333					

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте оптическую схему призмного монохроматора. Укажите, какое назначение имеет каждый его элемент (коллиматор, входная щель, призма, объектив).
2. Какое физическое явление лежит в основе работы монохроматора УМ-2?
3. Выведите формулы для угловой и линейной дисперсии.
4. Какими основными параметрами характеризуются спектральные приборы?
5. Почему призмы у спектральных приборов ставят, как правило, под углом наименьшего отклонения?
6. Полностью закройте входную щель монохроматора. Медленно ее открывая, наблюдайте за изменением интенсивности спектральных линий. При некоторых значениях ширины щели яркость начинает уменьшаться. Эта ширина щели будет оптимальной. Запишите ее значение. Объясните наблюдаемые явления.
7. Как будут отличаться спектры, полученные от одного и того же источника при помощи дифракционной решетки и призмы?