

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

## Характеристики спектральных приборов

*Методические указания  
по курсу общей физики*

Рецензент: *С.А. Чудинова*, доцент, кандидат физ.-мат. наук

Составитель: *О.Я. Березина*, ст. преподаватель,  
кандидат физ.-мат. наук

Петрозаводск  
2007

### Цели работы:

1. Ознакомиться с классификацией и принципами действия спектральных приборов
2. Ознакомиться с основными характеристиками дифракционных и призмных спектральных приборов и способами их определения

### Задачи работы:

1. Определить длину световых волн с помощью дифракционной решетки.
2. Определить период дифракционной решетки.
3. Изучить влияние угла падения лучей на характеристики дифракционной решетки.
4. Получить дисперсионную зависимость призмы
5. Определить дисперсию и разрешающую способность призмного и дифракционного спектроскопов.

**Принадлежности.** Спектрометр-гониометр, ртутная лампа, источник питания 220 В, дифракционная решетка, призма, держатели.

## Введение

### 1. Спектральные приборы

Любой спектральный прибор предназначен для проведения *гармонического анализа* падающего на него излучения, т.е. физического разложения излучения на монохроматические составляющие. В этой связи выделяют два больших класса спектральных приборов, отличающихся по принципу регистрации спектров – это приборы дисперсионные и интерференционные.

В *дисперсионном* спектральном приборе устанавливается распределение энергии падающего на него излучения по частотам, т.е. находятся интенсивности отдельных монохроматических составляющих, а информация об их фазах оказывается утраченной. В *интерферометрах* основной измеряемой характеристикой является фаза электромагнитного колебания, а не амплитуда световой волны и связанная с ней энергия.

Спектральные приборы можно классифицировать и по ха-

рактору решаемых с их помощью задач: *спектроскоп* – для визуального наблюдения, *спектрограф* – для фотографической регистрации спектра, *спектрофотометр* – для измерения распределения энергии по спектру, *монохроматор* – для выделения из спектра узкого интервала частот.

Действие спектральных приборов может быть основано на разных физических принципах. Основная часть дисперсионного прибора, *диспергирующий элемент*, осуществляет обычно пространственное разделение излучения разных длин волн, отклоняя его на различные углы. В *призменных* спектральных приборах используется зависимость показателя преломления в оптическом стекле от длины волны (дисперсия). Диспергирующим элементом *дифракционных* спектральных приборов служит дифракционная решетка, в которой спектр получается за счет дифракции лучей на периодических структурах.

В приборах *высокой разрешающей силы* (интерферометры Фабри – Перо, Майкельсона и др.) используется многолучевая и двухлучевая интерференция при очень больших разностях хода. Интерферометры применяются в основном для решения задач, требующих от приборов предельно высокой точности.

Новые типы спектральных приборов (Фурье-спектрометры и СИСАМы – спектрометры с интерференционной селективной модуляцией) основаны на частотной и амплитудной модуляции исследуемого излучения. В них разложение в спектр по длинам волн не происходит. Регистрируется непосредственно сигнал на выходе, а затем специальные средства обработки сигнала производят математическое преобразование – преобразование Фурье, что позволяет представить зависимость интенсивности от частоты как комбинацию гармонических функций.

## 2. Основные характеристики дисперсионных спектральных приборов

**Принципиальная схема** спектрального прибора приведена на рис.1. Освещаемая исследуемым излучением входная щель  $\text{Щ}_1$  находится в фокальной плоскости коллиматорного объектива  $\text{Л}_1$ , который направляет на диспергирующий элемент (ДЭ) параллельный пучок лучей. Второй объектив  $\text{Л}_2$  фокусирует вышедшие из

ДЭ параллельные пучки. Создаваемые параллельными пучками изображения входной щели – спектральные линии – получаются в разных местах фокальной плоскости  $\text{Л}_2$  в зависимости от длины волны.

Рассмотрим наиболее важные характеристики спектральных приборов.

**Светосила спектрального прибора.** Это характеристика энергии электромагнитного излучения в заданном спектральном интервале, попадающей в прибор и дающей вклад в формирование сигнала на выходном устройстве – фотоприемнике. Светосила определяется характером и размером входной апертуры – диафрагмы, щели, – а также пропусканием прибора;

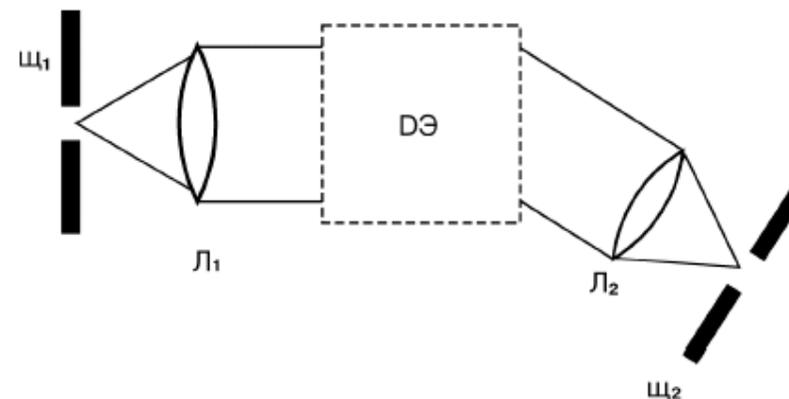


Рис.1. Схема дисперсионного спектрального прибора.  $\text{Щ}_1$  – входная щель,  $\text{Л}_1$ ,  $\text{Л}_2$  – линзы или объективы,  $\text{Щ}_2$  – выходная щель или фотопластинка, ДЭ – диспергирующий элемент.

**Угловая дисперсия** – величина, характеризующая изменение угла отклонения параллельного пучка света диспергирующим элементом при изменении длины волны. Она определяется отношением углового расстояния  $\delta\varphi_m$  между двумя близкими спектральными линиями к разности  $\delta\lambda$  соответствующих им длин волн:

$$D = \frac{\partial\varphi_{\max}}{\partial\lambda}, \quad (1)$$

т.е. угловая дисперсия численно равна угловому расстоянию между двумя спектральными линиями, длины волн которых отличаются на единицу. Она выражается, например, в радианах на ангстрем.

**Линейная дисперсия** – величина, численно равная расстоянию между двумя спектральными линиями, длины волн которых отличаются на единицу.

$$D_{л} = \frac{\partial x_{\max}}{\partial \lambda}, \quad (2)$$

где  $\partial x_{\max}$  – линейное расстояние между максимумами на экране.

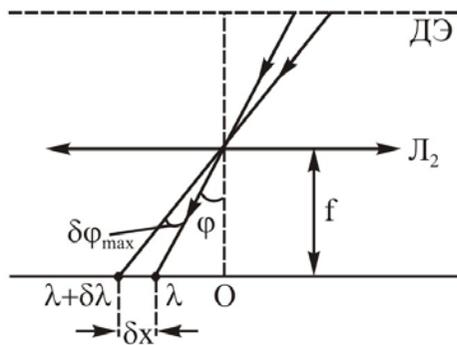


Рис.2. Определение линейной дисперсии

Из рис.2 видно:  $\partial x_{\max} = f \partial \phi_{\max}$ , где  $f$  – фокусное расстояние линзы  $L_2$ .

$$D_{л} = f \partial \phi_{\max} / \partial \lambda = f D \quad (3)$$

Линейная дисперсия зависит не только от свойств ДЭ, но и от свойств объектива  $L_2$ , используемого для наблюдения спектра.

Чаще всего спектральные приборы характеризуют обратной линейной дисперсией:

$$\frac{1}{D_{л}} = \frac{\partial \lambda}{\partial x_{\max}} \quad (4)$$

**Разрешающая способность** или **разрешающая сила**  $R$  спектрального прибора определяют возможность прибора наблюдать отдельно две близкие спектральные линии  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Если две спектральные линии видны как отдельные, то говорят, что они разрешаются данным спектральным прибором.

$$R = \lambda / \partial \lambda, \quad (5)$$

где  $\partial \lambda$  – минимальная разница длин волн, разрешаемая спектральным аппаратом в данном порядке спектра.

Возможность разрешения двух близких максимумов зависит от чувствительности метода наблюдения и является несколько неопределенной. Рэлей предложил *критерий*, согласно которому две спектральные линии еще четко видны как отдельные, если угловое расстояние между ними не меньше половины их угловой ширины (рис.3). Это значит, что максимум для спектральной линии, соответствующей длине волны  $\lambda_1$ , расположен там же, где и минимум для линии, соответствующей длине волны  $\lambda_2$ . Если главные максимумы располагаются ближе, то две линии сольются в одну.

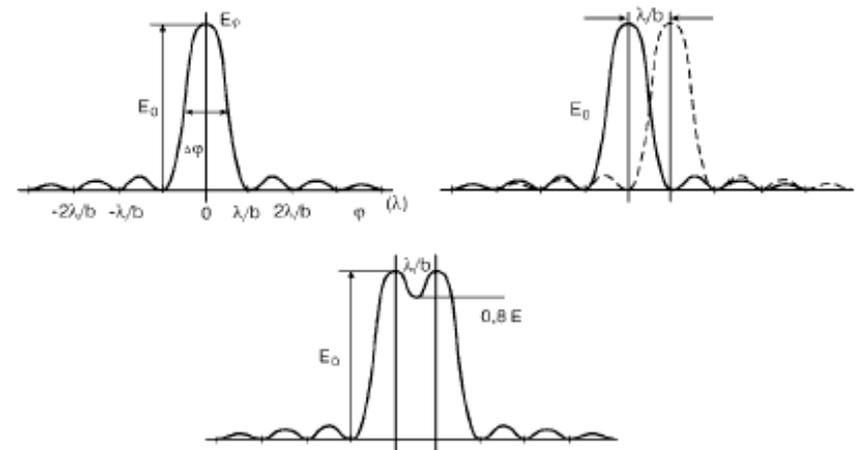


Рис.3. К определению критерия Рэля. 1- дифракционная картина одиночной монохроматической спектральной линии:  $b$  - линейный размер диафрагмы, ограничивающий ширину пучка света;  $E_0$  - освещенность спектральной линии на выходе прибора; 2 - две близкие по длине волны спектральные линии  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , удовлетворяющие критерию Рэля; 3 - контур  $C$ , являющийся сложением интенсивностей двух близких по длине волны спектральных линий, линии наблюдаются как отдельные.

Если линии имеют одинаковую интенсивность, то в соответствии с критерием Рэля минимально разрешенными считаются две монохроматические линии, для которых провал между максимумами составляет не менее 0,8 от интенсивности каждого из максимумов.

Угловое расстояние между максимумами  $\partial\varphi_{\max} = \lambda/b$  (см. рис.3), откуда  $\lambda = b \partial\varphi_{\max}$ . Из (1) получаем  $\partial\lambda = \partial\varphi_{\max}/D$ . Тогда

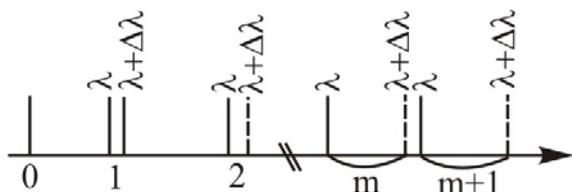
$$R = \lambda/\partial\lambda = bD. \quad (6)$$

Т.о., теоретический предел разрешающей способности равен произведению ширины параллельного пучка, выходящего из ДЭ, и угловой дисперсии D.

**Ширина области дисперсии** (дисперсионная область)  $G$  – предельная ширина спектрального интервала, при которой еще возможно получение непрерывающихся максимумов.

Пусть решетка освещается светом с длиной волны в интервале от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$ . В каком-то порядке  $m$  максимум для длины волны  $(\lambda + \Delta\lambda)$  наложится на максимум  $(m + 1)$ -го порядка длины волны  $\lambda$  (рис.4), т.е. интерференционная картина становится неясной. Для дифракционной решетки  $G = \Delta\lambda = \lambda/m$ .

Рис.4. Ширина области дисперсии.



## 2. Дифракционные спектральные приборы

В основе работы дифракционной решетки лежит явление дифракции на многих щелях и многолучевая интерференция.

Амплитудной дифракционной решеткой называется периодическая структура, представляющая собой чередование параллельных щелей и непрозрачных промежутков. Число щелей  $N$  может быть очень большим. Такая решетка периодически меняет амплитуду проходящих через нее световых волн и поэтому назы-

вается амплитудной\*. Амплитудная решетка изготавливается нанесением алмазным резцом с помощью делительной машины большого числа штрихов на плоскопараллельную стеклянную пластинку малой толщины (менее 1 мм). В настоящее время для изучения спектров в видимой и ультрафиолетовой области света используют решетки с числом штрихов на 1 мм длины: 300, 600, 1200, 1800 и 2400. Матовая поверхность штрихов интенсивно рассеивает свет, так что в направлении наблюдения проходит лишь его ничтожная часть. Штрихи являются, таким образом, почти непрозрачными промежутками между неповрежденными частями пластинки – щелями\*\*. Если ширина непрозрачного промежутка  $a$ , а щели –  $b$ , то величина  $d = a + b$  носит название периода дифракционной решетки (рис. 5).

При освещении решетки параллельным пучком световых лучей (плоская волна) каждая ее щель становится самостоятельным источником когерентных световых волн (лучей), расходящихся по всевозможным направлениям: происходит дифракция света на щелях решетки. Если за решеткой поставить линзу, то она рассортирует продифрагировавшие лучи по направлениям: лучи одного и того же направления соберутся в одной и той же точке фокальной плоскости линзы, и будут интерферировать друг с другом. Максимум интерференции наблюдается, когда оптическая разность хода волн от двух соседних щелей решетки равна либо нулю, либо целому числу длин волн монохроматического света, падающего на решетку (рис.5).

$$\Delta = d \sin \varphi_m = m\lambda; m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (7)$$

где  $\Delta$  – разность хода лучей, распространяющихся в данном направлении от двух соседних щелей решетки,  $\lambda$  – длина волны монохроматического света, а  $\varphi_m$  – угол, соответствующий максимуму интерференции (дифракционному максимуму). Формула (7) называется *формулой дифракционной решетки*, или *условием главных максимумов*.

\* Существуют решетки, периодически меняющие фазу проходящей через решетку волны. Такие решетки называются фазовыми (эшелон Майкельсона, эшелетт Вуда).

\*\* Существуют также отражательные решетки, изготовленные на полированных металлических пластинках.

Линза не вносит дополнительной разности хода. Число  $m$ , равное числу длин волн, укладывающихся в разности хода волн, образующих данный максимум, называется порядком интерференции или порядком спектра. Максимумам интерференции разного порядка в фокальной плоскости линзы соответствуют ярко освещенные линии определенного цвета на темном фоне. Угловое положение максимума  $\varphi_m$  зависит от  $\lambda$ .

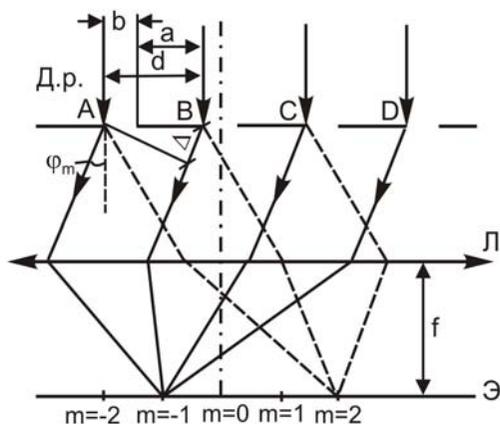


Рис. 5. Картина формирования дифракционных максимумов: Д.р. – амплитудная дифракционная решетка,  $a$  – ширина непрозрачного промежутка,  $b$  – ширина щели,  $d = a + b$  – период решетки,  $\varphi_m$  – угол дифракции,  $\Delta$  – разность хода световых,  $f$  – фокусное расстояние линзы Л, Э – экран,  $m$  – порядок спектра.

Схематическое изображение дифракционного спектра, даваемого некогерентным источником, приведено на рис. 6. Здесь каждый порядок  $m$ , кроме нулевого, содержит 3 спектральные линии с длинами волн  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ , окрашенные в разные цвета. Максимум нулевого порядка для всех  $\lambda_i$ , входящих в состав некогерентного света, наблюдается в одном и том же месте ( $\varphi_m = 0$ ), следовательно, его цвет совпадает с цветом света, падающего на решетку. По этому признаку максимум нулевого порядка легко отличить от всех других.

Идеальная дифракционная картина представляет систему дифракционных максимумов различной интенсивности и ничтож-

но малой ширины. Однако реально переход от максимума интенсивности к минимуму для данной длины волны происходит более или менее постепенно, поэтому распределение освещенности на экране или фотопластинке имеет вид, представленный на рис.6б. Наблюдаемая ширина дифракционного максимума зависит как от спектральной ширины дифрагирующей световой волны, так и от устройства прибора.

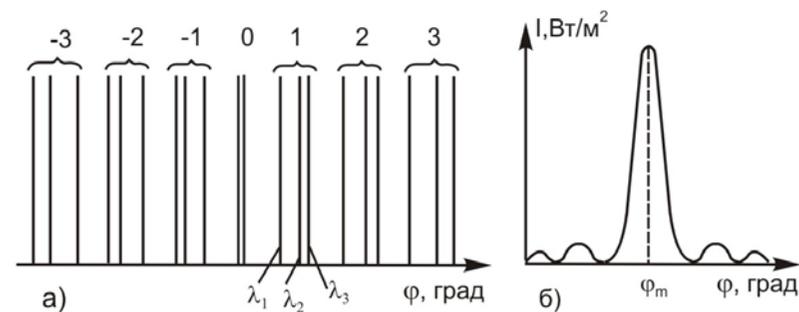


Рис. 6. Схематическое изображение дифракционного спектра источника, излучение которого содержит 3 монохроматические составляющие в области видимого света (а) и распределение интенсивности в одной из спектральных составляющих (б).

Рассмотрим **косое падение лучей** на решетку. Пусть лучи падают на решетку под углом  $i$  (рис.7).

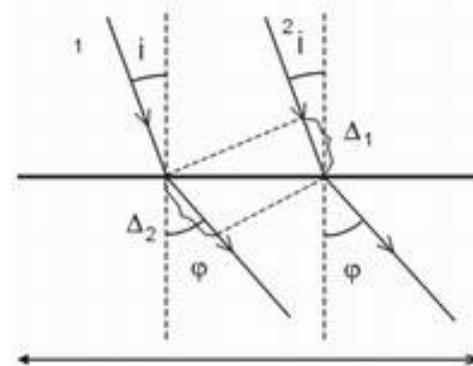


Рис.7. Косое падение лучей на решетку

Разность хода лучей, идущих от соседних щелей решетки в направлении  $\varphi$ :  $\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = d \sin \varphi - d \sin i$ .

Для главных максимумов:

$$d (\sin \varphi_{\max} - \sin i) = m\lambda, \quad (m = 0, +1, +2, \dots) \quad (8)$$

$$\text{или} \quad 2d \cos \frac{\varphi_{\max} + i}{2} \sin \frac{\varphi_{\max} - i}{2} = m\lambda. \quad (8a)$$

Из (8a) следует, что при  $m = 0$   $\varphi_{\max} = i$ , т.е. главный максимум нулевого порядка будет наблюдаться в направлении падающего пучка.

Будем считать, что углы дифракции  $(\varphi_{\max} - i)$  – малы, (главные максимумы ненулевых порядков располагаются вблизи максимума нулевого порядка). При этом условии  $\varphi_{\max} \approx i$  и, следовательно,  $(\varphi_{\max} + i)/2 \approx i$ ,  $2 \sin(\varphi_{\max} - i)/2 \approx \sin(\varphi_{\max} - i)$  (вспомним, что при малых  $\alpha$   $\cos \alpha \approx 1$ ,  $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha \approx 2 \sin \alpha$ ). С учётом сказанного

$$d \cos i \sin(\varphi_{\max} - i) = m\lambda \quad (9)$$

Соотношение (9) – условие главных максимумов при косом падении лучей на решетку.

Сравним (9) при  $i = 0$  с формулой решетки (7):  $d \sin \varphi_{\max} = m\lambda$ . Т.о. при  $i \neq 0$  решетка работает, как решетка с периодом

$$d^* = d \cos i \quad (9a),$$

$d^*$  – эффективный период решетки.

Угловую дисперсию дифракционной решетки можно рассчитать, воспользовавшись определением (формула (1)).

Продифференцируем выражение (7) слева по  $\varphi$ , справа по  $\lambda$ :

$$d \cos \varphi \partial \varphi = m \partial \lambda,$$

откуда

$$D = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi} \quad (10)$$

Если углы, под которыми наблюдаются дифракционные максимумы, невелики ( $\varphi_m < 10^\circ$ ), то  $\cos \varphi_m \approx 1$  при всех  $m$ , следовательно,

$$D = m/d. \quad (10a)$$

Отсюда видно, что величина дисперсии пропорциональна порядку спектра для данной решетки и тем больше в определенном порядке, чем меньше ее период  $d$ .

Теоретическую разрешающую способность дифракционной решетки найдем из формулы (6). Учтем, что ширина параллельного пучка, дифрагировавшего под углом  $\varphi$ , для решетки из  $N$  штрихов  $b = Nd \cos \varphi$  (см. рис.5).

$$R = \lambda / \partial \lambda = bD = mN. \quad (11)$$

Максимальное значение  $R$  будет в спектре наибольшего порядка, который возможен при заданных  $d$  и  $\lambda$ .

### 3. Призменные спектральные приборы

В призмных спектральных приборах наибольшая разрешающая сила достигается при симметричной установке призмы, когда угол отклонения  $\varphi$  параллельного пучка от первоначального направления минимален.

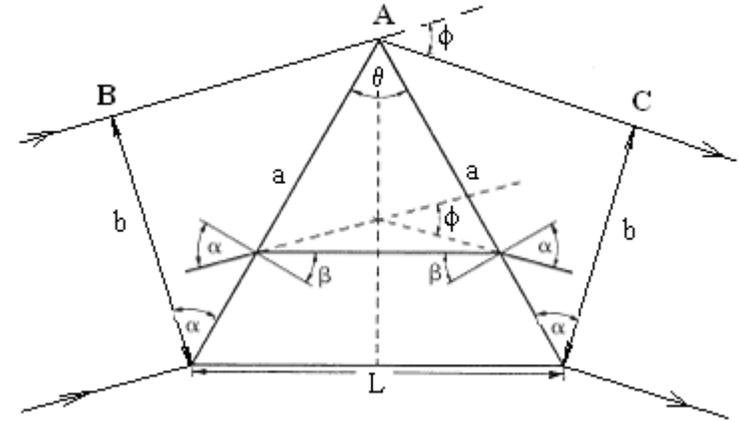


Рис.8. Преломление в призме при симметричной установке

По закону преломления

$$\sin \alpha / \sin \beta = n, \quad (12)$$

где  $n$  – показатель преломления оптического стекла призмы.

Связь угла преломления и преломляющего угла призмы:  $\beta = \theta/2$ . Угол отклонения  $\varphi = 2\alpha - 2\beta = 2\alpha - \theta$  (13); следовательно  $\alpha = (\theta + \varphi)/2$  (13a). Подставляем в (12):

$$n = \frac{\sin(\theta + \varphi)/2}{\sin \theta/2}. \quad (14)$$

Угловая дисперсия обусловлена зависимостью показателя

преломления призмы от длины волны. Воспользуемся формулой (1):

$$D = \partial\varphi / \partial\lambda = (\partial\varphi/\partial n)(\partial n/\partial\lambda). \quad (15)$$

Величина  $\partial n/\partial\lambda$  называется *дисперсией материала*.

Продифференцируем (13):

$$\partial\varphi/\partial n = 2(\partial\alpha/\partial n) \quad (15a)$$

Учитывая, что оптическая длина пути луча, идущего вдоль основания призмы, равна сумме длин АВ + ВС, можно написать  $nL = 2a\sin\alpha$ . Тогда  $L\partial n = 2a\cos\alpha\partial\alpha$  (16). Но  $a\cos\alpha = b$ , где  $b$  – ширина пучка, ограниченная размерами призмы. Из (16)  $\partial\alpha/\partial n = L/(2a\cos\alpha) = L/2b$  и *угловая дисперсия* призмы

$$D = \frac{L}{b} \frac{\partial n}{\partial\lambda}. \quad (17)$$

Первый сомножитель уравнения (15) можно также найти, дифференцируя формулу (14):

$$\partial n / \partial\varphi = \cos((\theta + \varphi)/2) / 2\sin(\theta/2).$$

Тогда *угловую дисперсию* призмы можно выразить иначе:

$$D = \frac{2\sin(\theta/2)}{\cos(\theta + \varphi)/2} \cdot \frac{\partial n}{\partial\lambda} = \frac{2\sin(\theta/2)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\theta/2)}} \cdot \frac{\partial n}{\partial\lambda}. \quad (17a)$$

Как видно из этой формулы, чтобы достичь максимального спектрального разрешения призмы, мы должны использовать материал с максимальными значениями показателя преломления  $n$  и дисперсии ( $\partial n/\partial\lambda$ ).

**Разрешающая способность** призмы в соответствии с (6)

$$R = L \frac{\partial n}{\partial\lambda} \quad (18)$$

зависит от дисперсии вещества, из которой она сделана  $\partial n/\partial\lambda$ , и длины основания призмы  $L$ , но не зависит от преломляющего угла  $\theta$ . Однако, с ростом  $\theta$  уменьшается  $b$  и растет дисперсия (см. формулу (17)), что облегчает наблюдение спектра. Поэтому наиболее часто используют призмы с большим преломляющим углом  $\theta \approx 60^\circ$ .

Один из существенных недостатков призмы состоит в быстром уменьшении  $R$  и  $D$  при продвижении в длинноволновую часть спектра.

## Методика эксперимента

В ходе работы предлагается определить длины волн некоторых спектральных линий ртути с помощью формулы дифракционной решетки (7). Для чего необходимо измерить угловые координаты соответствующих дифракционных максимумов первого порядка, наблюдаемых с помощью решетки 600 линий/мм. Затем, предлагается рассчитать период другой дифракционной решетки, проведя измерения угловых координат видимых линий и воспользовавшись полученными значениями длин волн.

Для призмы из крона или флинта снимаются угловые координаты всех видимых линий спектра при симметричной установке призмы (условие получения наибольшей угловой дисперсии). Рассчитываются показатели преломления по формуле (14), строится дисперсионная кривая, примерный вид которой приведен на рис. 9. В областях коротких (синяя линия) и длинных (желтая линия) волн проводятся касательные к кривой и определяется тангенсы углов ее наклона  $\alpha$ . Тогда дисперсия оптического стекла призмы в различных диапазонах  $\lambda$ :  $|\partial n/\partial\lambda| = \text{tg } \alpha$ .

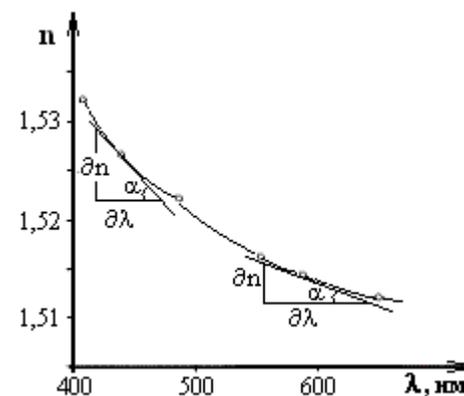


Рис. 9. Примерный вид дисперсионной зависимости призмы

Такие характеристики спектральных приборов, как разрешающая способность и угловая дисперсия, рассчитываются по приведенным во введении формулам с использованием результатов измерений. Проводится сравнение экспериментальных и теоретических значений указанных характеристик, а также свойств

призмы и дифракционной решетки в качестве диспергирующих элементов.

### Экспериментальная установка

Общий вид установки представлен на рис. 10. Она состоит из ртутной лампы, блока питания, спектрометра-гониометра.

*Внимание! Спектральная лампа достигает максимальной яркости свечения после прогрева в течение 5 минут. При установке лампы следите, чтобы воздух мог свободно циркулировать через вентиляционные отверстия в кожухе лампы*



Рис. 10. Экспериментальная установка

Наблюдение спектров и отсчет углов производится с помощью гониометра-спектрометра, схема которого изображена на рис. 11, примерный ход лучей – на рис. 12. В состав коллиматора входит ахроматическая линза ( $SO$ ) и щель регулируемой ширины ( $S_p$  на рис. 12), расположенная в фокальной плоскости линзы. Коллиматор служит для получения параллельных пучков лучей, ос-

вещающих решетку или призму. Наблюдение спектра производится с помощью зрительной трубы 4, настроенной на бесконечность. Угломерное устройство 2 представляет собой лимб, снабженный нониусом. Отсчет углов поворота зрительной трубы производится с помощью подвижной лупы 6, установленной над нониусом.

Для настройки спектрометра необходимо установить щель коллиматора против прорези защитного кожуха ртутной лампы и, регулируя расстояние от щели выдвижного тубуса ( $S_p$  на рис. 12) до объектива коллиматора, добиться, чтобы щель была четко видна в зрительную трубу. Это свидетельствует о том, что щель находится в фокусе объектива коллиматора.

В качестве диспергирующих элементов в работе используются две дифракционные решетки и призма из крона или флинта, которые устанавливаются на столик 5 (рис. 11).

Для симметричной установки призмы (когда угол отклонения  $\varphi$  параллельного пучка от первоначального направления минимален) необходимо развернуть зрительную трубу примерно на  $40 - 45^\circ$  по отношению к  $\varphi_0$  – отсчету по угломерному устройству, соответствующему установке зрительной трубы гониометра напротив входной щели коллиматора. Слегка поворачивая столик с призмой и зрительную трубу, надо добиться четкого изображения линий спектра. Далее аккуратно поворачивая столик с призмой в одном направлении, проследите за движением спектральных линий. При определенном угле падения лучей на призму наблюдаемая спектральная линия останавливается в поле зрения окуляра, а затем начинает двигаться в обратную сторону. Положение призмы в момент остановки наблюдаемой линии соответствует углу наименьшего отклонения луча  $\varphi_{\min}$ .

Для выполнения расчетов вам понадобятся следующие данные: преломляющий угол призмы  $\theta = 60^\circ$ ; длина основания призмы  $L = 30$  мм.

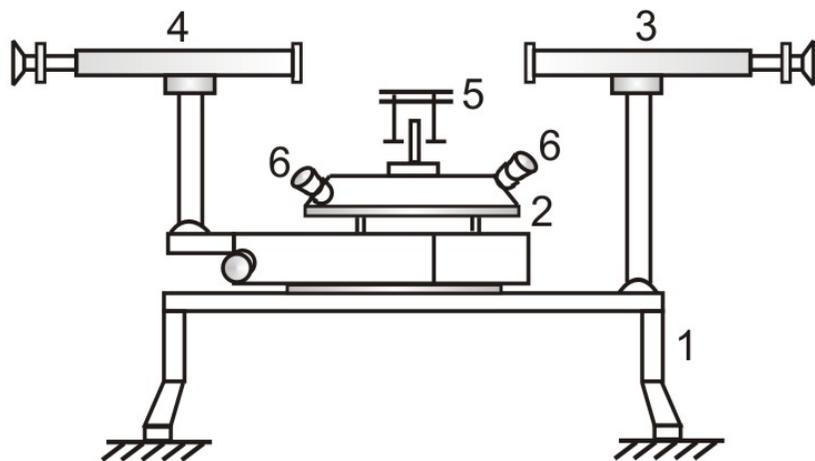


Рис. 11. Схема гониометра-спектрометра: 1 – штатив, 2 – угломерное устройство, 3 – коллиматор, 4 – зрительная труба, 5 – столик, снабженный установочными винтами, 6 – луна.

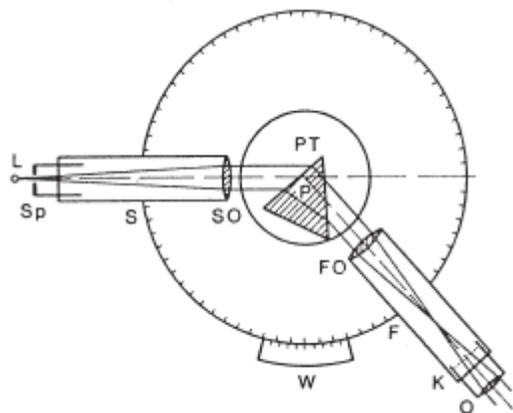


Рис. 12. Устройство и примерный ход лучей в спектрометре.

$L$  – источник света,  $S_p$  – щель выдвижного тубуса,  $S$  – коллиматор,  $SO$  – линза коллиматора,  $PT$  – столик для призмы или дифракционной решетки с юстировочными винтами,  $P$  – призма,  $FO$  – линза зрительной трубы,  $F$  – зрительная труба,  $O$  – окуляр,  $K$  – визирная нить,  $W$  – угломерное устройство с нониусом.

### Подходы к выполнению задач

Лабораторная работа «Характеристики спектральных приборов» - выполняются все упражнения\*.

Лабораторная работа «Изучение амплитудной дифракционной решетки» - выполняются упражнения 1, 2, 3.

Лабораторная работа «Изучение призмного спектроскопа» - выполняются упражнения 1, 5, 6.

### Упражнение 1. Определение длин волн линий спектра ртути

Длины волн, соответствующие всем видимым линиям спектра, лучше определить с помощью спектрального прибора – дифракционной решетки, содержащей 600 линий/мм. Используемый Вами способ проведения необходимых измерений должен обеспечивать достоверность результатов. Не забывайте о статистической обработке полученных экспериментальных данных. Сравните полученные результаты с табличными данными.

Для проведения дальнейших расчетов вам понадобится значение ширины пучка света, падающего на решетку.

### Упражнение 2. Определение периода дифракционной решетки

Для определения периода используйте вторую из имеющихся решеток. При расчетах воспользуйтесь определенными в упражнении 1 значениями длин волн спектральных линий ртути. Рассчитав период решетки, проведите статистическую обработку полученных результатов.

Не забудьте записать цвета всех видимых линий спектра ртути.

\* Упражнение 4 выполняют только студенты, обучающиеся по специальности «физика».

### Упражнение 3. Расчет угловой дисперсии и разрешающей способности дифракционного спектрометра

1. По данным, полученным в упражнениях 1 и 2, рассчитайте угловую дисперсию решетки ( $D_{\text{экс}}$ ) для разных порядков дифракции  $m$ . Зависимость, полученную экспериментально, сравните с теоретической зависимостью (10). Для второй решетки постройте график зависимости  $D(m)$ .
2. Рассчитайте минимальные разрешающие способности, необходимые для разрешения всех видимых линий спектра ртути. Сравните\* их с разрешающей способностью, которую могут обеспечить обе используемые решетки во всех измеренных порядках спектра.

Проведя расчеты, объясните, почему через вторую решетку видны не все линии спектра.

### Упражнение 4. Изучение влияния угла падения лучей на характеристики дифракционной решетки\*

1. Определите эффективный период решетки  $d^*$  при косом падении лучей на нее (угол  $i = 30 - 45^\circ$ ). Проверьте справедливость соотношения между периодом и эффективным периодом (формула 9а).
2. Рассчитайте угловую дисперсию  $D^*$  решетки, соответствующую эффективному периоду. Сравните  $D^*$  и  $D$ .

### Упражнение 5. Получение дисперсионной зависимости призмы

1. Установив призму на столике гониометра в положении, соответствующем минимальному углу отклонения параллельного пучка от первоначального направления, проведите измерения, необходимые для определения показателей преломления оптического стекла призмы для длин волн различных линий спектра ртути.
2. Воспользовавшись результатами 1-го упражнения (полученны-

\* Число щелей решетки можно рассчитать по формуле  $N = b/d$ , где  $d$  – период решетки,  $b$  – ширина пучка света, выходящего из коллиматора.

\* Выполняют только студенты, обучающиеся по специальности «физика».

ми значениями  $\lambda$ ), постройте дисперсионную кривую  $n = f(\lambda)$ .

3. По дисперсионной кривой рассчитайте дисперсию материала призмы  $|\partial n / \partial \lambda|$  вблизи точек на графике  $n = f(\lambda)$ , соответствующих синей и желтой линиям (см. рис.9).

### Упражнение 6. Расчет угловой дисперсии и разрешающей способности призмного спектрометра

1. Рассчитайте дисперсию призмы ( $D_{\text{экс}}$  по определению) для разных длин волн. Постройте график зависимости  $D = f(\lambda)$ .
2. Рассчитайте минимальную разрешающую способность  $R_{\text{min}}$ , необходимую для разрешения всех видимых линий спектра ртути\*. Полученные данные сравните с теоретическими значениями разрешающей способности призмы для длин волн вблизи синей и желтой линий.

В выводах отметьте преимущества и недостатки исследованных в работе диспергирующих элементов.

### Индивидуальное задание

При выполнении некоторых заданий необходимо использовать результаты ваших измерений.

1. Могут ли применяемые в работе дифракционные решетки разрешить длины волн:
  - а.  $\lambda = 5770 \text{ \AA}$  и  $5791 \text{ \AA}$  в спектре 1 порядка?
  - б.  $\lambda = 5890 \text{ \AA}$  и  $5896 \text{ \AA}$  в спектре 2 порядка?
  - в.  $\lambda = 4259 \text{ \AA}$  и  $4267 \text{ \AA}$  в спектре 2 порядка?
  - г.  $\lambda = 4339 \text{ \AA}$  и  $4349 \text{ \AA}$  в спектре 3 порядка?
  - д.  $\lambda = 5770 \text{ \AA}$  и  $5780 \text{ \AA}$  в спектре 3 порядка?
  - е.  $\lambda = 4340 \text{ \AA}$  и  $4350 \text{ \AA}$  в спектре 1 порядка?
2. Определите максимальный порядок спектра, который дают применяемые в работе дифракционные решетки при нормальном падении света с длиной волны  $\lambda$ , если
  - а)  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$
  - б)  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$
  - в)  $\lambda = 0.55 \text{ мкм}$
  - г)  $\lambda = 0.6 \text{ мкм}$
  - д)  $\lambda = 650 \text{ нм}$
  - е)  $\lambda = 700 \text{ нм}$ .
3. Определите ширину области дисперсии в максимальном порядке спектра, который дают применяемые в работе дифракционные решетки при нормальном падении света с длиной волны

\* Можно использовать результаты упражнения 3, п.2.

- $\lambda$ , если  
 а)  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$       б)  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$       в)  $\lambda = 0.55 \text{ мкм}$   
 г)  $\lambda = 0.6 \text{ мкм}$       д)  $\lambda = 650 \text{ нм}$       е)  $\lambda = 700 \text{ нм}$ .
- Сколько наблюдается максимумов при нормальном падении монохроматического света ( $\lambda = 589 \text{ нм}$ ) на решетку, имеющую 200 штрихов на 1 мм?
  - На решетку с периодом  $6 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  нормально падает монохроматический свет. Разность углов дифракции для максимумов второго и первого порядков равна  $4^\circ 36'$ . Определить длину световой волны.
  - Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет максимум третьего порядка на угол  $\varphi = 30^\circ$ . На какой угол отклоняет она максимум четвертого порядка?
  - На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, нормально падает белый свет. Диапазон длин волн видимого спектра  $\lambda_{\text{ф}} = 400 \text{ нм} \div \lambda_{\text{кп}} = 700 \text{ нм}$ . Могут ли перекрываться спектры первого и второго порядков?
  - На дифракционную решетку, имеющую 200 штрихов на 1 мм, нормально падает свет от разрядной трубки с водородом. При каком наименьшем угле дифракции максимумы линий  $\lambda_1 = 410.2 \text{ нм}$  и  $\lambda_2 = 656.3 \text{ нм}$  совпадают?
  - Постоянная дифракционной решетки в 4 раза больше длины волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определить угол между двумя симметричными дифракционными максимумами первого порядка.
  - Рассчитайте теоретическую разрешающую способность применяемой в работе призмы, применяя найденные в упр.6 значения разрешающей способности, в районе длины волны указанной линии спектра  
 а) синей б) желтой  
 Длина ребра призмы  $a = 30 \text{ мм}$ , ширина пучка света  $b \approx 0.5 \text{ мм}$ .
  - Найдите предельное значение преломляющего угла призмы.
  - Покажите, что при преломлении в призме с малым преломляющим углом  $\theta$  луч отклоняется на угол  $\varphi \approx (n - 1) \theta$  независимо от угла падения, если последний также мал.
  - Трехгранная призма с преломляющим углом  $60^\circ$  дает угол наи-

меньшего отклонения в воздухе  $37^\circ$ . Какой угол наименьшего отклонения даст эта призма в воде?

- Луч света, содержащий две монохроматические составляющие, проходит через трехгранную призму с преломляющим углом  $\theta = 60^\circ$ . Определить угол  $\Delta\varphi$  между обеими составляющими луча после призмы, если показатели преломления для них равны 1.515 и 1.520 и призма ориентирована на угол наименьшего отклонения.

Таблица вариантов заданий

№ варианта	Задания					
	1а	2а	3а	4	10а	14
1	1б	2б	3б	5	10б	13
2	1в	2в	3в	6	10а	12
3	1г	2г	3г	7	10б	11
4	1д	2д	3д	8	10а	14
5	1е	2е	3е	9	10б	13

### Контрольные вопросы

- Для чего используются спектральные приборы? Как они классифицируются?
- На каких физических принципах основано действие спектральных приборов?
- Перечислите наиболее важные характеристики спектральных приборов. Дайте их определение.
- Объясните принцип действия дифракционной решетки. Что такое «эффективный период» решетки?
- Как найти угловую дисперсию и разрешающую способность решетки? От чего они зависят?

6. Как можно определить показатель преломления материала призмы? От чего он зависит?
7. Что называется дисперсией материала призмы? Как найти угловую дисперсию и разрешающую способность призмы? От чего они зависят?
8. В чем заключаются недостатки призмы как диспергирующего элемента спектральных приборов?
9. Чем отличаются спектры, полученные с помощью дифракционной решетки и призмы?

### **Литература**

1. *Бутиков Е. И.* Оптика / Е. И. Бутиков. С.-Пб.: Невский диалект. 2003. Гл. 6.
2. *Матвеев А. Н.* Оптика / А. Н. Матвеев. М.: Высшая школа. 1985. §§ 15, 33.
3. *Ландсберг Г. С.* Оптика / Г. С. Ландсберг. М.: Физматлит. 2003. Гл. IX.
4. *Иродов И. Е.* Волновые процессы / И. Е. Иродов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2004. Гл. 5, 7.
5. *Савельев И. В.* Курс общей физики / И. В. Савельев. М.: Наука, 1989. Т. II. С. 397-407.