

## Лабораторная работа № 8

### Изучение спектрального прибора УМ-2

**Цель работы:** ознакомиться с принципом действия и характеристиками спектральных приборов.

**Приборы и принадлежности:** монохроматор УМ-2, ртутная лампа ДРШ высокого давления, неоновая лампа МН-5, блок питания.

#### Спектральные приборы.

Спектральными приборами называются все оптические приборы, в которых тем или иным способом осуществляется разложение электромагнитного излучения оптического диапазона на монохроматические составляющие. Рассмотрим принципиальную оптическую схему спектрального прибора (рис. 1).

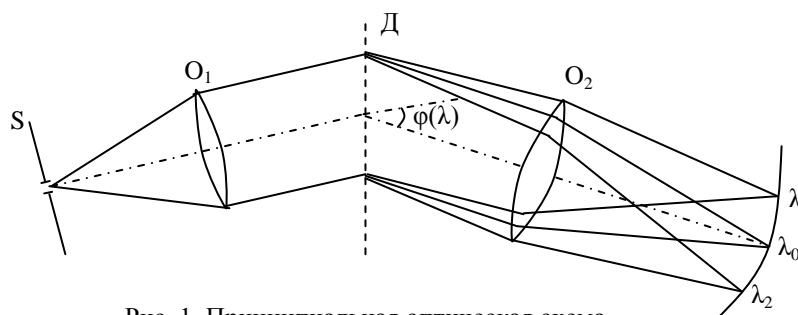


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема спектрального прибора.

Узкая входная щель  $S$ , освещаемая исследуемым излучением, устанавливается в фокальной плоскости коллиматорного объектива  $O_1$ , который от каждой точки щели направляет параллельные пучки лучей в диспергирующее устройство  $Д$ . Диспергирующее устройство отклоняет лучи на различные углы  $\varphi$  в зависимости от длины волны излучения  $\lambda$ , превращая параллельный пучок от входной щели в веер монохроматических параллельных пучков. Фокусирующий объектив (или объектив камеры)  $O_2$  создает на некоторой поверхности монохроматические изображения щели, совокупность которых и образует спектр. Поверхность изображения  $P$  (фокальная поверхность) в общем случае не является плоской. В оптическую схему спектрального прибора также входят осветительная часть с источником излучения и приемно-регистрационная часть с приемником излучения.

Спектральные приборы классифицируются по ряду признаков:

1. Способ регистрации спектра:
  - а) визуальный (спектроскопы);
  - б) фотографический (спектрографы);
  - в) фотоэлектрический (спектрометры и спектрофотометры).
2. Вид диспергирующего устройства:
  - а) призмные приборы;
  - б) дифракционные приборы;
  - в) интерференционные приборы.
3. Область спектра, в которой они работают.
4. Назначение (например, для эмиссионного спектрального анализа, для исследования комбинационного рассеяния и т.д.).

Конструкция прибора и его оптическая схема определяются совокупностью всех четырёх классификационных признаков, но в большей степени – первым из них, по этому признаку обычно прибор и получает свое название.

При фотографическом или визуальном способе регистрации спектра весь исследуемый участок спектра либо фотографируется на фотопластинку, либо исследуется визуально. При фотоэлектрическом способе регистрации возникает необходимость последовательно выделять узкие участки спектра с помощью выходной щели, т.е. сканировать спектр. Сканирование можно осуществить либо перемещением щели при неподвижном диспергирующем устройстве, либо изменением положения диспергирующего устройства при неподвижных входной и выходной щелях. Второй способ наиболее удобен и чаще всего применяется в конструкциях спектрометров и спектрофотометров.

Основная часть спектрометра или спектрофотометра, включающая входную щель, коллиматорный и фокусирующий объективы, диспергирующее устройство и выходную щель, представляет собой монохроматор.

Монохроматоры могут быть использованы как монохроматорные осветители.

### Характеристики спектральных приборов.

Основные характеристики спектральных приборов – рабочая область спектра, увеличение спектрального аппарата, дисперсия и разрешающая способность.

Рабочая область спектра. Каждый спектральный аппарат рассчитан на работу в определенной области спектра. Оптические детали самого спектрального аппарата и системы освещения щели должны быть прозрачны во всей области спектра.

Увеличение спектрального аппарата. Увеличение любого оптического прибора показывает отношение размера изображения к размерам объекта. В спектральном аппарате объектом служит щель, а изображением – спектральная линия. Увеличение спектрального аппарата определяется по формуле:

$$\beta = \frac{f_2}{f_1}, \text{ где}$$

$f_1$  и  $f_2$  – соответственно фокусные расстояния объективов коллиматора и камеры.

Если объектив камеры не исправлен на хроматическую абберацию, то его фокусное расстояние и увеличение заметно растут в области больших длин волн. При одной и той же ширине щели спектрального прибора линии, соответствующие длинноволновым участкам спектра, имеют несколько большую высоту и ширину.

Дисперсия. *Угловая дисперсия* показывает, как быстро изменяется угловое расстояние между спектральными линиями в зависимости от длины волны:

$$D_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda},$$

где  $\varphi$  – угол отклонения света диспергирующей системой от первоначального направления. Для двух близких спектральных линий угловая дисперсия определяется как отношение разности углов отклонения  $\Delta\varphi$  этих линий к разности длин волн  $\Delta\lambda$ :

$$D_\varphi = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda}.$$

Угловая дисперсия есть характеристика диспергирующего устройства, она определяет способность отклонять излучение различных длин волн на разные углы.

Для призмы угол отклонения  $\varphi$  зависит от коэффициента преломления вещества призмы, поэтому

$$D_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \cdot \frac{dn}{d\lambda},$$

т.е. дисперсия призмы определяется дисперсией вещества призмы.

В положении минимума отклонения

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}},$$

где  $A$  – преломляющий угол призмы. Тогда угловая дисперсия призмы определится как:

$$D_{\varphi} = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}.$$

*Линейная дисперсия* является характеристикой прибора в целом. Она показывает, как быстро изменяется расстояние между спектральными линиями в фокальной плоскости объектива камеры в зависимости от длины волны:

$$D_{\lambda} = \frac{\partial \ell}{\partial \lambda}.$$

Для двух близких спектральных линий расстояние между ними в фокальной плоскости равно  $\Delta l = f_2 \Delta \varphi$ , тогда  $D_l = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda} f_2$  или  $D_l = D_{\varphi} f_2$ .

Часто спектральный прибор характеризуют величиной

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \ell} = \frac{1}{\frac{\partial \ell}{\partial \lambda}},$$

называемой *обратной линейной дисперсией*. Она выражается в мкм/мм, нм/мм, Å/мм.

Зная линейную дисперсию прибора, легко определить разность длин волн двух близких спектральных линий:

$$\Delta \lambda = \frac{1}{D_l} \Delta l.$$

Разрешающая способность спектрального прибора. Наличие значительной дисперсии ещё не обеспечивает возможности раздельного наблюдения двух близких спектральных линий. Каждая из таких линий может быть не видна отдельно из-за наложения дифракционных изображений. Рэлей ввёл критерий разрешения дифракционных изображений, который в применении к спектральным приборам звучит так: две спектральные линии являются разрешенными (раздельно наблюдаемыми), если

главный максимум дифракционной картины одной из линий совпадает по положению с первым дифракционным минимумом второй линии (рис. 2).

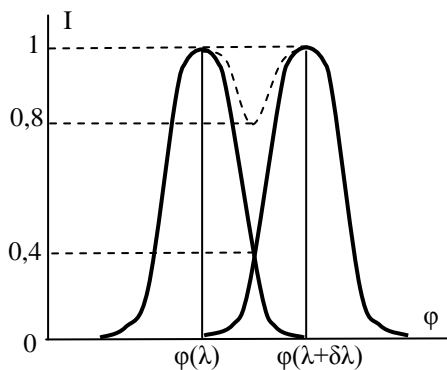


Рис. 2. Критерий разрешения Рэля для двух спектральных линий.

При равной интенсивности в максимумах обеих дифракционных картин ордината точки пересечения контуров примерно равна 0,4 минимальной интенсивности. При этом глубина "провала" между линиями составляет 20%, что достаточно для визуального раздельного наблюдения этих линий.

*Теоретической разрешающей способностью* спектрального прибора называют величину

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

где  $\delta\lambda$  – разность длин волн двух линий, удовлетворяющих критерию Рэля,  $\lambda$  – среднее значение длины волны. Величину  $\delta\lambda$  называют *теоретическим пределом разрешения*. Для призмы

$$R = L \frac{dn}{d\lambda},$$

где  $L$  – длина основания призмы (призма полностью заполнена светом). Таким образом, разрешающая способность призмы определяется дисперсией ее материала и величиной её основания и не зависит от преломляющего угла.

### Монохроматор УМ-2.

Универсальный монохроматор УМ-2 является призмным спектральным прибором, который может работать в качестве монохроматора и спектроскопа. УМ-2 – прибор со стеклянной оптикой, работающий в спектральной области  $3800 \div 10000$  нм, фокусные расстояния его объективов – 280 мм.

Оптическая схема монохроматора УМ-2 с осветительной частью приведена на рис. 3.

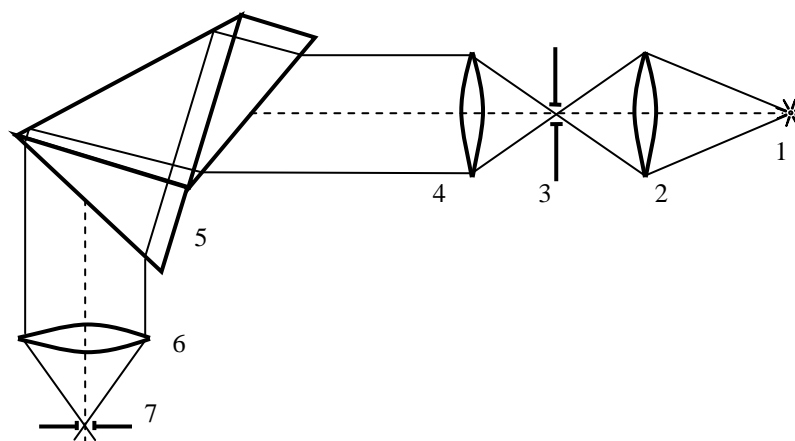


Рис. 3. Оптическая схема монохроматора УМ-2.

Свет от источника 1 фокусируется конденсором осветительной системы 2 на входной щели монохроматора 3, проходит через объектив коллиматора 4 и параллельным пучком падает на диспергирующую призму 5. Параллельные пучки разных длин волн, выходя из призмы 5 под разными углами отклонения, фокусируются объективом 6 в плоскости выходной щели 7.

Поворачивая призму 5 на различные углы относительно падающего на неё пучка света, получают в выходной щели свет различных длин волн, проходящий через призму под углом наименьшего отклонения.

Когда возникает необходимость использования прибора УМ-2 в качестве спектроскопа, выходная щель 7 заменяется насадкой со сменными окулярами, в которые рассматривается изображение входной щели. В этом случае объектив 6 с окуляром насадки превращается в зрительную трубу, а монохроматор – в спектроскоп постоянного отклонения.

Выходная труба монохроматора расположена под углом  $90^\circ$  к входной трубе, такая конструкция предусматривает использование диспергирующей призмы постоянного отклонения Аббе.

Призма Аббе (рис. 4а) состоит из трёх склеенных призм: двух прямоугольных "полупризм" с преломляющим углом  $A_1$  и прямоугольной призмы полного внутреннего отражения, отклоняющей лучи на  $90^\circ$  (обычно  $A_1 = 30^\circ$ ). Дисперсия света в этом случае происходит лишь на гранях I и II полупризм; средняя отражательная призма эквивалентна плоскопараллельной пластинке.

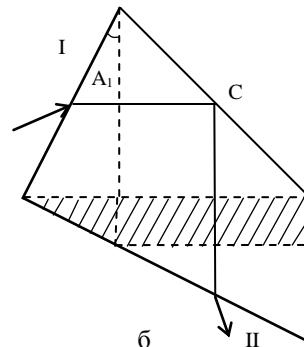
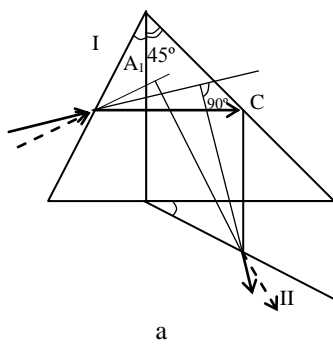


Рис.4. Ход лучей в призме Аббе.

Призма Аббе обладает следующим свойством: для лучей любой длины волны, падающих на первую грань под углом  $i_1(n)$

$$i_1(n) = \arcsin(n \cdot \sin A_1),$$

т.е. проходящих параллельно основаниям полупризм, угол отклонения равен  $90^\circ$ . По угловой дисперсии и потерям на отражение при преломлении на гранях I и II эта система эквивалентна одиночной призме с углом  $A = 2A_1$ .

Потери света из-за поглощения в призме Аббе больше, чем в одиночной призме ввиду большей длины хода лучей. Поэтому для увеличения пропускания в фиолетовой области спектра отражательная прямоугольная призма изготавливается из стекла с малым показателем преломления (крон), а диспергирующие полупризмы – из стекла с большой дисперсией  $\frac{dn}{d\lambda}$  (тяжелый флинт).

Иногда, чтобы избежать склеивания между собой трёх деталей, призму Аббе делают в виде целого стеклянного блока из одного материала (рис. 4б). При этом увеличивается длина хода лучей в стекле, объём и вес призмы (лишняя часть на рисунке заштрихована); кроме того, требования к однородности материала для большого стеклянного блока выполнить труднее, чем для трёх отдельных призм.

Внешний вид монохроматора представлен на рис. 5. (Не представляется возможным изобразить монохроматор здесь, поэтому рисунок прибора смотрите в старых описаниях.) Монохроматор укреплен на оптической скамье, где также размещены источник света и конденсор. Объектив коллиматора, диспергирующая призма и объектив зрительной трубы находятся внутри корпуса. Ширина щели 1 регулируется микрометрическим винтом 2. Для получения яркого изображения входной щели объектив коллиматора должен быть расположен так, чтобы входная щель находилась в его фокусе. Фокусировка объектива коллиматора производится при помощи маховичка 3. В фокальной плоскости фокусирующего объектива (объектива зрительной трубы) располагается выходная щель 4, ширина которой регулируется микрометрическим винтом 5. При работе прибора в режиме спектроскопа выходная щель снимается и устанавливается патрубком с окуляром 6. В фокальной плоскости окуляра имеется индекс, освещаемый лампочкой подсветки через сменные светофильтры в револьверной оправе 7. Вывод спектральной линии на индекс (при работе со спектроскопом) или на выходную щель производится поворотом диспергирующей призмы при помощи барабана 8. Барабан 8 является отсчетным устройством прибора. При повороте барабана на одно деление ( $2^\circ$ ) призма поворачивается на  $20''$ .

## Задания к работе.

1. Провести градуировку шкалы барабана УМ-2.
2. Найти длину волны желтой линии неона.
3. Построить график зависимости обратной линейной дисперсии монохроматора от длины волны.

Задание 1. Провести градуировку шкалы барабана. Она производится для того, чтобы выразить показания шкалы барабана в длинах волн. Для градуировки пользуются ртутной лампой высокого давления ДРШ и неоновой лампой МН-5, спектры которых состоят из большого числа близко расположенных, хорошо изученных линий.

Градуировка состоит из следующих операций:

1) Лампу ДРШ установить на оптической скамье по метке и включить в сеть через блок питания. Регулируя положение лампы, добиться полного освещения шкалы монохроматора.

2) Поворачивая барабан, посмотреть через окуляр весь спектр от фиолетовых до красных линий. При правильном положении лампы все линии должны быть ровно и ярко освещены.

3) Совместить с индексом окуляра жёлтую линию Hg и сделать пробный отсчёт, который необходимо показать преподавателю. Если отсчёт сделан правильно, можно приступить к измерениям.

4) Последовательно совместить с индексом линии ртути от красной до фиолетовой и сделать отсчёты по барабану монохроматора, отмечая цвет линии. Затем измерения повторить в обратном порядке. По полученным отсчётам вычислить среднее значение по барабану для каждой спектральной линии.

5) Взяв из таблицы значения длин волн для ртути, построить градуировочный график на миллиметровой бумаге. По оси ординат отложить углы  $\alpha$ , отсчитанный по барабану  $\theta$ , по оси абсцисс – соответствующие длины волн  $\lambda$ . Масштаб следует выбрать так, чтобы график позволял чётко определить длину волны с точностью до 1 нм.

Задание 2. Определить длину волны линии спектра неона. Необходимо отодвинуть ртутную лампу и установить по меткам неоновую МН-5. Найдя жёлтую линию неона, сделать отсчёт по барабану. С помощью градуировочного графика найти длину волны жёлтой линии неона.

Задание 3. Определить дисперсии монохроматора УМ-2. Необходимо определить обратную линейную дисперсию для следующих длин волн спектра ртути: 410, 436, 486, 520, 546, 580, 610, 628 нм.

Как известно, обратная линейная дисперсия определяется следующим образом:

$$\frac{1}{D_{\lambda}} = \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} = \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} \cdot \frac{1}{f}.$$

Для монохроматора с диспергирующей призмой Аббе угол  $\varphi$  (угол отклонения лучей призмой) соответствует углу поворота призмы. Фокусное расстояние объектива  $f = 280$  мм. Угол поворота призмы связан с углом поворота барабана  $\alpha$  следующим образом:  $\varphi = \alpha \cdot K$ , где  $K$  – цена деления барабана монохроматора ( $1^\circ$  шкалы барабана соответствует  $10''$  угла поворота призмы). Тогда, учитывая, что  $\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = K \frac{\partial \alpha}{\partial \lambda}$ , получим

$\frac{1}{D_{\lambda}} = \frac{1}{K} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{f}$ . Для определения величины обратной линейной дисперсии для любой

длины волны необходимо использовать градуировочный график. Проведя касательную

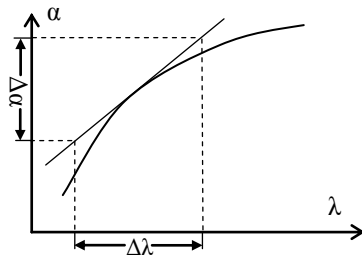


Рис. 6. Определение величины  $\partial\alpha/\partial\lambda$  по градуировочному графику.

к графику в данной точке, можно найти величину  $\frac{\partial\alpha}{\partial\lambda} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\lambda}$  (рис. 6). Тогда  $\frac{1}{D_\ell} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\alpha \cdot f \cdot K}$ , где  $\Delta\lambda$  измеряется в Å,  $f$  – в мм,  $\Delta\alpha$  – в радианах.

Вычислить значения  $\frac{1}{D_\ell}$  для указанных длин волн, построить график зависимости обратной дисперсии от длины волны  $\frac{1}{D_\ell}(\lambda)$ .

### Контрольные вопросы.

1. Принцип действия спектральных приборов.
2. Оптическая схема и принцип действия прибора УМ-2. Особенности призмы постоянного отклонения (призмы Аббе).
3. Охарактеризовать спектральный призмный прибор:
  - а) угловая и линейная дисперсия;
  - б) разрешающая способность;
  - в) рабочая область спектра.

### ВНИМАНИЕ!

РТУТНАЯ ЛАМПА – мощный источник света. Во время работы в лампе развивается давление до  $300 \text{ н/см}^2$ , поэтому обращаться с ней следует чрезвычайно осторожно. Включение и выключение лампы производит только лаборант. НЕ ТРОГАТЬ ЗАЩИТНОЕ СТЕКЛО.

### ТАБЛИЦА.

Интенсивные линии спектров ртути и неона.

Цвет линии.	Длина волны, нм.
Интенсивные линии спектра ртути.	
красная	690,6
ярко-красная	623,4
красно-оранжевая 1	612,3
красно-оранжевая 2	607,3
желтая 1	579,0
желтая 2	576,9
светло-зеленая	546,1
сине-зеленая	491,6
синяя 1	435,8
синяя 2	434,7
синяя 3	433,9
фиолетовая 1	407,8
фиолетовая 2	404,7
Интенсивные линии спектра неона.	
желтая	585,2
зеленая светлая	576
сине-зеленая	484

### Рекомендуемая литература.

- Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1976.  
 Шишловский А.А. Прикладная физическая оптика. М., 1961.  
 Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л., 1975.  
 Лабораторный практикум по физике./Под ред. Ахманова А.С. М., 1980.