

Лабораторная работа №2

КАЧЕСТВЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ МОНОХРОМАТОРА УМ-2

Цель работы

Ознакомление с основными принципами спектрального анализа; изучение оптической схемы спектральных приборов и их характеристик; определение по спектру неизвестного элемента с помощью монохроматора УМ-2.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основные определения

Спектральным анализом называется физический метод определения химического состава вещества, основанный на изучении спектра излучения или поглощения электромагнитных волн этим веществом. Различают качественный и количественный анализ. Задачей качественного спектрального анализа является установление всех химических элементов, из которых состоит исследуемый образец. Она решается путем измерения длин волн спектральных линий излучения вещества и отождествления их по таблицам с определенными химическими элементами.

В задачу количественного спектрального анализа входит определение концентраций химических элементов, содержащихся в веществе-источнике излучения. Этот анализ производится путем измерения интенсивностей спектральных линий данного элемента и последующего сравнения их с интенсивностями тех же линий в образцах с известной концентрацией того же элемента.

Спектральный анализ в подавляющем большинстве случаев точнее, быстрее и чувствительнее химических методов и поэтому широко применяется в современном производстве и в научных исследованиях. Особую роль играет спектральный анализ в астрофизике: здесь это единственный экспериментальный метод определения химического состава в строении звезд.

Развитие спектрального анализа

Путь к современным методам, технике и пониманию физических основ спектрального анализа был длинным и непростым. Началом систематического изучения спектров излучения вещества следует считать работы И.Ньютона по преломлению света в призмах. Он первым сформулировал идею о том, что белый свет

является составным, т.е. представляет собой смесь лучей различного цвета и различной преломляемости.

В 1834 г. Ф.Тальбо первым пришел к заключению: “Когда в спектре пламени появляются какие-либо определенные линии, они характеризуют металл, содержащийся в пламени”. В 1835 г. Ч.Уитстон, исследуя спектр электрической искры, подтверждает эту мысль: линии спектра зависят только от качества электродов, причем для каждого материала характерен свой спектр.

В 1854-1859 г.г. физик Г.Р.Кирхгоф и химик Р.Б.Бунзен провели большую серию экспериментов со спектрами излучения различных веществ, возбуждаемых в пламени газовой горелки и пришли к фундаментальному выводу: “Разнообразие соединений, в которые входили металлы, разнообразие химических процессов, происходивших в различных пламенах, и огромный интервал температур – все это не оказывает никакого влияния на положение спектральных линий отдельных металлов”. Тем самым были сформулированы основы спектрального анализа: однозначная связь вида спектра с химической индивидуальностью атомов данного элемента. Сейчас говорят так: спектры – это паспорта атомов.

Плодотворность спектральных методов не замедлила проявиться: стоило в спектре какого-то соединения обнаружить неизвестные ранее линии, как химическим путем из этого соединения извлекался новый элемент. Так были открыты: рубидий (1860 г.), цезий (1861 г.), таллий (1862 г.), индий (1863 г.), галлий (1875 г.), гелий (1895 г.).

Однако, несмотря на значительные успехи в практическом применении спектрального анализа, вплоть до начала XX века оставались неясными фундаментальные физические вопросы: как устроен атом; почему спектры излучения атомов состоит из отдельных узких линий, тогда как спектры излучения молекул представляет собой набор относительно широких полос; почему спектры всех элементов разные? Иными словами: каков механизм излучения и поглощения света веществом. Ответить на эти вопросы классическая физика не смогла.

Постулаты Бора

В 1913 г. Нильс Бор постулировал дискретность энергетических состояний атомов, откуда с необходимостью следует квантовый характер поглощения и излучения света.

Первый постулат Бора гласит: атом может находиться лишь в определенных дискретных энергетических состояниях, в которых он не излучает, несмотря на ускоренные движения входящих в его состав заряженных частиц. Такие состояния называются стационарными.

Согласно второму постулату атом излучает или поглощает энергию лишь при скачкообразном переходе из одного стационарного состояния в другое. При этом частота излученного или поглощенного кванта света пропорциональна разности энергии начального E_1 и конечного E_2 состояний:

$$h\nu = E_1 - E_2. \quad (1)$$

Коэффициентом пропорциональности служит постоянная Планка h .

Постулаты Бора имеют чрезвычайно общий характер и применимы к любому атому или атомной системе. Их правильность многократно подтверждена экспериментально. Таким образом, теория Бора хорошо описывает физический механизм поглощения и излучения света.

Каждое стационарное состояние атома характеризуется определенной энергией E_n ($n=1,2,3,\dots,\infty$). Поэтому принято говорить об энергетических уровнях данного атома и наглядно представлять их в виде схемы уровней энергии (рис.1).

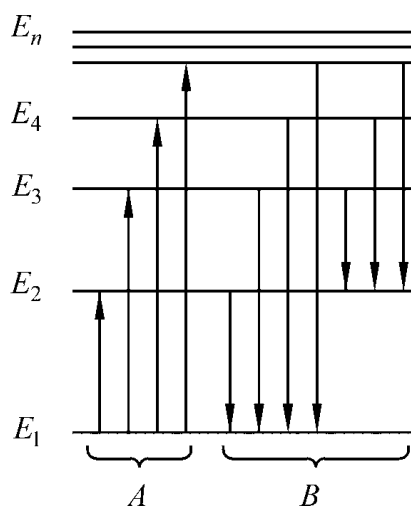


Рис. 1. Энергетические уровни атома и переходы между уровнями, сопровождаемые поглощением или излучением квантов света

На схеме по оси ординат откладываются дискретные значения энергии E_n стационарных состояний, а ось абсцисс не имеет никакой координаты. Горизонтальные прямые фиксированных значений E_n обозначают скачкообразные переходы электрона в атоме из одного стационарного состояния в другое. Стрелками вверх показано поглощение света. Стрелки вниз означают испускание кванта света с соответствующим уменьшением энергии атома. Частоты излучения и поглощения могут быть легко рассчитаны по формуле (1).

Важно подчеркнуть, что спектральные переходы возможны строго между определенными уровнями энергии. Никаких промежуточных переходов в атоме быть не может. Следовательно, не может быть и квантов света с промежуточными значениями энергии, а значит и частоты ν .

В современной квантовой механике строго доказано, что атомы каждого химического элемента имеют присущий только им набор возможных стационарных энергетических состояний. Переходы между этими состояниями и образуют спектр частот излучения (или поглощения), характерный только для данного элемента. Именно поэтому оказывается возможным отождествление химического элемента по его спектру испускания или поглощения, т.е. качественный спектральный анализ.

Число спектральных линий одинаковых атомов может быть очень велико. Например, спектр железа только в видимой и ультрафиолетовой областях содержит около 60 тысяч линий. У других многоэлектронных атомов число линий того же порядка. Следовательно, не исключено случайное совпадение некоторых частот в спектре различных атомов, что называется в спектроскопии "наложением" линий. Поэтому качественный спектральный анализ следует проводить по нескольким наиболее интенсивным линиям в исследуемом спектре. Совпадение измеренных длин волн этих линий с табличными данными надежно показывает присутствие элемента в источнике излучения.

Спектральные приборы

Общие характеристики. Спектральные приборы предназначены для анализа сложного излучения, непосредственно излучаемого различными телами или преобразованного в результате взаимодействия излучения с веществом. Эти

исследования проводятся в широком диапазоне длин волн от далекой ультрафиолетовой области до миллиметровых радиоволн.

Спектральные приборы позволяют:

- a) разложить исследуемое излучение в спектр, т.е. расположить по длинам волн излучение, которое попадает на вход прибора;
- b) зафиксировать положение отдельных участков спектра или отдельных спектральных линий;
- c) измерить интенсивность какого-либо участка спектра или спектральной линии.

По положению линий в спектре, т.е. по длинам волн, можно судить об уровнях энергии и внутреннем строении атомов и молекул, а по интенсивности линий – о вероятностях переходов между отдельными уровнями. Интенсивность спектральных линий определяется также числом излучающих атомов и молекул, что дает возможность определить содержание отдельных элементов и молекулярных соединений в исследуемом веществе. По форме контура спектральных линий можно сделать заключение о характере взаимодействия между частицами, о влиянии электрических и магнитных полей, а также о температуре, при которой происходит излучение. Таким образом, спектральные приборы исследуют излучение как сигнал, посылаемый в определенных условиях веществом и дающий информацию о его строении.

Различают атомный и молекулярный спектральный анализ. В обоих случаях анализ может проводиться по спектрам излучения и тогда он называется эмиссионным. Анализ по спектрам поглощения именуется абсорбционным.

Спектры излучения атомов обычно получают при высокой температуре источника света, при которой происходит испарение вещества, расщепление его молекул на отдельные атомы и возбуждение атомов.

При исследовании спектров важно, чтобы в процессе анализа молекулы не изменили своей структуры. Спектры молекул можно изучать и в излучении, и в поглощении. Спектры сложных молекул легче изучать в поглощении, так как при этом они не распадаются.

При абсорбционном анализе свет от источника со сплошным спектром пропускают через исследуемое вещество. При этом часть световой энергии будет избирательно поглощаться атомами или молекулами вещества. В результате на фоне сплошного спектра появятся темные линии и полосы поглощения. По положению, структуре и коэффициенту поглощения этих линий можно узнать состав и строение исследуемого вещества.

Принципиальная схема спектрального прибора и назначение отдельных узлов. Спектральный прибор состоит из трех основных частей: осветительной, диспергирующей и приемно-регистрающей.

Осветительная часть включает источник излучения и фокусирующую оптику, при помощи которой освещается узкая входная щель прибора.

Спектральная часть состоит из входной щели, диспергирующей и фокусирующей систем (рис.2).

Входная щель (3 на рис.2) является вторичным источником монохроматического света или “предметом” по отношению ко всей последующей оптической части прибора. Изображение щели, разложенное диспергирующей системой по длинам волн и сфокусированное на выходе прибора и представляет собой наблюдаемый спектр источника излучения.

В принципе спектральный прибор можно построить и без входной щели, используя в качестве предмета непосредственно источник излучения. Но все реальные источники имеют значительные размеры и после разложения в спектр их монохроматические изображения частично наложатся друг на друга и их невозможно

будет различать. Чтобы избежать этого, на пути лучей ставится узкая щель и ее монохроматические изображения получаются в виде резких линий. Именно форме изображения щели в свете той или иной длины волны обязано появление термина «спектральная линия».

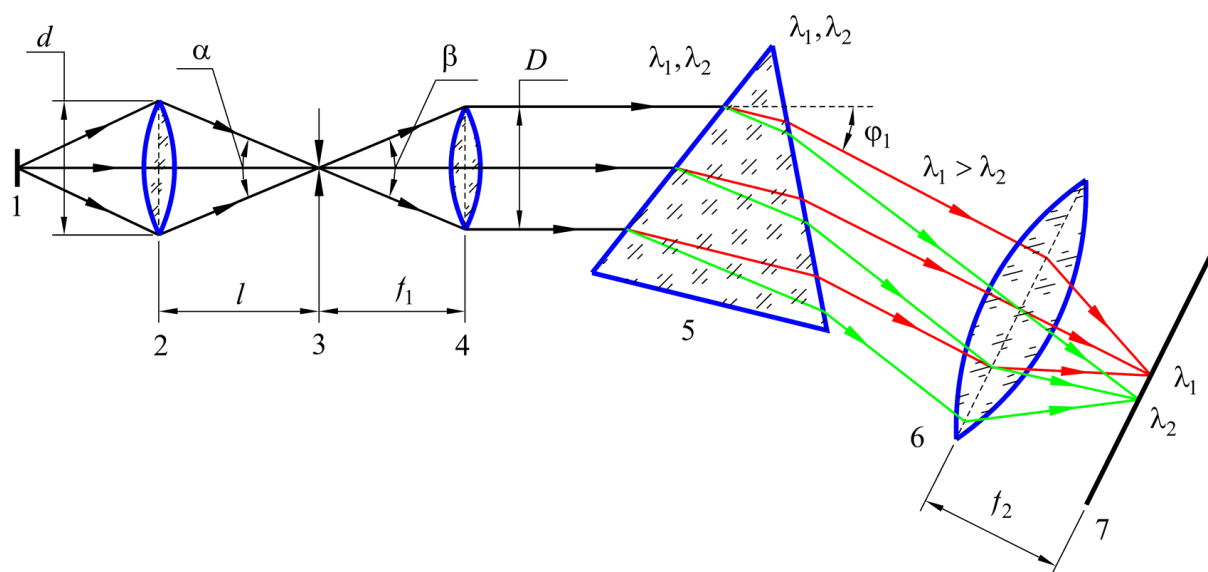


Рис. 2. Оптическая схема призмного спектрального прибора:

- 1 - источник света – исследуемое вещество;
- 2 - конденсорная линза;
- 3 - узкая входная щель;
- 4 - коллимирующий объектив;
- 5 - призма – диспергирующий элемент;
- 6 - фокусирующий объектив;
- 7 - фокальная плоскость – плоскость формирования спектра излучения.

Однако уменьшать ширину щели разумно лишь до определенного предела, обусловленного дифракцией, ниже которого дальнейшее ее сужение уже приводит не к уменьшению ширины спектральных линий, а, наоборот, к увеличению. Этот предел называется нормальной шириной щели и равен

$$S_H = f_1 \lambda / D, \quad (2)$$

где D - диаметр пучка света, падающего на призму, а затем на фокусирующий объектив.

При любой ширине щели $S \geq S_H$ дифракционными явлениями на ней можно пренебречь и рассматривать ход лучей в приборе по законам геометрической оптики.

Часть прибора, включающая щель 3 и первый по ходу лучей объектив 4 на рис.2, называется *коллиматором*. Его назначение – создать параллельные пучки лучей. Поэтому щель всегда ставится в фокусе объектива, а сам объектив должен быть ахроматическим, т.е. его фокусное расстояние не должно зависеть от длины волны.

Для получения максимальной интенсивности спектра объектив коллиматора должен быть полностью заполнен светом. Это достигается специальным выбором условий освещения щели.

Источник света с большой равномерной излучающей поверхностью можно расположить непосредственно перед щелью. Если угловая ширина источника α (рис.2), не меньше углового размера коллимирующего объектива β , то коллиматор заполнен

светом. При этом никакая осветительная система не может увеличить световой поток, приходящий в прибор. Из условия $\alpha = \beta$ (рис.2) следует, что источник диаметром d должен располагаться от щели (2) на расстоянии

$$l = f_1 d / D. \quad (3)$$

Если источник света мал или по техническим причинам его нельзя расположить близко к щели, чтобы выполнялось условие (3), пользуются линзовыми осветительными системами, формирующими изображение источника на входной щели спектрального прибора, как показано на рис. 2. В этом случае в условии (3) d – диаметр апертуры конденсорной линзы, l – расстояние от линзы до входной щели.

Диспергирующая система предназначена для пространственного разделения пучков света различных длин волн. В качестве диспергирующих элементов используются призмы, дифракционные решетки, а также интерферометр Фабри-Перо и другие приборы.

Рассмотрим ход лучей в призмном спектральном приборе (рис.2). Пусть источник 1 излучает свет только двух длин волн λ_1 и λ_2 . Выйдя из коллиматора, параллельный пучок света падает на призму 5 под одним и тем же углом. Для света длины волны λ_1 показатель преломления имеет значение n_1 . Поэтому параллельно падающие лучи света с одинаковой длиной волны одинаково преломляются на гранях призмы и выходят из нее снова параллельным пучком под некоторым углом φ_1 к первоначальному направлению. Лучи другой длины волны λ_2 также выйдут из призмы параллельным пучком, но в другом направлении, под углом φ_2 , т.к. $n_1(\lambda_1) \neq n_2(\lambda_2)$ (рис. 2 и 3). Так призма осуществляет пространственное разделение световых пучков различных длин волн.

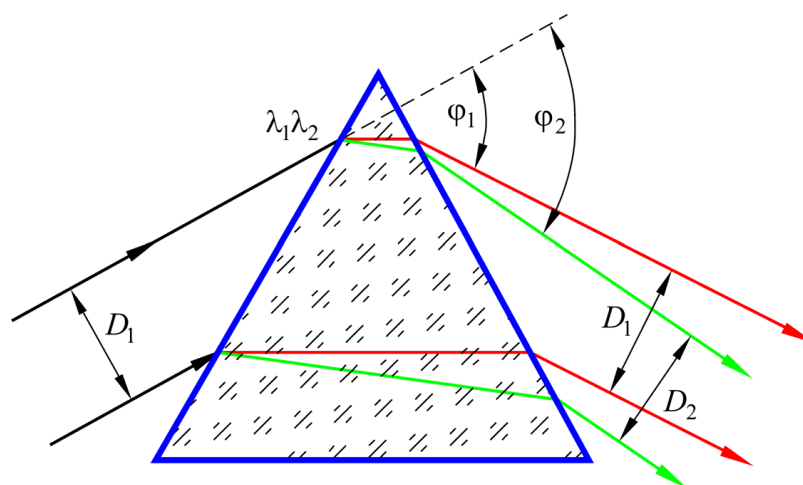


Рис. 3. Ход лучей света двух разных длин волн λ_1 и λ_2 через призму

Объектив камеры 6 собирает параллельные пучки света, выходящие из призмы, в своей фокальной плоскости 6. Так как лучи различных длин волн имеют после призмы различные направления, то в фокальной плоскости объектива камеры получается ряд параллельных, различно окрашенных изображений щели, образующих систему спектральных линий – спектр излучения источника (рис. 4, а).

Найдем ширину S' и высоту h' спектральной линии, если S и h – ширина и высота входной щели. На рис. 5 показан ход лучей в “спектральном приборе”, в котором отсутствует призма. Такое построение значительно облегчает отыскание изображения щели и возможно потому, что действие призмы сводится лишь к повороту на определенные углы падающего на него параллельного пучка света различных длин

волн (рис.3). При этом ширина пучка для лучей, падающих на призму под углом наименьшего отклонения, на выходе из призмы не меняется, что использовано при построении на рис.5. Тогда этот рисунок действительно представляет собой ход лучей в спектральном приборе без учета поворота пучка на угол φ_l .

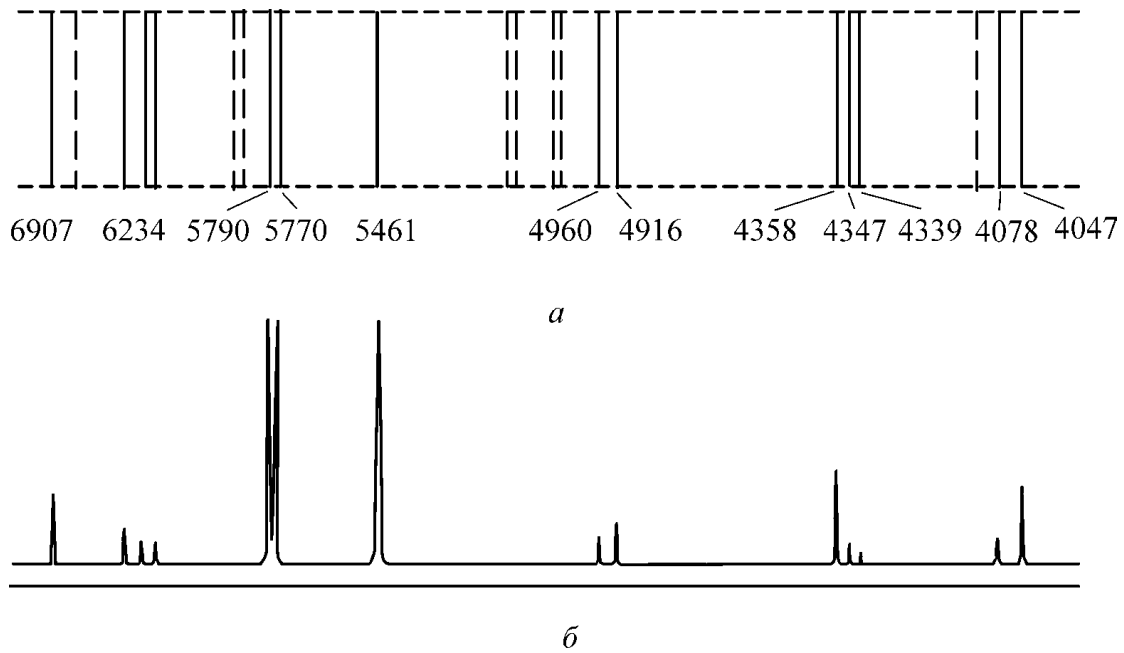


Рис. 4. Система спектральных линий излучения ртути (а) и соответствующее распределение интенсивности света в спектре (б)

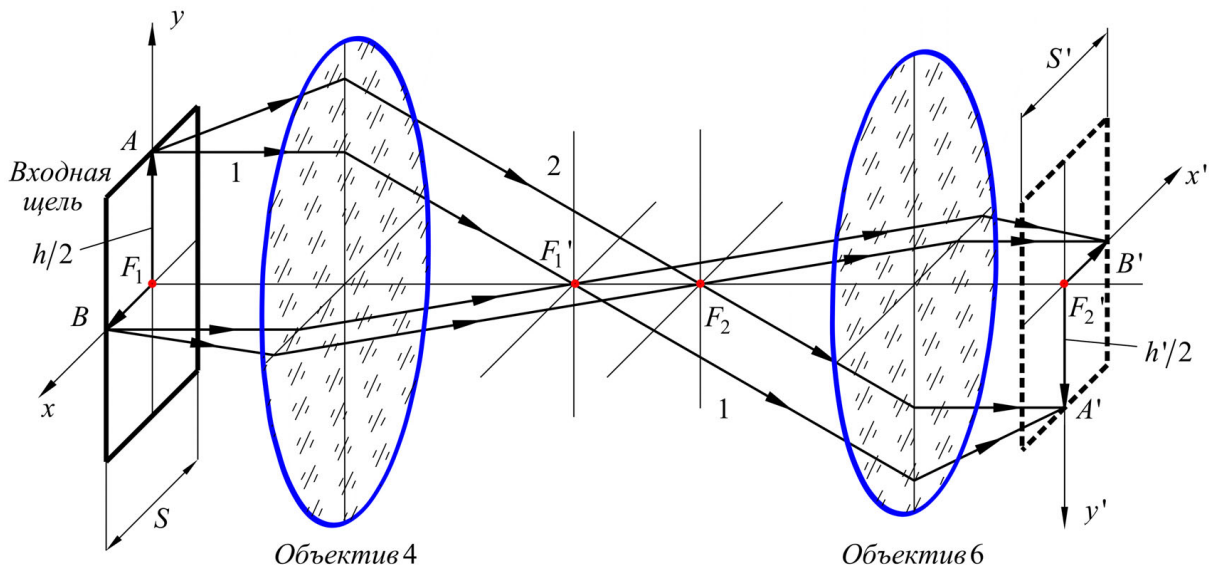


Рис.5. Ход лучей в спектральном приборе в отсутствие призмы

Пусть F_1A – полувысота входной щели прибора. Щель находится в передней фокальной плоскости первой линзы. Найдём изображение точки A . Луч 1, выходящий из точки A параллельно оптической оси, после преломления в линзе пройдет через ее фокус F_1' . Проведем луч 2 через передний фокус F_2 второй линзы так, чтобы он был параллелен лучу 1. Тогда луч 2 также выходит из точки A . Следовательно, лучи 1 и 2

после преломления во второй линзе пересекутся в точке A' , которая будет изображением точки A . Так как при падении на вторую линзу лучи 1 и 2 параллельны, то точка A' их пересечения лежит в фокальной плоскости. Эту точку легко найти, так как известно, что луч 2 проходит через передний фокус F_2 второй линзы и поэтому выходит из нее параллельно оптической оси.

Из рис.5 следует, что высота h' изображения щели

$$h' = h \frac{f_2}{f_1} = kh, \quad (4)$$

где h – высота щели, $k=f_2/f_1$ – увеличение прибора без учета увеличения, даваемого окуляром, который может использоваться для наблюдения спектральных линий.

Полагая на том же чертеже, что S есть высота щели, а S' – ширина спектральной линии, получим:

$$\frac{S}{S'} = \frac{f_1}{f_2}, \text{ т.е. } S' = S \frac{f_2}{f_1} = kS, \quad (4')$$

Приемно-регистрирующая часть. В фокальной плоскости объектива (6) камеры получается спектр, доступный измерению данным прибором. Если с этой плоскостью совместить эмульсию фотопластинки и включить источник света, то после проявления на пластинке появится в виде темных линий сразу весь участок спектра. Приборы подобного типа именуется *спектрографами*.

Можно поступить иначе: на пересечении оптической оси прибора с фокальной плоскостью объектива установить вторую щель (выходную), параллельную входной. Выходная щель при соответствующей ширине вырежет из всего спектра только одну спектральную линию. Такие приборы называют *монохроматорами*. С их помощью также можно изучить весь спектр, но для этого необходимо поворачивать диспергирующий элемент. Тогда через выходную щель последовательно пройдут все линии спектра. Если теперь поставить за щелью фотоприемник с усилителем (например, фотодиод или фотоэлектронный умножитель), а призму вращать автоматически, то можно записать весь спектр в виде максимумов интенсивности фотосигнала, расположенных в определенном порядке (рис. 4, б).

В последнее время в качестве фоторегистратора используются специальные матрицы и линейки фоточувствительных элементов (ПЗС–матрицы и ПЗС–линейки; ПЗС – прибор с зарядовой связью) формирующие сигнал в телевизионном формате. В сочетании со специальной платой ввода изображений и компьютером такие устройства позволяют получать в цифровом виде информацию о распределении интенсивности в спектре излучения. Фотоэлектрическая запись спектра имеет то преимущество, что на графике одновременно регистрируются длины волн, относительные интенсивности и форма спектральных линий.

В простейшем случае за фокальной плоскостью объектива можно поставить окуляр зрительной трубы и наблюдать спектр визуально. Приборы такого типа называются *спектроскопами*.

Оптические характеристики спектрального прибора. К основным характеристикам спектральных приборов, определяющим их функциональные возможности, относятся: дисперсия (угловая и линейная), разрешающая способность и светосила (относительное отверстие).

Угловая дисперсия D_φ характеризует способность диспергирующего элемента отклонять излучение различных длин волн на разные углы

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad (5)$$

где $d\varphi$ - угол между лучами с длинами волн λ и $\lambda+d\lambda$.

Линейная дисперсия D_l является характеристикой прибора в целом. Она определяет линейное расстояние dl между спектральными линиями с длинами волн λ и $\lambda+d\lambda$ в фокальной плоскости объектива камеры. Линейная дисперсия пропорциональна угловой D_φ и фокусному расстоянию объектива f_2 :

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda} = f_2 D_\varphi. \quad (6)$$

Разрешающая способность. Ранее было показано в (2) и (4), что наблюдаемая спектральная линия имеет конечную ширину. Поэтому линии двух близких волн не всегда и не любым прибором удастся наблюдать раздельно, они как бы сливаются, накладываясь друг на друга. Для каждого прибора существует предельная разность в длинах волн двух линий, которые еще могут наблюдаться раздельно: $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. Для призмных приборов эта разность не постоянна по спектру, она зависит от средней длины волны $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ этих линий.

Разрешающая способность R есть количественная оценка способности спектрального прибора различать две близко расположенные спектральные линии:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (7)$$

Светосила и относительное отверстие спектральных приборов. Для повышения чувствительности анализа важно, чтобы в спектральный прибор попадала максимально возможная доля энергии, излучаемой источником. Для этой цели применяются различные осветительные системы, задачей которых является: равномерное освещение щели и формирование пучка с углом падения на щель α , равным угловому размеру объектива коллиматора β . Допустим, что это условие выполнено. Тогда величиной, определяющей часть энергии, попадающей в прибор, является угол β , который определяется из условия

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{D}{2f_1}.$$

Обычно за меру светосилы прибора принимают величину D/f_1 , называемую относительным отверстием. Для фотообъективов D/f колеблется от 1:1,2 до 1:4 (нормальные объективы) и даже 1:20 (длиннофокусные телеобъективы). Чтобы увеличить светосилу диаметр телеобъективов приходится делать большим. Относительные отверстия спектральных приборов в зависимости от их назначения колеблется от 1:2 до 1:40.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель эксперимента: изучить оптическую схему и конструкцию монохроматора; освоить методику градуировки и отградуировать прибор; измерить длины волн спектральных линий неизвестного источника света и по ним с помощью таблиц спектральных линий определить состав светящегося газа.

Монохроматор УМ-2

Универсальный монохроматор для видимой области спектра УМ-2 разработан в начале 50-х годов. Прибор оказался настолько удачным, что он до сих пор серийно выпускается нашей промышленностью.

Оптическая схема УМ-2 приведена на рис.6. Свет от источника проходит через входную щель 1, установленную в фокусе ахроматического объектива коллиматора 2 и далее параллельным пучком падает на диспергирующий элемент – призму Аббе 3. Фокусное расстояние объектива $f_1 = 280$ мм, а диаметр его $D = 47$ мм. Поэтому относительное отверстие D/f_1 равно 1:6, т.е. это прибор средней светосилы.

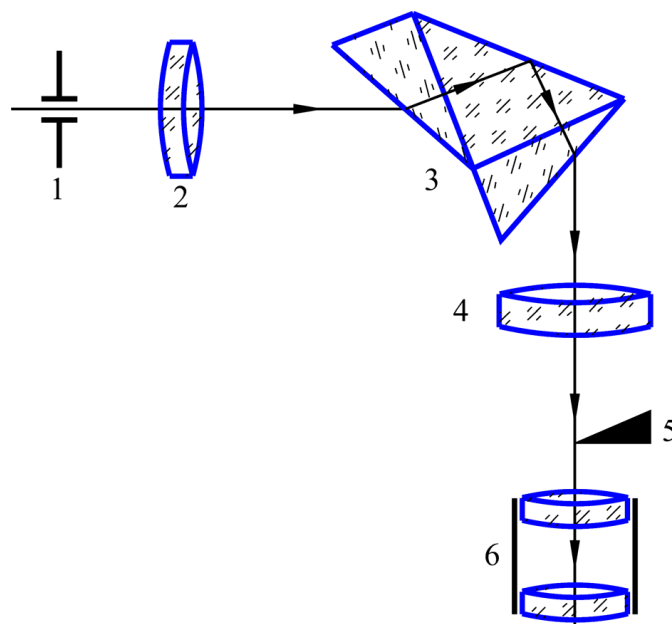


Рис. 6. Оптическая схема монохроматора УМ-2

Призма Аббе является не только диспергирующим элементом, но также отклоняет любой луч, идущий через нее под углом наименьшего отклонения, на 90° (рис.7). Призма делается из трех склеенных призм, одна из которых является поворотной.

От объектива коллиматора на призму падает параллельный пучок немонахроматического света. На входной грани призмы в силу дисперсии лучи различных длин волн преломляются по-разному. Один из лучей пойдет под углом наименьшего отклонения, т.е. параллельно основанию 1-й призмы и под углом 45° отразится от гипотенузной грани поворотной призмы полного внутреннего отражения и пройдет параллельно основанию 3-й призмы. Далее этот луч попадает на границу стекло-воздух, снова преломляется и выходит из призмы вдоль оптической оси приемной части прибора. Призмы 1 и 3, фактически, выполняют роль диспергирующей призмы.

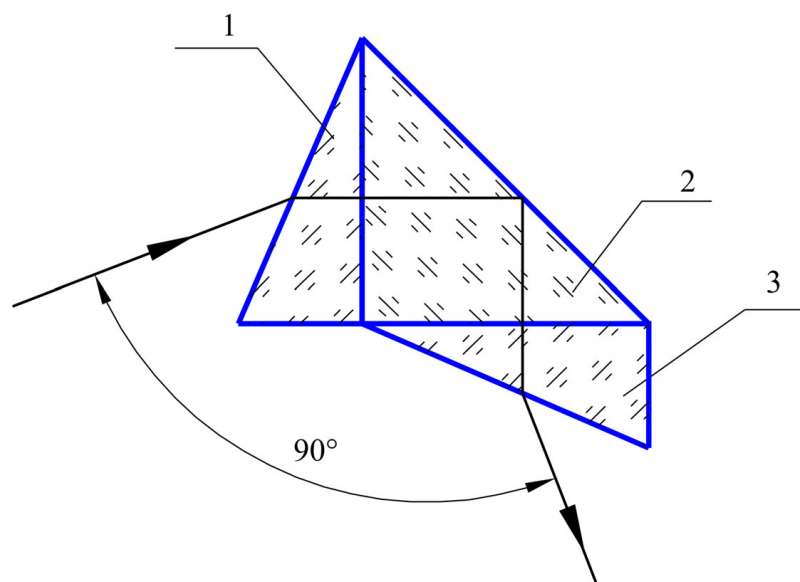


Рис. 7. Ход лучей света через призму Аббе

Лучи других длин волн отклоняются призмой на иные углы и выходят из нее параллельными пучками, не совпадающими с оптической осью.

Столик, на котором установлена призма, делается поворотным и вращается барабаном с отсчетами длин волн. Это позволяет вывести на оптическую ось прибора параллельный пучок лучей определенной длины. При этом угол 90° между входящим в призму и выходящим пучками данной λ сохраняется. Ахроматический объектив камеры 4 собирает все параллельные лучи различных длин волн в своей фокальной плоскости. Окуляр 6 служит для визуального отсчета положений спектральных линий. В комплект прибора входят сменная выходная щель и окуляр.

Выходная щель устанавливается на пересечении оптической оси прибора и фокальной плоскости объектива камеры. За щелью ставят фотоприемник и регистрирующий прибор. Поворачивая барабан длин волн (и призму) и фиксируя показания прибора, можно снять спектр, подобный изображенному на рис 4,б.

В данной работе используется визуальный метод наблюдения с помощью окуляра, который устанавливается вместо щели. В поле зрения окуляра оказывается не одна линия (как за выходной щелью), а несколько (рис.8).

Для индикации луча, идущего вдоль оптической оси прибора, в фокальной плоскости объектива камеры устанавливается игла 5, силуэт которой виден через окуляр вместе с изображениями спектральных линий (рис.8). Та из линий, которая совпадает с острием иглы, выведена на оптическую ось прибора. Ее положение фиксируется на барабане длин волн против риски указателя делений.

Изображение барабана установки ширины входной щели (1 на рис.10) представлено на рис. 9.

Общий вид монохроматора и его органы управления показаны на рис.10. Вращением по часовой стрелке барабанчика установки ширины входной щели (рис.9) можно щель открывать, в обратную сторону – закрывать. Сотые доли миллиметра указаны на верхнем торце барабанчика вертикальными штрихами. При установке щели нужное деление совмещают с вертикальной чертой на основании барабанчика. Пять горизонтальных черточек на основании соответствует первоначальному раскрытию щели на 0-1-2-3-4 мм. Один полный оборот барабанчика соответствует разрыву щели на 1 мм.

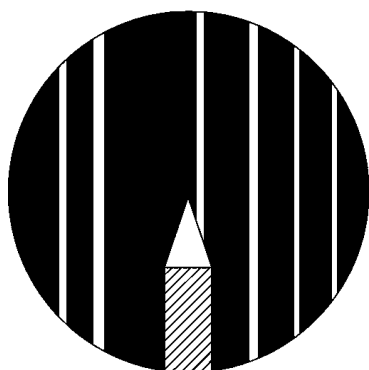


Рис.8. Вид поля зрения окуляра с набором спектральных линий и иглой-указателем

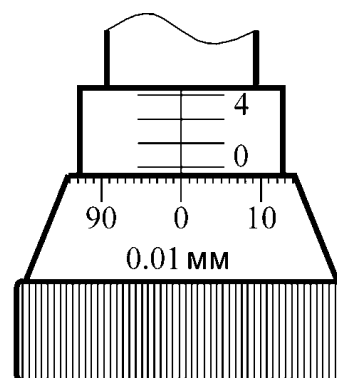


Рис.9. Барабан установки ширины входной щели монохроматора УМ

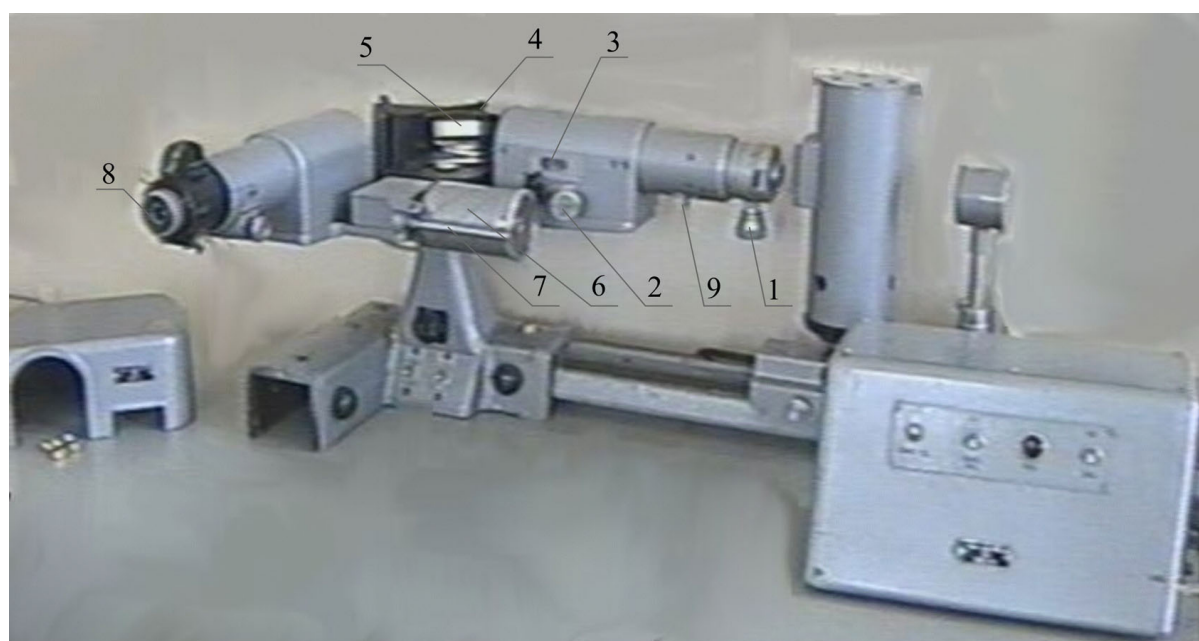


Рис. 10. Внешний вид монохроматора УМ-2:

- 1 - барабан установки ширины входной щели;
- 2 - маховичок фокусировки объектива коллиматора;
- 3 - шкала фокусировки объектива коллиматора;
- 4 - поворотный столик;
- 5 - призма Аббе;
- 6 - барабан поворота столика с отсчетными делениями угла поворота;
- 7 - указатель делений;
- 8 - окуляр;
- 9 - затвор коллиматора.

Положение барабанчика щели, показанное на рис.9, является недопустимым, так как при этом щель «зашкалена» за 0 и ее ножи плотно прижаты друг к другу. Чтобы установить требуемую ширину, необходимо:

а) поворачивая барабанчик, совместить его верхний край с горизонтальной чертой заданного числа целых миллиметров;

б) поворачивая барабанчик по часовой стрелке, установить сотые доли миллиметра несколько больше (на 0,10-0,20), чем требуется. Затем вернуться назад и точно установить заданную ширину щели. Такой порядок обусловлен тем, что ходовой винт любой щели имеет “мертвый ход”, а щель при градуировке под микроскопом устанавливается на 0 при ее закрывании.

Маховичок 2 фокусировки объектива коллиматора установлен при регулировке прибора и его может вращать только преподаватель или лаборант. Если наблюдаемый спектр окажется размытым, следует прежде всего добиться максимальной (по индивидуальному глазу) резкости спектральных линий вращением окуляра 8. Призма 5 установлена на столике 4, поворот которого осуществляется вращением барабана длин волн 6 с указателем делений 7. Барабан отградуирован в углах его поворота, при этом призма поворачивается во много раз медленнее. Поэтому, подводя барабаном длин волн каждую линию спектра на острие иглы окуляра, мы фиксируем не длину волны, а угол поворота барабана. Окуляр прибора 8 имеет накатанное кольцо, вращением которого можно добиться резкого изображения спектра и иглы-указателя в поле зрения окуляра.

Порядок проведения эксперимента

Упражнение 1. Градуировка монохроматора УМ-2. Прежде чем приступить к изучению спектров различных источников, монохроматор нужно проградуировать, т.е. определить длины волн, соответствующие делениям шкалы барабана. Для этого используется источник с известным спектром. В работе применяется спектр ртути.

На рельсе вблизи входной щели УМ-2 установить кожух с ртутной лампой и подключить ее к блоку питания. Включить блок в сеть 220 В, тумблер блока “сеть” перевести в положение “Вкл” и нажать кнопку “Пуск”. Лампа иногда загорается и без нажатия кнопки. Для достижения максимальной яркости ртутной лампы потребуется некоторое время (3-5 мин).

Установить входную щель 0,10 мм и открыть затвор коллиматора (9 на рис.10). Наблюдая через окуляр за спектром, вывести в поле зрения наиболее яркую желтую двойную линию (дублет) $\lambda_1 = 577$ нм, $\lambda_2 = 579,1$ нм (рис.4). Если изображение иглы указателя размыто, необходимо вращением кольца окуляра добиться его максимальной резкости. На отъюстированном приборе линии спектра при этом также будут резкими. Если же линии размыты, то с помощью преподавателя или лаборанта необходимо маховичком 2 (рис.10) сфокусировать спектр.

После окончания юстировки прибора необходимо вращением барабана длин волн в одну сторону последовательно устанавливать точно против иглы-указателя все линии ртутного спектра, записывая каждый раз длины волн, пользуясь табл.1, и соответствующие им деления барабана. Удобно начинать отсчет с фиолетовой линии 404,7 нм. Измерения провести 3 раза и усреднить полученные значения. Выключить блок питания.

Составить таблицу, включающую в себя длины волн ртутного спектра, соответствующие им цвета, а также измеренные и усредненные значения делений барабана длин волн для каждой линии. По данным этой таблицы построить градуировочный график зависимости длины волны λ (в нм) от соответствующих средних значений делений барабана. Масштаб длин волн по оси ординат выбирать не менее 0,1 нм в 1 см.

Длины волн ярких спектральных линий некоторых элементов

Табл.1

Ртуть		Гелий		Неон	
Окраска линии	нм	Окраска линии	нм	Окраска линии	нм
Красная	623,4	Темно-красная	706,5	Ярко-красная	640,2
Красно-оранжевая	612,3	Ярко-красная	657,8	Красно-оранжевая	614,3
Желтая	579,1	Оранжевая	587,6	Оранжевая	594,5
Желтая	577,0	Зеленая	501,6	Желтая	585,2
Зеленая	546,1	Зеленая	492,2	Зеленая	540,0
Сине-зеленая	491,6	Синяя	471,3	Зеленая	533,0
Фиолетовая	435,8	Фиолетовая	447,1	Зеленая	503,1
Фиолетовая	434,7	Фиолетовая	402,6	Сине-зеленая	484,9
Фиолетовая	433,9	Фиолетовая	388,9		
Фиолетовая	410,8				
Фиолетовая	407,7				
Фиолетовая	404,7				

Табл.2

Цвет линии	λ	φ_1	φ_2	φ_3	$\langle \varphi_3 \rangle$

Упражнение 2. Определение неизвестного элемента по его спектру излучения (качественный спектральный анализ). Заменить ртутную лампу на неизвестный газоразрядный источник света. Подключить его к блоку питания и включить разряд. Вращением барабана длин волн последовательно совмещать все линии исследуемого спектра с иглой-указателем, записывая каждый раз деление барабана и цвет наблюдаемой линии. Измерения проделать три раза и усреднить полученные значения. По полученным данным и градуировочному графику определить длины волн в спектре неизвестного элемента. Составить таблицу длин волн и цветов линий исследуемого источника света. Сравнивая полученные значения длин волн с данными таблицы 1, определить вещество исследуемого источника света.

Упражнение 3. Исследование зависимости ширины спектральной линии от ширины входной щели УМ-2. Каждая спектральная линия является монохроматическим изображением входной щели. Ее ширина S' связана с шириной щели S формулой (4')

$$S' = S \frac{f_2}{f_1} = kS. \quad (4')$$

Монохроматор УМ-2 позволяет проверить эту формулу и найти соотношение $k = f_2/f_1$.

Задание 1: показать, что S' является линейной функцией S .

Выберем в спектре ртути одиночную линию средней яркости. Наиболее удобной является голубая линия 435,8 нм. Слабые соседние линии 434,4 и 433,9 нм не помешают измерениям. При ширине входной щели 0,10 мм установить середину линии 435,8 нм перед иглой-указателем, а затем раскрыть щель до 3 мм.

Измерение ширины линии проводится в начале в угловых единицах. Для этого, вращая барабан длин волн в одну сторону, нужно совместить с иглой-указателем

левый, а затем правый край наблюдаемой линии, фиксируя против указателя барабана отсчеты φ_l и φ_{np} . Тогда $\Delta\varphi = \varphi_l - \varphi_{np}$ есть наблюдаемая угловая ширина линии в градусах. Снять зависимость $\Delta\varphi$ от S , уменьшая ширину щели на 0,20 мм в пределах от 3,00 до 0,20 мм и фиксируя при каждом измерении φ_l и φ_{np} . Полученные значения занести в табл.3. По полученным данным построить график зависимости $\Delta\varphi = f(S)$ и убедиться, что ширина спектральной линии зависит от ширины щели линейно.

Задание 2: найти отношение $k = f_2/f_1$.

Для вычисления $k = f_2/f_1$ по формуле (4') нужно S и S' выразить в одних и тех же единицах. Так как S измеряется в миллиметрах, то и угловую ширину $\Delta\varphi$ изображения щели S' следует выразить в линейных единицах, что будет соответствовать ширине действительного изображения линии в фокальной плоскости объектива камеры. Для этого необходимо умножить $\Delta\varphi$ на фокусное расстояние f_2 объектива трубы

$$S' = \Delta\varphi \cdot f_2,$$

где $f_2 = 280$ мм монохроматора УМ-2.

По этой формуле найти ширину S' изображения щели для всех значений S . Построить график зависимости $S'=f(S)$ и найти $k = f_2/f_1$ как тангенс угла наклона полученной прямой.

Табл.3

S , мм	φ_l	φ_{np}	$\Delta\varphi$	$S' = \Delta\varphi \cdot f_2$, мм	$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$
3.00					
2.80					
0.2					

Подсчитать среднюю квадратичную ошибку измерений S' .

Дополнительное упражнение. Интересно наблюдать, как влияет ширина щели на разрешение спектральных линий. Выведите в центр поля зрения желтый дублет спектра ртути. При очень узкой щели ($\leq 0,10$ мм) две линии дублета еще видны отдельно. Раскрывая щель, можно заметить, как за счет расширения линий их края смыкаются, и желтый дублет уже виден как одна линия. При дальнейшем раскрытии щели $>2,5$ мм начинают перекрываться желтая и зеленая линии спектра ртути.

Контрольные вопросы

1. На чем основан качественный спектральный анализ?
2. Постулаты Бора, схема уровней энергии атома. Переходы с излучением и поглощением.
3. Оптическая схема спектрального прибора и назначение отдельных узлов.
4. Как формируется изображение входной щели в фокальной плоскости объектива камеры?
5. Каково назначение призмы?
6. Основные характеристики спектрального прибора: дисперсия, разрешающая способность, светосила.
7. Оптическая схема монохроматора УМ-2. Действие призмы постоянного угла отклонения (призма Аббе).

Литература

1. Ландсберг Г.Г. Оптика. М.: Наука, 1976. § 86а, 94.
2. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1977; 1986. Гл.7.