



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра оптики и спектроскопии**

Специальный оптический практикум

Задача №2

**Дифракционный монохроматор МДР-23
с регистрацией на ФЭУ**

*Методическое пособие
для студентов физического факультета*

**Составитель:
Мушников А.В.**

Москва
2022

Оглавление

§ 1.	Монохроматоры	3
§ 2.	Основные свойства плоских дифракционных решеток	5
§ 3.	Освещение щели спектрографа	7
§ 4.	Ширина входной и выходной щели	8
§ 5.	Фотоэлектронные умножители.	9
§ 6.	Спектры пропускания и поглощения	11
§ 7.	Экспериментальная установка	14
§ 8.	Выполнение работы	16
§ 9.	Инструкция по работе с программой	17
	Литература.	18

§ 1 Монохроматоры

Спектральные приборы можно разделить на два типа – спектрографы и монохроматоры.

Входная часть оптической схемы первых и вторых сходна, различия начинаются после камерного объектива.

В спектрографах свет с разной длиной волны, идущий после диспергирующего элемента под разными углами, фокусируется в разных точках фотопластины или другого протяженного приемника – матрицы или линейки, расположенных в фокальной плоскости.

В монохроматорах в фокальной плоскости расположена выходная щель (Рис. 1.1). Из падающего на фокальную плоскость спектра большая часть поглощается, а узкий участок, попавший на щель, проходит через неё. Прошедший через щель свет может либо направляться в приемник, либо использоваться в других целях, превращая прибор в источник монохроматического излучения. Чтобы изменить длину волны выходящего из щели света, диспергирующий элемент (либо одно из зеркал монохроматора) делают поворотным.

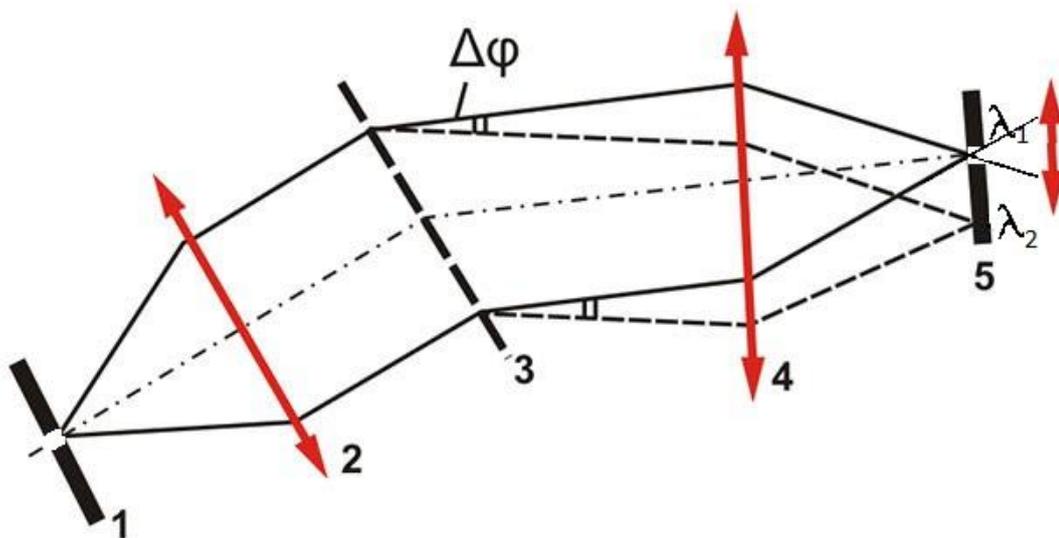


Рис. 1.1. Принципиальная оптическая схема монохроматора.

Показан ход лучей с разными длинами волн λ_1 и λ_2 . Излучение от источника проходит через входную щель 1, которая находится в фокусе коллиматорного объектива 2, формирующего параллельный пучок света, падающий на диспергирующий элемент 3, после которого лучи с разными длинами волн идут под разными углами. Лучи с длиной волны λ_1 и λ_2 фокусируются в разных точках фокальной плоскости камерного объектива 4. Выходная щель 5, расположенная в этой плоскости, пропускает узкий участок спектра с длиной волны λ_1 . Для настройки монохроматора на другую длину волны следует повернуть диспергирующий элемент на угол φ .

Так как монохроматор выдает монохроматический пучок, то нет необходимости использовать многоканальный приемник (фотопластинку, ПЗС-матрицу и т.д.). Можно использовать одноканальный приёмник с хорошей чувствительностью и широким диапазоном, например ФЭУ.

В качестве диспергирующего элемента в большинстве современных монохроматоров применяется отражающая дифракционная решетка. Чтобы избежать хроматических aberrаций и неоднородного поглощения изучаемого света в стекле в качестве коллиматорного и камерного объективов используются параболические зеркала.

Дополнительным преимуществом зеркальной оптики является уменьшение габаритов прибора за счет многократного разворота пучка почти на обратное направление.

На рисунке показана наиболее распространенная и используемая в изучаемом приборе оптическая схема Черни–Тернера. Кроме компактности прибора, достоинством данной схемы является то, что входной и выходной пучки лежат на одной оптической оси.

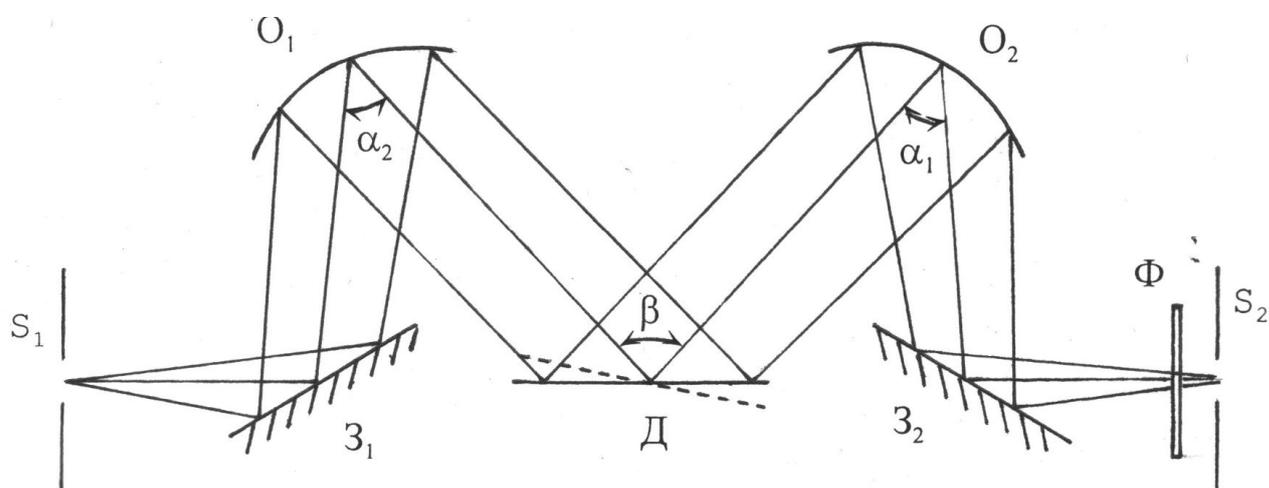


Рис. 1.2. Монохроматор, построенный по схеме Черни–Тернера.

S_1 и S_2 - входная и выходная щели, O_1 и O_2 - зеркальные объективы,

Z_1 и Z_2 - поворотные зеркала, D - дифракционная решетка, Φ - фильтр.

§ 2. Основные свойства плоских дифракционных решеток.

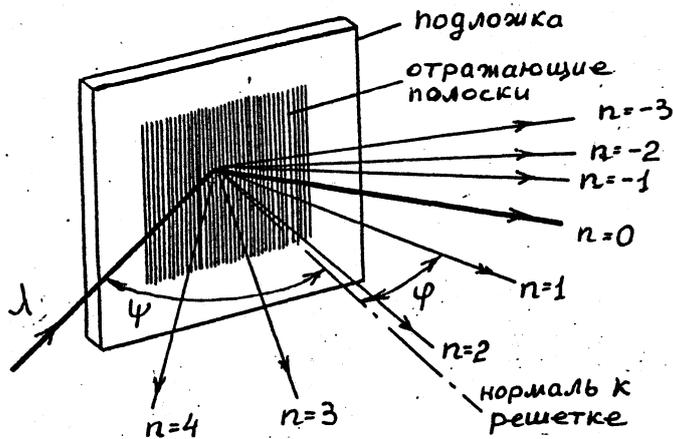


Рис.2.1. Дифракция монохроматического пучка света с длиной волны λ на плоской решетке; ψ - угол падения, φ - угол дифракции, n - номера порядков.

Плоская дифракционная решетка представляет собой систему параллельных равноотстоящих полосок, нанесенных на поверхности какой-либо пластинки (подложки). Решетки могут быть пропускающие, тогда используется свет, прошедший через щели между полосками, или отражающие, тогда используют свет, отраженный от зеркальных штрихов (зеркальных полосок). В спектроскопии применяют только отражательные дифракционные решетки.

На рис.2.1 показано расположение лучей, дифрагировавших на отражательной решетке. На решетку под углом ψ падает монохроматический световой пучок с длиной волны λ . Лучи, отраженные от различных штрихов решетки, когерентны и интерферируют между собой. Условия интерференции зависят от длины волны λ и углов падения ψ и дифракции φ . Принято, что углы ψ и φ отсчитываются от нормали к решетке и имеют разные знаки, если расположены по разные стороны от нормали. По направлениям, для которых разность хода лучей, отраженных от соседних штрихов, равна целому числу длин волн, образуются главные максимумы:

$$d(\sin\psi + \sin\varphi) = n\lambda, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Условие максимума нулевого порядка спектра:

$$d(\sin\psi + \sin\varphi) = 0 \quad (2)$$

определяет угол φ , под которым распространяется свет с любыми длинами волн. Это соотношение совпадает с законом зеркального отражения: $\psi = -\varphi$.

На рис.2.2 показана упрощенная схема спектрального прибора. Плоская решетка устанавливается в параллельном пучке лучей. Штрихи решетки должны быть параллельны входной щели. Пучок света попадает в прибор через входную щель 1, отражается от плоского зеркала 2 и после линзы 3 параллельным пучком падает на решетку. Угол падения лучей на решетку в данном случае равен нулю ($\psi=0$). Чтобы зеркало 2 не мешало распространению дифрагировавших лучей, решетка немного наклонена и поэтому падающий пучок находится в другой плоскости, наклоненной относительно плоскости падающих лучей.

При отражении пучка света от дифракционной решетки происходят два явления - дифракция на каждом зеркальном штрихе шириной b и интерференция лучей, отраженных от всех штрихов (общее число штрихов решетки равно N , период их равен d).

Результат дифракции на каждом штрихе показан на рис.2.2 в фокальной плоскости 6 линзы 3 пунктиром,

$$\Phi(u) = \frac{\sin^2 u}{u^2}, \quad u = \pi b (\sin\psi + \sin\varphi) / \lambda \quad (3)$$

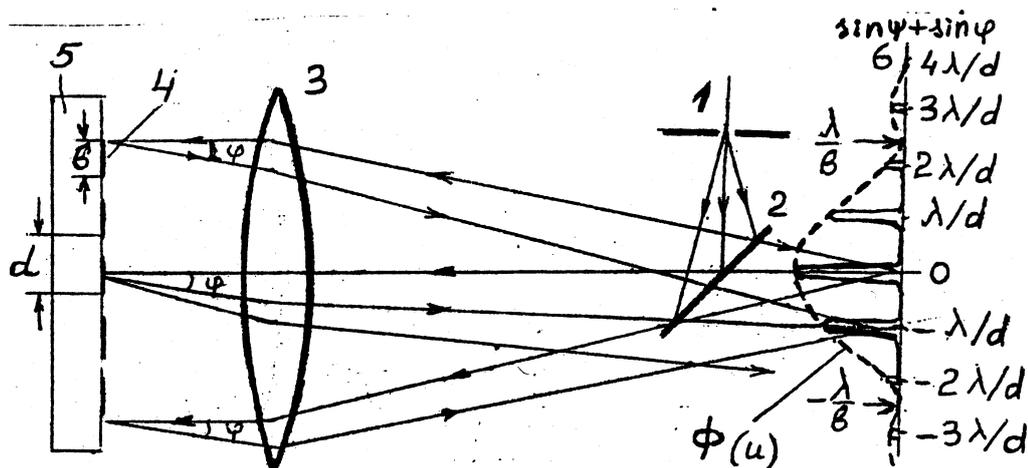


Рис. 2.2. Образование спектров при дифракции на плоской решетке. 1 - входная щель, 2 - поворотное зеркало, 3 - линза, 4 - отражающие штрихи решетки, 5 - подложка, 6 - фокальная плоскость линзы, b - ширина зеркальной полоски, d - период решетки, φ - угол дифракции (угол падения $\psi=0$). Падающие лучи и дифрагировавшие лежат в разных плоскостях благодаря небольшому наклону решетки.

Основная доля световой энергии приходится на центральный максимум дифракционной картины, угловые размеры которого определяются величиной $\lambda b = \sin \psi + \sin \varphi$ (первый нуль дифракционной картины).

Пучки, отраженные от различных штрихов интерферируют друг с другом и образуют в фокальной плоскости b интерференционную картину. Согласно условию (1) по направлениям, соответствующим значениям $\sin \psi + \sin \varphi$, равным $0, \pm \frac{\lambda}{d}, \pm 2 \frac{\lambda}{d}, \pm n \frac{\lambda}{d}, \dots$,

волны от всех N штрихов решетки складываются и образуют главные максимумы. На рис. 2 эти максимумы изображены сплошной линией. Нулевой максимум - один и тот же для всех длин волн. Он "белый", т.к. излучение в нем не разложено в спектр. Положения всех других максимумов для разных длин волн разные, и можно говорить о спектрах первого порядка ($n=\pm 1$), второго порядка ($n=\pm 2$), и т.д.. Поскольку для заданного угла φ , как видно из (1), $n\lambda = \text{const}$, спектры разных порядков накладываются друг на друга. Так, на длину волны $\lambda=6000\text{\AA}$ первого порядка накладывается $\lambda=3000\text{\AA}$ второго порядка, $\lambda=2000\text{\AA}$ третьего порядка и т.д... Для длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ порядков n_1, n_2, n_3, \dots условие наложения: $\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2 = \lambda_3 n_3 = \dots = \lambda_n n_n = \text{const}$.

Наложение спектров в приборах с дифракционными решетками имеет положительную и отрицательную стороны. При работе со спектрами, бедными спектральными линиями, линии из других порядков могут служить дополнительными реперами при расшифровке спектров. В то же время есть опасность принять линии, появляющиеся из соседних порядков, за линии данного порядка. А при достаточно богатых спектрах в наложенных друг на друга спектрах разобраться практически невозможно.

Чтобы устранить наложение высших порядков спектра на спектр первого порядка можно использовать светофильтры, обрезающие коротковолновую область. В спектральных приборах с дифракционными решетками, работающими в порядках выше первого, спектры разных порядков разводят используя дополнительный диспергирующий элемент (призму или решетку) с дисперсией в поперечном направлении.

§ 3. Освещение щели спектрографа.

В спектрографе используется только тот световой поток, который заключен в телесном угле, опирающемся на коллиматорный объектив (действующее отверстие прибора), с вершиной в центре щели. Существует несколько способов освещения щели от внешнего источника, назначение которых - направить в этот телесный угол наибольшую долю светового потока от источника света, причём коллиматорный объектив целиком должен быть заполнен светом. Для возможности количественных измерений по спектрограмме требуется обычно и равномерность освещения щели по высоте.

Освещение щели без линзы.

Источник света с большой излучающей поверхностью можно расположить непосредственно перед щелью так, как показано на рис.3.1а, когда излучающая поверхность полностью вписывается в рабочий телесный угол и целиком заполняет его светом. Это наивыгоднейший способ освещения щели, и никакие дополнительные линзы не могут увеличить световой поток, попадающий на коллиматорный объектив.

Освещение щели с одной линзой.

Если источник света невозможно разместить так, чтобы он вписывался в телесный угол α (рис.3.1а), для освещения щели применяют различные осветительные системы. С одной линзой обычно используют фокусирование источника на входную щель (рис.3.1б) или на коллиматорный объектив (рис.3.1в). В первом случае коллиматор заполнен светом, если угол, под которым осветительная линза видна из щели, не меньше угла α . Во втором случае для этой же цели размер изображения источника не должен быть меньше размера действующего отверстия. При этом на щели образуется четкое (рис.3.1б) или размытое (рис.3.1в) изображение источника. В этих случаях щель освещена по высоте, как правило, неравномерно.

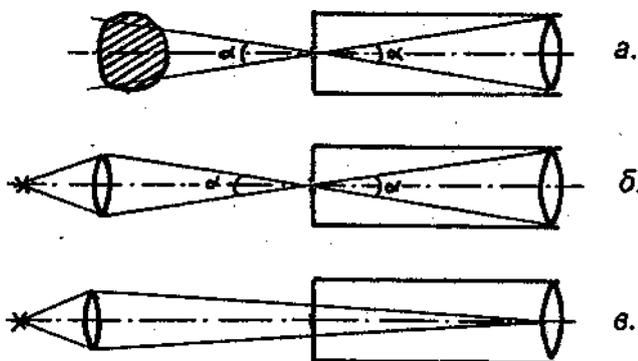


Рис.3.1. Освещение щели без линзы (а), с одной линзой при фокусировании изображения источника на щель (б) и на коллиматорный объектив (в).

Освещение щели с помощью зеркального или многолинзового конденсора.

В некоторых случаях требуется более сложная схема освещения щели. Источник расположен в фокусе параболического зеркала или линзы. В результате формируется параллельный пучок, в который можно ставить различные светофильтры и другие объекты. Далее параллельный пучок фокусируется на щель с помощью линз как в предыдущем случае.

Освещение щели с помощью световодов.

Если источник света невозможно разместить так, чтобы он находился на оптической оси прибора, то можно использовать гибкий световод, точнее пучок световодов. При этом выходной конец световода располагается перед щелью прибора, а свет подается на вход световода одним из описанных выше способов.

§ 4. Ширина входной и выходной щели.

Существует две характерные величины входной щели, при переходе через которые меняются особенности работы спектрального прибора и регистрации спектра.

Нормальная ширина щели S_n равна

$$s_n = \frac{f_1}{D} \lambda, \quad (13)$$

где f_1 - фокусное расстояние коллиматора, D - диаметр действующего отверстия, λ - рабочая длина волны. Часто в технических характеристиках оптических приборов указывают сразу отношение D/f_1 - относительное отверстие прибора. со стороны коллиматора.

Нормальная ширина щели соответствует размеру щели, при котором её геометрическое изображение на спектре равно расстоянию от центра дифракционной картины, возникающей при дифракции на действующем отверстии, до её первого дифракционного минимума. Короче говоря, при нормальной ширине щели ширина изображения щели примерно равна ширине основного дифракционного максимума на фокальной плоскости. При уменьшении ширины щели меньше нормальной ($S < S_n$) линия на спектре не уменьшается по ширине, а лишь ослабляется по интенсивности. Поэтому бессмысленно стремиться уменьшать ширину линий путем уменьшения щели меньше S_n . В случае когерентного освещения щели (от удаленного источника света малых размеров) наблюдается дифракция на щели прибора. При $S = S_n$ расстояние от центра дифракционной картины на коллиматорном объективе до её первого нуля равно D . Следовательно, при $S < S_n$ коллиматор всегда заполнен светом, при любом телесном угле падающего на щель светового потока. Разрешающая способность прибора сохраняется номинальной, однако света в прибор поступает мало.

Если исследуемые линии недостаточно ярки, то рекомендуется работать при ширине щели $S \approx (1,5-2) S_n$. В этом случае линии на спектре остаются достаточно тонкими.

С увеличением щели при $S > S_n$ линии на спектре все более уширяются. Для рассмотрения формы изображения спектральной линии на фотопластинке при $S > S_n$ введем вторую характерную величину - спектральную ширину щели.

Спектральная ширина щели $\delta\lambda_{\text{щ}}$ характеризует аппаратную функцию спектрографа при $S > S_n$. Аппаратной функцией или инструментальным контуром называют форму спектральной линии на фокальной плоскости прибора при монохроматическом освещении щели. При $S \leq S_n$ аппаратная функция - дифракционная. При $S > S_n$ форма спектральной линии определяется главным образом геометрическим изображением щели, поэтому аппаратная функция - щелевая.

Спектральная ширина щели - это ширина щелевой аппаратной функции спектрографа. Она равна величине спектрального интервала, уместяющегося в изображении щели на спектре :

$$\delta\lambda_{\text{щ}} = s' \frac{d\lambda}{dl} \quad (14)$$

где S' - ширина изображения щели, $d\lambda/dl$ - обратная линейная дисперсия спектрографа.

Спектральные линии, излучаемые плазмой, разнообразны по ширине - это могут быть узкие линии или более или менее широкие, уширенные за счёт каких-либо процессов в плазме. Плазма может излучать также и сплошной спектр. Каждая монохроматическая составляющая спектра оказывается на фокальной плоскости расширенной в соответствии

с шириной аппаратной функции $\delta\lambda_{\text{сп}}$. Если $\delta\lambda_{\text{сп}}$ больше, чем истинная ширина линии, линию можно считать практически монохроматической, и на спектрограмме мы видим равномерно освещенный прямоугольник (изображение щели). С увеличением ширины щели возрастает лишь ширина прямоугольника, освещенность на плоском участке его сохраняется постоянной.

Сплошной спектр состоит из множества смещенных по спектру монохроматических компонент, каждая из которых на фокальной плоскости дает освещенный прямоугольник. С ростом ширины щели эти прямоугольники расширяются, переналожение их увеличивается, освещенность в спектре растет пропорционально ширине щели.

В большинстве атомных спектров линии узкие и при работе на спектрографе их можно считать монохроматическими. При ширине щели, в 7 - 10 раз превосходящей нормальную ширину S_n , они на фокальной плоскости имеют вид прямоугольников. Измерения интенсивностей линий следует проводить именно в таких условиях. Однако не следует забывать, что с ростом ширины линейно растет интенсивность сплошного спектра. Если он имеется в спектре данного источника света, он может мешать измерениям интенсивностей линий.

Главные выводы, касающиеся выбора рабочей ширины щели, следующие:

- 1). Для расшифровки спектров (определения длин волн линий, отождествления их с табличными значениями длин волн) следует пользоваться шириной щели, превышающей нормальную S_n в 1,5 - 2 раза.
- 2). Для количественных измерений интенсивностей линий следует использовать такую ширину щели, при которой измеряемые линии выглядят на спектре как равномерно освещенные прямоугольники. Это обычно имеет место, если ширина щели превышает нормальную S_n в 7 - 10 раз и более.

Ширину выходной щели следует выбрать исходя из увеличения оптической системы данного прибора. Обычно оно близко к единице, и в таких случаях выходная щель устанавливается равной входной.

§ 5. Фотоэлектронные умножители.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) — электровакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно (до миллиона раз) превышает первоначальный фототок

Конструктивно от вакуумного фотоэлемента ФЭУ отличается тем, (см. рис.5.1) что кроме фотокатода 2 и анода 6 содержит еще фокусирующую систему 4, диафрагму 5 и дополнительные электроды Д1, Д2, Д3... (диноды), являющиеся эмиттерами вторичных электронов (рисунок 10). В некоторых типах ФЭУ имеется модулятор электронного потока 3, в виде сетки, расположенной вблизи фотокатода. На модулятор подается переменное напряжение. В этом случае отпадает необходимость в модуляции регистрируемого излучения.

Падающий на фотокатод поток излучения вызывает электронную эмиссию пропорциональную потоку. Электроны вылетают из фотокатода с разными скоростями и под разными углами. Фокусирующая система собирает их на первый динод. Пространство между первым динодом и фотокатодом называется входной камерой ФЭУ. Во входной камере осуществляется фокусировка и ускорение фотоэлектронов, направляемых на первый динод. Качество электронно-оптической системы входной камеры ФЭУ характеризуется коэффициентом сбора электронов γ_k , представляющим собой отношение

числа электронов, достигших первого динода, к числу электронов, вылетевших из фотокатода. У современных ФЭУ этот коэффициент близок к единице.

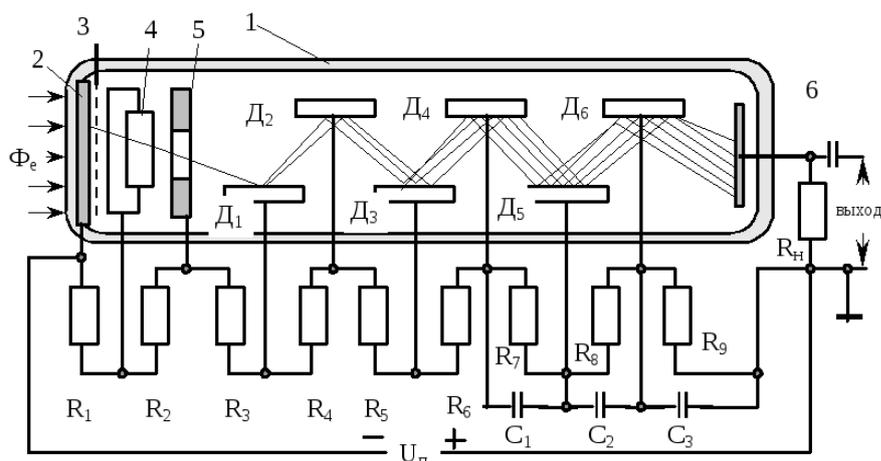


Рис.5.1 Фотозлектронный умножитель со схемой питания. 1 – стеклянная вакуумированная колба; 2 – полупрозрачный фотокатод; 3 – модулятор; 4 – фокусирующий электрод; 5 – диафрагма; 6 – анод; $D_1...D_6$ – диноды.

Для того чтобы на каждый электрод ФЭУ подать соответствующий потенциал, обеспечивающий оптимальную работу прибора, используется делитель напряжения, простейший вариант которого состоит из нескольких одинаковых сопротивлений, включенных последовательно друг с другом. Общее сопротивление делителя обычно составляет 2 – 10 МОм. На один конец делителя, соединенный с фотокатодом, подается питающее напряжение U обычно от 1000 до 2000 В, а другой конец заземлен, т.е. находится при нулевом потенциале. В таком делителе междинодное напряжение равно примерно 150 - 200 В. Диноды последовательно подключаются к точкам соединения резисторов. Анод соединяется с землей через нагрузочное сопротивление R_L . Существенным является то, что параллельно с этим сопротивлением обязательно включена некая емкость C — это либо реальный конденсатор, либо просто паразитная емкость, образованная элементами реальной конструкции и входной емкостью дальнейшей электронной схемы. Эти три элемента образуют выходную (анодную) цепь ФЭУ, сигнал с которой и подается на вход электронной схемы (усилителя) для дальнейшего усиления и регистрации.

Фотозлектронные умножители могут производить сигнал даже в отсутствии света, т.к. существуют темновой ток, возникающий из-за термальной эмиссии электронов из фотокатода, утечка тока между динодами, а также случайные излучения. Электрический шум также относится к темновому току и обычно включается в значение темнового тока. Фотозлектронные умножители не хранят заряда и отвечают на изменения входящих световых потоков в течении нескольких наносекунд. Благодаря этому, ФЭУ могут быть использованы для обнаружения и записи очень кратковременных событий. Характерной особенностью фотозлектронных умножителей, используемых в научных целях, является высокое отношение сигнал-шум при умножении более одного миллиона вторичных электронов. Это связано с тем, что темновой шум может быть существенно снижен благодаря охлаждению фотозлектронного умножителя

§ 6. Спектры пропускания и поглощения

Спектральный анализ основан на том, что атомы и молекулы каждого химического элемента имеют строго определённые резонансные частоты, на которых они излучают или поглощают свет. Соответственно возможны два подхода к изучению спектров:

1) **эмиссионная спектроскопия** - разложение в спектр излучения, испускаемого возбуждённым тем или иным способом атомами или молекулами.

2) **абсорбционная спектроскопия** - исследование воздействия вещества на внешнее излучение. Тут возможна регистрация и последующее разложение в спектр прошедшего через исследуемый объект, отраженного и рассеяного света. При обработке полученных спектров можно рассчитать спектр поглощения. Разным веществам соответствуют разные спектры поглощения, что позволяет использовать методы абсорбционной спектроскопии для определения состава вещества. Для почти свободных атомов и молекул в разрежённых газах, оптический спектр поглощения состоит из отдельных спектральных линий и называется линейчатым. Для твёрдых веществ спектры поглощения непрерывны, но встречаются и отдельные линии.

Исторически первым методом спектрографических исследований является эмиссионный анализ - изучения спектров излучения различных источников. Однако неустранимым недостатком является то, что не всякий исследуемый объект можно заставить излучать. В то время как спектр поглощения можно зарегистрировать для любых прозрачных объектов.

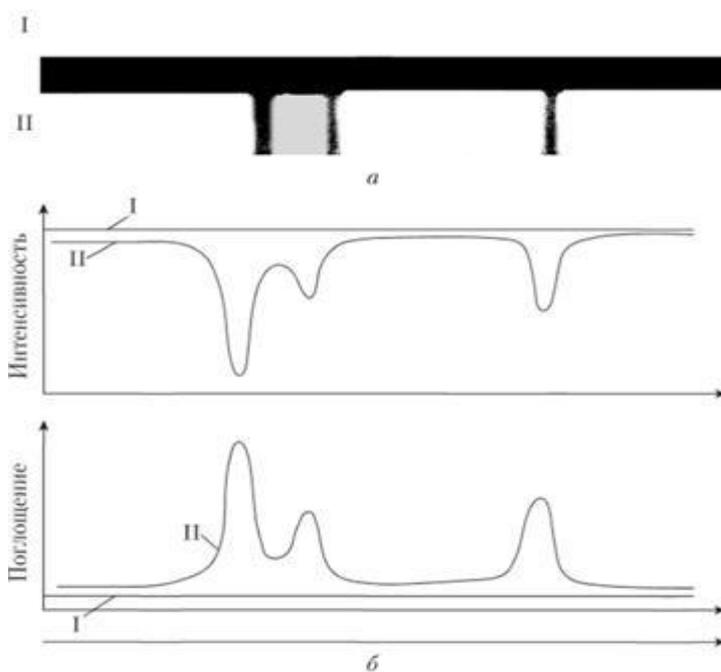


Рис. 6.1. Изображение спектров поглощения:

а – фотографическое; *б* – графическое; *I* – спектр источника сплошного света; *II* – спектр того же излучения после прохождения через анализируемую пробу

Для проведения абсорбционного спектрального анализа анализируемую пробу помещают между источником света с известным спектром и спектральным аппаратом.

Для получения спектра пропускания в широком диапазоне необходим источник света со сплошным спектром. Хотя в случаях, когда требуется информация о поглощении на определенной длине волны, могут использоваться источники монохроматического излучения. В видимой и инфракрасной областях источником света обычно служит нагретое твердое тело, например спираль лампы накаливания.

Следует заметить, что при этом записанный спектр по величине пропускания будет несколько отличаться от "истинного" вследствие действия по крайней мере трех факторов. Во-первых, это различная интенсивность источника на разных длинах волн. Во-вторых, различные пропускание оптических элементов спектрографа и отражательная способность дифракционной решетки под разными углами. И, в-третьих, различная чувствительность приёмника на разных длинах волн. Скомпенсировать влияние этих факторов можно, нормировав полученный спектр пропускания на так называемую аппаратную функцию. Для этого надо снять спектр источника $I_0(\lambda)$. Нормировав полученную зависимость на её максимальное значение, получим аппаратную функцию всей измерительной установки. Теперь если измеренное значение интенсивности света прошедшего через исследуемый образец $I_\tau(\lambda)$ на каждом шаге разделить на соответствующее значение аппаратной функции, получим «истинный» спектр пропускания.

Впрочем, чаще используется пропускание $T(\lambda)$, то есть нормированный спектр пропускания, равное просто отношению интенсивности прошедшего света к интенсивности падающего света $T(\lambda) = I_\tau(\lambda)/I_0(\lambda)$.

Для практических целей обычно используют десятичный логарифм обратной величины, который называют оптической плотностью D слоя толщины l :

$$D(\lambda, l) = \lg (1/T(\lambda)) = \lg (I_0(\lambda)/I_\tau(\lambda)).$$

Значение $D=2$ соответствует ситуации, когда исходная интенсивность света ослабляется слоем вещества в 100 раз, а при $D = 0$ поглощение света слоем вещества не происходит.

Аналогичным образом получают спектр отражения. $R(\lambda) = I_R(\lambda)/I_0(\lambda)$.

Спектр поглощения рассчитывается исходя из $I_0(\lambda) = I_{\text{ногл}}(\lambda) + I_R(\lambda) + I_\tau(\lambda)$.

Пусть пучок монохроматического света с длиной волны λ интенсивностью I проходит через слой поглощающего вещества толщиной dl . Интенсивность прошедшего светового пучка будет равна $I-dI$: При отсутствии нелинейных эффектов изменение интенсивности света dI в процессе поглощения определяется соотношением

$$dI = -\alpha I \cdot dl .$$

где α - коэффициент поглощения. Он имеет размерность м^{-1} в системе СИ. Знак «минус» в соответствии тому, что свет поглощается в среде

Интегрируя это выражение, найдем закон Бугера—Ламберта—Бера для интенсивности света, прошедшего слой поглощающей среды толщиной l :

$$I(l) = I_0 \exp(-\alpha l)$$

где I_0 - интенсивность падающего на образец света, $I(l)$ - значение интенсивности после прохождения слоя толщины l .

Закон Бугера—Ламберта—Бера можно записать в логарифмическом виде:

$$\ln (I_0 / I_\tau) = \alpha l .$$

Если использовать десятичный логарифм, то:

$$\lg (I_0 / I_\tau) = k l .$$

где $k = \alpha \lg(e)$ - десятичный коэффициент поглощения. Это величина, обратная толщине слоя, ослабляющего интенсивность падающего излучения в 10 раз.

Спектральные характеристики стекол.

В работе изучаются методы регистрации спектров поглощения на примере светофильтров из цветного стекла.

Из-за того, что коэффициент поглощения зависит от длины волны, поглощающие вещества окрашены. Например, стекло, слабо поглощающее красные лучи и сильно поглощающее синие и зеленые лучи, при освещении белым светом будет казаться красным, а при освещении синим и зеленым светом - черным из-за сильного поглощения. Это явление используется в светофильтрах, которые в зависимости от химического состава пропускают свет только определенных длин волн.

Спектральные характеристики стекол характеризуется значениями показателя поглощения $\alpha(\lambda)$ или оптической плотности $D(\lambda)$ и коэффициента пропускания $T(\lambda)$ для различных длин волн.

Показатель поглощения стекла $\alpha(\lambda)$ для света длиной волны определяется из выражения:

$$\alpha(\lambda) = \ln(I_0 / I_t) / l = -\ln T / l$$

где $T(\lambda) = I_t(\lambda) / I_0(\lambda)$ - пропускание (отношение интенсивностей прошедшего и падающего излучений)

Для оптической плотности можно записать следующее соотношение:

$$D(\lambda, l) = \lg(I/T) = -\ln(T) / 2.303 = k l$$

При расчете оптической плотности светофильтра необходимо учитывать, кроме поглощения света, потери на отражение от двух поверхностей стекла и вводить соответствующую поправку. Внутрь стекла попадает не I_0 , а $(1-R)I_0$. Интенсивность после прохождения всего слоя равна не I_v , а $I_v / (1-R)$

Тогда оптическая плотность светофильтра для данной длины волны равна:

$$D(\lambda) = -\ln((1-R)^2 T) = D_\lambda + D_R$$

где $D_\lambda = -\ln(T)$, а поправка на отражение от двух поверхностей $D_R = -2 \lg(1-R)$

Коэффициент отражения R (отношение интенсивностей отраженного падающего излучений) определяется по формуле Френеля:

$$R = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2$$

Принимая показатель преломления внешней среды (воздуха) равным единице

$$R = (n_2 - 1)^2 / (n_2 + 1)^2$$

Обычно коэффициент отражения R условно принимается за постоянную для стекла каждой марки величину, зависящую только от показателя преломления этого стекла в видимой области спектра n . Фактически показатель преломления непостоянен и зависит от длины волны проходящего света. Это вносит погрешность в определении коэффициента отражения и поправки на отражения от поверхности стекла. Наибольшей эта погрешность будет в тех случаях, когда рабочая область светофильтра находится за пределами видимого спектра, а величина показателя поглощения мала, т.е. сравнима с величиной коэффициента отражения.

§ 7 экспериментальная установка

В работе изучаются методы регистрации спектров поглощения на примере светофильтров. Исследования проводятся с помощью спектрального автоматизированного комплекса КСВУ, основным элементом которого является монохроматор МДР-23 с дифракционной решёткой в качестве диспергирующего элемента. Общий вид экспериментальной установки показана на рис.7.1, а оптическая схема спектрального комплекса показана на рис.7.2.

Комплекс действует следующим образом. Осветитель с лампой накаливания и расположенным внутри кожуха эллиптическим зеркалом создает пучок света с расходимостью около 3° . Для освещения входной щели монохроматора используется кварцевый конденсор.

Оптическая схема монохроматора является классической Черни–Тернера : входная щель - плоское поворотное зеркало - коллиматорное сферическое зеркало - дифракционная решетка - второе (камерное) сферическое зеркало - второе плоское поворотное зеркало - выходная щель монохроматора. Сферические зеркала располагаются на соответствующих фокусных расстояниях от входной и выходной щели, обеспечивая работу дифракционной решетки в параллельном пучке света и фокусировку на выходную щель. Увеличение системы близко к единице. Дифракционная решетка работает в



Рис. 7.1. Общий вид экспериментальной установки.

1-источник света, 2-коллиматор, 3- монохроматор, 4- АЦП, блок управления шаговым двигателем, 5- кюветное отделение, 6- ФЭУ, 7-источник высокого напряжения, 8-компьютер

видимом диапазоне спектра в первом порядке дифракции. Решетка закреплена в специальном держателе, который может поворачивать решетку вокруг её оси. При

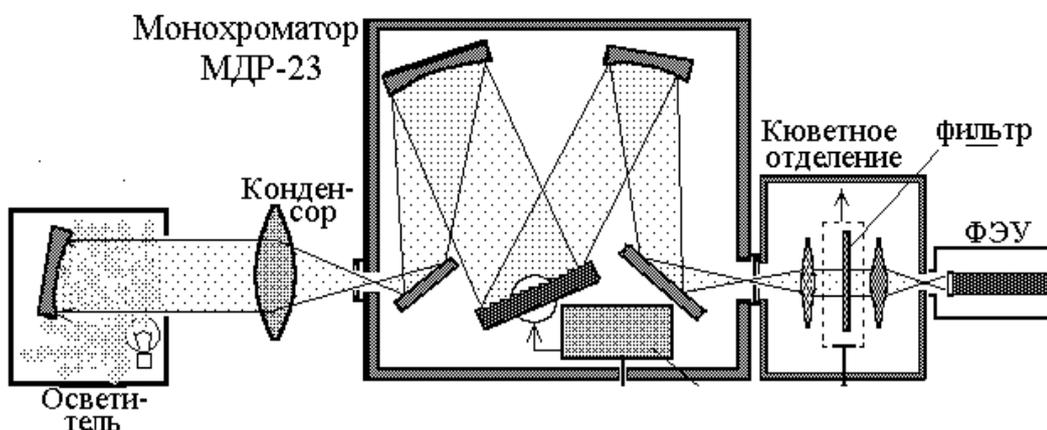


Рис. 7.2. Оптическая схема спектрального комплекса.

постепенном повороте решетки на второе сферическое зеркало (и, затем, на выходную щель монохроматора) направляются дифракционные максимумы от различных длин волн и, таким образом, осуществляется сканирование по спектру. Значение длины волны, направляемой на выходную щель в каждый момент времени (рабочая длина волны), выводится в специальное окошко-счетчик на корпусе монохроматора. Поворот производится с помощью шагового двигателя, расположенного в корпусе монохроматора и управляемого электрическим сигналом от отдельного блока управления.

Для устранения наложения порядков используется набор светофильтров, которые не пропускает коротковолновую часть спектра. Светофильтры надеваются на оправу входной щели монохроматора. Если исследуемый большой диапазон спектра, то в процессе сканирования светофильтры приходится менять.

Рядом с входной щелью монохроматора расположена ручка, позволяющая открывать оптический затвор, перекрывающий световой поток на входе в монохроматор. Прощедшее монохроматор излучение попадает в кюветное отделение. Здесь в параллельном пучке света на передвижной платформе может располагаться исследуемый объект (на рисунке платформа показана пунктиром). Прощедшее излучение попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя. Следует обратить внимание на следующую конструктивную особенность: непосредственно перед фотокатодом на корпусе ФЭУ расположен дополнительный оптический затвор. Электрический сигнал, снимаемый с анода ФЭУ, усиливается в усилителе постоянного тока и поступает на АЦП (аналого-цифровой преобразователь), а с него в компьютер. С АЦП совмещен цифровой вольтметр, его показания позволяют контролировать величину светового потока, падающего на фотокатод ФЭУ.

Программа позволяет проводить измерения интенсивности с заданным шагом по длинам волн, осуществлять также математическую обработку спектров, а также выводить результаты измерений в текстовый файл для обработки с помощью других стандартных программ.

Измерения осуществляются дискретным образом при неподвижной решетке. Возможно задать несколько последовательных измерений с записью среднего значения.

После измерений решетка поворачивается на заданный шаг и процесс повторяется. Если установить слишком крупный шаг, то можно пропустить узкие спектральные линии. Однако слишком мелкий шаг замедляет процесс измерений. Во всяком случае нет смысла делать шаг меньше спектральной ширины щели.

В случае, если запись спектров производится вручную, без использования АЦП и компьютера, следует самостоятельно выбрать разумный шаг записи. При постоянном шаге для этого может понадобиться порядка тысячи точек. Однако их можно на порядок сократить, если в окрестности максимума применять мелкий шаг, а вдали от него в несколько раз больший. В ручном режиме показания считываются с помощью вольтметра.

§ 8. Выполнение работы

Задание

1) Получить в достаточно широком видимом спектральном интервале спектр относительного пропускания фильтра при нормальном падении света (в процентах к падающему излучению).

Для этого снять аппаратную функцию прибора в спектральном интервале 350-750 нм.

Установить светофильтр в кюветном отделении в световой пучок. Записать спектр пропускания светофильтр в спектральном интервале 350-750 нм. Провести нормировку и обработку результатов для построения графика пропускания. По спектрам рассчитать величины соответствующих минимальных пропусканий.

2) Построить график зависимости оптической плотности светофильтра от длины волны, используя спектр пропускания и принимая коэффициент отражения R постоянным, зависящую только от n . Показатель преломления стекла в видимой области спектра считать равным 1,5.

Графики должны быть либо нарисованы на миллиметровке, либо построены на компьютере и распечатаны.

Освещение щели. Линзу конденсора следует расположить так, чтобы входная щель монохроматора была равномерно освещена по высоте (7-8 мм). Этого можно добиться, если щель находится вблизи фокуса конденсора. Фокусное расстояние используемого конденсора таково, что при диаметре падающего на него пучка ~4 см обеспечивается эффективное заполнение коллиматорного зеркала монохроматора.

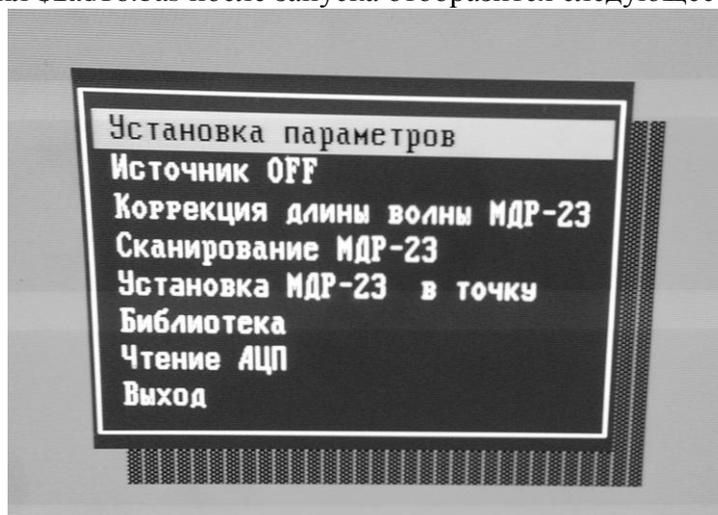
Выбор ширины щели. Ширину как входной, так и выходной щели S следует подобрать, исходя из следующего требования: нужно, чтобы спектральная ширина щели на выходе монохроматора была во много раз меньше полосы пропускания фильтра (т.е. $S_{cn} \ll 2\delta\lambda$). Для $2\delta\lambda \approx 30$ нм с учетом величины обратной линейной дисперсии прибора $D^{-1} = 1,3$ нм/мм можно выбрать S . При выполнении данной задачи ширину щели можно уменьшить еще в несколько раз. При этом света на выходе монохроматора достаточно для нормальной цифровой обработки сигнала. Увеличение данного прибора близко к единице. Поэтому величину выходной щели следует выбрать такой же. Рекомендуется величина $S \leq 10^{-2}(2\delta\lambda/D^{-1}) \approx 0,06$ мм.

Установка режима работы регистрирующей системы. Устанавливая питание ФЭУ, следует иметь в виду, что при чрезмерно высоком напряжении может произойти разрушение фотокатода при его паразитной засветке. Поэтому на пульте управления блока питания ФЭУ рекомендуется установить напряжение питания ФЭУ не более 1300В.

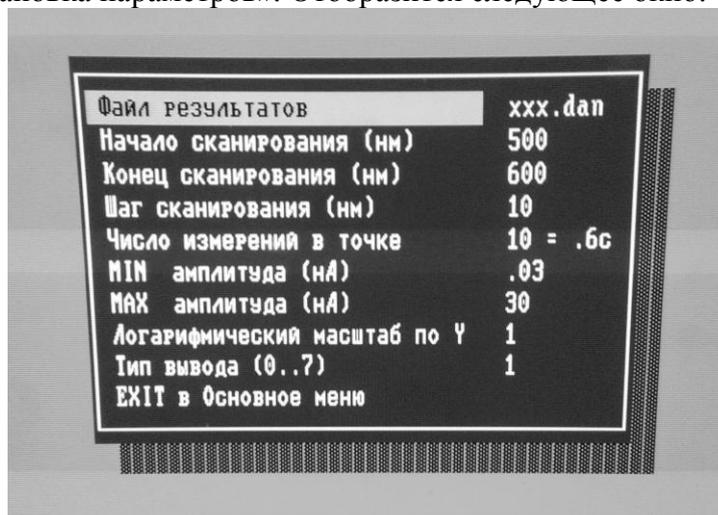
Установка светофильтра. Светофильтр устанавливается в кюветном отделении перпендикулярно оптической оси.

§ 9. Инструкция по работе с программой

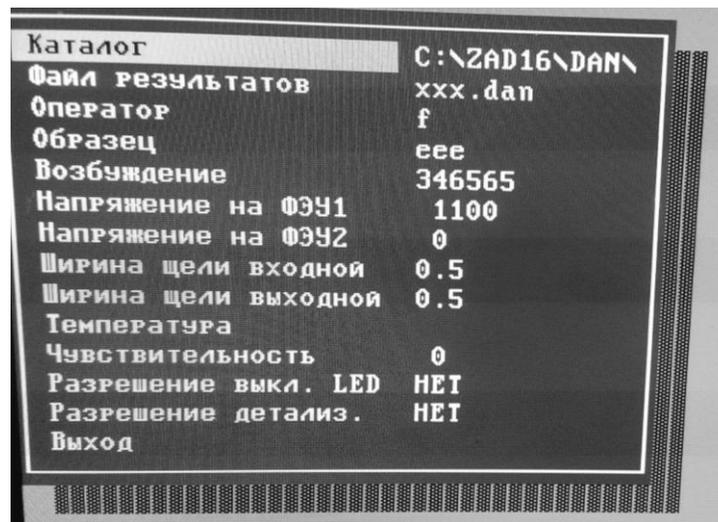
1. Включение установки производит преподаватель (щиток 5, пилот, АЦП, блок управления шаговым двигателем, высокое)
2. Прodelать следующие предварительные операции: осветить щель; установить ширину щели; открыть оптические затворы на входе МДР-23 и перед ФЭУ.
3. Загрузить компьютера в режиме Caldera DR DOS.
4. На диске С войти в папку ZAD16.
5. Запустить файл \$zad16.bas после запуска отобразится следующее окно:



6. Провести коррекцию длины волны монохроматора МДР-23; ввести показания монохроматора.
7. Войти в «Установка параметров». Отобразится следующее окно:



8. Войти в «Файл результатов». Отобразится следующее окно:



9. Войти в «Каталог». Выбрать папку текущий год (например 2016). Еще раз войти в «Каталог». Выбрать папку по дате занятия (например Mart25). Войти в «файл результатов» и ввести имя файла (не более 8 латинских букв)
10. В качестве оператора указать фамилию(латиницей)
11. В качестве образца указать : лампа/зеркало/фильтр(сколько градусов)
12. Возбуждение = 0.
13. Напряжение на ФЭУ 1 ввести показания высоковольтного источника питания.
14. Выставить на монохроматоре ширины щелей и заполнить соответствующие графы.
15. Нажать «Выход» и вернуться в предыдущее меню.
16. Установить диапазоны сканирования, шаг сканирования и число измерений в точке в соответствии с выполняемой задачей/измеряемым образцом
17. Установить минимальную амплитуду = 0,01 (уточнить у преподавателя).
18. Установить максимальную амплитуду = 100 (уточнить у преподавателя).
19. Логарифмический масштаб по Y (рекомендуется 1)
20. Тип вывода – 1
21. Вернуться в основное меню.
22. Запустить сканирование МДР-23.
23. Выполнять инструкции появляющиеся на экране:
по измерению фона ("БУДЕМ УСТАНОВЛИВАТЬ НОЛЬ? Yes/No")
по смене фильтров и решеток (Решетки не меняем).
24. Для обработки полученных файлов заходим в «БИБЛИОТЕКА». Осуществляем нормировку делим файл данных на файл аппаратной функции. Для измерений используем курсор.

Литература

1. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М., МГУ, 2006.