



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

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра оптики и спектроскопии**

Специальный оптический практикум

Задача №13

**Дифракционный спектрограф
со скрещенной дисперсией СТЭ-1**

*Методическое пособие
для студентов физического факультета*

**Составитель:
д.ф-м.н. Лебедева В.В.**

Москва
1993-2004

Оглавление

Введение	2
§ 1. Основные свойства плоских дифракционных решеток	2
§ 2. Устройство спектрографа СТЭ-1	9
§ 3. Освещение щели спектрографа	12
§ 4. Влияние ширины щели на фотографируемый спектр	13
§ 5. Измерение интенсивностей линий по фотопластинке	14
§ 6. Источник света	17
§ 7. Выполнение работы	17
§ 8. Задание	19
Форма отчета по задаче	19
Литература.	19

Введение

В оптическом спецпрактикуме представлены задачи, позволяющие студентам расширить и углубить знания по читаемым на кафедре спецкурсам: "Экспериментальные методы в оптике", "Физика и применение лазеров", "Оптические спектры атомов и молекул", "Оптика когерентного излучения".

В данной задаче студенты знакомятся с дифракционным спектрографом со скрещенной дисперсией и осваивают методы работы на нем. Студенты фотографируют спектры, расшифровывают их, проводят калибровку фотопластинки для количественных измерений интенсивностей спектральных линий. Задача должна быть сделана первой в серии работ по диагностике плазмы, молекулярной спектроскопии и др., выполняемых в оптическом спецпрактикуме на этом же спектрографе.

§ I. Основные свойства плоских дифракционных решеток.

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

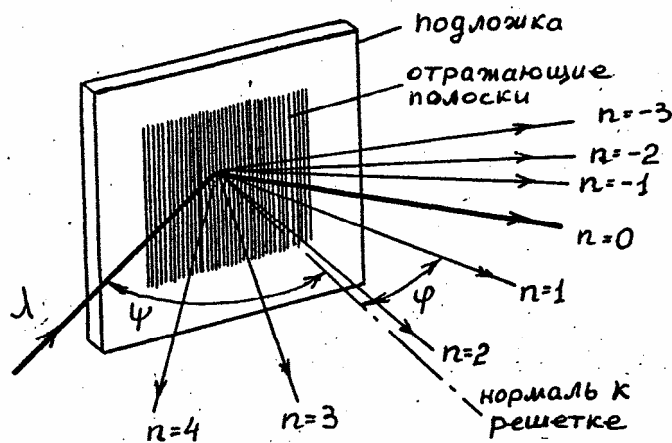


Рис.1. Дифракция монохроматического пучка света с длиной волны λ на плоской решетке; ψ - угол падения, φ - угол дифракции, n - номера порядков.

полосками, или отражающие, тогда используют свет, отраженный от зеркальных штрихов (зеркальных полосок). В спектроскопии применяют только отражательные дифракционные решетки.

На рис.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

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

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

В спектральном приборе плоская решетка устанавливается в параллельном пучке

лучей (рис. 2). 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.

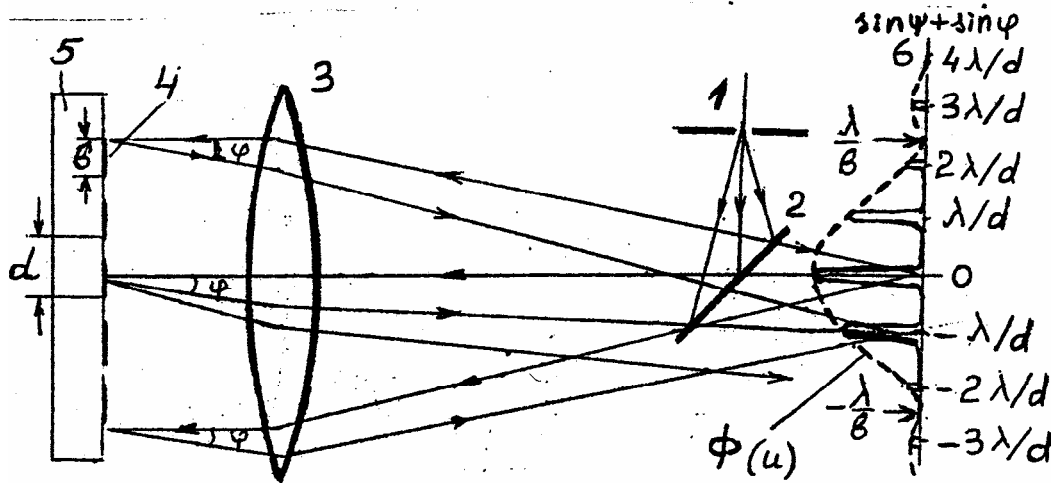


Рис. 2. Образование спектров при дифракции на плоской решетке. 1 - входная щель, 2 - поворотное зеркало, 3 - линза, 4 - отражающие штрихи решетки, 5 - подложка, 6 - фокальная плоскость линзы, b - ширина зеркальной полоски, d - период решетки, φ - угол дифракции (угол падения $\psi=0$). Падающие лучи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

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 в фокальной плоскости 6 линзы 3 пунктиром,

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

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 6 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..

Интенсивности главных максимумов не одинаковы. Они промодулированы функцией $\Phi(u)$, выражающей угловое распределение отраженного от решетки светового потока, возникающее в результате дифракции на отдельных штрихах решетки (см. рис.2). В итоге

оказывается, что основная часть светового потока сосредоточена в нулевом "белом" максимуме, который не несет спектроскопической информации. Световой поток, идущий в первый, второй и т.д. максимумы, значительно слабее. Он может оказаться почти нулевым, если соответствующие главные максимумы находятся вблизи нулевых значений ($\sin\psi + \sin\varphi = \lambda/b, 2\lambda/b$, и т.д.) функции $\Phi(u)$.

Чтобы избежать потери света в ненужном нулевом максимуме, следует сместить интерференционную картину относительно картины дифракции на отдельном штрихе так, чтобы в центр основного дифракционного максимума попадал требуемый порядок спектра, а нулевой интерференционный максимум - оказался бы на склоне дифракционного профиля или даже где-нибудь в районе нулевых значений ($\sin\psi + \sin\varphi = \lambda/b, 2\lambda/b$, и т.д.). Это делают путем внесения дополнительной разности фаз в пучки, отраженные от соседних штрихов. Такие решетки называют решетками с профилированным штрихом (решетками со ступенчатым профилем штриха).

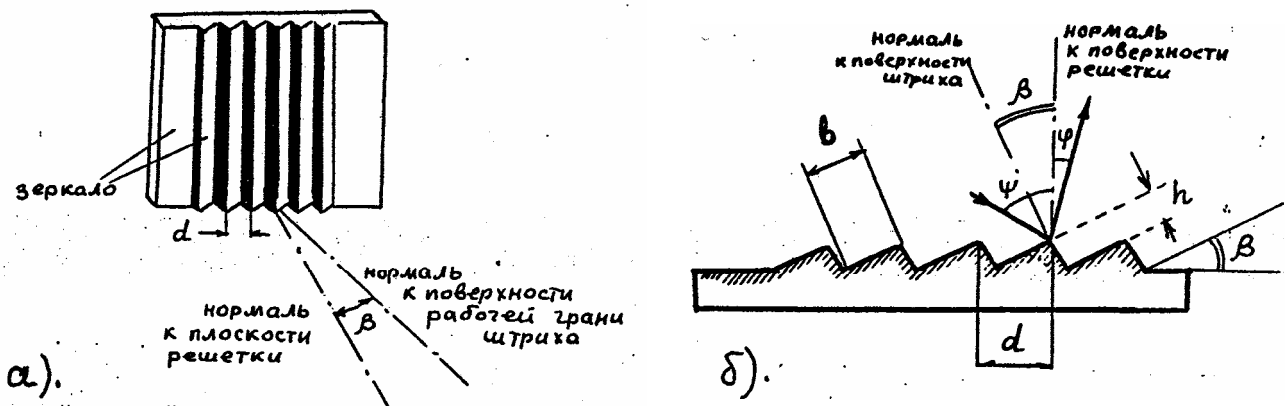


Рис. 3. Решетка с профилированным штрихом:

а) вид участка решетки, б) профиль штриха.

d - период решетки, b - ширина зеркальной грани штриха, h - высота ступеньки штриха, β - угол блеска решетки.

Штрихи профилированной решетки (рис.3) обычно нарезаны (выдавлены) на алюминиевой поверхности заготовки алмазным резцом определенного профиля. Одна из зеркальных граней штриха, обычно более высококачественная, является рабочей. Плоскости этих зеркальных граней штрихов, ширина которых равна b , строго параллельны друг другу и образуют ступеньки, наклоненные под углом β к плоскости заготовки.

Угол β является важной характеристикой решетки и называется "углом блеска". Из названия видно, что это угол, под которым решетка "блестит", т.е. зеркально отражает свет от рабочих граней штрихов. Этот угол соответствует центру основного дифракционного максимума в отраженном от решетки свете, когда свет падает по нормали к зеркальной грани штриха.

На рис.4 изображена схема образования спектров при дифракции на плоской решетке с профилированным штрихом. Как и на рис.2, решетка установлена в автоколлимации. При этом все грани штрихов отражают свет в том же направлении, откуда свет падает, т.е. $\psi = \varphi = \beta$. Высота h ступеньки штриха в данном примере равна λ . Разность хода соседних пучков равна удвоенной высоте ступеньки и составляет 2λ . Это означает, что в центр основного дифракционного максимума отраженного от решетки света попадает второй главный максимум интерференционной картины длины волны λ , соответствующий по (1) значению $\sin\psi + \sin\varphi = 2\lambda/d$. Этот максимум и оказывается наиболее ярким в спектре. Нулевой максимум, самый яркий при дифракции на решетке с плоскими штрихами (рис.2), теперь смещен в область малых интенсивностей дифракционной картины и очень слаб.

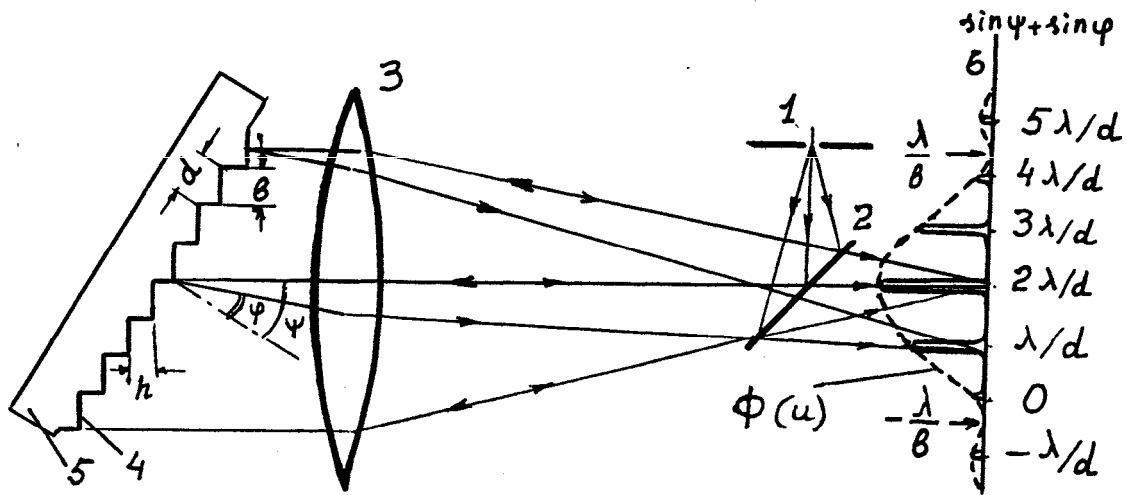


Рис. 4. Образование спектров при дифракции на плоской решетке с профилированным штрихом. 1 - входная щель, 2 - поворотное зеркало, 3 - линза, 4 - зеркальные поверхности ступенчатых штрихов решетки, 5 - подложка, 6 - фокальная плоскость линзы, ψ - угол падения, φ - угол дифракции. Угол блеска β в данном случае равен углу падения ψ .

Из условия главных максимумов (1) следует, что при автоколлимации, т.е. когда $\psi = \varphi = \beta$, для центра дифракционной картины справедливо соотношение

$$\lambda_{\text{автоколл}} = \frac{2d \sin \beta}{n}. \quad (3)$$

Это означает, что решетка с профилированным штрихом в разных порядках n блестит в свете разных длин волн

$$\lambda_{1, \text{автоколл}} \cdot n_1 = \lambda_{2, \text{автоколл}} \cdot n_2 = \dots = 2d \sin \beta. \quad (4)$$

Все эти длины волн накладываются друг на друга. Для других длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ порядков n_1, n_2, n_3, \dots условие наложения:

$$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2 = \lambda_3 n_3 = \dots \lambda_n n = \text{const}. \quad (5)$$

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.

Угловую дисперсию $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ порядка n решетки можно найти из условия главных максимумов (1) дифференцированием:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{n}{d \cos \varphi} \quad (6)$$

Поскольку угловые размеры спектра в приборе обычно не превышают нескольких градусов, угловая дисперсия в пределах одного порядка меняется мало.

Линейная дисперсия $\frac{dl}{d\lambda}$ и обратная линейная дисперсия $\frac{d\lambda}{dl}$ связаны с угловой соотношениями

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot f_2, \quad \frac{d\lambda}{dl} = \frac{1}{f_2 \cdot d\varphi/d\lambda}, \quad (7)$$

где f_2 - фокусное расстояние объектива, формирующего спектр в фокальной плоскости прибора. Теоретическая разрешающая способность $\frac{\lambda}{\delta\lambda}$ решетки, определяемая по критерию Рэля, т.е. исходя из дифракционной аппаратной функции, равна

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = n N. \quad (8)$$

Здесь $\delta\lambda$ - минимальная разность длин волн двух спектральных линий, которые, согласно критерию Рэля, еще могут наблюдаться раздельно, N общее число штрихов решетки.

Область длин волн $\Delta\lambda_n$, свободную от наложения таких же длин волн соседних порядков $n+1$ и $n-1$, называют свободной спектральной областью или областью дисперсии.

$$\Delta\lambda_n = \frac{\lambda_n}{n}. \quad (9)$$

Угловую величину $\Delta\varphi_n$ свободной спектральной области находим дифференцированием (1) при постоянном φ .

$$\Delta\varphi_n = \frac{n}{d \cos \varphi} \Delta\lambda_n \quad (10)$$

По угловой величине $\Delta\varphi_n$, зная фокусное расстояние f_2 камеры спектрографа, можно найти «длину спектра» n -го порядка в фокальной плоскости прибора, т.е. длину участка на фокальной плоскости, соответствующую свободной спектральной области:

$$l_n = \Delta\varphi_n f_2 \quad (11)$$

Для спектрографа СТЭ-1 $f_1=885\text{мм}$, $f_2=805\text{мм}$.

Зная величину свободной спектральной области $\Delta\lambda_n$ и соответствующую ей длину спектра l_n , определяем обратную линейную дисперсию $\frac{\Delta\lambda_n}{l_n}$ в n -ом порядке (обычно ее

выражают в Å/мм). Реальную разрешающую способность определим, считая, что щелевая аппаратная функция преобладает над дифракционной. Тогда величина разрешаемого спектрального интервала в спектре n -го порядка равна

$$\delta\lambda_n = s' \frac{\Delta\lambda_n}{l_n} = s \frac{f_2}{f_1} \frac{\Delta\lambda_n}{l_n}, \quad (12)$$

где s и s' - ширина входной щели и ее изображения, $\frac{\Delta\lambda_n}{l_n}$ - обратная линейная дисперсия.

В спектральных приборах с дифракционными решетками, работающими в порядках выше первого - второго, обычно разводят спектры разных порядков, используя дополнительный диспергирующий элемент (призму или решетку) с дисперсией в

поперечном направлении. Спектры порядков при этом образуют двумерную картину наклонных строчек. Пример разделения спектров первых пяти порядков показан на рис.5. Если бы дополнительным диспергирующим элементом являлась решетка, наклонные строчки на рис.5-б были бы прямыми, расходящимися веером в длинноволновую сторону. В данном случае использована призма. Дисперсия призмы нелинейна и в красную сторону спектра меньше. В спектрографе СТЭ-1, с которым студенты работают в данной задаче, строчки расположены теснее друг к другу в длинноволновой области спектра и немного расходятся в коротковолновой.

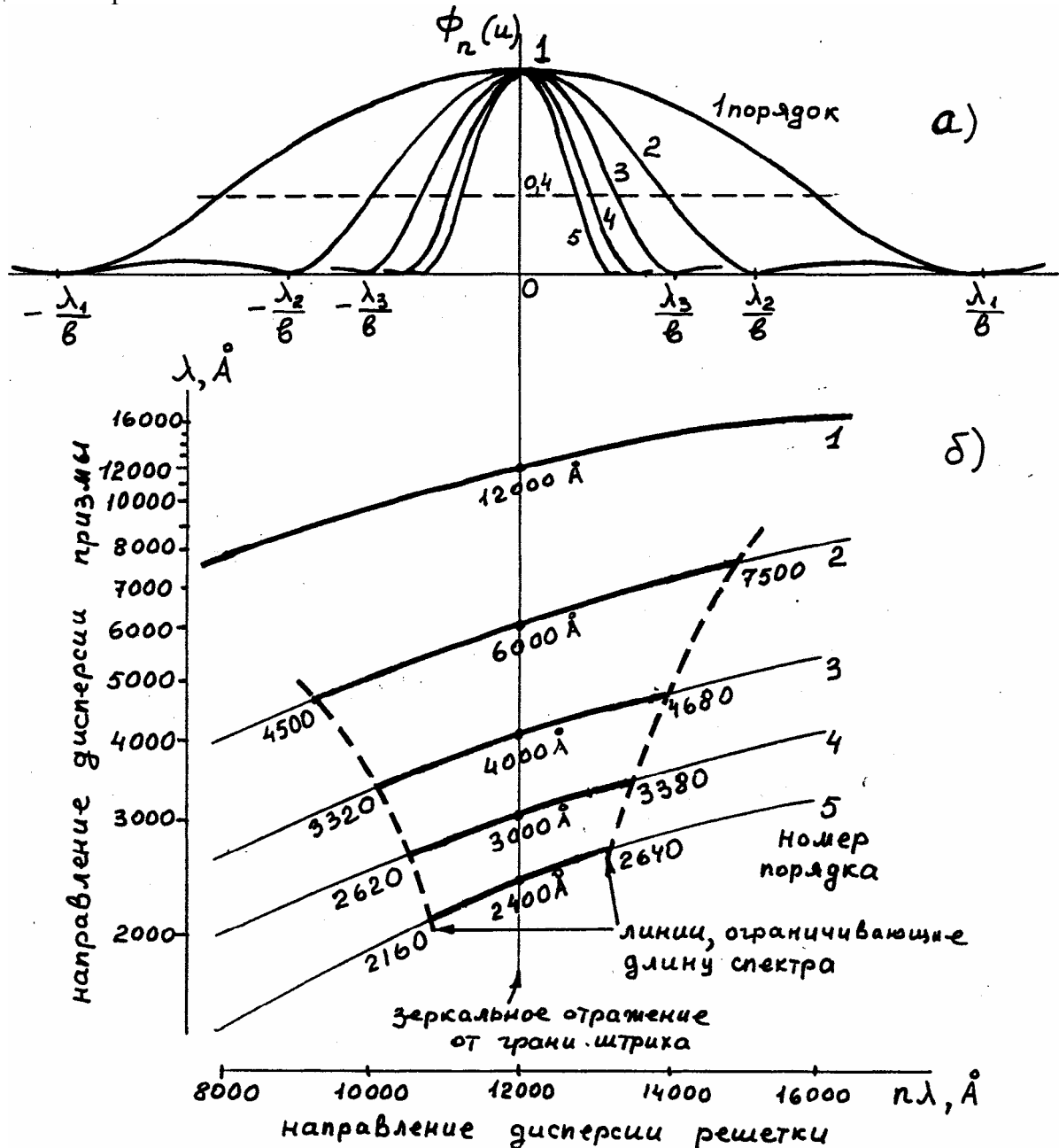


Рис. 5. Схема разделения спектров различных порядков с помощью призмы, дисперсия которой перпендикулярна направлению дисперсии решетки (дисперсии скрещены). Приведен пример для первых пяти порядков.

Согласно соотношению (4) с увеличением номера порядка уменьшается длина волны, удовлетворяющая условию автоколлимации. А поскольку ширина углового распределения отражательной способности решетки $\Phi(u)$ определяется величиной λ/b , она тоже уменьшается.

На рис.5-а изображены кривые $\Phi(u)$ первых пяти порядков для длин волн, соответствующих условию автоколлимации. В данном примере это $\lambda_1=12000\text{Å}$, $\lambda_2=6000\text{Å}$, $\lambda_3=4000\text{Å}$ и т.д. Видно, что спектры более высоких порядков при отходе от положения автоколлимации быстрее убывают по интенсивности.

Интенсивность спектров велика только в центральной части основного дифракционного максимума $\Phi(u)$, которую называют областью высокой концентрации энергии. Найдем, какую часть максимума приходится использовать, чтобы, переходя от одной строчки к другой, т.е. от одной свободной спектральной области к другой, получить спектр в широком диапазоне длин волн. Для этого воспользуемся выражением для отражательной способности

$$\Phi_n(\lambda) = \frac{\sin^2 u}{u^2} \approx \left[\frac{\sin \pi \left(n - \frac{\lambda_{1, \max}}{\lambda} \right)}{\pi \left(n - \frac{\lambda_{1, \max}}{\lambda} \right)} \right]^2, \quad (13)$$

где $\lambda_{1, \max}$ - длина волны максимума первого порядка. Результат расчетов по формуле (18) показан на рис.6-а. Как видно, максимумы $\Phi_n(\lambda)$ несимметричны - они более пологие с длинноволновой стороны.

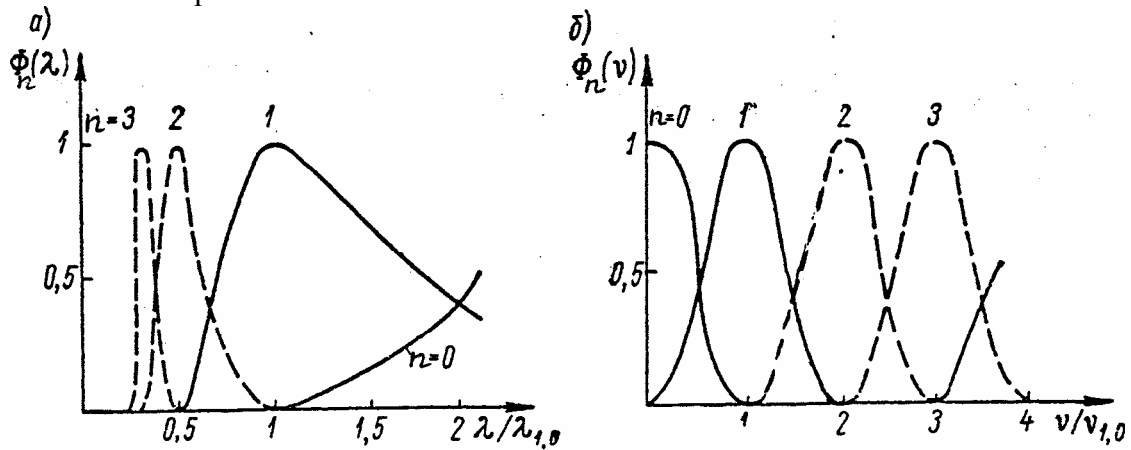


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения решетки от длины волны λ (а) и от волновых чисел $\nu=1/\lambda$ (б).

Примечательной особенностью является то, что кривые для разных n пересекаются друг с другом при значении ординаты, близком к 0,4. Поэтому, если требуется наблюдать широкий спектр, при ординате 0,4 можно переходить к следующему порядку, т.е. к следующей строчке. В итоге рабочей областью данного порядка является область, где $\Phi_n(\lambda) \geq 0,4$. Эта величина совпадает с величиной свободной спектральной области $\Delta\lambda_n$, определяемой по формуле (9).

Из сказанного следует вывод - в пределах свободной спектральной области каждого порядка отражательная способность решетки уменьшается от $\Phi_n(\lambda)=1$ в центре спектра до $\Phi_n(\lambda)=0,4$ на краях спектра.

Ширина свободной спектральной области согласно формуле (9) в разных порядках различна - с ростом порядка она уменьшается. Совокупность спектров разных порядков имеет вид фигуры, похожей на трапецию. На рис.5-б пунктиром показаны границы свободной спектральной области первых пяти порядков.

В шкале волновых чисел $\nu=1/\lambda$

$$\Phi_n(\nu) = \left[\frac{\sin \pi \left(\kappa - \frac{\nu}{\nu_{1max}} \right)}{\pi \left(\kappa - \frac{\nu}{\nu_{1max}} \right)} \right]^2 \quad (14)$$

где $\nu_{1max} = 1/\lambda_{1max}$ - волновое число, соответствующее максимуму первого порядка. В этой шкале все максимумы одинаковы (рис.6-б).

§ 2. Устройства спектрографа СТЭ-1.

Оптическая схема спектрографа СТЭ-1 показана на рис.7. Свет поступает в прибор через входную щель, проходит сквозь цилиндрическую линзу, предназначенную для компенсации астигматизма зеркальных объективов коллиматора и камеры, и после отражения от коллиматорного зеркала параллельным пучком идет в направлении дифракционной решетки.

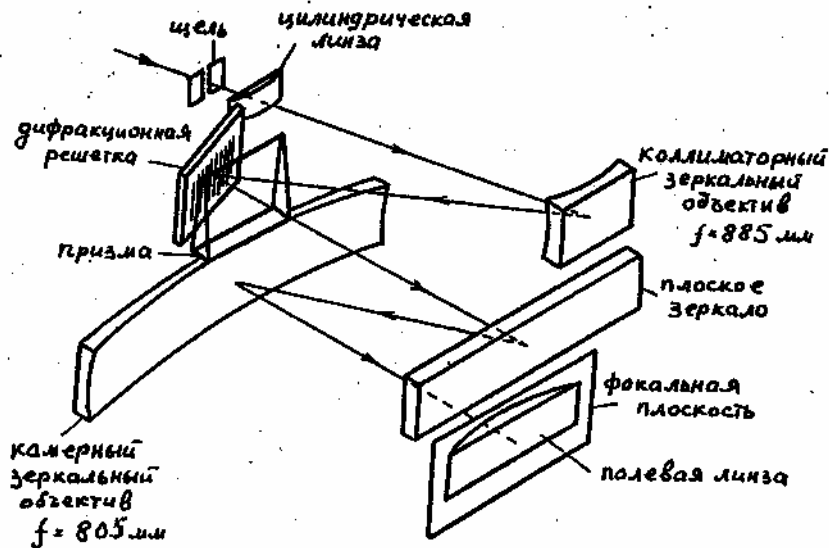


Рис.7. Оптическая схема спектрографа СТЭ-1.

В спектрографе имеются две сменные отражательные решетки с профилированным штрихом с углом блеска $\beta=20-21^\circ$. Одна из них, имеющая 300штр/мм, предназначена для видимой области спектра с длинами волн от 450 до 900нм, вторая с 600штр/мм. - для фотографирования ультрафиолета и фиолетовой части видимого спектра с длинами волн от 220 до 450нм.

Перед дифракционной решеткой в том же параллельном пучке лучей расположена призма-делитель. Решетке 300штр/мм соответствует призма-делитель из стекла, решетке 600штр/мм - призма-делитель из кварца. Смена решеток и призм-делителей производится поворотом рукоятки, выведенной на переднюю стенку корпуса прибора (под входной щелью).

После дифракции на решетке параллельные пучки света различных длин волн направляются на плоское зеркало. Плоское зеркало введено в схему для удобства конструктивного выполнения прибора. Отразившись от него, пучки попадают на вогнутое зеркало камеры и далее фокусируются на фокальной поверхности.

Вогнутое зеркало коллиматора фокусирует спектр на поверхности сферической формы. Чтобы сфотографировать спектр на плоской фотопластинке, необходимо изменить фокальную поверхность прибора, сделать ее плоской, как говорят, "исправить поле зрения".

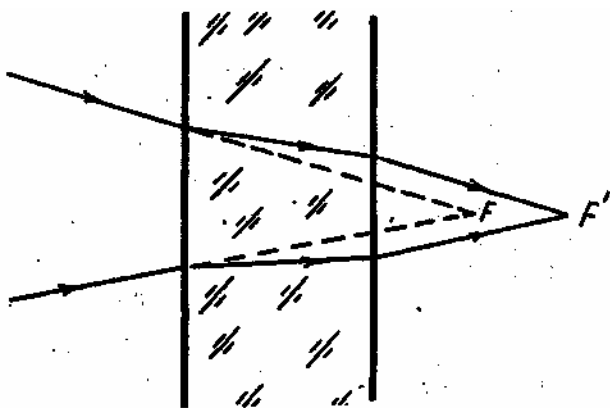


Рис.8. Смещение точки фокусировки сходящегося пучка при прохождении через плоскопараллельную пластину.

Для этой цели перед фотопластинкой установлена плосковыпуклая линза, называемая полевой линзой. Поясним её действие.

При прохождении сходящегося пучка света сквозь плоскопараллельную пластинку точка фокусировки пучка смещается (см. рис.8) на величину FF' , причём смещение тем больше, чем толще пластина. Для выравнивания фокальной плоскости во всем поле зрения необходимо вводить разную толщину в разных точках спектра. Это и обеспечивает полевая линза. Её толщина плавно меняется вдоль по спектру. То обстоятельство, что полевая линза, в отличие от плоскопараллельной пластины, обладает

дополнительным фокусирующим действием, не имеет практического значения, поскольку фокусное расстояние её намного превышает расстояние от её выпуклой поверхности до фотопластинки.

При фотографировании на фотопленку полевая линза не используется. Кассета для фотопленки (адаптер) имеет цилиндрическую поверхность для прижима пленки, совпадающую с фокальной плоскостью прибора.

Спектр получается в виде трех слегка изогнутых строчек. Общая высота всех трех строчек при высоте щели 4 мм не превышает 24 мм, что позволяет фотографировать спектр на 35-миллиметровую пленку. Диапазон спектра на каждой из строчек, обратная линейная дисперсия и теоретическая разрешающая способность согласно паспортным данным прибора приведены в таблице 1.

Таблица I Характеристики спектрографа СТЭ-1

Область спектра	Решетка штр/мм	Призма, преломляющий угол	№ строчек	Поря- док	Область спектра на фотопластинке, нм	Обратная лин. дисперсия, нм/мм	Теоретич. разрешающая способность.
Ультра-фиолетовая	600	кварцевое	1	III	450-336	0,64	99000
		стекло	2	IV	337,5-252	0,47	132000
		$11^{\circ}35'$	3	V	270-220	0,38	165000
Видимая	300	Стекло	1	III	900-672	1,23	49500
		ТФ-1	2	IV	675-504	0,94	66000
		$15^{\circ}15'$	3	V	540-450	0,76	82500

Внутреннее устройство спектрографа СТЭ-1 видно на рис.9, где он изображен со снятой боковой стенкой. Передняя 1 и задняя 2 стенки прибора служат для укрепления деталей оптической схемы прибора. Стенки соединены друг с другом четырьмя тягами 3. Каждая тяга состоит из двух сваренных между собой стержней - стального и инварного. Длина каждого стержня подобрана так, чтобы скомпенсировать изменение фокусных расстояний объективов прибора при изменении температуры. На передней стенке 1 укреплены узел входной щели с цилиндрической линзой 4, сменные решетки с призмами 5 и зеркальный объектив камеры 6. На задней стенке 2 находятся вогнутое коллиматорное зеркало 7, плоское поворотное зеркало 8 и кассетная часть 9.

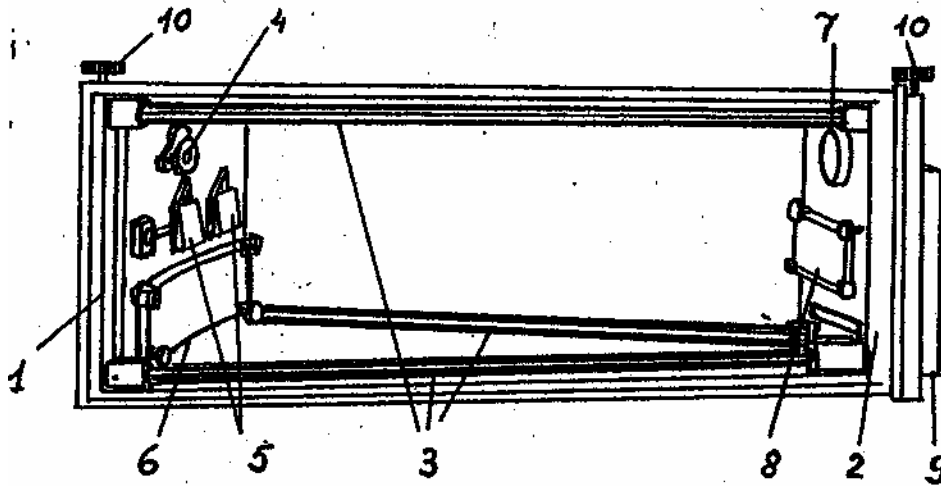


Рис.9. Спектрограф СТЭ-1 со снятой боковой крышкой. 1 и 2 - передняя и задняя стенки, 3 - тяги, 4 - узел щели с затвором и цилиндрической линзой, 5 - сменные решетки с призмами перед ними, 6 - камерный и 7 - коллиматорный зеркальные объективы, 8 - плоское поворотное зеркало, 9 - кассета, 10 - рукоятки перемещения кассеты.

Выходную щель можно изменять по ширине от 0 до 0,4 мм; цена деления барабана 1 щели (рис.10) составляет 0,001 мм. Кольцо 2 со шкалой служит для перемещения щели вдоль оптической оси прибора при его точной фокусировке. В данном приборе в видимой области спектра при работе с кассетой для пластинки на шкале должно быть установлено деление 5,4, а в ультрафиолете - 5,8 (при фотографировании с адаптером - соответственно 5,8 и 6,2). Деление отсчитывается по риску, нанесенной на основании узла щели. Для ограничения щели по высоте служит гартмановская диафрагма 3. Она имеет несколько вырезов (рис.13) - "ласточкин хвост" 1, которому соответствует шкалы 2 и 2', косой вырез 3 со шкалой 4 и

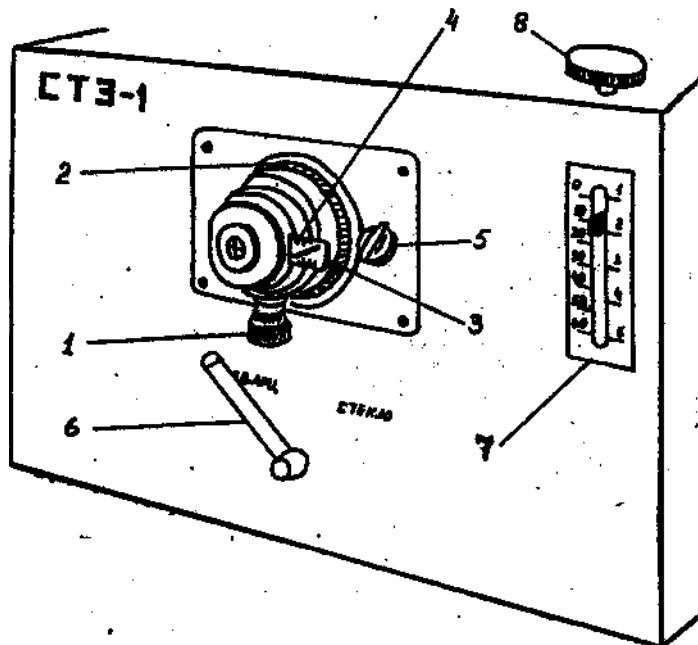


Рис.10. Передняя часть спектрографа СТЭ-1. 1 - барабан раскрытия щели, 2 - барабан перемещения щели при фокусировке спектра, 3 - гартмановская диафрагма, 4 - шкала на диафрагме, 5 - рукоятка затвора, 6 - рукоятка замены диспергирующих блоков, 7 - шкала кассеты, 8 - рукоятка перемещения кассеты.

центральный вырез с рисками 5 и 5'. Риски шкалы диафрагмы при установке должны совмещаться с краем оправы. Максимальная рекомендуемая высота щели равна 4 мм (верхняя шкала установлена при этом на делении 7). При более высокой щели строчки начинают накладываться концами линий друг на друга.

Для выделения отдельных строк в спектре при фотографировании можно использовать специальные шторки, укрепляемые на приборе перед кассетой с фотопластинкой (на полевой линзе). Шторки имеют прорези высотой 4 мм, кривизна и расположения которых соответствует заданным областям спектра. Эти шторки следует использовать, если необходимо сфотографировать несколько десятков спектров на одну пластинку и нужная область спектра вполне уместится на одной строке. Без шторок на фотопластинке размером 13x18 см можно сфотографировать

всего 5 спектров по три строчки каждый.

За щелью расположен затвор, который включается и выключается ручкой 5. Рукояткой 6 переключаются диспергирующие блоки (решетки и призмы) при переходе от видимой к ультрафиолетовой области и наоборот (при повороте рукоятки легко задеть барабан щели и сбить его установку!). Справа от щели имеются шкала 7 и ручка 8 (или 10 на рис.4) для перемещения кассеты. Подобная же ручка и шкала имеются и в кассетной части прибора. Таким образом, перемещать кассету возможно, находясь как со стороны передней, так и со стороны задней части прибора.

§ 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.11а, 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.11а), для освещения щели применяют различные осветительные системы. С одной линзой обычно используют фокусирование источника на входную щель (рис.11б) или на коллиматорный объектив (рис.11в). 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.11б) или размытое (рис.11в) изображение источника. В этих случаях щель освещена по высоте, как правило, неравномерно. В данной задаче используется освещение щели по рис.11а.

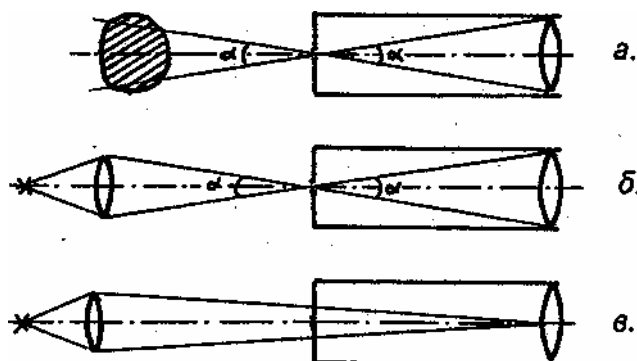


Рис.11. Освещение щели без линзы (а), с одной линзой при фокусировании изображения источника на щель (б) и на коллиматорный объектив (в).

§ 4. Влияние ширины щели на фотографируемый спектр.

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

Нормальная ширина щели S_n равна

$$S_n = \frac{f_1}{D} \lambda, \quad (15)$$

где f_1 - фокусное расстояние коллиматора, D - диаметр действующего отверстия, λ - рабочая длина волны ($D: f_1$ - относительное отверстие прибора со стороны коллиматора, для СТЭ-1 оно 1:17). Она равна 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 щели $S < S_n$ 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.

С целью получения спектров с тонкими линиями достаточно хорошей интенсивности рекомендуется работать при ширине щели $S \approx (1,5-2) S_n$.

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 :

$$\delta\lambda_{\text{щ}} = s' \frac{d\lambda}{d\ell} \quad (16)$$

где s' - ширина изображения щели, $d\lambda/d\ell$ - 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 $\delta\lambda_{\text{щ}}$. Если $\delta\lambda_{\text{щ}}$ 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, используемом в данной задаче, 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. Чем шире равномерно освещенный прямоугольник линии, тем удобнее измерять. 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. При съемках со ступенчатым ослабителем удобно щель выбирать ещё шире.

§5. Измерение интенсивностей линий по фотопластинке.

Для возможности измерений интенсивностей (в относительных единицах) спектральных линий необходимо выполнение двух условий. Во-первых, нужно сфотографировать спектр при такой ширине щели, когда каждая из измеряемых спектральных линий имеет плоский равномерно освещенный участок (см. выше), более широкий, чем щель микрофотометра при последующем фотометрировании. Во-вторых каждую фотопластинку необходимо прокалибровать - найти для неё зависимость почернения фотоэмульсии от интенсивности падающего на неё света ("отклик" фотоэмульсии).

Действие света на светочувствительный слой фотопластинки или величина экспозиции H зависит от общего количества упавшей на пластинку лучистой энергии данной длины волны (количества освещения), которую определяют как произведение освещенности E на время t действия этой освещенности. Величина включает в себя также некоторую величину P (константа Шварцшильда), в большинстве случаев близкую к единице и зависящую от характера освещения фотопластинки (времени освещения, прерывистости):

$$H = E \cdot t^P.$$

Засвеченный участок светочувствительного слоя после проявления чернеет. Прозрачность почерневшего участка определяется соотношением:

$$T = \frac{i}{i_0},$$

где i_0 - количество света, проходящего при освещении через незасвеченный участок данной фотопластинки, I - через её исследуемый участок.

Оптическая плотность почернения S , обычно в практике спектроаналитических работ называемая почернением, равна

$$S = \lg \frac{1}{T} = \lg \frac{i_0}{i}$$

Зависимость почернения S от величины экспозиции H представляется обычно графически в виде кривой $S=f(H)$, носящей название характеристической кривой фотоэмульсии или кривой почернения (рис.12).

В нижней части кривая идет параллельно оси абсцисс, S_0 соответствует величине фотографической вуали, получаемой при проявлении, H_i - инерция пластинки. Обратная ей величина дает чувствительность эмульсии (необходимо отметить, что чувствительность определяется обычно только для белого света). Величина $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$ называется контрастностью фотоэмульсии. В области нормальных почернений кривая почернения прямолинейна (BC). Участок AB - область недодержек, CD - область передержек, DE - область соляризации. На прямолинейном участке почернение может быть выражено как

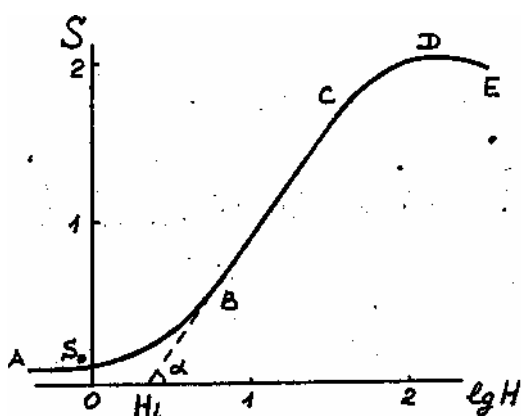


Рис.12. Кривая почернения фотопластинки.

$$S = \gamma \lg H$$

Вид кривой почернения может сильно меняться в зависимости от сорта эмульсии, условий проявления, характера освещения, длины волны света. Например, кривая почернения фотопластинки, проявленной в старом проявителе, всегда более пологая (коэффициент γ меньше), чем фотопластинки, проявленной в свежем проявителе; на одной и той же пластинке коэффициент γ будет в видимой области спектра больше, чем в ультрафиолетовой и пр.

Для построения кривой почернения необходимо знать почернение и величины экспозиции $H = Et^P$ в нескольких точках. Так как t входит в H в степени P , вообще говоря, неизвестной, для построения кривой почернения следует брать время t постоянным (этим исключается неизвестная величина P), а изменять только E .

Освещенность E пропорциональна интенсивности света I , падающей на щель спектрографа, поэтому по оси абсцисс откладывают $\lg I$. Для построения кривой почернения $S=f(\lg I)$ достаточно нанести на фотопластинку марки почернения, помещая на пути света фильтры с различной известной прозрачностью, и промерить полученные почернения.

Ступенчатый ослабитель, применяемый обычно для этой цели, представляет собой тонкую пластинку стекла или кварца с нанесенными на ней слоями платины различной толщины. Эти слои образуют ступеньки различной плотности. В данной задаче удобно использовать 9-ти ступенчатый ослабитель. Две крайние ступеньки его (первая и последняя) - совершенно прозрачные, служат для контроля равномерности освещения ослабителя. Пропускаемость этих ступенек принята за 100 %. В паспорте ослабителя пропускаемость света ступеньками дана в логарифмическом масштабе, так что для крайних ступенек $\lg I=2$, а для остальных ступенек $\lg I$ последовательно уменьшается (таблица 2).

Таблица 2

Градуировка ступенчатого ослабителя									
№ ступеньки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lg I$	2,0	1,84	1,69	1,53	1,37	1,22	1,06	0,90	2,0

Ослабитель устанавливается в насадке на щели спектрографа. Линии в спектрах, снятых с ослабителем, оказываются разбитыми на участки (ступеньки) с различными почернениями. При съемках спектров с ослабителем для построения кривой почернения щель должна быть освещена равномерно по высоте, а ширина её - как можно больше, чтобы было удобно измерять почернения. Измерив почернения всех ступенек на какой-либо линии спектра и зная градуировку (пропускаемость) ступенек ослабителя, получают сразу 8 точек на кривой почернения. Для построения всей кривой почернения следует использовать несколько близких спектральных линий различной интенсивности, каждая из которых дает участок кривой почернения. Параллельным переносом в горизонтальном направлении все эти участки совмещают в одну кривую почернения.

По полученной кривой почернения можно вести расчёт относительных интенсивностей в данном участке спектра на данной фотопластинке (как указано выше, при изменении длины волны света, характера проявления и др., вид кривой почернения может изменяться). В этих расчётах за 100% будет принята интенсивность такой линии, почернение которой определяется точкой на этой кривой при $lgI=2,00$. Расчёт ведут следующим образом: на микрофотометре в шкале почернений измеряют почернение исследуемой линии, затем по кривой почернения определяют соответствующий lgI этой линии, а отсюда и интенсивность линии в относительных единицах.

Если нужно измерить относительную интенсивность двух линий, измеряют соответственно их почернения S_1 и S_2 , по кривой почернения находят lgI_1 и lgI_2 , и берут разность логарифмов, получая

$$lg \frac{I_1}{I_2}$$

Присутствие сплошного фона, интенсивность которого накладывается на интенсивности линий, осложняет расчёт. В таком случае справа и слева от линии нужно измерить почернение сплошного фона и усреднить его, найдя почернение фона в том месте, где находится данная линия. Затем по кривой почернения, зная S фона, находят lgI фона. После этого интенсивность фона вычитают из интенсивности линии с фоном и находят истинную интенсивность линии:

$$I_{л} = I_{л+ф} - I_{ф} .$$

Расчёт относительных интенсивностей значительно упрощается, если необходимые для работы почернения линий лежат на прямоугольном участке кривой почернения. Тогда

$$\Delta S = S_1 - S_2 = \gamma \lg \frac{I_1}{I_2} ,$$

т.е. разность почернения двух линий пропорциональна логарифму их относительной интенсивности.

Спектрограф СТЭ-1 рассчитан на работу со щелью не выше 4 мм. Если использовать более высокую щель, концы линий соседних порядков наложатся друг на друга в тех местах, где строчки расположены теснее. Кроме того, может произойти затенение концов линий конструктивными элементами прибора, и при равномерной освещенности щели почернение вдоль линии будет равномерным только в какой-то её части. Высота 9-ступенчатого ослабителя составляет 6 мм, поэтому оба эффекта будут присутствовать. При достаточно бедном спектре (например, ртутном) первый эффект не страшен. Второй может привести к ошибкам при построении кривой почернения, поэтому следует обратить внимание на равномерность освещения вдоль линии.

§ 6. Источник света.

Спектрограф СТЭ-1 пригоден для работы с любым лабораторным источником света.

Очень удобны для получения спектров различных элементов шариковые лампы. Они представляют собой баллончики из кварца диаметром 2,0 - 2,5 см, наполненные каким-либо инертным газом до давления 1,5 мм рт.ст., либо содержащие еще небольшое количества какого-либо металла - ртути, цинка, железа, меди, рубидия и пр. Лампы вставляют между витками катушки в.ч. генератора, работающего на частоте 20 МГц при мощности около 40 Вт. Лампа вместе с катушкой закрыта защитным цилиндром от охлаждения конвекционными потоками.

При небольших мощностях в.ч. разряда свечение линий металлов сосредоточено в тонком пристеночном слое толщиной ~ 1 мм и практически неабсорбировано, а в центре лампы светится инертный газ. При повышении тока разряда до 80-100 мА различие зон исчезает. Благодаря высокому потенциалу ионизации инертного газа по сравнению с металлами линии газа в излучении лампы значительно слабее, чем линии металлов (например, ртути).

Шариковые лампы являются протяженными источниками света, что упрощает их "стыковку" со спектральным прибором (рис.11а). В данной задаче для этого нужно поставить лампу в кожухе почти вплотную перед щелью прибора.

§ 7. Выполнение работы.

В данной задаче студенты выполняют два упражнения:

- 1) съемка и расшифровка спектров ртути в ультрафиолетовой и видимой области спектра,
- 2) калибровка фотопластинки для фотометрических измерений относительных интенсивностей линий (построение кривой почернения).

Спектры для первого упражнения фотографируют с шириной щели 15 мкм. Для второго упражнения ширина щели должна быть 150 мкм. Все необходимые спектры могут быть сфотографированы на одной фотопластинке, если работу выполнять достаточно аккуратно.

Прежде всего, нужно составить план съемок. Рекомендуется следующий план съемок:

№ спектра	область спектра	диафрагма перед щелью	ширина щели	выдержка	деление кассеты	барабан фокусировки
1.	видимая	2 мм	15 мкм	5 мин	1	5,4
2.	Ультрафиолетовая	2 мм	15 мкм	10 мин	2	5,8
3.	видимая	ступенчатый ослабитель	150 мкм	5 мин	3,5	5,4
4	Ультрафиолетовая	ступенчатый ослабитель	150 мкм.	5 мин	5	5,8

Далее рекомендуется следующая последовательность выполнения работы.

1. Поставьте штатив с ртутной шариковой лампой перед щелью СТЭ-1 почти вплотную. Поскольку поперечные размеры шариковой лампы значительны (~2 см в диаметре), при такой установке обеспечено заполнение коллиматора светом (рис.11а). Проверьте это, посмотрев со стороны камеры внутрь прибора при максимально широкой входной щели. Рукоятка 6 (рис. 10) при этом должна быть переключена на видимую область спектра.

2. Найдите, какое деление барабана щели соответствует нулевому отсчету её ширины. Это приходится делать вдвоем - один вращает барабан щели, другой смотрит в лупу на спектральные линии и отмечает момент их исчезновения и появления. По формуле (16) рассчитайте величину нормальной ширины щели и установите щель шириной не менее чем в 2-3 раза превышающей нормальную.

3. Установите гартмановскую диафрагму на риску 5 (рис. 13). При этом высота щели составляет 2 мм. Убедитесь в правильности установки, посмотрев в лупу на спектральные линии.

4. Проверьте установку барабана фокусировки спектра. При фотографировании ультрафиолетовой области должно стоять деление 5,8, при фотографировании видимой области - деление 5,4.

5. Установите перед щелью ступенчатый ослабитель. Расширьте щель до 150 мкм и посмотрите в лупу на спектральные линии. Они должны быть в виде освещенных прямоугольников, без дефектов и черных пятен (грязи). Если на линиях видна грязь, попросите лаборанта протереть ступенчатый ослабитель. Проверьте, все ли 9 ступенек ослабителя видны на линии.

6. Уберите ступенчатый ослабитель и снова посмотрите на линии. Они должны иметь вид высоких равномерно освещенных полосок. Если освещенность неравномерна и эта неравномерность попадает в то место, где будет находиться ступенчатый ослабитель, измените немного положение источника света.

7. Выполнив все подготовительные работы, приступайте к съемкам по намеченному плану. В практикуме используются 2 типа фотопластинок - "спектральные" и "изоортохром". Не забывайте о разнице в их спектральной чувствительности (рис.14).

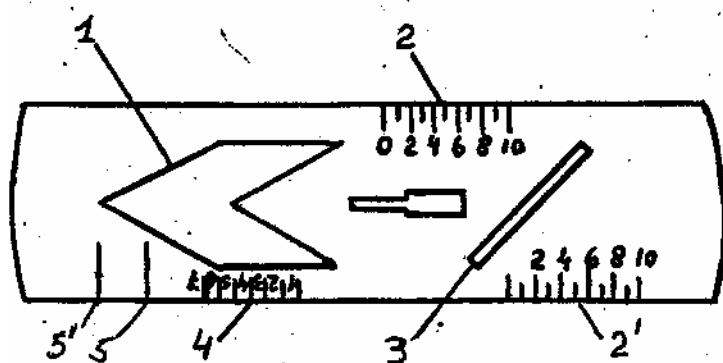


Рис. 13. Гартмановская диафрагма.

1 - фигурный вырез, 2 - шкала, соответствующая левой части выреза, 3 - косой вырез, 4 - шкала, соответствующая косому вырезу, 5 - риска, соответствующая высоте щели 2 мм.



Рис. 14. Кривые спектральной чувствительности фотопластинок "спектральные" и "изоортохром".

§ 8. Задание.

1. Сфотографируйте спектры ртути в ультрафиолетовой и в видимой областях спектра и спектры со ступенчатым ослабителем.

2. Расшифруйте спектры, пользуясь фотографией, имеющейся в практикуме. Ручкой с чернилами или фломастером надпишите линии на фотопластинке.

3. Отождествите порядки спектров. Пользуясь линейкой с миллиметровой шкалой, найдите обратную линейную дисперсию в $\text{Å}/\text{мм}$ в каждом из порядков, надпишите на пластинке. Сравните с паспортными данными СТЭ-1 (см. таблицу 1). С помощью линейной интерполяции найдите, какая длина волны находится в центре фотопластинки в каждом из порядков.

4. По формулам (9)-(12) рассчитайте для 1-5 порядков следующие параметры прибора:

- 1) свободную спектральную область $\Delta\lambda_n$
- 2) «длину спектра» l_n ,
- 3) обратную линейную дисперсию $\Delta\lambda_n/l_n$,
- 4) реальную разрешающую способность $\lambda/\delta\lambda_n$ при использованных значениях ширины щели.

Расчеты проведите для решеток с плотностью штрихов 600 штр/мм и 300 штр/мм, ширина решетки 56 мм, высота штриха-45 мм, угол блеска $\beta \approx 19^\circ-24^\circ$

5. Реальную разрешающую способность сравните с теоретической, вычислив ее по формуле (8) (или взяв из таблицы 1).

6. По одному из спектров, снятых со ступенчатым ослабителем, постройте кривую почернения фотопластинки для какой-либо области спектра. Найдите относительные интенсивности каких-либо двух ртутных линий.

Форма отчета по задаче

1. Цель работы (дать краткое изложение основной цели работы, указать ее содержание),

2. Изложение физической сущности задачи.

3. Описание всех этапов работы с приложением схемы установки и пояснений к ней.

4. Результаты измерений, их обработка и оценка погрешностей. Числовой материал оформить в виде таблиц. Графики вклеить в текст отчета,

5. Вместе с отчетом при сдаче должны быть предъявлены расшифрованные и подписанные спектрограммы,

Литература

1. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. М., МГУ, 1977, 1986.
2. Тарасов К.И. Спектральные приборы. М., "Машиностроение", 1968.
3. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л., "Машиностроение", 1970, 1975.
4. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М., МГУ, 1994.