

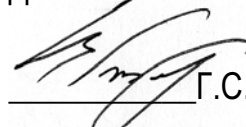
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Декан ЭФФ



Г.С. Евтушенко

«25» ноября 2007 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО СПЕЦГЛАВАМ ОПТИКИ**

Методические указания для выполнения лабораторных работ по курсу «Спецглавы оптики» для бакалавров и магистрантов, обучающихся по направлению 200200 «Оптика»

Составитель И.П. Денисов

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 535.33(07)
ББК 22.334.я7
М54


Методические указания для выполнения лабораторных работ
М54 **по спецглавам оптики:** методические указания для выполнения лабораторных работ по курсу «Спецглавы оптики» для бакалавров и магистрантов, обучающихся по направлению 200200 «Оптика» / сост. И.П. Денисов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 80 с.

ISBN 5-98298-239-3

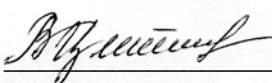
УДК 535.33(07)
ББК 22.334.я7

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры лазерной
и световой техники ЭФФ
21 ноября 2007 г.

Зав. кафедрой ЛИСТ
доктор физико-математических наук,
профессор


В.М. Лисицын

Председатель учебно-методической
комиссии


В.П. Цитилев

Рецензент

Доктор физико-математических наук, профессор ТПУ

В.Ю. Яковлев

ISBN 5-98298-239-3

© И.П. Денисов, составление, 2008
© Составление. Томский политехнический университет, 2008
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2008

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРА

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является изучение принципов работы и определение основных характеристик спектрального прибора на примере спектрографа ИСП-51.

Спектральные приборы предназначены для анализа спектрального состава оптического излучения светящихся объектов, а также спектральных характеристик взаимодействия излучения с веществом. Спектральные приборы по назначению подразделяются на спектрографы, спектрофотометры, монохроматоры, спектрометры.

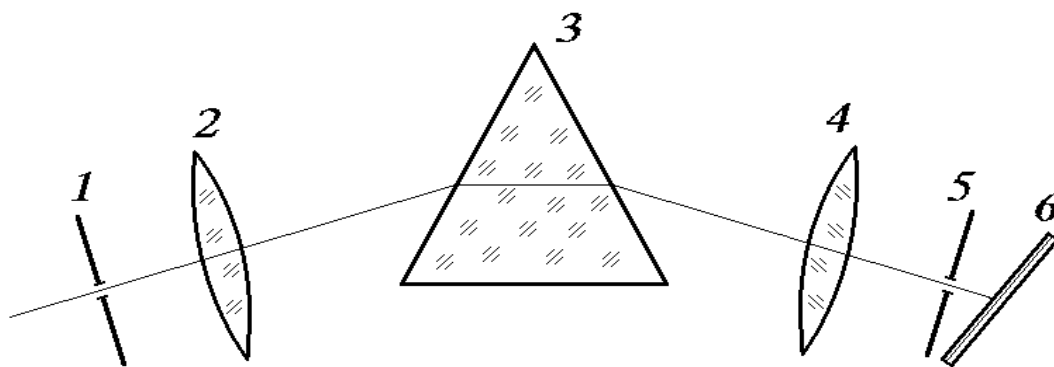


Рис. 1.1. Принципиальная оптическая схема призменного спектрального прибора

Спектральные приборы, как правило, содержат общие элементы оптической системы. На рис. 1.1 представлена принципиальная оптическая схема призменного спектрального прибора. Входная щель 1 расположена в передней фокальной плоскости объектива 2. Вместе они образуют оптическую систему, называемую входным коллиматором. Объектив 4 и расположенная в его задней фокальной плоскости выходная щель 5 составляют выходной коллиматор. Диспергирующая призма 3 разлагает излучение в спектр, а выходная щель 5 вырезает из него узкий монохроматический пучок света. Прибор, построенный по такой схеме, называется монохроматором.

Если вместо выходной щели 5 устанавливается фотопластинка 6, то прибор называется спектрографом. При этом объектив 4 и пластинка 6 составляют регистрирующую камеру.

Вместо призмы 3 может быть установлена плоская дифракционная решетка. Расположение оптических осей входного и выходного коллиматоров в этом случае может быть другим, но основные элементы схемы сохраняются.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИЗМЕННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРА

Главным элементом оптической схемы призмного спектрального прибора является призма, которая непосредственно и разделяет лучи по длинам волн.

Призма характеризуется следующими основными элементами (рис. 1.2): основанием призмы служит грань S , через которую не проходит световой пучок; ребро AA , лежащее против основания называется преломляющим ребром, а угол α – преломляющим углом призмы.

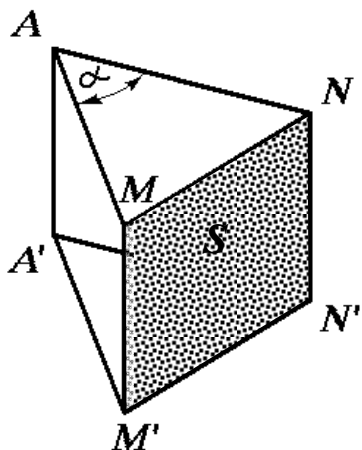


Рис. 1.2. Преломляющий угол призмы

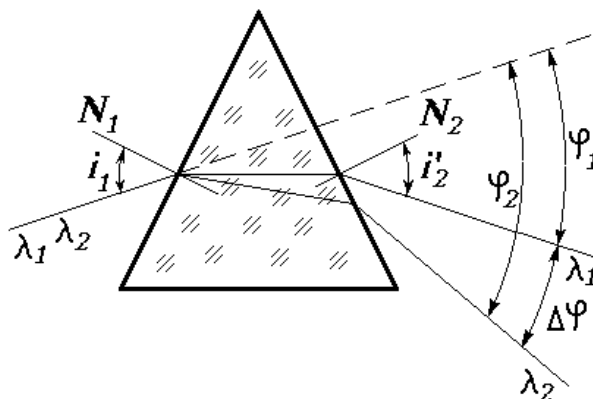


Рис. 1.3. Ход лучей в призме

На рис. 1.3 показан ход лучей света в призме. Угол между направлениями луча, падающего на призму и выходящего из него, называется углом отклонения φ . Призму устанавливают так, чтобы свет проходил через нее под углом наименьшего отклонения, что позволяет получить лучшее качество спектра. При этом угол падения $i_1 = i_2'$ и световой пучок внутри призмы параллелен основанию.

Показатель преломления прозрачного материала n зависит от длины волны. Эта зависимость, как правило, нелинейная и характеризуется оптической дисперсией материала $\frac{dn}{d\lambda}$, где dn – изменение показателя преломления материала при изменении длины волны на величину $d\lambda$.

Показатель преломления для разных длин волн λ_1 и λ_2 различен, поэтому ход лучей для них при прохождении через призму также будет различен. В конечном итоге они отклоняются на разные углы φ_1 и φ_2 . Отношение разности углов отклонения $\Delta\varphi$ для двух длин волн λ_1 и λ_2 к разности этих длин волн $\Delta\lambda$ называется угловой дисперсией призмы.

В случае расположения призмы в минимуме угла отклонения, угловая дисперсия равна:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} \rightarrow \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}; \quad (1)$$

где α – преломляющий угол призмы; n и $\frac{dn}{d\lambda}$ – показатель преломления и оптическая дисперсия материала призмы при длине волн λ .

Если угол $\alpha = 60^\circ$, то формула (1.1) принимает вид

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2}{\sqrt{4 - n^2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (1.2)$$

Преломляющие углы большинства призм близки к 60° , поэтому этой формулой удобно пользоваться для ориентировочных расчетов.

Рассмотрим подробнее оптическую схему спектрального прибора (рис. 1.4).

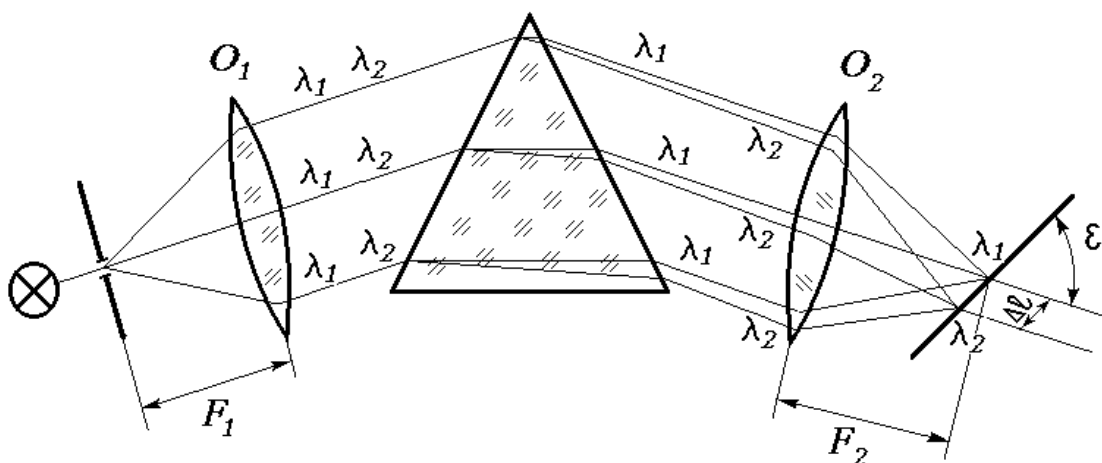


Рис. 1.4. Ход лучей в спектральном приборе для излучений с разными длинами волн

Световой пучок, падающий на призму, должен быть строго параллельным. Для достижения этого точечный источник света нужно поместить в передней фокальной плоскости объектива входного коллиматора O_1 . Поскольку обычно источник света не является точечным, то свет от источника, например лампы, направляется на узкую щель, расположенную в фокальной плоскости объектива O_1 . Тогда для спектрального прибора эта щель является источником света (точечным в плоскости главного сечения) со спектральным составом излучения, подобным спектру излучения лампы.

После прохождения призмы лучи разных длин волн становятся, конечно, непараллельными, но все лучи света одной длины волны остаются строго параллельными друг другу. Чтобы собрать параллельные лучи света одной длины волны вместе, необходимо поставить второй объектив – камерный (O_2). При этом для различных длин волн соответствующие пучки параллельных лучей будут собираться каждый в своей точке на некоторой фокальной поверхности, так что в главном сечении любая точка этой поверхности ℓ_i может характеризоваться длиной волны λ_i собираемых в нее лучей. Если объектив O_2 не исправлен на хроматическую aberrацию, то его фокусное расстояние для различных длин волн различно, поэтому образуемая фокальная поверхность будет наклонена к оптической оси на некоторый угол ε .

Принцип измерения спектра излучения заключается в том, что в каждой точке ℓ_i , точнее на каком-то малом участке $\Delta\ell_i$, каким-либо образом должна быть измерена интенсивность P сходящихся в эту точку лучей одинаковой длины волны λ_i или, соответственно, узкого интервала длин волн $\Delta\lambda_i$. Обычно для этого применяются фотографические или фотоэлектрические методы регистрации. В первом случае в фокальной плоскости помещается фотопластинка, производится снимок спектра, и об интенсивности судят по степени почернения фотоэмульсии в соответствующих точках, измеряемой специальным прибором – микрофотометром. При фотоэлектрической регистрации возможны два основных варианта измерения. Во-первых, с применением множества микрофотоэлементов, собранных в, так называемые, фотодиодные линейки (до 1000 элементов на 1 см длины), которые помещаются в фокальной плоскости, так что каждый участок спектра регистрируется отдельным фотоэлементом. Во-вторых, с применением одного фотоэлемента, помещаемого за выходной щелью монохроматора, которая пропускает на фотоэлемент лучи одного узкого участка спектра, а регистрация всего спектра производится последовательным перемещением различных участков спектра относительно щели, осуществляемом обычно поворотом призмы.

Ввиду того, что входная щель является не идеальным точечным источником, а имеет конечные размеры, то из всех монохромных лучей с длиной волны λ_i строго попадут в соответствующую точку ℓ_i лишь те, которые проходят точно через точку фокуса входного объектива O_1 . А остальные лучи той же длины волны соберутся в некоторой области вокруг точки ℓ_i , образуя на фокальной плоскости монохроматическое изо-

бражение входной щели в виде светлой полосы соответствующего цвета. Размеры этого изображения будут определяться размерами входной щели и увеличением прибора. Другими словами, два объектива создают изображение освещенной щели, а призма помещает положение изображений, построенных лучами разных длин волн, в соответствующие точки на фокальной поверхности. Число таких изображений будет равняться числу имеющихся в спектре источника разных длин волн излучения.

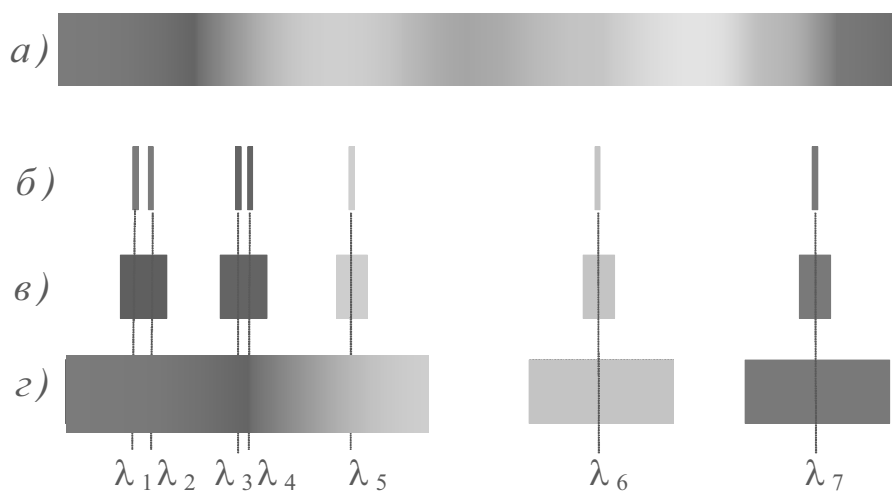


Рис. 1.5. Вид спектра при разной ширине входной щели

При большом числе длин волн монохроматические изображения сливаются или накладываются друг на друга, образуя картину сплошного спектра, как показано на рис. 1.5, а.

При малом числе излучаемых частот будет наблюдаться картина линейчатого спектра в виде набора разноцветных полосок или линий. На рис. 1.5, б – в показаны картины одного и того же линейчатого спектра при разной ширине входной щели. Очевидно, что с увеличением ширины щели увеличивается линейный размер каждого монохроматического изображения, так что изображения, расположенные друг от друга на расстояниях меньших, чем ширина изображения, сливаются, и получаются участки как бы сплошного спектра. При этом на рис. 1.5, в видны пять полос излучения вместо семи, а на рис. 1.5, з – только три широкие полосы, что является, конечно, сильным искажением действительного распределения энергии излучения по длинам волн.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИЗМЕННОГО ПРИБОРА

Спектральная рабочая область прибора

Спектральная рабочая область призмического прибора определяется, в основном, спектром пропускания материала, из которого выполнены оптические детали прибора: призма и объективы. Оптическое стекло прозрачно в области 360...2500 нм, кварц – 190...3500 нм, кристаллы фтористого лития и фтористого магния – 110...5000 нм. Обычно граница спектральной рабочей области прибора с инфракрасной стороны спектра ниже указанной. Это связано с тем, что оптическая дисперсия с ростом λ уменьшается, а следовательно, уменьшается и угловая (линейная) дисперсия. Для работы в инфракрасной области используют приборы с оптикой из хлоридов или бромидов щелочно-земельных металлов, у которых оптическая дисперсия в инфракрасной области выше.

Линейная дисперсия спектрального прибора

Под линейной дисперсией спектрального прибора понимается отношение расстояния $\Delta \ell$ в фокальной плоскости объектива выходного коллиматора между положениями двух спектральных линий к разнице длин волн $\Delta \lambda$ излучений, соответствующим этим линиям:

$$\frac{\Delta \ell}{\Delta \lambda} \rightarrow \frac{d\ell}{d\lambda} = f_2 \cdot \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \frac{1}{\sin \varepsilon}, \quad (1.3)$$

где f_2 – фокусное расстояние объектива выходного коллиматора или камеры; $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ – угловая дисперсия призмы; ε – угол наклона фокальной плоскости объектива (см. рис. 1.4).

Таким образом, понятие линейной дисперсии устанавливает связь между линейными размерами картины спектра в фокальной плоскости или ее участками с соответствующими интервалами длин волн.

Линейная дисперсия измеряется в единицах [мм/Å] или [мм/нм] и показывает линейные размеры единичного спектрального интервала в фокальной плоскости выходного объектива.

На практике для характеристики прибора часто используется величина, называемая обратной линейной дисперсией – $\frac{d\lambda}{d\ell}$, которая измеряется в [Å /мм] или [нм/мм] и показывает величину спектрального интервала, приходящегося на 1 мм линейной шкалы в фокальной плоскости выходного объектива.

Для призмённых приборов величина линейной дисперсии, так же как дисперсия материала и угловая дисперсия призмы, зависит от длины волны излучения.

Увеличение спектрального прибора

Любой объектив как оптическая система служит для получения увеличенного или уменьшенного изображения какого-либо предмета или объекта. Совокупность объективов спектрального прибора служит этой же цели, при этом объектом является освещенная входная щель, а изображением – некоторая линия в фокальной плоскости выходного объектива, яркость которой определяется светосилой, а размеры – размерами входной щели и увеличением оптической системы прибора. Если входная щель имеет конечные размеры: a – ширину и h – высоту, то при размерах изображения a' и h' увеличение в главном сечении прибора составляет

$$\beta = \frac{a'}{a} = \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{1}{\sin \varepsilon}, \quad (1.4)$$

где f_1 и f_2 – фокусные расстояния объективов входного и выходного коллиматоров.

Увеличение в плоскости, перпендикулярной главному сечению:

$$\beta = \frac{h'}{h} = \frac{f_2}{f_1}. \quad (1.5)$$

Спектральная ширина щели

Если входную щель конечной ширины осветить монохроматическим светом, то ширина геометрического изображения монохроматической линии излучения будет

$$a' = \beta \cdot a. \quad (1.6)$$

Таким образом, даже при идеально монохроматическом излучении с $\Delta\lambda \rightarrow 0$, изображение входной щели в виде некоторой светлой полосы или линии на фокальной плоскости имеет определенную ширину $a' = \Delta\ell$, занимающая линейный интервал между точками ℓ_1 и ℓ_2 , на которые попадают края изображения. Каждой точке фокальной плоскости с линейной координатой ℓ_i соответствует длина волны λ_i собираемых в эту точку монохромных лучей, поэтому краям изображения в точках ℓ_1 и ℓ_2 можно сопоставить соответствующие длины волн λ_1 и λ_2 . Интервал длин волн между λ_1 и λ_2 принято называть *спектральной шириной щели* $\Delta\lambda_{\text{щ}} = \lambda_2 - \lambda_1$.

Учитывая линейную дисперсию прибора (3) и зная, что $\Delta\ell = a'$, определим зависимость спектральной ширины щели от ее геометрической ширины и параметров прибора:

$$\Delta\lambda_{\text{щ}} = a' \cdot \frac{d\lambda}{d\ell} = \beta \cdot a \cdot \frac{d\lambda}{d\ell}. \quad (1.7)$$

Таким образом, спектральная ширина щели – это интервал длин волн, который занимает монохроматическое изображение входной щели по шкале длин волн в фокальной плоскости выходного объектива. Для призмных приборов, у которых величина линейной дисперсии зависит от длины волны, величина $\Delta\lambda_{\text{щ}}$ также зависит от значения λ_i . Для дифракционных приборов величина $\Delta\lambda_{\text{щ}}$ практически постоянна по всему спектру.

Выражение (1.7) справедливо при работе с достаточно широкими щелями, когда можно не учитывать увеличение спектральной ширины щели вследствие дифракции и других причин.

Нормальная ширина щели

Если не учитывать дифракцию, то при монохроматическом освещении и бесконечно узкой входной щели на фокальной плоскости должно получиться изображение в виде бесконечно узкой линии. Но так как свет при прохождении через прибор ограничивается размерами оптических деталей, то происходит его слабая дифракция на наименьшем отверстии прибора, которое называется действующим отверстием d . Таким наименьшим отверстием для параллельного пучка лучей в спектрографе является грань диспергирующей призмы. Обычно d определяется как диаметр вписанной в грань призмы окружности.

Параллельный пучок лучей монохроматического света, вследствие дифракции на отверстии призмы, становится слабодиффракционным (рис. 1.6); поэтому в фокальной плоскости выходного объектива O_2 наблюдается не бесконечно узкая линия, а линия конечной ширины $\Delta\ell$, причем изображение щели представляется в виде типичной картины дифракции света на отверстии – с интерференционными минимумами и максимумами. В правой части рисунка показано соответствующее этому случаю распределение освещенности E' в фокальной плоскости вдоль направления дисперсии ℓ .

Расстояние между главным максимумом и первым минимумом дифракционной картины, или, на практике, половина расстояния между двумя первыми минимумами ($\Delta\ell/2$ на рис. 1.6), определяет дифракционную ширину S изображения спектральной линии. Поскольку угол дифракции в направлении первого минимума $\Theta = \lambda/d$, где d – диаметр действующего отверстия, то

$$S = \Theta \cdot f_2 = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{f_2}{\sin \varepsilon}. \quad (1.8)$$

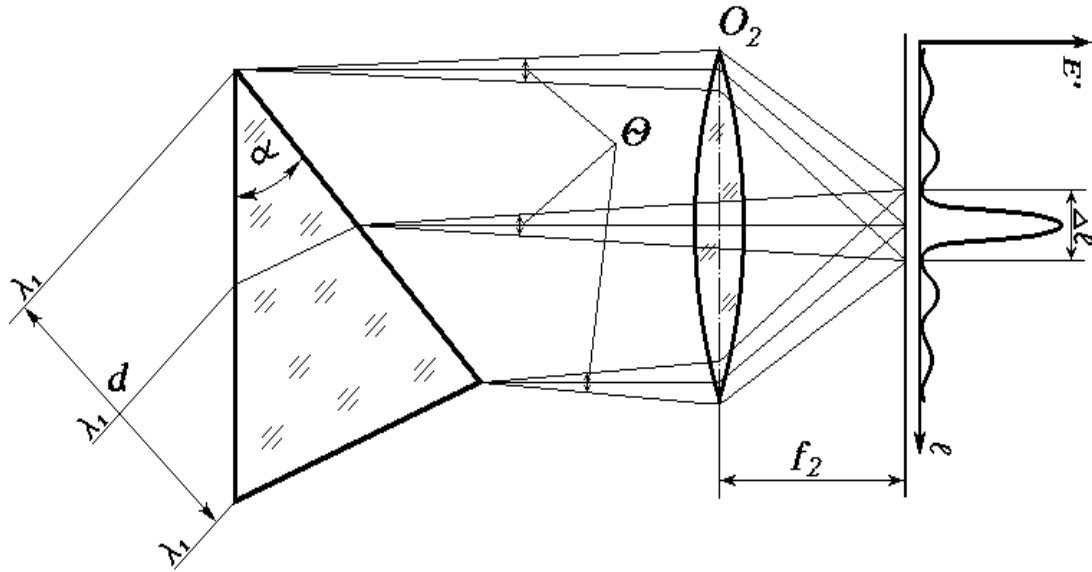


Рис. 1.6. Дифракция на действующем отверстии спектрального прибора

Изображение спектральной линии принципиально не может быть меньше, чем дифракционная ширина S , поэтому устанавливать предельно узкие входные щели бесполезно. Принято считать, что минимальным размером входной щели, когда еще несущественно сказывается дифракционное уширение, является такой, когда ширина геометрического изображения монохроматической линии будет равна ее дифракционной ширине, то есть когда $a' = S$. Входная щель такого размера называется нормальной и обозначается a_n .

Используя выражение (1.4) и (1.8), требуемое равенство можно записать:

$$a \cdot \frac{f_2}{f_1 \cdot \sin \varepsilon} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{f_2}{\sin \varepsilon}.$$

Тогда

$$a_n = \frac{\lambda}{d} \cdot f_1. \quad (1.9)$$

Очевидно, что величина нормальной ширины щели будет различной для разных длин волн излучения.

Разрешающая способность спектрального прибора

Под понятием разрешающей способности спектрального прибора обычно подразумевается способность прибора разрешать, то есть наблюдать отдельно, близкорасположенные спектральные линии излучения так, чтобы можно было определить положение максимумов излучения каждой линии.

Принятой характеристикой разрешающей способности спектрального прибора служит относительная разрешающая способность спек-

тального прибора R , которая определяется как отношение значения длины волны λ , в области которой производится наблюдение, к наименьшей разности $\Delta\lambda$ положений максимумов двух линий одинаковой интенсивности, которые еще могут быть разрешены (то есть могут наблюдаться отдельно):

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (1.10)$$

На рис. 1.7 показан спектр излучения, представленный тремя парами близко расположенных линий, причем спектральный интервал $\Delta\lambda$ между положениями максимумов линий во всех трех случаях одинаков.

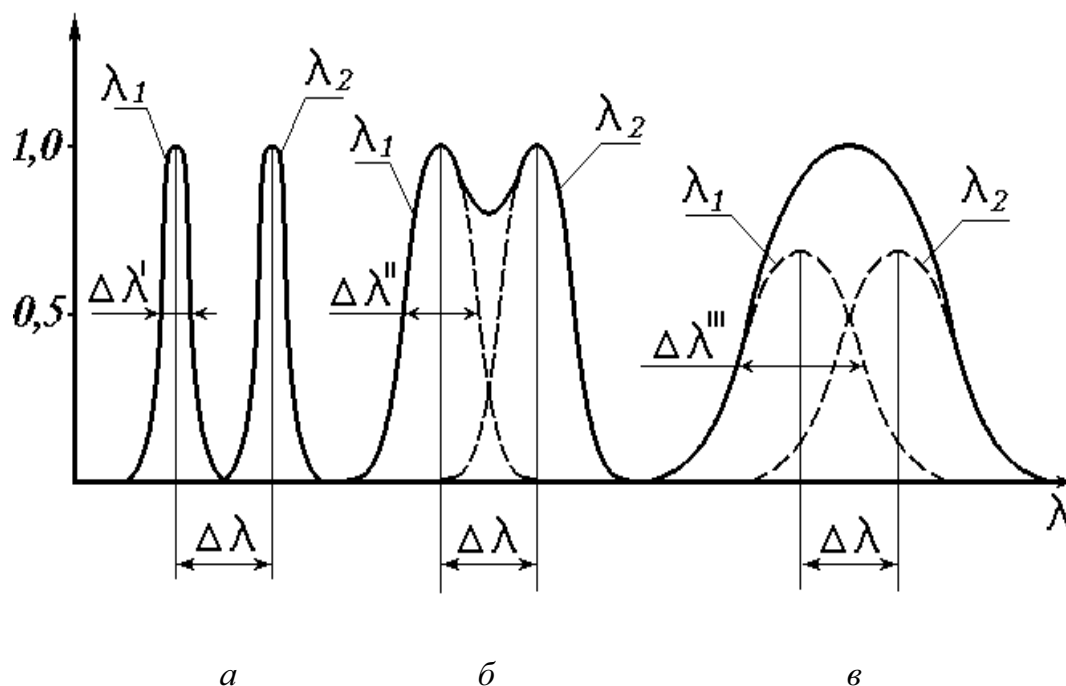


Рис. 1.7. Разрешение двух линий в зависимости от соотношения полуширины линий $\Delta\lambda'$... $\Delta\lambda'''$ и величины $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$

В варианте *a* линии разрешены хорошо; вариант *v* показывает случай, когда две линии не разрешены и сливаются в результате наложения в одну широкую; вариант *б* представляет предельный случай разрешения, когда линии накладываются друг на друга, но на результирующей кривой еще удается выделить положение максимумов каждой.

Истинная ширина спектральной линии в спектре излучения определяется физическими процессами, протекающими в излучателе. В случае измерения спектра идеальным спектральным прибором, то есть прибором, не искажающим форму линий, две близкие в спектре перекрывающиеся линии считаются разрешенными, если между ними существует явно выраженный провал (рис. 1.7, *б*) по величине составляющий не менее 20 % от интенсивности в максимуме.

Очевидно, что чем уже истинная ширина спектральных линий, тем легче они могут быть разрешены и тем меньше интервал между ближайшими разрешенными линиями. Обычно ширина линии характеризуется ее полушириной (на рис. 1.7 – $\Delta\lambda'$, $\Delta\lambda''$ и $\Delta\lambda'''$), то есть шириной линии на уровне половины максимальной амплитуды. Из рисунка видно, что когда $\Delta\lambda' < \Delta\lambda$ – линии разрешены, $\Delta\lambda''' > \Delta\lambda$ – линии неразрешены, при $\Delta\lambda'' = \Delta\lambda$ – случай предельного разрешения.

Однако, как было показано выше, в реальном спектральном приборе истинная форма линий уширяется из-за дифракции света на отверстиях прибора и вследствие того, что щели всегда имеют конечную ширину. Даже при идеально монохроматическом свете и a бесконечно

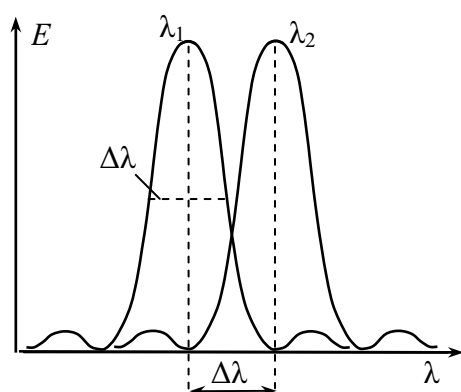


Рис. 1.8. Предельное разрешение двух линий

близкой к нулю, размер изображения линии не может быть меньше ее дифракционной ширины (1.8), а распределение освещенности в фокальной плоскости выходного объектива имеет вид, как на рис. 1.6. Если же через прибор проходит свет с двумя монохроматическими линиями λ_1 и λ_2 , то вид распределения освещенности будет подобен изображенному на рис. 1.8.

Искаженные из-за дифракции света две спектральные линии считаются разрешенными, если они расположены не ближе чем дифракционная ширина линий, то есть когда главный дифракционный максимум одной совпадает с первым минимумом другой. Следовательно минимальное расстояние между линиями:

$$\Delta\lambda_{\min} = \lambda_2 - \lambda_1 \geq S \cdot \frac{d\lambda}{d\ell} = f_2 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{d\lambda}{d\ell}. \quad (1.11)$$

Разрешающая способность спектрального прибора, рассчитанная по дифракционной ширине линии, называется теоретической разрешающей способностью прибора R_T :

$$R_T = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\min}} = \frac{d}{f_2} \cdot \frac{d\ell}{d\lambda}. \quad (1.12)$$

В действительности уширение изображений монохроматических линий происходит за счет дифракции и других факторов. К ним относятся: конечная ширина щелей, дефекты оптики прибора и его фокусировки, зернистое строение фотоземли, рассеяние света в ней; поэтому существует понятие практической разрешающей способности прибора R_{Π} :

$$R_{\Pi} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\Pi}}, \quad (1.13)$$

где $\Delta\lambda_{\Pi}$ – спектральная ширина изображения монохроматической линии.

При ширине входной щели значения a много большей значения a_{Π} величина $\Delta\lambda_{\Pi}$ определяется спектральной шириной щели $\Delta\lambda_{\text{щ}}$. Тогда

$$R_{\Pi} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\text{щ}}} = \frac{\lambda}{\beta \cdot a} \cdot \frac{d\ell}{d\lambda}. \quad (1.14)$$

В случаях, когда ширина щели a соизмерима с величиной a_{Π} , рассчитать R_{Π} сложнее.

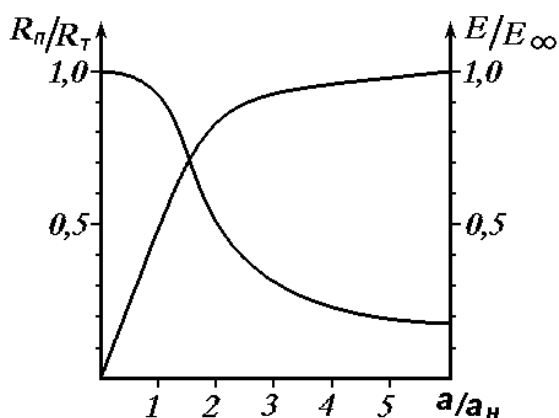


Рис. 1.9. Зависимость отношения R_{Π}/R_T и E/E_{∞} от относительного размера щели a/a_{Π}

На рис. 1.9 показана зависимость отношения R_{Π}/R_T от относительного размера щели a/a_{Π} .

Нормальной ширине щели соответствует потеря в разрешающей способности по сравнению с бесконечно узкой щелью примерно на 23 %. На том же рисунке представлена зависимость освещенности в центре изображения монохроматической линии от ширины щели (E_{∞} – случай бесконечно широкой щели).

Светосила спектрального прибора

Под светосилой спектрографа L понимается отношение освещенности изображения входной щели E'_1 в фокальной плоскости объектива камеры к величине освещенности самой щели монохроматическим светом E_1 :

$$L = \frac{E'_1}{E_1} = \tau \cdot \frac{\pi^2 d^2}{4 f_2^2}, \quad (1.15)$$

где τ – коэффициент пропускания всех оптических элементов прибора; d – диаметр действующего отверстия прибора.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из спектрографа ИСП-51 и сменных газоразрядных источников света с блоком пускорегулирующей аппаратуры (рис. 1.10).

В спектрографе ИСП-51 применена трехпризменная система Ферстерлинга, состоящая из двух одинаковых равнобедренных призм и расположенной между ними призмы Аббе. Призмы изготовлены из стекла ТФ-1, основание призм – 70 мм, преломляющий угол – 63°. Синхронным поворо-

том всех призм можно выводить нужную область спектра на середину кассеты. При вращении рукоятки поворота призм (6 на рис. 1.10), каждая призма на своем столике перемещается таким образом, что все остальные остаются под углом наименьшего отклонения для луча, идущего вдоль оптической оси.

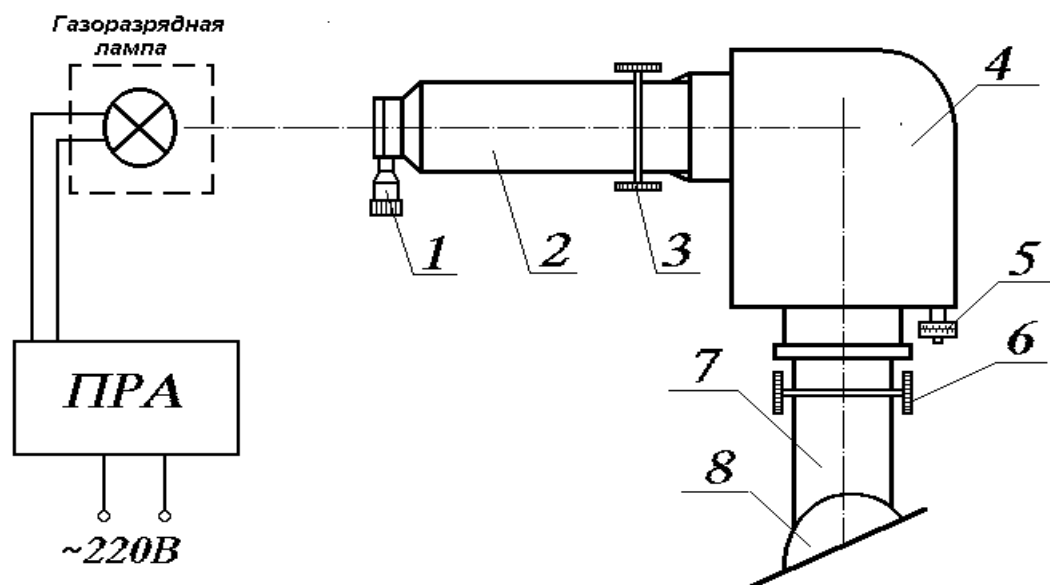


Рис. 1.10. Схема установки:

- 1 – микровинт входной щели; 2 – входной коллиматор;
 3 – рукоятка фокусирования объектива входного коллиматора; 4 – корпус;
 5 – рукоятка поворота призм; 6 – рукоятка фокусирования объектива камеры;
 7 – выходная камера; 8 – кассетный блок на поворотном барабане

Спектрограф ИСП-51 имеет несколько сменных коллиматоров и камер. В данной установке используется входной коллиматор УФ-61 с объективом F-800 мм и камера с объективом F-270 мм. Все объективы ахроматические, поэтому фокальная поверхность достаточно плоская, а нормаль к ней наклонена к оптической оси на небольшой угол $\varepsilon = 5 \dots 10^\circ$. Коллиматор и камера снабжены устройствами фокусировки (рукоятки 3 и 5 на рис. 1.10). На коллиматоре установлена входная щель с ценой деления на барабане раздвигающего микровинта равной 0,01 мм и раскрытием до 4 мм. Рабочая область ИСП-51 – 360...1000 нм.

В качестве источников света на установке применяются газоразрядные дуговые лампы высокого давления с разрядом в парах ртути, натрия и ртути с добавками различных металлов. Все лампы специальной вилкой подсоединяются к блоку ПРА, который включается в сеть 220 В. Лампы в защитных кожухах с помощью рейтеров поочередно устанавливаются на рельс перед входной щелью спектрографа.

В данной лабораторной работе наблюдение изображения спектра излучения осуществляется визуально, то есть прибор работает в качестве спектроскопа. К кассетному блоку крепится окуляр, который по направ-

ляющим может перемещаться вдоль фокальной плоскости по направлению развертки спектра. В плоскости изображения спектра помещена линейная шкала на прозрачной подложке с ценой деления 0,5 мм.

ЗАДАНИЕ

1. Изучить и нарисовать оптическую схему прибора ИСП-51.
2. Построить градуировочный график зависимости положения спектральной линии на фокальной плоскости от длины волны $\ell = f(\lambda)$ по линиям излучения ртутного разряда.
3. Рассчитать и построить график зависимости линейной дисперсии прибора от длины волны $\frac{\Delta \ell}{\Delta \lambda} = f(\lambda)$.
4. Определить длины волн спектральных линий для излучений различных газоразрядных источников света.
5. Рассчитать увеличение прибора β , нормальную ширину входной щели a_n и теоретическую разрешающую способность R_r прибора ИСП-51 для длины волны λ_i , указанной преподавателем.
6. Определить разрешающую способность прибора R_p при используемой ширине входной щели.
7. Установить при какой ширине входной щели становятся неразрешенными две, указанные преподавателем, линии в спектре газоразрядного источника. Рассчитать какова при этом спектральная ширина изображения входной щели на фокальной плоскости камеры.

УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Открыть верхнюю крышку прибора и ознакомиться с конструкцией и расположением оптических деталей прибора. Произвести необходимые измерения размеров призм линейкой. Определить действующее отверстие прибора. Нарисовать оптическую схему спектрографа.

2. Поместить на рельс перед входной щелью ртутную газоразрядную лампу. Установить ширину входной щели 0,2...0,5 мм. Включить лампу. Рукояткой поворота призм 5 вывести изображение спектра на середину шкалы. Рукояткой перемещения линз объектива камеры 6 и поворотом кассетного блока 8 добиться резкости изображения спектра по всей его длине. Наблюдение изображения спектра излучения удобнее начинать с левой (красной) стороны спектра, так как в поле зрения окуляра попадает большее количество линий.

3. Измерить от произвольной точки шкалы слева от спектра, взятой за 0, положение основных линий ртути и записать данные в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Спектральные линии ртути

№ линии	1	2	3	4
Цвет линии	желтая	зеленая	синяя	фиолетовая
Длина волны, нм	577,0...579,1	545,1	435,8	404,7
Положение линии, мм				

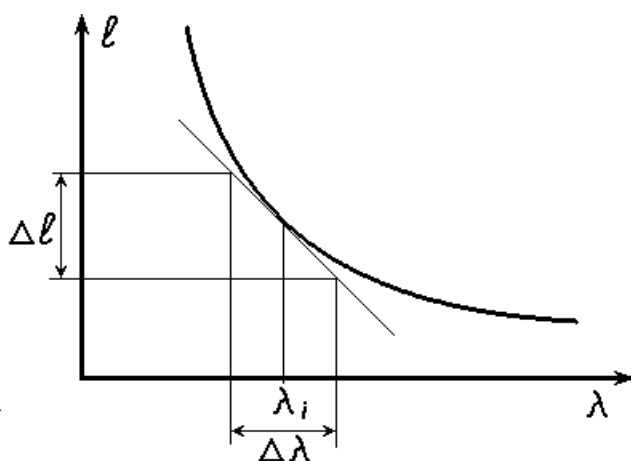


Рис. 1.11. Графическое определение величины линейной дисперсии $(\Delta l / \Delta \lambda)_{\lambda_i}$ для длины волны λ_i

4. Построить по данным табл. 1.1 градуировочный график $l = f(\lambda)$.

5. Построить, пользуясь градуировочным графиком, график зависимости линейной дисперсии $\frac{\Delta l}{\Delta \lambda}$ от длины волны λ . Чтобы рассчитать значение $\frac{\Delta l}{\Delta \lambda}$ для одной длины волны λ_i , необходимо про-

вести касательную к кривой $l = f(\lambda)$ в точке с абсциссой λ_i (как показано на рис. 1.11) и определить значения $\Delta \lambda$ и Δl для этой длины волны. Для построения графика зависимости линейной дисперсии от длины волны эти операции повторить для различных длин волн.

6. Установить перед входной щелью и включить газоразрядный источник света, указанный преподавателем. Понаблюдать изменение спектра в процессе разгорания лампы. Через 5...7 мин после выхода лампы на рабочий режим горения измерить положение спектральных линий данного источника света и по градуировочному графику определить длины волн линий. Результаты занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Спектральные линии источника света

№ линии	1	2	3	4				n
Положение линии, мм								
Длина волны линии, нм								

7. Проанализировать полученные результаты наблюдения спектров, пользуясь данными приложения 1 об основных длинах волн излучения некоторых элементов.

8. Определить, пользуясь данными измерений и известными характеристиками прибора, нормальную ширину входной щели a_n и теоретическую разрешающую способность R_T для длины волны, указанной преподавателем. При этом угол наклона фокальной плоскости определяется как

$$\varepsilon = 90^\circ - \gamma,$$

где γ – угол поворота кассетного блока, определяемый по шкале на его корпусе.

9. Рассчитать какой при этом получается размер изображения щели a' , установив при какой ширине входной щели две указанные преподавателем линии сливаются в одну полосу. Определив из графика величину линейной дисперсии для длины волны в максимуме полосы и принимая $\Delta\ell = a'$, найти спектральную ширину изображения щели $\Delta\lambda_{щ}$. Сравнить этот результат со спектральным расстоянием $\Delta\lambda$ между выбранными линиями.

ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ

1. Назовите основные конструкционные элементы спектрального прибора.
2. Что такое *линейная дисперсия* спектрального прибора, от каких параметров зависит ее величина?
3. Как зависит вид линейчатого спектра в фокальной плоскости объектива выходного коллиматора от ширины входной щели?
4. Что такое *спектральная ширина щели*, от каких характеристик прибора зависит ее величина?
5. Что такое *дифракционная ширина щели*, от чего она зависит?
6. Поясните, что такое *нормальная ширина щели*, от каких параметров прибора зависят ее размеры?
7. Какие спектральные линии называются разрешенными?
8. Чем определяется разрешающая способность спектрального прибора?
9. Как связаны понятия *спектральная ширина щели* и разрешающая способность спектрального прибора?
10. Какие и каким образом изменятся характеристики прибора, если половину призмы закрыть непрозрачным экраном?
11. От чего зависит угол наклона фокальной плоскости объектива выходного коллиматора? Как его определить?
12. Как построить график зависимости линейной дисперсии спектрального прибора от длины волны?

Лабораторная работа № 2 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Изучение источника света характеризуется количественными (мощность излучения, световой поток) и качественными (спектр излучения, цветность) характеристиками.

Под спектром излучения понимают зависимость спектральной плотности излучения φ_λ от длины волны λ или энергии излучаемых квантов света $h\nu$. Спектральной плотностью излучения называется поток излучения в узком интервале спектра $\Delta\lambda$, стремящийся к нулю, при длине волны λ , рассчитанный на единичный интервал длин волн (обычно на 1 нм):

$$\varphi_\lambda = \frac{\Delta\Phi_{e\lambda}}{\Delta\lambda}, \quad (2.1)$$

где $\Delta\Phi_{e\lambda}$ – поток излучения в спектральном интервале $\Delta\lambda$ при длине волны λ .

Размерность спектральной плотности излучения – [Вт/нм].

Обычно источники излучения характеризуются относительным спектром излучения, нормируемым относительно максимального значения спектральной плотности излучения в данном спектре (см. рис. 2.1–2.3).

$$\varphi(\lambda) = \frac{\varphi_\lambda}{\varphi_{\lambda_{\max}}}, \quad (2.2)$$

где $\varphi_{\lambda_{\max}}$ – максимальное значение спектральной плотности излучения в спектре; λ_{\max} – длина волны, на которую приходится максимум спектра излучения, или длина волны, соответствующая положению наиболее интенсивной линии спектра.

Использование относительных значений спектров излучения обусловлено тем, что для решения большинства спектрометрических задач достаточно значение соотношения интенсивностей различных волн в спектре излучения. Кроме того, измерение спектров излучения в относительных единицах значительно проще, чем в абсолютных.

Спектры излучения разделяются на сплошные, линейчатые, полосатые. Под сплошным понимается спектр, мощность излучения в котором не равна нулю внутри пределов спектра излучения (рис. 2.1). Сплошной спектр характерен для теплового излучения.

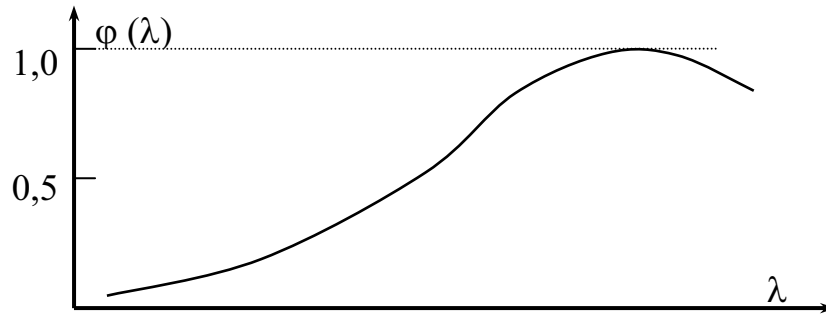


Рис. 2.1. Сплошной спектр излучения

Линейчатым называется спектр излучения, состоящий из серии отдельных линий излучения, обычно шириной менее 10 нм (рис. 2.2). Линейчатые спектры характерны для излучения газового разряда.

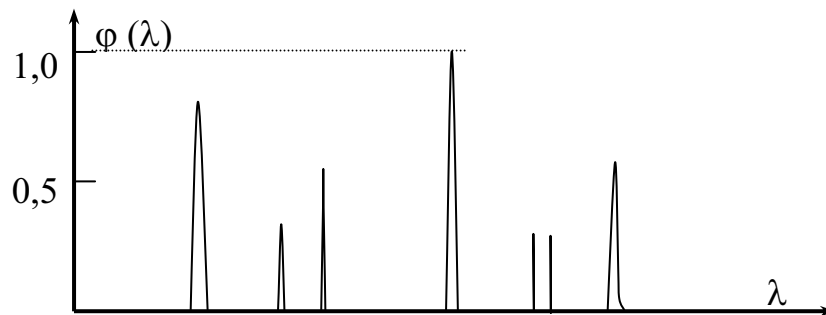


Рис. 2.2. Линейчатый спектр излучения

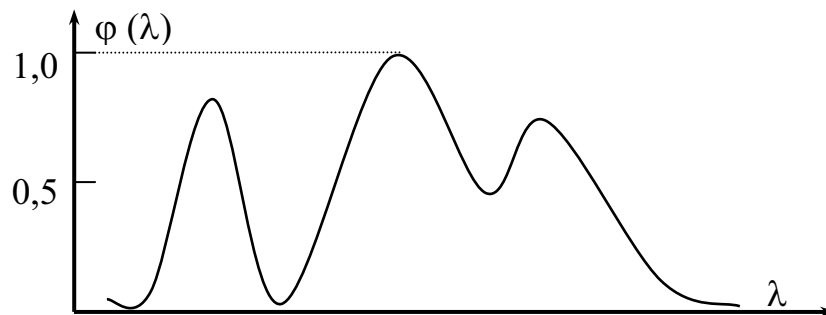


Рис. 2.3. Полосатый спектр излучения

В полосатом спектре имеется несколько широких полос излучения; такие спектры характерны для люминесценции твердых тел и жидкостей (рис. 2.3).

Часто спектры излучения представляют собой комбинацию перечисленных спектров.

Для подавляющего большинства источников спектральный состав излучения не зависит от направления распространения света, поэтому о спектре излучения источника в целом можно судить по результатам измерения спектра излучения в каком-либо одном выбранном направлении.

Измерения спектров излучения выполняется с помощью установок, состоящих из монохроматоров и приемников света, предварительно отградуированных по пропусканию и спектральной чувствительности. Свет от исследуемого источника света направляется на входную щель монохроматора. Через выходную щель монохроматора выходит монохроматический поток, ослабленный, по сравнению с падающим, в соответствующее число раз согласно спектральному коэффициенту пропускания оптической системы τ_λ . При правильно подобранных размерах входной $a_{\text{ВХ}}$ и выходной $a_{\text{ВЫХ}}$ щели, когда выполняется условие

$$a_{\text{ВЫХ}} = a_{\text{ВХ}} \cdot \frac{f_2}{f_1}, \quad (2.3)$$

где f_1 и f_2 – фокусные расстояния объективов входного и выходного коллиматоров.

Спектральная область $\Delta\lambda$ выделенного монохроматором потока излучения равна:

$$\Delta\lambda = a_{\text{ВЫХ}} \cdot \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_\lambda, \quad (2.4)$$

где $\left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_\lambda$ – обратная линейная дисперсия спектрального прибора для

установленной длины волны λ . Величина $\Delta\lambda$ в выражении (2.4) называется спектральной шириной щели.

Поток излучения $\Delta\Phi'_{e\lambda}$, выделенный монохроматором при длине волны λ , равен:

$$\Delta\Phi'_{e\lambda} = \Delta\Phi_{e\lambda} \cdot \tau_\lambda. \quad (2.5)$$

Измерения потока света, вышедшего из монохроматора осуществляется с помощью приемника света. Приемник света подбирается из следующих соображений: спектральная область чувствительности приемника должна быть шире ожидаемого (или заданной области) спектра излучения; чувствительность должна быть достаточной для измерения наименьших значений спектральных плотностей излучения в спектре; световая характеристика должна быть линейной. Величина сигнала приемника света i_λ при освещении его рабочей поверхности светом узкого спектрального диапазона $\Delta\lambda$ при длине волны λ равна:

$$i_\lambda = K \cdot \gamma_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot \Delta\Phi'_{e\lambda} = K \cdot \gamma_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot \Delta\Phi_{e\lambda}, \quad (2.6)$$

где γ_λ – спектральная чувствительность приемника света при длине волны λ ; K – коэффициент, учитывающий долю вышедшего из монохроматора потока излучения, который попал на рабочую поверхность приемника света, а также коэффициент усиления усилителя тока.

Тогда спектральная плотность излучения потока света, падающего на вход монохроматора, при длине волны λ может быть найдена по результатам измерения тока с учетом (2.4) и (2.6) следующим образом:

$$\varphi_{\lambda} = \frac{\Delta\Phi_{e\lambda}}{\Delta\lambda} = \frac{i_{\phi\lambda}}{K \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \left(\frac{d\lambda}{dl}\right)_{\lambda} \cdot a_{\text{ВЫХ}}}. \quad (2.7)$$

На практике обычно известны лишь относительные значения спектральной чувствительности и пропускания $\gamma(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$, которые определяются следующими выражениями:

$$\gamma(\lambda) = \frac{\gamma_{\lambda}}{\gamma_{\lambda \max}}; \quad (2.8)$$

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda \max}}, \quad (2.9)$$

где $\gamma_{\lambda \max}$ – максимальное значение спектральной чувствительности; $\tau_{\lambda \max}$ – максимальное значение спектрального коэффициента пропускания.

С учетом (2.8) и (2.9) формулу (2.7) можно записать следующим образом:

$$\varphi_{\lambda} = \frac{i_{\phi\lambda}}{K \cdot a_{\text{ВЫХ}} \cdot \gamma_{\lambda \max} \cdot \gamma(\lambda) \cdot \tau_{\lambda \max} \cdot \tau(\lambda) \cdot \left(\frac{d\lambda}{dl}\right)_{\lambda}} = \frac{i_{\phi\lambda}}{b \cdot \gamma(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \left(\frac{d\lambda}{dl}\right)_{\lambda}}, \quad (2.10)$$

где $b = K \cdot a_{\text{ВЫХ}} \cdot \gamma_{\lambda \max} \cdot \tau_{\lambda \max}$ – коэффициент, не зависящий от длины волны.

Тогда

$$\varphi'(\lambda) = b \cdot \varphi_{\lambda} = \frac{i_{\phi\lambda}}{\gamma(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \left(\frac{d\lambda}{dl}\right)_{\lambda}}. \quad (2.11)$$

Величина $\varphi'(\lambda)$ прямо пропорциональна спектральной плотности излучения $\varphi(\lambda)$, а зависимость $\varphi'(\lambda) = f(\lambda)$, рассчитанная по формуле (11), отражает истинное соотношение интенсивностей излучения различных длин волн, но размерность этой величины – [А·Вт/нм]. Относительную спектральную плотность излучения $\varphi(\lambda)$ можно определить по формуле

$$\varphi(\lambda) = \frac{\varphi'(\lambda)}{\varphi'(\lambda)_{\max}} \quad (2.12)$$

или

$$\varphi(\lambda) = \frac{i_{\phi\lambda} \cdot \gamma(\lambda)_{\max} \cdot \tau(\lambda)_{\max} \cdot \left(\frac{d\lambda}{d\ell}\right)_{\lambda_{\max}}}{i_{\phi\lambda_{\max}} \cdot \gamma(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \left(\frac{d\lambda}{d\ell}\right)_{\lambda}}, \quad (2.13)$$

где $\varphi'(\lambda)_{\max}$ – наибольшее значение величины $\varphi'(\lambda)$ в спектре излучения; λ_{\max} – длина волны, на которую приходится $\varphi'(\lambda)_{\max}$; $i_{\phi\lambda_{\max}}$, $\gamma(\lambda)_{\lambda_{\max}}$, $\tau(\lambda)_{\lambda_{\max}}$, $\left(\frac{d\lambda}{d\ell}\right)_{\lambda_{\max}}$ – фототок, относительная спектральная чувствительность, относительное пропускание и обратная линейная дисперсия, соответствующие λ_{\max} .

Таким образом, для измерения относительной спектральной плотности излучения, кратко называемой спектром излучения, достаточно знать спектральные значения линейной дисперсии монохроматора, если она зависит от длины волны, а также относительных спектральных характеристик чувствительности фотоприемника и пропускания оптической системы. При этом, в случае линейной световой характеристики приемника света и постоянства коэффициента усиления, а эти условия обязательны для измерительной системы, значения $i_{\phi\lambda}$ могут выражаться любым способом – в миллиамперах, делениях шкалы и т. п.

Для решения задачи измерения спектральной плотности излучения в абсолютных единицах – [Вт/нм] – должна быть проведена градуировка измерительной установки по эталонному источнику излучения, для которого известно распределение спектральной плотности излучения в интересующей области спектра в соответствующих единицах. С целью градуировки на данной установке производится измерение спектра излучения эталонного источника и определяется спектральный градуировочный коэффициент установки C_{λ} :

$$C_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda_{\text{эт}}}}{i_{\phi\lambda_{\text{эт}}}}, \quad (2.14)$$

где $\Phi_{\lambda_{\text{эт}}}$ – спектральная плотность излучения эталонного источника излучения; $i_{\phi\lambda_{\text{эт}}}$ – показания измерительной системы, при измерении спектра эталонного источника.

Тогда спектральная плотность излучения исследуемого источника, при соблюдении тех же условий измерения, что и для эталонного, находится из выражения

$$\Phi_{\lambda} = C_{\lambda} \cdot i_{\phi\lambda}. \quad (2.15)$$

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для измерения спектров излучения состоит из монохроматора, регистрирующей системы и сменных газоразрядных ламп с блоком пуско-регулирующей аппаратуры (ПРА).

В качестве источников исследуемых спектров излучения в работе применяются газоразрядные лампы высокого давления с разрядом в парах ртути с добавками различных металлов. Запуск и стабильное горение ламп обеспечивается блоком ПРА. Возможно применение лампы накаливания как источника со сплошным спектром.

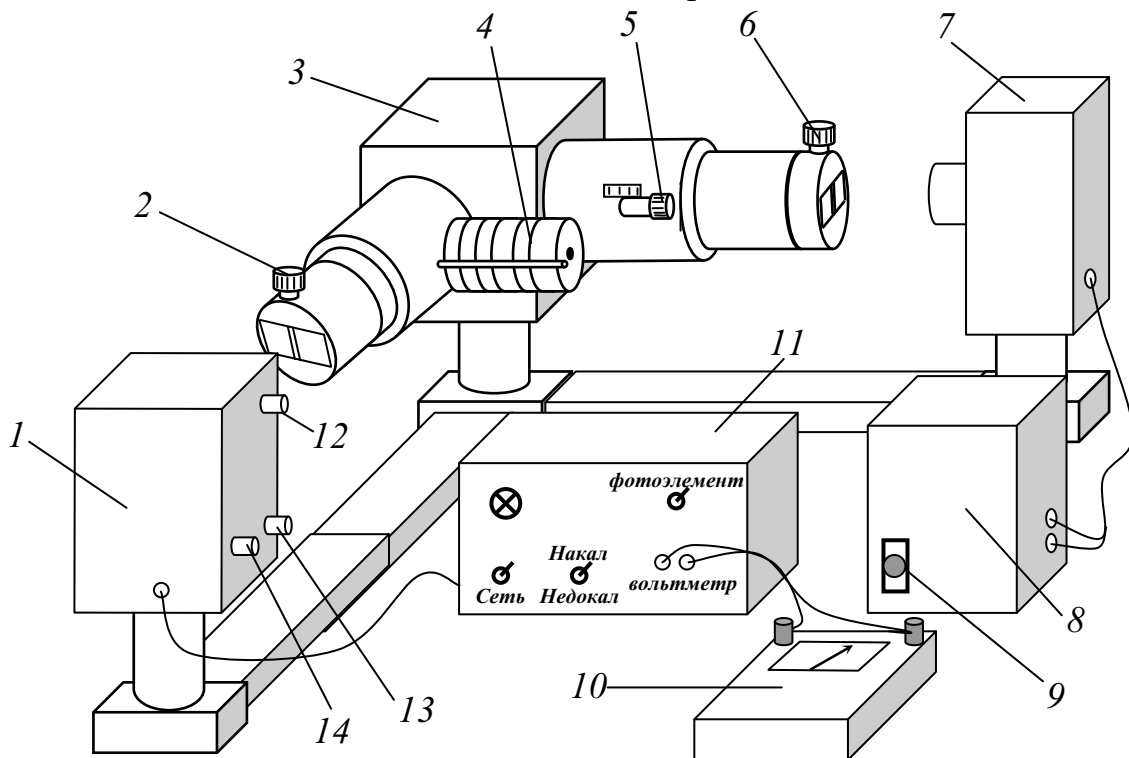


Рис. 2.4. Схема установки для измерения спектров излучения:

- 1 – блок приемника излучения; 2 – микровинт входной щели;
- 3 – корпус монохроматора УМ-2; 4 – барабан поворота призмы;
- 5 – рукоятка фокусирования объектива выходного коллиматора;
- 6 – микровинт выходной щели; 7 – лампа в защитном кожухе; 8 – блок ПРА;
- 9 – кнопка поджига разряда лампы; 10 – измерительный прибор; 11 – блок питания;
- 12 – рукоятка изменения диафрагмы; 13 – рукоятка установки нуля темного тока;
- 14 – переключатель диапазонов чувствительности измерительной системы

Регистрирующая система (см. рис. 2.4) состоит из блока фотоприемника 1 и блока питания 11 с подключенным микроамперметром или цифровым вольтметром В7-22А 10.

На лицевой панели корпуса блока питания имеются: тумблер «СЕТЬ» и сигнальная лампа, расположенная над этим тумблером; тумблер «НАКАЛ-НЕДОКАЛ», обеспечивающий включение и работу на-

кального источника излучения в 2-х режимах; гнезда для подключения микроамперметра; тумблер включения фотоэлемента.

Блок приемника излучения состоит из фотоэлемента Ф-25, усилителя и систем регулирования сигнала. На боковую стенку корпуса блока выведены: рукоятка изменения диафрагмы входного окна 12, рукоятка установки нуля темнового тока 13, переключатель диапазонов чувствительности системы 14. Положение **I** переключателя соответствует максимальной чувствительности системы для измерения самых слабых потоков излучений. При положении **II** переключателя чувствительность системы снижается в 2 раза, при положении **III** – в 7 раз, и при положении **IV** в 100 раз по отношению к максимальной.

Регистрация интенсивности излучения в относительных единицах осуществляется по шкале микроамперметра или цифрового вольтметра В7-22А.

Используемый в регистрирующей системе фотоэлемент Ф-25 имеет многощелочной катод с расширенной областью спектральной чувствительности и кривой относительной спектральной чувствительности типа С-11. Значения относительной спектральной чувствительности фотоэлемента Ф-25 приведены на рис. 2.5, а также частично в приложении 2.

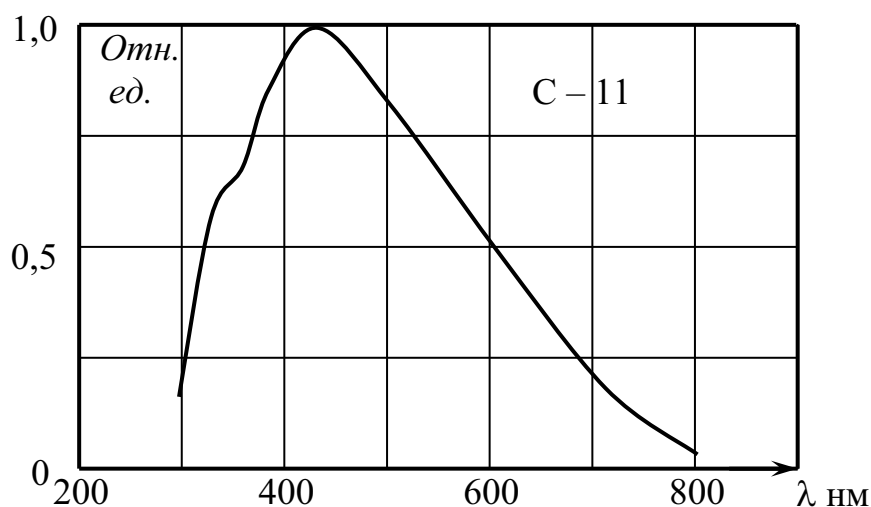


Рис. 2.5. Относительная спектральная чувствительность фотоэлемента Ф-25 (спектральная характеристика фотокатода типа С-11)

В работе используются призмный монохроматор УМ-2, предназначенный для работы в области спектра 380...1000 нм.

Собственно монохроматор (см. рис. 2.6) состоит из входной щели 1, объектива входного коллиматора 2, призмы постоянного угла отклонения 3, объектива выходного коллиматора 4 и выходной щели 5. Щели прибора прямые, симметричные. Объективы коллиматоров ахроматические, с просветленными поверхностями и одинако-

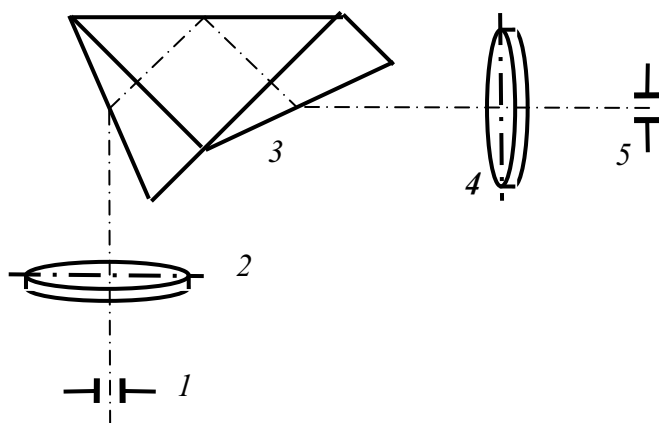


Рис. 2.6. Оптическая схема монохроматора УМ-2

вым фокусом 280 мм. Вращение призмы Аббе осуществляется барабаном, на котором по спирали нанесена шкала в градусах угла поворота барабана. Объектив выходного коллиматора может перемещаться вдоль оптической оси для фокусировки излучения различных длин волн на выходную щель (рукоятка 5 на рис. 2.4).

Зависимость обратной линейной дисперсии от длины волны для монохроматора УМ-2 с точностью до 15 % описывается выражением вида:

$$\frac{d\lambda}{d\ell}(\lambda) = 0,8 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^{3,4} \text{ нм/мм.} \quad (2.16)$$

Значения обратной линейной дисперсии, вычисленные по этой формуле, приведены в приложении 2.

Пропускание τ оптического тракта монохроматора в рабочей области спектра с точностью 5 % от длины волны не зависит.

Для определения длины волны λ , выделяемой монохроматором, шкала барабана должна быть предварительно отградуирована по известным линейчатым спектрам, обычно ртутной лампы. Результаты градуировки приведены в приложении 2. Эта градуировка должна регулярно проверяться.

ЗАДАНИЕ

1. Провести проверку градуировки шкалы барабана по длинам волн.
2. Измерить спектры излучения источников света, указанных преподавателем. Результаты измерений внести в таблицы.
3. Построить графики измеренных спектров излучения ламп.
4. Рассчитать и указать на графике спектральную ширину щели, при которой измерялись спектры.
5. Рассчитать и указать на графике погрешность определения спектральной плотности излучения.

ПОРЯДОК РАБОТЫ

Подготовка установки к работе

1. Подсоединить миллиамперметр к гнездами «ВОЛЬТМЕТР» блока питания и установить предел измерения 0,75 мА.
2. Подключить блок питания к сети 220 В. Включить тумблер «СЕТЬ». При этом должна закрепиться сигнальная лампочка, расположенная над этим тумблером.
3. Установить в положение 3 переключатель чувствительности, находящейся на блоке фотоприемника.
4. Перевести в верхнее положение тумблер «ФОТОЭЛЕМЕНТ» на блоке питания.
5. Вывести стрелку миллиамперметра на начало шкалы вращением ручки «УСТ.НУЛЯ» на блоке фотоприемника.

Проверка градуировки шкалы барабана поворота призмы

6. Установить на рельс перед входной щелью ртутную газоразрядную лампу. Подключить лампу к блоку ПРА. Включить блок ПРА в сеть 220 В. Нажатием кнопки запуска зажечь лампу и дождаться ее разгорания (4...5 мин.).
7. Раскрыть входную и выходную щели монохроматора на величину 0,2 мм.
8. Вывести указатель на начало шкалы вращением барабана поворота призмы.
9. Определить, медленно вращая барабан, по отклонению стрелки миллиамперметра при каких положениях барабана n_{\max} наблюдаются максимумы отклонения стрелки, соответствующие линиям излучения ртутного разряда. Результаты занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты проверки градуировки монохроматора

№	n_{\max}	$i_{\phi \max}$	λ_{\max}
п/п	град	мА	нм
1			
2			
3			
4			
...			

Для более точного определения n_{\max} барабан следует подводить к положению максимального отклонения стрелки всегда с одной стороны, вращая в сторону увеличения n для того, чтобы устранить люфт микро-винта. Поэтому после обнаружения максимума $i_{\phi \max}$ по началу спада

величины фототока, следует повернуть барабан назад, на участок подъема, и повторным поворотом добиться уже известного значения $i_{\phi \max}$, при котором делается отсчет n_{\max} .

10. В видимой области спектра в разряде ртути среди прочих выделяются четыре самых интенсивных линии излучения с длинами волн соответственно: 405; 438,8; 546,1 и 577...579 нм. Сравнением величин $i_{\phi \max}$ установить, каким n_{\max} соответствуют эти ртутные линии. Начало шкалы барабана соответствует коротковолновой области спектра.

11. Сверить полученные результаты табл. 2.1 с данными в приложении 2.

12. Если проверка показывает незначительные несовпадения, достаточно внести соответствующие поправки. В случае сильного несовпадения необходимо построить новый градуировочный график $n = f(\lambda)$.

Измерение спектра излучения исследуемой лампы

13. Установить указанные преподавателем размеры щелей.

14. Установить перед входной щелью монохроматора исследуемую лампу. Подключить лампу к блоку ПРА и включить в сеть 220 В. Нажатием кнопки поджига зажечь лампу.

15. Измерить значения сигнала фотоприемника $i_{\phi\lambda}$ при различных углах поворота n барабана через каждые $\Delta n = 50 \dots 75^\circ$. Измеренные значения $i_{\phi\lambda}$ занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты измерения спектра излучения исследуемой газоразрядной лампы

n	$i_{\phi\lambda}$	λ	$\gamma(\lambda)$	$(d\lambda/dl)_\lambda$	$\phi'(\lambda)$	$\phi(\lambda)$
град	мкА	нм	—	нм/мм	мкА мм/нм	—

Строго говоря, для надежного поточечного измерения спектра $\Delta n = n_{i+1} - n_i$ должен быть таким, чтобы соответствующий ему шаг измерений $\Delta\lambda_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i$ был не более выделяемого монохроматором интервала длин волн, т. е. величины спектральной ширины щелей $\Delta\lambda_i$. При этом число измерений может оказаться достаточно большим. Поэтому при измерениях широкополосного или сплошного спектра, с целью сокращения трудоемкости, шаг измерений может выбираться не-

сколько большим, но так, чтобы в промежутках между точками измерений изменения спектра являлись монотонными. Затем недостающие значения найти методом графической интерполяции. В случае наличия в спектре узких линий излучения, например, как у газоразрядных ламп, обнаруживаемых по резкому отклонению стрелки прибора при вращении барабана, излучение таких линий промеряется отдельно, независимо от основного шага измерений. Обычно для каждой линии находится положение максимума излучения $n_{i\max}$, величина фототока в максимуме линии $i_{\phi\lambda\max}$, а также полуширина линии, определяемая по отсчетам барабана $n_{+0,5}$ и $n_{-0,5}$ слева и справа от $n_{i\max}$, когда величина фототока принимает значения, равные $0,5 \cdot i_{\phi\lambda\max}$. Найденные параметры излучения линий также заносятся в табл. 2.2.

16. Определить и внести в табл. 2.2 следующие значения:

- а) длин волн λ_i , соответствующих углу поворота барабана n_i ;
- б) относительной спектральной чувствительности измерительной системы $\gamma(\lambda)$;
- в) величины обратной линейной дисперсии монохроматора

$$\text{УМ-2} \left(\frac{d\lambda}{dl} \right)_{\lambda}$$

17. Рассчитать спектр излучения исследуемой лампы.

18. Построить на одном рисунке графики зависимостей $i_{\phi\lambda} = f(\lambda)$ и $\varphi(\lambda) = f(\lambda)$.

19. Рассчитать для нескольких длин волн в разных областях спектра спектральную ширину щели $\Delta\lambda_i$, используя формулу (2.4).

20. Для тех же λ рассчитать погрешность определения $\varphi(\lambda)_i$, взяв за основу формулу (2.13). Принять, что точность задания величины спектральной чувствительности в приложении 2 равна 5%, точность значений линейной дисперсии в приложении 2 – 15%, $\tau(\lambda)$ по всему спектру принять равной $(0,9 \pm 0,05)$.

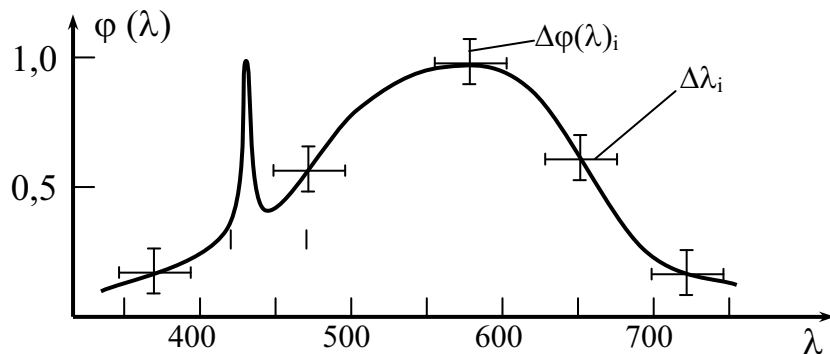


Рис. 7. Обозначение погрешностей измерений

21. Обозначить на графике $\varphi(\lambda) = f(\lambda)$ полученные значения $\Delta\lambda_i$ и $\Delta\varphi(\lambda)_i$ в масштабе рисунка, как показано на рис. 7. Вертикальный размер перекрестья соответствует погрешности измерения $\varphi(\lambda)$, а горизонтальный – величине спектральной ширины щелей $\Delta\lambda$ при измерениях на длине волны λ_i .

22. Измерить по указанию преподавателя спектр другой лампы или той же лампы, но с другими значениями ширины щелей.

ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ

1. Что называется спектром излучения?
2. Что подразумевается под понятием «спектральная плотность излучения»?
3. Чем отличаются различные спектры излучения?
4. Как определить интервал выделяемых монохроматором длин волн?
5. Что такое обратная линейная дисперсия спектрального прибора?
6. Как можно измерить спектральную плотность излучения?
7. Какое значение при измерении спектров излучения имеют характеристики и конструктивные особенности монохроматора?
8. Какое значение при измерении спектров излучения имеют характеристики и конструктивные особенности регистрирующей системы?
9. В чем заключаются различия при измерениях спектров излучения в абсолютных и относительных единицах?
10. Как провести проверку градуировки монохроматора по длинам волн?
11. Как правильно выбрать шаг поточечного измерения спектра?
12. Как измерить излучение узкой линии?
13. В чем заключается и от чего зависит погрешность результатов измерения спектров излучения?

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКОВ СВЕТА

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших характеристик приемника излучения является его чувствительность. В общем случае для любого прибора чувствительность определяется отношением величины реакции прибора к величине внешнего воздействия.

Под чувствительностью фотоприемника γ понимается отношение изменения величины сигнала фотоприемника (фототока i_ϕ или фото-ЭДС) при изменении величины падающего на него потока излучения Φ :

$$\gamma = \frac{di_\phi}{d\Phi}. \quad (3.1)$$

В случае линейности световой характеристики, когда с изменением падающего потока Φ отношение (3.1) остается постоянным, можно считать, что

$$\gamma = \frac{i_\phi}{\Phi}. \quad (3.2)$$

В зависимости от того, в каких величинах измеряется Φ , чувствительность выражается либо в А/Вт, либо в А/лм.

Под спектральной чувствительностью фотоприемника γ_λ понимается чувствительность приемника к монохроматическому излучению с длиной волны λ :

$$\gamma_\lambda = \frac{i_{\phi\lambda}}{\Phi_\lambda} = \frac{i_{\phi\lambda}}{\phi_\lambda \cdot \Delta\lambda}, \quad (3.3)$$

где Φ_λ – поток падающего монохроматического излучения; ϕ_λ – спектральная плотность падающего на фотоприемник излучения в интервале длин волн $\Delta\lambda$; $i_{\phi\lambda}$ – соответствующий фототок.

Совокупность всех значений спектральной чувствительности фотоприемника для различных длин волн оптического диапазона называют спектром чувствительности приемника излучения. Другими словами, спектром чувствительности является зависимость спектральной чувствительности фотоприемника от длины волны, обычно выраженная в относительных единицах:

$$\gamma(\lambda) = \frac{\gamma_\lambda}{\gamma_{\max}}, \quad (3.4)$$

где γ_{\max} – максимальное значение величины спектральной чувствительности в спектре.

Как правило, спектр чувствительности фотоприемника представляется в виде графика или таблицы.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Наибольшее распространение для измерения потоков излучения получили приемники света, использующие в основе своей работы внешний или внутренний фотоэффект. Такие приемники имеют высокую чувствительность, удобны в работе. Принципиальной их особенностью является сложный вид зависимости спектральной чувствительности от длины волны. Чаще всего эта зависимость представляет собой некоторую кривую с одним или несколькими максимумами, расположенную в ограниченном спектральном интервале. Поэтому такие приемники называются селективными (то есть чувствующими избирательно). Причиной такой особенности спектра чувствительности является принцип работы и конструктивные особенности фотоэлементов.

Все приемники света, работающие на принципе внешнего фотоэффекта – вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители (ФЭУ), электронно-оптические преобразователи (ЭОП), диссекторы и др. – имеют конструктивную общность, определяющую их спектр чувствительности. Этой общностью является наличие вакуумной стеклянной колбы, оптического окна для ввода излучения и фотокатода, напыленного либо на внутреннюю стенку колбы, либо, чаще всего, на внутреннюю поверхность оптического окна (в этом случае фотокатод делается полупрозрачным). Электроны, выбиваемые из фотокатода прошедшими через окно квантами излучения, при приложении электрического поля двигаются либо к аноду, как в вакуумном фотоэлементе, либо к первому диноду умножительной системы, как в ФЭУ, либо к преобразовательной системе, как в ЭОП и диссекторах. Возникающий при этом электрический ток (ток фотокатода) является непосредственной реакцией фотоприемника на излучение. В вакуумных фотоэлементах этот ток измеряется как выходной сигнал фотоприемника, в ФЭУ ток фотокатода предварительно усиливается каскадным умножителем за счет вторичной эмиссии на динодах в $10^3 \dots 10^6$ раз. Соответственно, во столько же раз чувствительность ФЭУ выше чувствительности вакуумного фотоэлемента при одинаковых фотокатодах.

Количество электронов, составляющих ток фотокатода при попадании излучения на фотоприемник, зависит от коэффициента пропускания входного окна и квантового выхода фотоэмиссии электронов из материала фотокатода, т. е. от относительного числа электронов, выбиваемых одним квантом излучения. Квантовый выход фотоэмиссии зависит

от энергии кванта. При энергии кванта, меньшей энергии работы выхода электронов из материала фотокатода, квантовый выход фотоэмиссии равен нулю. Этим обусловлена длинноволновая граница спектра чувствительности фотоприемника. Сложный характер зависимости квантового выхода фотоэмиссии от энергии квантов и определяет сложный вид кривой графика зависимости чувствительности фотокатода от длины волны λ .

Квантовый выход фотоэмиссии, вид его зависимости от длины волны различны для разных материалов. В качестве фотокатодов выбираются такие материалы, которые имеют достаточно высокие значения квантового выхода, достигающие величины 0,4. В основном, это щелочные и щелочно-земельные металлы и их соединения. Существует набор стандартных материалов для фотокатодов, поэтому имеется и стандартный набор спектральных характеристик. В справочниках по фотоэлементам указывается только тип спектральных характеристик (например, «С-1», «С-8»), отдельно приводится их вид. Следует подчеркнуть, что реальная спектральная характеристика каждого фотоэлемента несколько отличается от стандартной из-за технологических трудностей создания фотокатода с заданным составом материала.

Спектр чувствительности фотоприемника зависит также от материала, из которого изготовлено входное окно. Пропускание оптических материалов ограничено в ультрафиолетовой области спектра, поэтому для измерения УФ-излучения фотоприемники изготавливаются с окнами из увиолевого стекла, кварца, сапфира и др., прозрачными в данной области. Как правило, именно материалом входного окна определяется коротковолновая граница спектра чувствительности фотоприемника.

Другое явление – внутренний фотоэффект – служит принципиальной основой для изготовления целого ряда приемников света: фотосопротивлений (фоторезисторы), фотодиодов, фототранзисторов, фотоматриц.

Фотосопротивления представляют собой пластинки, выполненные из полупроводниковых материалов. Попадание света на них вызывает перевод электронов в зону проводимости (дырок в валентную зону), результатом чего является изменение проводимости, а значит, и сопротивления материала. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта, как и внешнего, зависит от энергии квантов. Следствием этого является наличие сложной зависимости чувствительности фотосопротивления от длины волны света.

Фотодиоды представляют собой конструкцию с двумя, состоящими в плотном контакте, полупроводниковыми материалами *n*- и *p*-типов. В месте контакта имеется запирающий слой, представляющий собой обедненную носителями заряда зону. Этот слой имеет высокое сопро-

тивление. При попадании света в полупроводнике появляются неравновесные носители заряда, которые перетекают через запирающий слой, ширина слоя при этом уменьшается, уменьшается его сопротивление. Фотодиоды могут работать и в режиме генератора тока (фотовентильный режим) без приложения внешнего напряжения, и в режиме фотодиода, когда в замкнутой цепи при приложенном напряжении ток зависит от уровня освещенности рабочего элемента фотодиода.

Из указанного выше следует, что для приемников света, работающих на принципах внешнего или внутреннего фотоэффекта, спектральные характеристики сложны, могут различаться для однотипных приборов. Поэтому часто приходится определять эти характеристики экспериментально для каждого прибора.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Спектр чувствительности измеряется с помощью монохроматора, следовательно, спектральный интервал длин волн светового потока $\Delta\lambda$ в формуле (4.3) определяется параметрами монохроматора. Известно, что при правильно установленных размерах входной и выходной щелей

$$\Delta\lambda = a_{\text{ВЫХ}} \cdot \left(\frac{d\lambda}{d\ell} \right)_{\lambda}, \quad (3.5)$$

где $a_{\text{ВЫХ}}$ – ширина выходной щели; $\left(\frac{d\lambda}{d\ell} \right)_{\lambda}$ – обратная линейная дисперсия приборов для длины волны λ , нм/мм.

В призмных спектральных приборах линейная дисперсия зависит от длины волны, в приборах с дифракционной решеткой – почти не зависит. Поэтому, в общем виде, в формуле (3.5) линейная дисперсия является функцией λ , что подчеркнуто ниже соответствующей индексом.

Подставляя формулу (3.5) в (3.3), получим

$$\gamma_{\lambda} = \frac{i_{\phi\lambda}}{\Phi_{\lambda} \cdot a_{\text{ВЫХ}} \left(\frac{d\lambda}{d\ell} \right)_{\lambda}}, \quad (3.6)$$

$$\gamma(\lambda) = \frac{i_{\phi\lambda} \cdot \Phi_{\lambda m} \cdot a_{\text{ВЫХ}} \cdot \left(\frac{d\lambda}{d\ell} \right)_{\lambda m}}{i_{\phi\lambda m} \cdot \Phi_{\lambda} \cdot a_{\text{ВЫХ}} \cdot \left(\frac{d\lambda}{d\ell} \right)_{\lambda}}. \quad (3.7)$$

В выражении (3.7) индекс m означает величины параметров, соответствующих максимуму функции спектральной чувствительности приемника.

Поскольку максимум спектральной чувствительности приемника неизвестен, то нормирование при определении относительной спектральной чувствительности осуществляется после измерений и расчетов спектральных чувствительностей по формуле (3.6).

Отметим также, что при измерениях спектров ширина щели обычно не меняется. В установке, используемой для выполнения настоящей работы, применен монохроматор с дифракционной решеткой, у которого линейная дисперсия постоянна:

$$a_{\text{вых}} \cdot \frac{d\lambda}{dl} = K. \quad (3.8)$$

Отсюда

$$\gamma_{\lambda} = \frac{i_{\phi\lambda}}{\phi_{\lambda} \cdot K}. \quad (3.9)$$

Важным моментом является то, что для определения относительной спектральной чувствительности фотоэлементов не обязательно знать абсолютные значения требуемых спектральных параметров. Спектральная характеристика фотоэлементов (чувствительность, значение тока $i_{\phi\lambda}$) и спектральная плотность излучения ϕ_{λ} могут представляться в относительных величинах – $i_{\phi\lambda, \text{отн}}$ и $\phi_{\lambda, \text{отн}}$ – т. к. соответствующие коэффициенты пропорциональности, согласно формуле (3.7), сокращаются.

Следовательно, для определения относительной спектральной чувствительности приемника света необходимы результаты измерений фототока (или пропорциональной фототоку величины) и знание относительной спектральной плотности излучения применяемого источника света. Последнее достигается либо специальными измерениями с помощью уже отградуированного приемника излучения, либо применением эталонного источника света, обычно *типа А*, для которого известна относительная спектральная плотность излучения. В данной работе необходимые спектральные параметры источника приведены в приложении 3.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В настоящей работе для измерения спектральных характеристик приемников света используется установка, собранная на базе малогабаритного универсального монохроматора типа МУМ. Установка состоит из собственно монохроматора, источника излучения и сменных приемников излучения со своими блоками питания и регистрации. Схема установки при различных режимах измерений представлена на рис. 3.2 и 3.3.

Монохроматор МУМ изготовлен по автоколлимационной оптической схеме (см. рис. 3.1) с применением вогнутой дифракционной решетки, которая выполняет роль диспергирующего и фокусирующего элемента. Решетка выполнена с переменным шагом нарезки и криволинейными штрихами, что дает возможность значительно компенсировать расфокусировку и другие аберрации. Излучение от источника попадает на входную щель 2 и посредством зеркала 4 заполняет вогнутую дифракционную решетку 1. Дифрагированное решеткой излучение направляется в выходную щель 3 (при введенном зеркале 4')

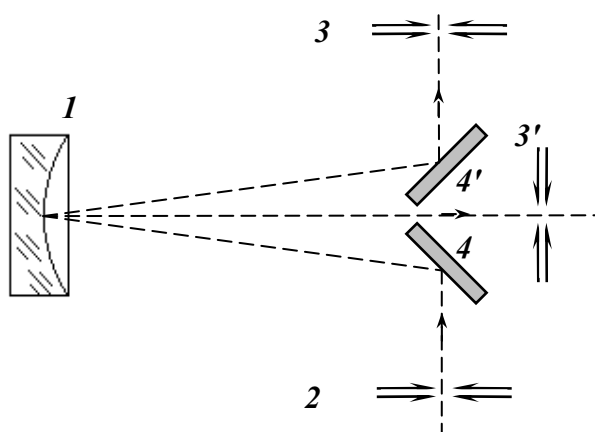


Рис. 3.1. Оптическая схема монохроматора МУМ

при введенном зеркале 4') или в выходную щель 3' (при выведенном зеркале 4').

В монохроматоре установлены нерегулируемые щели равной ширины с $a_{\text{ВЫХ}} = 0,05$ мм. Рабочий диапазон длин волн – 200...800 нм, величина обратной линейной дисперсии $d\lambda/dl = 3,5$ нм/мм.

На рис. 3.2 представлена схема установки для измерения относительной спектральной чувствительности элемента Ф-25. Монохроматор 7 установлен на рельс 1. Со стороны входной щели 10 на рельс установлен источник излучения 12 на рейтере. Необходимое расстояние от источника света до входной щели можно получить, передвигая рейтер вдоль рельса.

На торцевой стенке монохроматора расположена рукоятка 9 с цифровым механическим счетчиком 8, вмонтированным в корпус монохроматора, с помощью которого осуществляется непосредственный отсчет длин волн с точностью 0,2 нм.

На лицевой панели корпуса блока питания 13 имеются: тумблер «СЕТЬ» и сигнальная лампа, расположенная над этим тумблером; тумблер «НАКАЛ-НЕДОКАЛ», обеспечивающий работу источника излучения в 2-х режимах; гнезда для подключения микроамперметра; тумблер включения фотоэлемента.

Блок приемника излучения 6 состоит из фотоэлемента Ф-25, усилителя и систем регулирования сигнала. На боковую стенку корпуса блока выведены: рукоятка изменения диафрагмы входного окна 5, рукоятка установки нуля темнового тока 4, переключатель диапазонов чувствительности измерительной системы 3. Положение I переключателя соответствует максимальной чувствительности системы для измерения самых слабых потоков излучений. При положении II переключателя

чувствительность системы снижается в 2 раза, при положении III – в 7 раз, и при положении IV – в 100 раз по отношению к максимальной.

Регистрация интенсивности излучения в относительных единицах осуществляется по шкале микроамперметра 14.

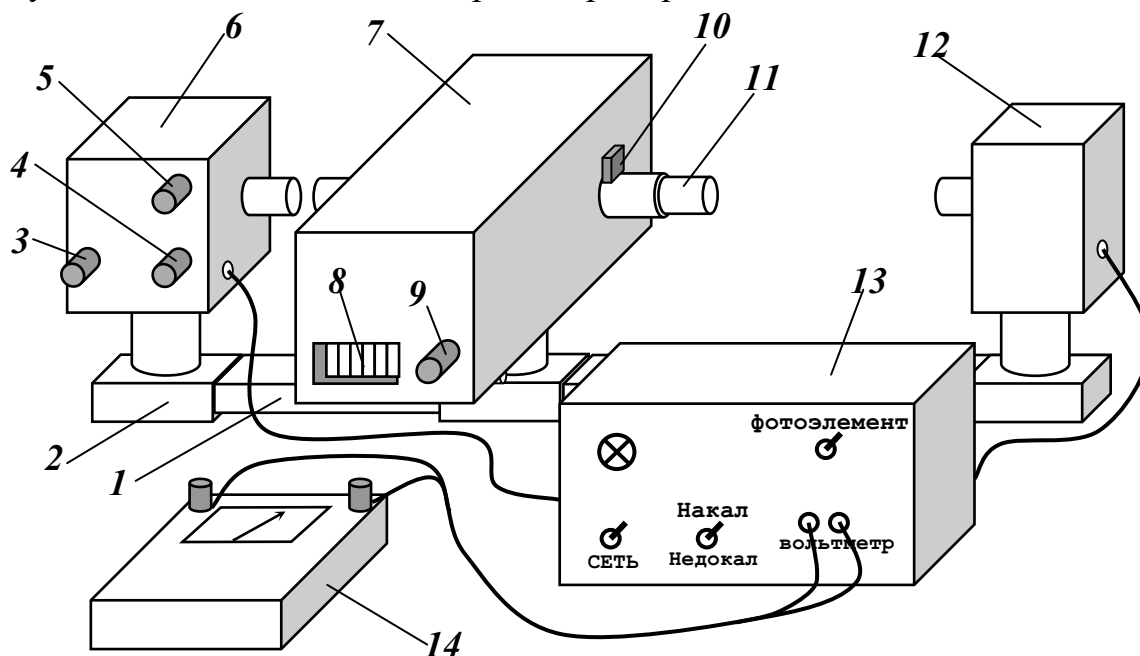


Рис. 3.2. Схема установки для измерения относительной спектральной чувствительности фотоэлемента Ф-25:

- 1 – рельс; 2 – рейтер; 3 – переключатель диапазонов чувствительности измерительной системы; 4 – рукоятка установки нуля темнового тока; 5 – рукоятка изменения диафрагмы; 6 – блок приемника излучения; 7 – корпус монохроматора МУМ; 8 – счетчик длин волн; 9 – рукоятка изменения выделяемой длины волны; 10 – сменная входная щель; 11 – конденсор освещения входной щели; 12 – лампа в защитном кожухе; 13 – блок питания; 14 – измерительный прибор

На установке предусмотрена возможность смены приемника излучения: фотоэлемент Ф-25 и соответствующая ему измерительная система могут быть заменены на фотоэлектронный умножитель ФЭУ-92 с блоком питания и регистрации, как показано на рис. 3.3.

Блок питания ФЭУ и измерительная система изготовлены в едином корпусе 1. На лицевой панели корпуса расположены: сверху – переключатель рода работ 3, который имеет 4 положения – «ВЫКЛ», «НАКАЛ», «АНОД» и положение режима измерений «ИЗМ.»; внизу находятся – ручка установки нуля измерительной системы «УСТ.НУЛЯ» 2 и многопозиционный переключатель пределов измерений 4. При положениях переключателя кратных «10» отсчет производится по верхней шкале микроамперметра, при положениях кратных «3» – по нижней. Регистра-

ция интенсивностей излучения осуществляется микроамперметром 5 в относительных единицах.

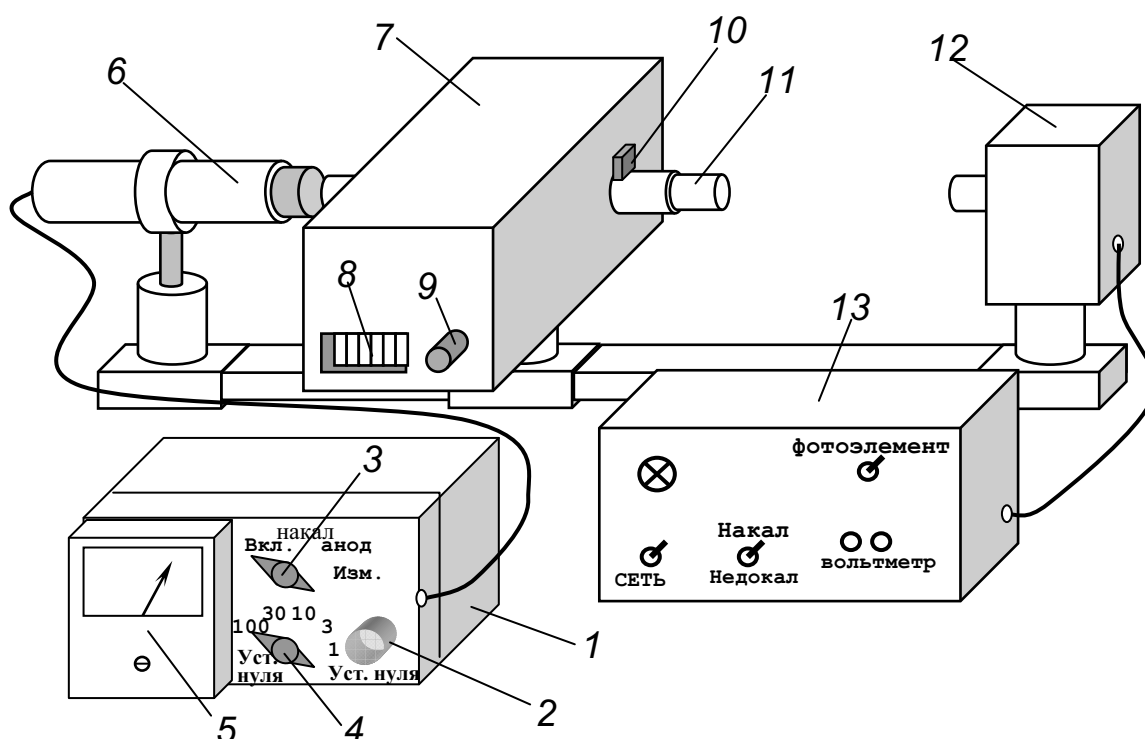


Рис. 3.3. Схема установки для измерения относительной спектральной чувствительности ФЭУ-92:

- 1 – блок питания и регистрации ФЭУ; 2 – рукоятка установки нуля;
 3 – переключатель рода работ; 4 – переключатель пределов измерений;
 5 – микроамперметр; 6 – ФЭУ-92 в защитном кожухе;
 7 – корпус монохроматора МУМ; 8 – счетчик длин волн;
 9 – рукоятка изменения выделяемой длины волны; 10 – сменная входная щель;
 11 – конденсор освещения входной щели; 12 – лампа в защитном кожухе;
 13 – блок питания источника излучения

ЗАДАНИЕ

1. Измерить зависимость фототока приемника света от длины волны для фотоэлемента Ф-25 и ФЭУ-92.
2. Рассчитать относительную спектральную чувствительность фотоэлемента и ФЭУ.
3. Построить графики зависимости фототока от длины волны.
4. Построить графики спектров чувствительности для обоих фотоприемников.
5. Определить красную границу фотоэффекта для каждого фотоприемника.
6. Сделать выводы об области применения каждого фотоприемника.

ПОРЯДОК РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ

I. Измерение относительной спектральной чувствительности фотоэлемента Ф-25

1.1. Установить на рельс приемник излучения Ф-25.

1.2. Подключить блок питания в сеть. Включить тумблер «СЕТЬ», при этом должна загореться сигнальная лампочка, расположенная над этим тумблером.

1.3. Подсоединить микроамперметр к гнездам «Вольтметр» блока питания и установить предел измерений 0,75 мА.

1.4. Установить в положение 3 переключатель чувствительности, находящийся на блоке приемника излучения.

1.5. Перевести тумблер «Фотоэлемент» на блоке питания в верхнее положение.

1.6. Вывести стрелку микроамперметра на начало шкалы вращением ручки «УСТ. НУЛЯ» на блоке фотоприемника.

1.7. Тумблер «НАКАЛ-НЕДОКАЛ» установить в положение «НЕДОКАЛ».

Вращением ручки установки длины волны на монохроматоре установить положение максимума фототока. В случае, если стрелка микроамперметра «зашкаливает», то нужно передвинуть рейтер источника излучения от входной щели вдоль рельса до необходимого расстояния и закрепить винтом. В случае, если значения тока малы, установить переключатель чувствительности в положение 2.

1.8. Измерить и внести в табл. 3.1 значения фототока через каждые 1...10 нм в диапазоне 350...800 нм.

Таблица 3.1

Результаты определения относительной спектральной чувствительности фотоэлемента Ф-25

λ , нм	$i_{\phi\lambda}$, мА	ϕ_{λ}	K	$\phi_{\lambda} \cdot K$	γ_{λ}	$\gamma(\lambda)$
350						
360						
370						
...						

1.9. Выключить установку в обратной последовательности.

1.10. Записать в табл. 3.1 значения ϕ_{λ} используемого источника света, которые даны в приложении 3, и рассчитать спектральную чувствительность фотоэлемента Ф-25.

II. Измерение относительной спектральной чувствительности фотоэлектронного умножителя ФЭУ-92

2.1. Установить ФЭУ на рельс к выходной щели монохроматора МУМ.

2.2. Установить перед входной щелью ограничивающую ирисовую диафрагму. Закрыть ее до минимального пропускания излучения.

2.3. Установить переключатель рода работ в положение «ВЫКЛ», а переключатель пределов измерений в положение «УСТ. НУЛЯ».

2.4. Подключить блок питания и измерений к сети.

2.5. Поставить переключатель рода работ в положение «2-НАКАЛ», при этом показания стрелки по нижней шкале микроамперметра должно быть близким к значению 2,0 дел.

2.5. Поставить переключатель в положение «3-АНОД», проверяя анодное напряжение, которое должно быть в пределах 0,8...0,9 дел (по нижней шкале).

2.7. Перевести переключатель в положение 4 – «Режим измерения».

2.8. Установить стрелку микроамперметра на начало шкалы вращением ручки «УСТ. НУЛЯ».

2.9. Включить источники излучения согласно п. 1.2 и 1.7.

2.10. Установить переключатель пределов измерений в положение «100». Вращением ручки установки длины волны на монохроматоре установить положение максимума фототока. В случае, если значения тока малы, раскрыть ирисовую диафрагму. Если стрелка микроамперметра «зашкаливает», то нужно передвинуть рейтер источника излучения от входной щели вдоль рельса до необходимого расстояния и закрепить винтом.

2.11. Измерить и внести в табл. 3.2 (см. форму табл. 3.1) значения фототоков через каждые 10 нм в диапазоне 350...800 нм.

2.12. Выключить установку в следующем порядке:

- а) переключатель пределов измерений установить в положение «УСТ. НУЛЯ» ;
- б) переключатель рода работы установить в положение «ВЫКЛ.»;
- в) тумблер «НЕДОКАЛ-НАКАЛ» перевести в среднее положение;
- г) отключить блоки питания от сети.

2.13. Записать в табл. 2.3 значения φ_{λ} из прилагаемого спектра излучения источника света и рассчитать относительную спектральную чувствительность ФЭУ.

ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ

1. Чем отличаются понятия «спектральная чувствительность» и «спектр чувствительности»?
2. Что такое «квантовый выход фотоэмиссии»? Какова его роль при работе фотоприемника?
3. Как и почему материал входного окна влияет на избирательную чувствительность вакуумных фотоэлементов и ФЭУ?
4. Какие характеристики конструктивных элементов определяют спектр чувствительности фотосопротивления, фотодиода?
5. В чем заключается различие при измерении спектра чувствительности фотоприемника, если используется призмный или дифракционный монохроматор?
6. Изменится ли результат измерения спектральной чувствительности, если заменить стандартный источник света с $T_{\text{ц}} = 2856 \text{ К}$ (источник типа А) на стандартный источник с $T_{\text{ц}} = 4870 \text{ К}$?
7. Каковы различия в порядке работы при измерениях спектра чувствительности Ф-25 и ФЭУ-92?
8. Каким образом влияет на результаты измерений спектра чувствительности фотоприемника величина линейной дисперсии монохроматора?
9. Для каких целей необходима информация о чувствительности фотоприемников?
10. Почему для решения большинства практических задач достаточно знать относительную спектральную чувствительность фотоприемника?

Лабораторная работа № 4

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Под спектром пропускания $\tau(\lambda)$ понимается зависимость коэффициента пропускания образца (объекта) от длины волны.

Под спектром поглощения понимается зависимость коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$, показателя поглощения $\beta(\lambda)$ или оптической плотности $D(\lambda)$ от длины волны.

Аналогичное определение можно дать и для спектра отражения $\rho(\lambda)$.

Значение перечисленных параметров при определенной длине волны называется, соответственно, спектральным коэффициентом пропускания $\tau_\lambda = \Phi_{\lambda\text{прош}} / \Phi_{\lambda\text{пад}}$, поглощения $\alpha_\lambda = \Phi_{\lambda\text{погл}} / \Phi_{\lambda\text{пад}}$, отражения $\rho_\lambda = \Phi_{\lambda\text{отр}} / \Phi_{\lambda\text{пад}}$, спектральным показателем поглощения β_λ , спектральным значением оптической плотности D_λ . Для спектральных коэффициентов, по определению, можно записать следующим образом:

$$\tau_\lambda + \alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1. \quad (4.1)$$

Спектры пропускания и поглощения измеряются в однородных (нерассеивающих) прозрачных материалах.¹ Они являются основной количественной характеристикой цветных стекол, светофильтров, материалов, используемых для коррекции спектрального состава потока излучения или спектральной чувствительности приемников света. Действительно,

$$\varphi'(\lambda) = \varphi(\lambda) \cdot \tau(\lambda); \quad \gamma'(\lambda) = \gamma(\lambda) \cdot \tau(\lambda),$$

где $\varphi(\lambda)$ и $\varphi'(\lambda)$ – спектр потока излучения до и после прохождения материала; $\gamma(\lambda)$ и $\gamma'(\lambda)$ – спектральная чувствительность приемника света без и со светофильтром, имеющим спектр пропускания $\tau(\lambda)$.

При распространении излучения только внутри однородной поглощающей среды (в этом случае отсутствует отражение, $\rho(\lambda) = 0$), связь между τ_λ , α_λ , β_λ , D_λ достаточно простая. Согласно (4.1), сумма коэффициентов пропускания и поглощения равна единице, тогда

$$\tau_\lambda + \alpha_\lambda = 1 \quad \text{или} \quad \alpha_\lambda = 1 - \tau_\lambda. \quad (4.2)$$

¹ Рассеивающие материалы характеризуются показателем рассеяния и ослабления.

Показатель поглощения² β_λ , оптическая плотность D_λ связаны, по определению, с коэффициентом пропускания вещества τ_λ , а через выражение (4.2) и с коэффициентом поглощения α_λ , соотношением:

$$\tau_\lambda = e^{-D_\lambda} = e^{-\beta_\lambda \ell} \quad (4.3)$$

или

$$D_\lambda = \beta_\lambda \cdot \ell = -\ln \tau_\lambda; \beta_\lambda = \frac{D_\lambda}{\ell} = -\frac{1}{\ell} \cdot \ln \tau_\lambda, \quad (4.4)$$

где ℓ – толщина поглощающего слоя.

Часто пользуются связью между коэффициентом пропускания и оптической плотностью (или показателем поглощения) не через натуральный, а через десятичный логарифм:

$$\tau_\lambda = 10^{-D_{\lambda 10}} = 10^{-\beta_{\lambda 10} \ell}; \quad (4.5)$$

$$D_{\lambda 10} = -\lg \tau_\lambda; \beta_{\lambda 10} = \frac{1}{\ell} \cdot \lg \tau_\lambda. \quad (4.6)$$

При этом

$$D_\lambda = 2,3 \cdot D_{\lambda 10}; \beta_\lambda = 2,3 \cdot \beta_{\lambda 10}. \quad (4.7)$$

Отметим, что τ_λ , α_λ , и D_λ являются безразмерными величинами, а β_λ имеет размерность обратную размерности длины. Например, если ℓ измеряется в сантиметрах, то β_λ имеет размерность см^{-1} .

Если τ_λ , α_λ и D_λ зависят как от оптических свойств вещества, так и от толщины образца, то β_λ – только от свойств вещества. Поэтому показатель поглощения β_λ является основной оптической характеристикой материала.

При прохождении излучения через границу двух сред, когда излучение испытывает на поверхности образца френелевское отражение с коэффициентом френелевского отражения ρ_ϕ , связь между τ_λ , α_λ и β_λ (или D_λ) существенно усложняется.

Спектры пропускания и поглощения обычно измеряются при нормальном (или близком к нормальному) падении пучка излучения на плоскопараллельную пластинку. В этом случае коэффициент френелевского отражения связан с показателем преломления образца n следующим соотношением (вторая среда – воздух, $n_B = 1$):

$$\rho_\phi = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}. \quad (4.8)$$

В области прозрачности диэлектриков (когда $h\nu < E_D$, см рис. 1.1) показатель преломления n , а следовательно и ρ_ϕ , практически не зави-

² В дальнейшем слово «спектральный» для краткости изложения будет опускаться.

сит от длины волны. Кроме того, у большинства диэлектриков в области прозрачности значение n мало, поэтому и коэффициент френелевского отражения имеет малую величину. Например, для CaF_2 $n \approx 1,4$ и тогда, согласно (4.8), $\rho_\phi \approx 0,03$.

Для плоского образца, с учетом многократных отражений излучения от его передней и задней поверхности, связь между коэффициентом пропускания и показателем поглощения имеет вид

$$\tau_\lambda = \frac{(1 - \rho_\phi)^2 \cdot e^{-\beta_\lambda \cdot \ell}}{1 - \rho_\phi^2 \cdot e^{-2\beta_\lambda \cdot \ell}}. \quad (4.9)$$

Учитывая, что значение ρ_ϕ мало ($\rho_\phi < 0,05$), а $e^{-2\beta_\lambda \ell}$ всегда меньше единицы, знаменатель в (4.9) можно принять равным единице. Тогда связь между τ_λ и β_λ существенно упрощается:

$$\tau_\lambda = (1 - \rho_\phi)^2 e^{-2\beta_\lambda \ell}. \quad (4.10)$$

Аналогичный учет френелевского отражения дает выражение и для коэффициента отражения:

$$\rho_\lambda \approx \rho_\phi \cdot (1 + e^{-2\beta_\lambda \ell}). \quad (4.11)$$

Из выражения (1.1) с учетом формул (4.10) и (4.11) можно получить выражение и для коэффициента поглощения α_λ .

Чаще всего спектральный коэффициент пропускания $\tau_\lambda = \Phi_{\lambda\text{прош}} / \Phi_{\lambda\text{пад}}$ определяется экспериментально, поэтому для нахождения β , с учетом многократных отражений излучения от поверхности плоскопараллельного образца, применяется один из следующих способов:

1) *расчет β_λ непосредственно по формуле (4.10).*

Этим способом пользуются чаще всего тогда, когда n известно и практически не зависит от длины волны и, кроме того, образец один. Тогда из (4.10) имеем:

$$\beta_\lambda = \frac{1}{\ell} \cdot \ln \frac{(1 - \rho_\phi)^2}{\tau_\lambda}, \quad (4.12)$$

где ρ_ϕ определяется по формуле (4.8).

2) *Применение контрольного образца.*

В этом случае проводят измерение τ_λ двух образцов (один из них контрольный), имеющих одинаковый коэффициент френелевского отражения, т. е. основу образцов составляет одно и то же вещество. При этом контрольный образец должен иметь минимальную оптическую плотность в измеряемой области спектра (когда $\beta_{\lambda_k} \cdot \ell_k \ll \beta_{\lambda_0} \cdot \ell_0$, т. е. произведение коэффициента поглощения и толщины контрольного образца мало). Тогда для измеряемого и контрольного образца из выражения (4.10) имеем:

$$\begin{aligned}\tau_{\lambda_0} &= (1 - \rho_\phi)^2 \cdot e^{-2\beta_{\lambda_0} \cdot \ell_0}; \\ \tau_{\lambda_K} &= (1 - \rho_\phi)^2 \cdot e^{-2\beta_{\lambda_K} \cdot \ell_K}.\end{aligned}\quad (4.13)$$

Или, исключая ρ_ϕ , получим

$$\tau_\lambda = \frac{\tau_{\lambda_0}}{\tau_{\lambda_K}} = e^{(\beta_{\lambda_K} \cdot \ell_K - \beta_{\lambda_0} \cdot \ell_0)}.\quad (4.14)$$

Учитывая, что $\beta_{\lambda_K} \cdot \ell_K \ll \beta_{\lambda_0} \cdot \ell_0$ и $\beta_{\lambda_K} \cdot \ell_K \ll 1$, а ρ_ϕ мало, на практике принимают $\tau_{\lambda_K} = 1$. Тогда из (4.14) получаем выражения, аналогичные (4.3) и (4.4). В этом случае удобнее производить измерения непосредственно оптической плотности образца.

3) *Использование двух одинаковых образцов различной толщины.*

В этом случае $\beta_{\lambda_1} = \beta_{\lambda_2} = \beta_\lambda$, а $\ell_1 \neq \ell_2$. Тогда, аналогично (4.13) и (4.14), имеем:

$$\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}} = e^{\beta_\lambda \cdot (\ell_2 - \ell_1)};\quad (4.15)$$

или

$$\beta_\lambda = \frac{1}{\ell_2 - \ell_1} \cdot \ln \frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}}.\quad (4.16)$$

Если имеется возможность изготовить два образца различной толщины из одного и того же материала, то предпочтительнее использовать третий способ как наиболее точный для определения спектрального коэффициента поглощения β_λ . Однако изготовление двух одинаковых образцов не всегда возможно, поэтому в научных исследованиях и на производстве чаще всего используют первый или второй способ измерения β_λ .

Второй способ измерения особенно удобен тогда, когда необходимо определить величину изменения оптических свойств образца после какого-либо воздействия на него. Измерение коэффициента пропускания проводят до (τ_{λ_d}) и после (τ_{λ_n}) воздействия на образец, а изменение оптических свойств образца определяют по формуле

$$\Delta\beta_\lambda = \beta_{\lambda_d} - \beta_{\lambda_n} = \frac{1}{\ell} \ln \frac{\tau_{\lambda_n}}{\tau_{\lambda_d}}.\quad (4.17)$$

Поглощение света материалом является следствием наличия в нем соответствующих электронных переходов (см. рис. 4.1). В таких материалах, кроме основного (фундаментального) поглощения, обусловленного переходами электронов из зоны валентных состояний в зону проводимости (переход E_d), может присутствовать дополнительное поглощение, обусловленное наличием энергетических уровней в пределах запрещенной зоны (переходы E_1, E_2, E_3). Эти уровни появляются при вве-

дении в материал примесей или наведении в материале структурных дефектов в результате внешнего воздействия.

Дефекты структуры материала, атомы примеси в материале, приводящие к дополнительному поглощению, называются центрами поглощения или центрами окраски. Каждому центру окраски присуще свое положение полосы (или полос) поглощения в спектре, соответствующее разрешенным электронным переходам в центре, поэтому по наличию дополнительных полос поглощения можно получить информацию о типе центра окраски (в виде примеси) и концентрации этих центров.

Схематически, некоторые возможные переходы, приводящие к поглощению света, и соответствующие этим переходам полосы поглощения представлены на рис. 4.1.

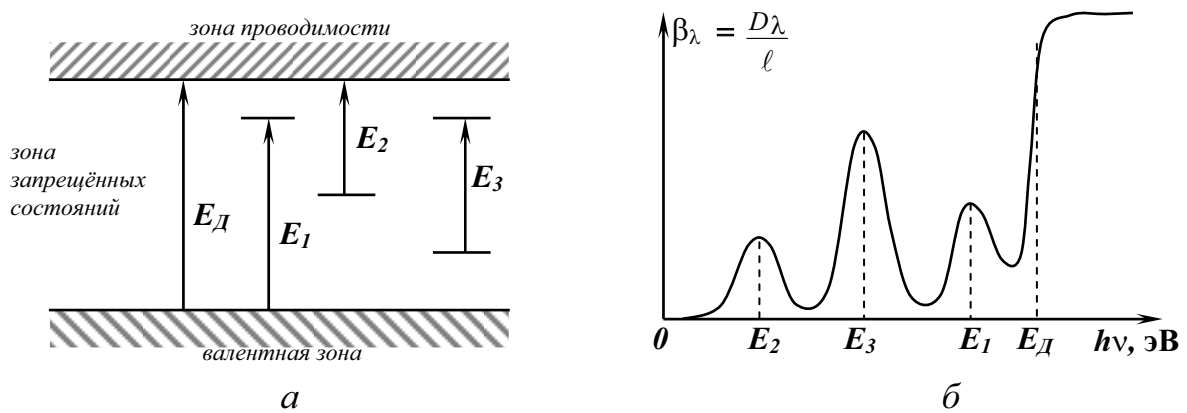


Рис. 4.1. Схема некоторых разрешенных переходов (а) и соответствующий этой схеме спектр поглощения (б) в диэлектриках и полупроводниках ($E_D > E_1 > E_3 > E_2$)

Концентрация центров окраски (C) пропорциональна площади соответствующей им полосы поглощения и может быть определена, например, по формуле Смакулы:

$$C [\text{см}^{-3}] = 0,87 \cdot 10^{17} \cdot \frac{n}{(n^2 + 2)^2} \cdot \frac{1}{f} \cdot \beta_{\lambda_{\max}} [\text{см}^{-1}] \cdot W [\text{эВ}], \quad (4.18)$$

где $\beta_{\lambda_{\max}}$ – показатель поглощения в максимуме полосы поглощения (рис. 4.2); W – полуширина полосы поглощения, выраженная в эВ; f – сила осциллятора, характеризующая вероятность поглощения кванта света центром окраски (для большинства центров окраски $f = 0,1 \dots 1$); n – показатель преломления материала.

Характерная полоса поглощения представлена на рис. 4.2.

Напомним, что под полушириной полосы поглощения понимается ее ширина на полувывсоте. Энергия кванта $E_{\text{кв}}$ связана с длиной волны λ , выраженной в нм, соотношением

$$E_{\text{кв}} = h\nu = \frac{1240}{\lambda} \text{ эВ}. \quad (4.19)$$

Поэтому полуширина полосы поглощения определяется (см. рис. 4.2.) выражением:

$$W = E_1 - E_2 = 1240 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \text{ эВ.} \quad (4.20)$$

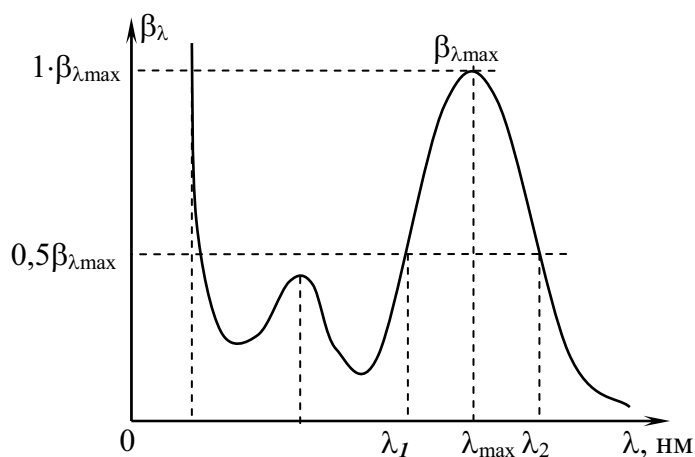


Рис. 4.2. К определению полуширины полосы поглощения

В том случае, когда определяется концентрация определенных центров в одной и той же матрице (например, концентрация красителя в растворе), прибор может быть отградуирован непосредственно в значениях концентрации. Это возможно, так как полуширина полосы не зависит от концентрации, но только до тех пор, пока центры окраски не взаимодействуют друг с другом.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на спектрофотометре СФ-46, который предназначен для измерения коэффициентов пропускания жидкостей и твердых прозрачных веществ в области от 190 до 1100 нм.

Некоторые технические данные спектрофотометра СФ-46

Спектральный диапазон измерений, нмот 190 до 1100

Обратная линейная дисперсия, нм/мм3,0

Пределы допускаемой абсолютной погрешности:

отсчетного устройства установки длин волн, нм.....0,5

измерения коэффициента пропускания, %:

в спектральном диапазоне 400...700 нм.....0,5

в остальном спектральном диапазоне1,0

В спектрофотометре обеспечены следующие режимы работы:

измерение спектрального коэффициента пропускания (τ_λ);

определение оптической плотности (D_λ);

определение концентрации (C);

определение скорости изменения оптической плотности $\frac{\Delta D_\lambda}{\Delta t}$.

Принцип действия спектрофотометра СФ-46

В основу работы спектрофотометра СФ-46 положен принцип измерения отношения двух световых потоков: потока, прошедшего через исследуемый образец, и потока, падающего на исследуемый образец (или прошедшего через контрольный образец). Структурная схема спектрофотометра представлена на рис. 4.3.

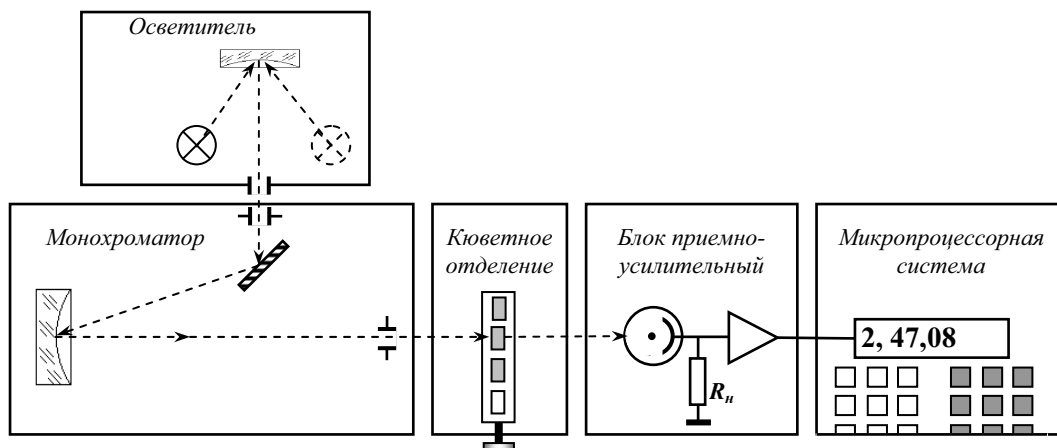


Рис. 4.3. Структурная схема спектрофотометра СФ-46

Световой пучок из осветителя попадает в монохроматор через входную щель и разлагается дифракционной решеткой в спектр. В монохроматический поток излучения, поступающий из выходной щели в кюветное отделение, поочередно вводятся контрольный и исследуемые образцы. Излучение, прошедшее через образец, попадает на катод фотоэлемента в приемно-усилительном блоке. Электрический ток, проходящий через резистор R_n , который включен в анодную цепь фотоэлемента, создает на резисторе падение напряжения, пропорциональное потоку излучения, падающему на фотокатод.

Усилитель постоянного тока, с коэффициентом усиления близким к единице, обеспечивает передачу сигналов на вход микропроцессорной системы (МПС).

МПС по команде оператора поочередно измеряет и запоминает напряжения U_T , U_0 и U_X , пропорциональные темновому току фотоэлемента i_T , потоку Φ_0 , прошедшему через контрольный образец и потоку Φ_X , прошедшему через исследуемый образец. После измерения МПС рассчитывает коэффициент пропускания исследуемого образца по формуле:

$$\tau_\lambda = \frac{U_X - U_T}{U_0 - U_T} \cdot 100 \%. \quad (4.21)$$

Значение τ_λ высвечивается на цифровом табло МПС в процентах.

Оптическая схема СФ-46

Монохроматор построен по вертикальной автоколлимационной схеме (см. рис. 4.4)

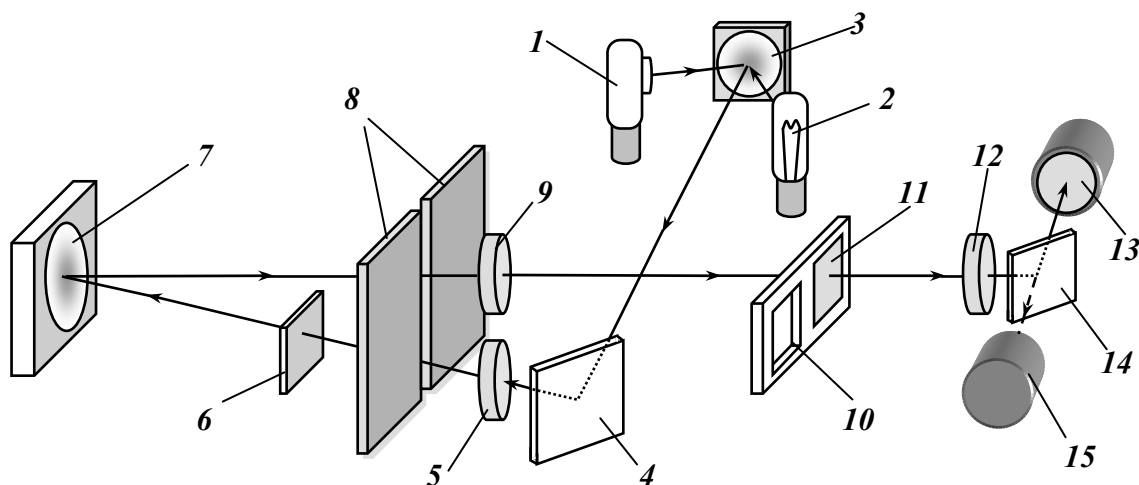


Рис. 4.4. Оптическая схема спектрофотометра СФ-46

- 1 – дейтериевая лампа; 2 – лампа накаливания; 3 – зеркальный конденсор;
4 – поворотное зеркало; 5 – входная линза монохроматора;
6 – сменный светофильтр; 7 – дифракционная решетка; 8 – входная (выходная) щель;
9 – выходная линза монохроматора; 10 – место контрольного образца;
11 – исследуемый образец; 12 – входная линза кюветного отделения;
14 – поворотное зеркало; 13, 15 – фотоэлементы

Излучение от источника 1 (или 2) попадает на зеркальный конденсор 3, который направляет его на плоское поворотное зеркало 4 и дает изображение источника излучения в плоскости входной линзы монохроматора 5, расположенной вблизи входной щели 8 монохроматора³. Прошедшее через входную щель 8 излучение сквозь сменный светофильтр 6 попадает на вогнутую дифракционную решетку 7 с переменным шагом и криволинейным штрихом. Решетка изготавливается на сферической поверхности, поэтому помимо диспергирующих свойств, она обладает свойством фокусировать излучение во всем рабочем диапазоне монохроматора.

Дифрагированный пучок фокусируется в плоскости выходной щели 8 монохроматора, расположенной над входной щелью. Его сканирование относительно выходной щели 8 осуществляется механизмом поворота дифракционной решетки. Вырезанное выходной щелью монохроматическое излучение какой-либо длины волны проходит выходную линзу 9, контрольный 10 или измеряемый 11 образец и через линзу кю-

³ Входная и выходная щели монохроматора объединены в единый механизм высокой щели, при этом нижняя ее часть служит входной щелью, а верхняя часть – выходной щелью монохроматора.

ветного отдела 12 попадает на поворотное зеркало 14. Зеркало 14 имеет два фиксированных положения, посылая пучок лучей на фотокатоды одного из фотоэлементов: 13 или 15.

Для уменьшения рассеянного света и срезания высших порядков дифракции в монохроматоре используется два светофильтра б: из стекла ПС11 для работы в области спектра 230...450 нм и из стекла ОС14 для работы в области спектра 600...1100 нм. Смена светофильтров производится автоматически. Все линзы в монохроматоре изготовлены из кварцевого стекла.

Для обеспечения работы спектрофотометра в широком спектральном диапазоне используются два фотоэлемента – 13 и 15 – и два источника излучения сплошного спектра – 1 и 2. Сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с окном из кварцевого стекла применяется для измерений в области спектра от 190 до 700 нм, кислородно-цезиевый фотоэлемент – для измерений в области спектра от 600 до 1100 нм. Длина волны, при которой следует переходить от измерений с одним фотоэлементом к измерениям с другим фотоэлементом, указана в паспорте спектрофотометра или определяется экспериментально (для данного прибора – 642 нм).

Дейтериевая лампа предназначена для работы в области спектра от 190 до 350 нм, лампа накаливания – для работы в области спектра от 340 до 1100 нм. Для проверки монохроматора используется ртутно-гелиевая лампа ДРГС-12.

Устройство спектрофотометра СФ-46

Спектрофотометр, показанный на рис. 4.5, состоит из монохроматора 15, осветителя с источниками излучения и стабилизатором 16, кюветного отделения 18, камеры 20 с фотоприемниками и усилителем (приемно-усилительный блок) и микропроцессорной системы (МПС) 26. Все основные элементы спектрофотометра установлены на основание 24.

Основные органы управления и индикации выведены на переднюю панель спектрофотометра.

1. Назначение органов управления и индикации

Кнопка 27 «СЕТЬ» служит для включения и выключения спектрофотометра. Расположенная над ней индикаторная лампа сигнализирует о включении спектрофотометра.

Рукоятка 28 предназначена для установки требуемых длин волн, значения которых определяются по отсчетному устройству 29 в нанометрах.

Переключатель 25 служит для ступенчатого выбора размеров щели, при этом на передней панели спектрофотометра выгравированы значения спектральной ширины щели в нанометрах (0,15; 0,5; 1,0; 2,5; 6,5 нм) для данной ступени раскрытия щелей.

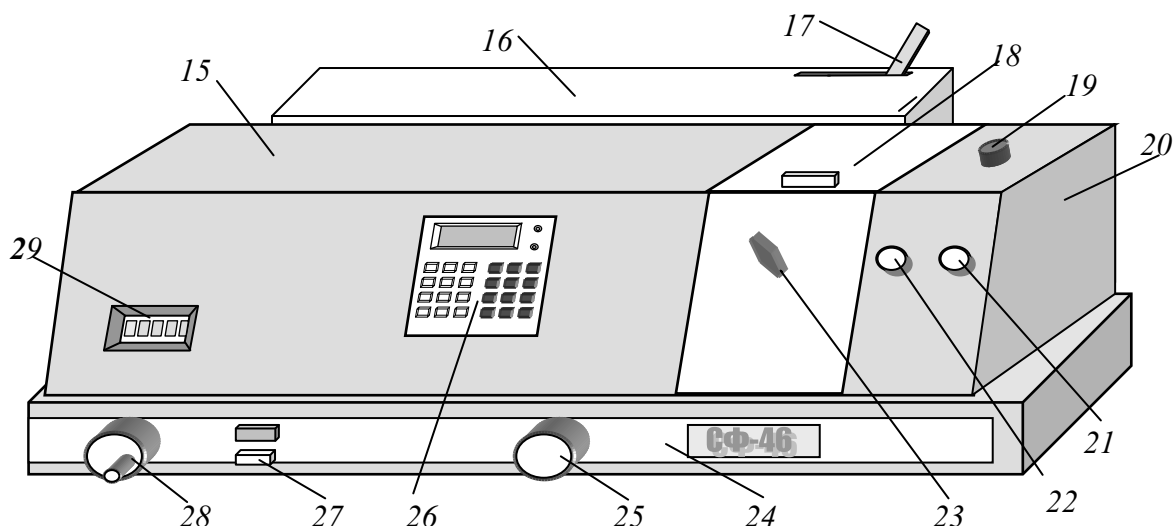


Рис. 4.5. Общий вид спектрофотометра:

15 – монохроматор; 16 – осветитель с источниками света и стабилизатором; 17 – рычаг перемещения зеркального конденсора; 18 – кюветное отделение; 19 – переключатель фотоэлементов; 20 – приемно-усилительный блок; 21 – потенциометр установки нуля с двойной регулировкой (грубой и точной); 22 – рукоятка переключения шторки; 23 – рукоятка перемещения каретки с образцами; 24 – основание; 25 – пятипозиционный переключатель входной и выходной щели; 26 – микропроцессорная система; 27 – индикаторная лампа и кнопка «СЕТЬ»; 28 – рукоятка установки длин волн излучения монохроматора; 29 – отсчетное устройство длин волн излучения

Рукоятка 23 служит для поперечного фиксированного перемещения каретки с держателем образцов внутри кюветного отделения. Держатель имеет четыре калиброванных отверстия для крепления образцов. При повороте рукоятки 22 одно из них (выгравированная на панели цифра указывает которое) ставится на пути зондирующего монохроматического пучка.

Рукоятка 22 предназначена для открытия (положение «ОТКР») или закрытия (положение «ЗАКР») шторки входного окна приемно-усилительного блока, которая при необходимости затемняет фотоэлементы.

Рукояткой 21 «НУЛЬ» производится компенсация темнового тока фотоэлемента при установке рукоятки 22 в положение «ЗАКР». Связанный с рукояткой 21 потенциометр имеет двойную регулировку: точную – легкое вращение рукоятки, и грубую – вращение рукоятки несколько более тугое.

Рукоятка 19 предназначена для смены фотоэлементов. Положение «К» соответствует включению кислородно-цезиевого фотоэлемента, работающего в «красной» области спектра 600...1100 нм, а положение «Ф» – включению сурьмяно-цезиевого фотоэлемента для измерений в области спектра 190...700 нм.

Рычагом 17 производится переключение источников излучения. При установке рычага 17 в положение «Н» используется лампа накаливания, а при установке рычага в положение «Д» – дейтериевая лампа.

2. Назначение клавиатуры микропроцессорной системы

Клавиатура МПС 26 предназначена для управления измерительной системой и ручного ввода данных.

Кнопка «ПУСК» служит для включения МПС, о чем сигнализирует высвечиваемая на табло запятая.

При нажатии клавиши «Ш(0)», что должно производиться при закрытом рукояткой 22 фотоэлементе, определяется выходное напряжения U_T при неосвещенном фотоэлементе, соответствующее значению темнового тока фотоприемника. Это значение в вольтах высвечивается на фотометрическом табло и запоминается МПС.

При нажатии клавиши «К(1)» определяется выходное напряжения U_0 при попадании на фотоэлемент светового потока, прошедшего через контрольный образец или калиброванное отверстие держателя. Это значение в вольтах также высвечивается на фотометрическом табло и остается в памяти МПС. Оно соответствует величине падающего на образец потока Φ_0 .

При нажатии клавиш « τ (2)» или «D(5)» определяется выходное напряжения U_X при попадании на фотоэлемент светового потока, прошедшего через исследуемый образец. Это напряжение пропорционально величине прошедшего потока Φ_X . Но на фотометрическом табло появляется не эта величина, а сразу высвечивается значение коэффициента пропускания τ_λ в процентах, вычисленное процессором по формуле (4.21), или значение оптической плотности $D_{\lambda 10}$ в единицах оптической плотности, вычисленное по формуле:

$$D_{\lambda 10} = \lg \frac{100}{\tau_\lambda}.$$

Клавиша «Ц/Р» служит для перевода МПС из разового режима в циклический и наоборот, о чем сигнализирует горящий индикатор «Р» (разовый) или «Ц» (циклический). При циклическом режиме вычисление и высвечивание измеряемых величин происходит каждые 5 с без дополнительного нажатия клавиш.

Клавиши «С(4)», «А(3)» «СБР», «УТВ», «/» «Ь» предназначены для работы спектрофотометра в режиме определения концентрации и скорости изменения оптической плотности.

При проведении измерений и проверок все клавиши следует нажимать не чаще одного раза в 2 с.

ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с устройством спектрофотометра СФ-46.
2. Провести измерения спектров пропускания $\tau(\lambda)$ или оптической плотности $D_{10}(\lambda)$ материалов, предложенных преподавателем, в заданной области спектра.
3. Рассчитать на основании проведенных в п. 2 измерений спектры поглощения $\alpha(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ используя, в зависимости от метода измерений, соответствующие формулы.
4. Рассчитать концентрацию центров окраски для полосы, предложенной преподавателем, по данным спектра поглощения $\beta(\lambda)$.
5. Оценить погрешность измерения концентрации центров окраски, считая, что значения K и f в формуле (4.18) заданы точно.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Порядок включения спектрофотометра

1. Выполнить п. 1 задания и получить разрешение преподавателя на включение спектрофотометра.

2. Закрывать фотоэлемент, установив рукоятку 22 переключателя шторки в положение «ЗАКР», и переключателем 25 установить ширину щели 0,15 нм.

3. Установить рычаг 17 в положение, соответствующее выбору источника излучения для предполагаемой спектральной области измерений. Если требуется проводить измерения во всем спектральном диапазоне прибора, то первой следует установить дейтериевую лампу.

4. Нажать кнопку 28 «СЕТЬ» – должна загореться индикаторная лампа «СЕТЬ». Нажать кнопку «ПУСК» на клавиатуре МПС – должна засветиться запятая на табло МПС.

Примечание: при установке рычага 17 в положение «Н» лампа накаливания загорается сразу после нажатия кнопки «СЕТЬ», при установке рычага 17 в положение «Д» дейтериевая лампа загорается автоматически после минутного прогрева. При этом стабильная работа спектрофотометра обеспечивается через 30 минут после включения.

Подготовка спектрофотометра к измерению

5. Установить в держателе кюветного отделения 18 от одного до трех исследуемых образцов. В четвертую позицию держателя может быть установлен либо контрольный образец, либо она служит в качестве калиброванного отверстия для измерений относительно воздуха. Установить держатель на каретку кюветного отделения 18 и плотно закрыть крышку кюветного отделения.

Внимание! Перед открыванием крышки кюветного отделения убедитесь, что фотоэлемент закрыт, т. е. рукоятка 22 находится в положении «ЗАКР».

6. Установить рукоятку 19 в положение «Ф» или «К», соответствующее выбору фотоэлемента для работы в требуемом спектральном диапазоне измерений.

7. Установить требуемую длину волны, вращая рукоятку установки длин волн 28 в сторону увеличения длин волн. Если при этом шкала повернется на большую величину, то ее следует вернуть назад на 5...10 нм и вновь подвести к требуемому делению.

Перед каждым новым измерением, когда неизвестна величина выходного напряжения, следует устанавливать ширину щели 0,15 нм, во избежание засвечивания фотоэлемента. Снимать показания следует при плотно закрытой крышке кюветного отделения. Открывать крышку кюветного отделения следует только при установлении рукоятки переключения шторки 22 в положение «ЗАКР».

Измерение коэффициента пропускания τ_λ

8. Установить рукояткой 28 длину волны, при которой требуется произвести измерения.

9. Установить рукоятку 22 в положение «ЗАКР».

10. Нажать клавишу «Ш(О)», при этом на фотометрическом табло высветится значение сигнала U_T в вольтах, пропорциональное значению темнового тока фотоэлемента.

11. Установить рукояткой 21 «НУЛЬ» на фотометрическом табло числовое значение в диапазоне от 0,05 до 0,1. Для этого необходимо после каждого подстроечного поворота рукоятки нажимать кнопку «Ш(О)». Вращение по часовой стрелке соответствует увеличению сигнала. При достижении необходимого значения кнопку «Ш(О)» нужно нажать несколько раз до появления на табло показания, равного предыдущему или отличающемуся от него не более чем на 0,001. Последнее показание заносится в память МПС и остается там до следующего нажатия клавиши «Ш(О)».

12. Установить, перемещая каретку рукояткой 23, на пути потока излучения контрольный образец или свободное отверстие держателя. При отсутствии контрольного образца измерение будет производиться относительно воздуха.

13. Установить рукоятку 22 в положение «ОТКР».

14. Установить, нажимая клавишу «К(1)»⁴, на фотометрическом табло показание в диапазоне от 0,5 до 5,0 (значение U_0) рукояткой 25 «ЩЕЛЬ». Наблюдая за миганием запятой на фотометрическом табло (частота мигания – один раз в секунду), отсчитать 10 секунд и нажать клавишу «К(1)».

15. Нажать клавишу «τ(2)», при этом на фотометрическом табло должно появиться показание $100,0 \pm 0,1$ (значение τ_λ контрольного образца в процентах), а слева – индекс «2». Если показание имеет другое значение, необходимо повторно ввести значение сигнала сравнения (U_0), нажав кнопку «К(1)».

16. Нажать клавишу «Ц/Р» – должно наблюдаться свечение индикатора циклического режима измерения «Ц». Нажать клавишу «(2)». Спектрофотометр переходит в циклический режим и через каждые 5 секунд высвечивает результат измерения коэффициента пропускания измеряемого образца в процентах.

17. Рукояткой 23 установить на пути зондирующего потока излучения один из измеряемых образцов, и при появлении показания, отличающегося от предыдущего не более чем на 0,1, снять показания с фотометрического табло, соответствующие τ_λ измеряемого образца. Установить последовательно следующие образцы и, аналогично, определить соответствующие τ_λ .

18. При непродолжительных измерениях, во время которых величина темнового тока не изменяется, можно не вводить эту величину в память МПС при каждом измерении. В этом случае все последующие измерения следует производить, начиная с операции, указанной в п. 14.

19. Для измерения абсолютных коэффициентов пропускания твердых образцов в видимой области спектра с абсолютной погрешностью, равной 0,5 %, необходимо перед началом измерений установить на выходную линзу 12, кюветного отделения 18, диафрагму диаметром 1 мм.

Определение оптической плотности $D_{\lambda 10}$

20. Выполнить операции, указанные в п.п. 11–17.

21. Нажать клавишу «D(5)» – на фотометрическом табло должно появиться показание $0,000 \pm 0,001$, а слева – индекс «5». Если показание имеет другое значение, необходимо еще раз ввести значение сигнала сравнения (U_0), нажав клавишу «К(1)».

22. Нажать клавишу «Ц/Р» – должно наблюдаться свечение индикатора режима «Ц». Нажать клавишу «D(5)». Устанавливать поочередно на пути потока излучения измеряемые образцы, перемещая каретку рукояткой 23, и при появлении показания, отличающегося от предыдущего не более чем на 0,001, снять показания фотометрического табло, определяя соответствующие значения $D_{\lambda 10}$.

⁴ При нажатии клавиши «К(1)» слева высвечивается индекс «1», при показании, большем 5,0, на табло высвечивается индекс «П» (переполнение).

Определение точки смены фотоэлемента

В области длин волн 600...700 нм возникает необходимость смены фотоэлементов. Смену необходимо производить при той длине волны, которая указана в паспорте спектрофотометра. Однако со временем точка смены фотоэлементов, ввиду их «старения» может меняться, поэтому периодически ее следует проверять. Конкретная длина волны смены фотоэлементов выбирается из условия равенства электрических сигналов как сурьмяно-цезиевого, так и кислородно-цезиевого фотоэлементов.

Для данного спектрофотометра смена фотоэлементов производится при длине волны 642 нм.

23. Установить длину волны указанную в паспорте. Выполнить операции, указанные в пп.11–17.

24. Переключить рукояткой 19 фотоэлементы и повторить операции, указанные в пп. 11–17. Если снятые показания одинаковы, то точка смены фотоэлементов осталась прежней. В противном случае следует подобрать длину волны, при которой показания по фотометрическому табло будут одинаковы.

25. Выполнить п. 2 задания, пользуясь указаниями пп. 1–27. Построить графики спектров пропускания и поглощения.

26. Выполнить пп. 3–5 задания на основании полученных результатов. Сделать выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ

1. Что такое оптическая плотность образца?
2. Каков физический смысл спектрального показателя поглощения?
3. Какой способ измерения β_λ Вы предполагаете использовать и почему?
4. Какова физическая природа поглощения оптического излучения различными материалами?
5. Почему стекла прозрачны, а металлы нет?
6. Почему и как окрашены светофильтры?
7. Как определить полуширину полосы поглощения?
8. Какие функции выполняет микропроцессорная система?
9. Зачем нужен сменный светофильтр (6 на рис. 4.4) в оптической системе спектрофотометра?
10. На передней панели спектрофотометра выгравированы значения спектральной ширины щели в нанометрах. Какова геометрическая ширина щелей данного монохроматора?
11. Какое практическое применение могут иметь данные о спектрах пропускания или поглощения различных материалов?
12. Качественно нарисуйте спектр пропускания защитного стекла в маске электросварщика.

Лабораторная работа № 5 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ НА СПЕКТРОФОТОМЕТРЕ СФ-18

ВВЕДЕНИЕ

Спектральные характеристики объектов

Распределение по спектру отраженного излучения определяет видимые свойства участка объекта – его яркость, насыщенность и цветовой тон.

На рис. 5.1 показаны кривые отражения разных поверхностей. Если отражение с изменением длины волны изменяется мало или остается постоянным, то объект воспринимается как ахроматический. Следовательно, насыщенность некоторого поля объекта связана с разницей максимального и минимального значения монохроматического коэффициента отражения. На рис. 5.1, а видно, что снег отражает все излучения одинаково. Большинство тел, которые воспринимаются как ахроматические, например мел, белая материя, отражают по спектру не вполне равномерно. Тем не менее, мы считаем их строго белыми. Это объясняется ограниченной чувствительностью глаза к цветовому тону.

Наиболее насыщенны, по сравнению с другими объектами, цвета красок. На рис. 5.1, б показано несколько примеров, из которых следует, что краски могут весьма сильно отражать в одной области спектра, обладая существенным поглощением в другой.

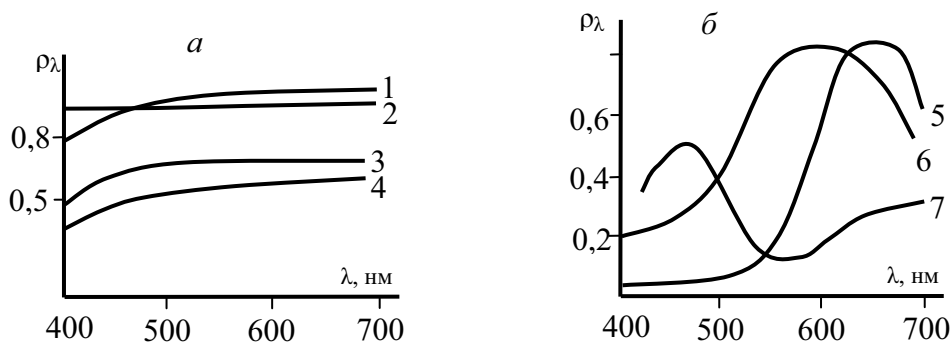


Рис. 5.1. Кривые отражения разных поверхностей:

а) ахроматические: 1 – белая материя; 2 – снег; 3 – окись цинка; 4 – мел;

б) поверхности насыщенных цветов (накраски): 5 – киноварь;

6 – кадмиевая желтая; 7 – кобальт синий

Из кривых, представленных на рис. 5.1, видно, что никакие объекты природы не отражают свет полностью ни в каких участках спектра и нигде его полностью не поглощают. Кроме того, кривые отражения их

поверхностей изменяются с изменением длины волны плавно. Даже краски, имеющие наибольшую насыщенность, по сравнению с другими объектами, не обладают крутыми характеристиками.

Задачи спектроскопии отражения

Раздел спектроскопии, изучающий закономерности отражения электромагнитного излучения от различных сред, называют *спектроскопией отражения*. Эти закономерности лежат в основе методов исследования веществ по спектрам отражения.

Различают спектры *внутреннего* и *внешнего* отражения.

Спектры внутреннего отражения наблюдают, когда исследуемый образец находится в контакте с призмой из оптически менее плотного материала. При этом излучение проходит сначала через призму и ее границу с образцом под углом, превышающим критический (т. е. угол падения, при котором преломление света в образец прекращается), а затем проникает в образец (на глубину до 1...2 мкм), где теряет часть своей энергии и отражается. Таким образом, получают спектры *нарушенного полного внутреннего отражения* (НПВО).

Спектры внешнего отражения, в свою очередь, делятся на спектры *зеркального отражения*, когда падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к отражающей поверхности, а угол отражения равен углу падения, и спектры *диффузного отражения*, когда отраженные лучи рассеиваются по разным направлениям. Характер внешнего отражения излучения определяется соотношением между длиной волны λ падающего излучения и размерами неровностей отражающей поверхности. При неровностях, размеры которых меньше λ , наблюдается зеркальное отражение, в остальных случаях – диффузное отражение (рассеянное излучение). В действительности отраженное излучение имеет смешанный характер; при специально выбранных условиях преобладает вклад того или иного вида отражения.

Зеркальное отражение получают с применением гладкой плоской поверхности, в частности, при исследовании молекулярных структур слоев, нанесенных на различные подложки, при изучении явлений адгезии, адсорбции, электрокатализа, ингибирования коррозии, а также при определении оптических постоянных (например, действительной и мнимой частей показателя преломления).

Зная оптические постоянные веществ, в спектрах отражения можно выделить смещение и искажение форм спектральных полос, изменение их интенсивности, вызванные не оптическими эффектами, а изменениями структуры отражающей поверхности или химическими реакциями. Так, например, при исследовании спектра отражения пленки из полиметилметакрилата, нанесенной на подложку из золота, полоса, соответ-

вующая валентному колебанию $C = O$, оказывается смещенной в высокочастотную область (примерно на 10 см^{-1}) и имеет асимметричную форму. Такие искажения возрастают при увеличении толщины пленки и уменьшении комплексного показателя преломления материала подложки. На искажение полос сильно влияет также угол падения излучения и поляризация падающего пучка. При использовании поляризованного излучения можно определить пространственную ориентацию молекул, образующих пленку на отражающей подложке, и характер их взаимодействия с подложкой. Однако необходимо предварительно тщательно учесть роль оптических эффектов в искажении спектров отражения.

Спектры, полученные при зеркальном отражении, представляют суперпозицию спектров отражения и пропускания. Обычно наилучшие результаты измерения спектров отражения получают при угле падения излучения около 45° и при толщине покрытий около $0,01 \text{ мм}$. При малых толщинах пленок ($\ll 0,01 \text{ мм}$) и угле падения 90° спектры отражения не могут быть получены, т. к. образующаяся стоячая волна электрического поля имеет на отражающей поверхности узел, и молекулы вещества не могут взаимодействовать с излучением. Количество отраженной энергии при скользящем падении луча может быть значительно больше, причем проникновение излучения будет более глубоким, т. е. будет исследоваться большая толщина образца.

Спектры диффузного отражения обычно малоинтенсивны, т. к. удается собрать и направить в спектральный прибор только очень малую часть рассеянного (отраженного) излучения. Поэтому в этом случае необходимо применять ИК фурье-спектрофотометры, обладающие высокими светосилой и соотношением сигнал/шум ($\sim 10^5$). Получаемые при диффузном отражении спектры часто оказываются подобны спектрам пропускания. Исследуемыми образцами могут служить массивные твердые тела, порошки (иногда содержащие различные наполнители – KBr , KCl , CsI , прозрачные в исследуемой области спектра), волокнистые (ткани, войлок) и ячеистые (например, электроды с различными наполнителями) материалы, пены, суспензии и аэрозоли, разрядные промежутки с электронными запалами для анализа возможных загрязнений и т. д. Перед исследованием твердый образец обычно натирают на наждачную бумагу на основе карбида кремния тонкого помола, спектр которого либо не проявляется в спектре исследуемого образца, либо может быть вычтен из полученного спектра и использоваться как спектр сравнения. Спектры отражения при диффузном рассеянии могут наблюдаться от достаточно малых количеств вещества, например от пятен на хроматографической пластине. Метод используют также для определения диэлектрических свойств образцов.

При исследовании зеркального отражения применяют обычно систему зеркал, которая отклоняет пучок излучения, направляет его на изучаемый объект и возвращает отраженное излучение вновь в спектральный прибор. Для наблюдения спектров НПВО используют такие же приставки, но с той разницей, что излучение направляется на призму, находящуюся в контакте с исследуемым образцом. Для изучения спектров диффузного отражения обычно используют так называемую полую фотометрическую сферу, внутренняя поверхность которой покрыта отражающим материалом, не поглощающим в исследуемой области спектра; для входа и выхода излучения и размещения образца в сфере предусматриваются соответствующие «окна». В применяемом в данной лабораторной работе спектрофотометре СФ-18 используется полая фотометрическая сфера.

Задачи измерения цвета

При решении целого ряда научных и практических задач: при контроле качества цветовоспроизведения в печати, дизайнерских разработках, либо на производстве, требуется осуществлять точные измерения характеристик исследуемого цвета образцов, таких как его цветовые координаты, спектр излучения, оптическая плотность и т. д.

Использование для этих целей зрительного аппарата человека не позволяет эффективно решать поставленные задачи, поскольку зрение человека, во-первых, является всегда субъективным, и, во-вторых, глаз человека, имея способность видеть тонкие отличия цвета между двумя цветовыми образцами, не может при этом использоваться для выполнения абсолютных цветовых измерений. Для этих целей применяются специальные приборы: колориметры и спектрофотометры.

Спектрофотометры являются наиболее точными приборами для измерения цвета. Они определяют коэффициенты спектрального отражения и пропускания образца, а также позволяют измерять спектры излучения самосветящихся предметов. Точность, с которой спектрофотометр измеряет спектр излучения, определяется шириной единичного интервала длин волн $\Delta\lambda$, в котором оценивается величина потока излучения. Обычно величины $\Delta\lambda = 10$ нм уже достаточно, чтобы с высокой степенью точности производить измерения цвета, хотя спектрофотометры могут производить измерения спектра и в более узких интервалах $\Delta\lambda = 5$ нм и $\Delta\lambda = 1$ нм.

Спектрофотометры измеряют только спектр излучения. Все остальные характеристики излучения рассчитываются по спектральным данным.

Колориметры определяет цветовые координаты образца по интенсивности трех световых потоков и не оценивает весь спектр излучения.

Вследствие метамерии возможны ситуации, когда два цветовых образца, имеющие разные спектральные распределения излучения и физически не равные друг другу, будут определены колориметром как не имеющие различия. Поэтому колориметры используются, как правило, в более дешевых цветоизмерительных системах. Например, коммерческие системы калибровки мониторов, для которых ошибки и неточности, допускаемые колориметром, оказываются несущественными. В промышленности и для научных целей, а также в случаях, когда критически важной является точность измерения, предпочтительным оказывается использование спектрофотометра.

Расчет координат цвета по спектральному коэффициенту отражения и относительному спектральному распределению энергии

Для характеристики спектрального распределения светового потока, отраженного от поверхности образца либо прошедшего через него, используются спектральные коэффициенты отражения $\rho(\lambda)$ и пропускания $\tau(\lambda)$, определяемые как отношение отраженной от поверхности образца или прошедшей через него частей светового потока ко всему световому потоку, осветившему образец в зависимости от длины волны:

$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi_{\rho}(\lambda)}{\Phi_0(\lambda)}; \quad \tau(\lambda) = \frac{\Phi_{\tau}(\lambda)}{\Phi_0(\lambda)}, \quad (5.1)$$

где $\Phi_{\rho}(\lambda)$ – световой поток, отраженный от поверхности образца; $\Phi_{\tau}(\lambda)$ – световой поток, прошедший через образец; $\Phi_0(\lambda)$ – световой поток, осветивший образец.

При измерении с помощью спектрофотометра образцов цвета несамоосветящихся объектов определяется спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$, который характеризует свойство поверхности объекта избирательно поглощать и отражать световой поток в зависимости от длины волны. Для того, чтобы оценить поток излучения $\Phi(\lambda)$, отраженного от этого объекта и попадающего в глаз, по которому мы и имеем возможность судить о цвете данного объекта, необходимо перемножить значения $\rho(\lambda)$ на относительное спектральное распределение энергии осветителя $S(\lambda)$. Поскольку в спектрофотометрии измерения спектрального коэффициента отражения осуществляется обычно в фиксированном числе конечных интервалов с длиной волны $\Delta\lambda$, вместо величины $\Phi(\lambda)$ мы имеем возможность определить лишь произведение $\Phi(\lambda)\Delta\lambda$:

$$\Phi(\lambda) \cdot \Delta\lambda = \rho(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda. \quad (5.2)$$

Для того, чтобы определить координаты цвета, например, в системе XYZ необходимо вычислить произведения $\Phi(\lambda)$ и удельных ординат

цвета $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, рассчитанных для стандартного колориметрического наблюдателя Международной комиссии по освещению:

$$\Phi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda; \Phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda; \Phi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda.$$

Затем вычислить суммы этих произведений, которые и будут являться искомыми координатами цвета XYZ:

$$X = k \cdot \sum_{\lambda=380\text{нм}}^{\lambda=760\text{нм}} [S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda)] \cdot \Delta\lambda; \quad (5.3)$$

$$Y = k \cdot \sum_{\lambda=380\text{нм}}^{\lambda=760\text{нм}} [S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)] \cdot \Delta\lambda; \quad (5.4)$$

$$Z = k \cdot \sum_{\lambda=380\text{нм}}^{\lambda=760\text{нм}} [S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda)] \cdot \Delta\lambda, \quad (5.5)$$

где k – нормирующий коэффициент, значение которого при определении цветовых параметров несамосветящихся объектов обычно принимается равным:

$$k = 100 \cdot \left[\sum_{\lambda=380\text{нм}}^{\lambda=760\text{нм}} [S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)] \cdot \Delta\lambda \right]^{-1}. \quad (5.6)$$

Благодаря введению нормирующего коэффициента, осуществляется перерасчет цветовых координат таким образом, чтобы для объектов, являющихся идеальным рассеивателем, значение координаты Y всегда было равно 100 (либо приближалось к 100 для материалов, коэффициент отражения которых приближается к коэффициенту отражения идеального рассеивателя).

Для возможности сравнивать объекты по индивидуальным характеристикам в качестве спектра осветителя $S(\lambda)$ принято использовать относительное спектральное распределение энергии стандартных источников излучения (A , B , C или D_{65}). Источник A аппроксимирует теплый цвет газонаполненной лампы накаливания с вольфрамовой нитью при 2856К. Он намного «краснее» остальных. Источник B соответствует солнечному свету в полдень, а C – полуденному освещению при сплошной облачности. Источник C принят в качестве опорного белого цвета Национальным комитетом по телевизионным стандартам (NTSC). Источник D_{65} соответствует излучению абсолютно черного тела при 6504 К.

Координаты цветности определяются по формулам:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (5.7)$$

УСТРОЙСТВО И РАБОТА СПЕКТРОФОТОМЕТРА

Схема и принцип действия спектрофотометра СФ-18

Оптическая схема спектрофотометра состоит из двух частей: спектральной (двойного монохроматора) и фотометрической.

Нить лампы 1 (рис. 5.2) изображается конденсором 2 через входную щель 3 в плоскости объектива 4.

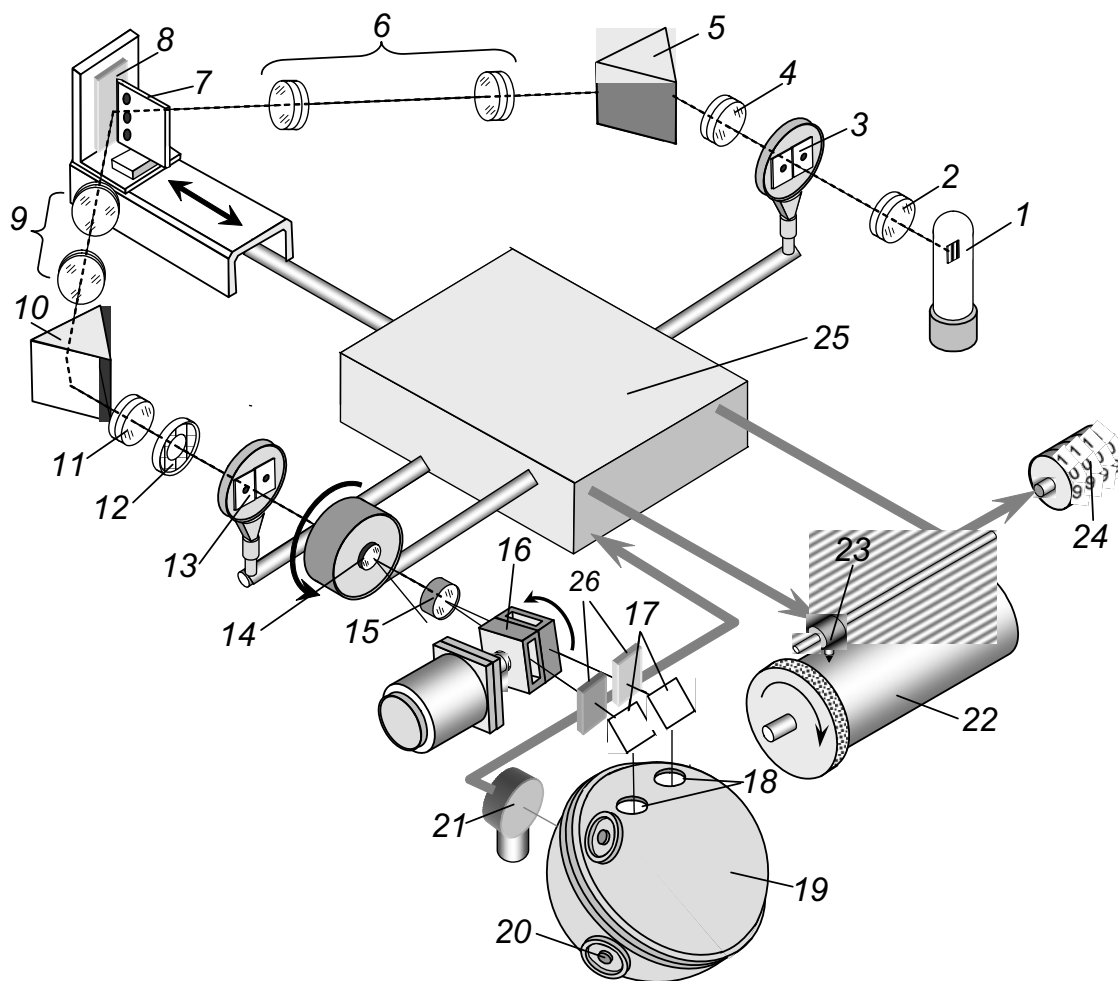


Рис. 5.2. Схема спектрофотометра СФ-18:

- 1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – входная щель; 4 – объектив; 5 – диспергирующая призма; 6 – объектив; 7 – нож; 8 – зеркало; 9 – объектив; 10 – вторая диспергирующая призма; 11 – объектив; 12 – ирисовая диафрагма; 13 – выходная щель; 14 – призма Рошона; 15 – призма Волластона; 16 – модулятор; 17 – поворотные призмы; 18 – входные окна шара; 19 – шар; 20 – окно с заглушкой для образца на отражение; 21 – фотозлемент; 22 – барабан для бланка записи; 23 – пишущее перо; 24 – индикатор длин волн; 25 – обобщенный блок кинематики, фоторегистрации и привода записи; 26 – образцы, измеряемые на пропускание

Входная щель расположена в фокальной плоскости объектива; выходящий из него параллельный пучок света проходит диспергирующую

призму 5 и разлагается в спектр. Объектив 6 первого монохроматора дает спектральное изображение входной щели в плоскости средней щели. Средняя щель двойного монохроматора, образованная зеркалом 8 для поворота лучей и ножом 7, вырезает участок спектра $\Delta\lambda_1$, который проходит во второй монохроматор. После вторичного разложения, в котором задействованы объектив 9, призма 10 и объектив 11, изображение входной щели 3 проецируется в плоскость выходной щели 13, которая, в свою очередь, вырезает участок спектра $\Delta\lambda_2$, обеспечивая тем самым высокую степень монохроматичности проходящего излучения.

Ножи входной и выходной щели изготовлены по радиусу, соответствующему искривлению изображения, вызываемого призмами.

Раскрытие щелей спектрофотометра осуществляется автоматически движением штоков от специального кулачка кинематической системы и обеспечивает постоянную энергию по спектру.

По выходе из щели монохроматора пучок света попадает в фотометрическую часть спектрофотометра. Сначала пучок проходит через линзу (на рисунке не видна) и двоякопреломляющую призму Рошона 14, собранных в общей оправке. Линза дает изображение объектива выходного коллиматора вблизи диафрагмы, в качестве которой служит оправка элемента 15. Призма Рошона 14 разделяет это изображение на два, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Одно изображение, расположенное на оптической оси системы, проходит через призму Волластона 15 и линзу 15' (в одной оправке), другое, смещенное, – срезается диафрагмой – оправкой элемента 15.

Линза 15' дает изображение выходной щели в плоскости полулинз 16', установленных внутри модулятора света 16. Вследствие двойного лучепреломления призмы Волластона в плоскости полулинз получают два изображения выходной щели. Пройдя полулинзы 16', контрольный и измеряемый образец (при измерении пропускания), пучки отклоняются призмами 17 на 90° , затем через входные окна 18 шара 19 падают на окна 20, к которым прижимаются две белые заглушки. При измерении коэффициента отражения на место заглушек помещаются контрольный и измеряемый образцы.

Свет суммируется шаром и освещает фотоэлемент, расположенный за выходным окном шара, закрытым молочным стеклом.

Кинематическая система спектрофотометра, условно обозначенная как часть блока 25, обеспечивает согласованное по скорости и времени выполнение ряда задач. Один электродвигатель через коробку скоростей передает движение на:

- а) вращение барабана 22 записывающего устройства;
- б) вращение счетчика длин волн 24;
- в) передвижение средней щели (7–9) монохроматора;
- г) раскрытие входной 3 и выходной 13 щели спектрофотометра.

Другой, реверсивный электродвигатель, приводит во вращение вал с фотометрическими кулачками, которые с помощью штока и сектора поворачивают призму Рошона 14.

На одном валу с фотометрическими кулачками укреплен шкив и с помощью тросика, концы которого закреплены на шкиве, и системы роликов вращение вала передается на перо 23 записывающего устройства.

Принцип действия спектрофотометра СФ-18 основан на нулевом методе и заключается в следующем.

Монохроматический пучок света делится призмой Рошона на два плоскополяризованных пучка. Один из двух пропускаемых лучей не меняет своего направления, другой (необыкновенный) отклоняется на угол θ и отрезается диафрагмой. Плоскополяризованный пучок (обыкновенный) попадает на призму Волластона и снова делится на два пучка, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. На призму Волластона падает плоскополяризованный пучок света, поэтому отношение интенсивностей пучков света за призмой Волластона будет определяться угловым положением относительно нее призмы Рошона: при совпадении плоскости поляризации призмы Рошона и плоскости поляризации одного из пучков, интенсивность этого пучка будет максимальной, а другого, с перпендикулярной плоскостью, – минимальной. Поворачивая призму Рошона относительно призмы Волластона, можно изменять соотношение интенсивностей выходящих пучков. Равенство интенсивностей в обоих пучках будет при угле 45° между плоскостью поляризации призмы Рошона и плоскостями поляризации обоих пучков после призмы Волластона.

Далее пучки поочередно перекрываются вращающимся модулятором таким образом, что интенсивность света в каждом пучке изменяется по трапецеидальной форме и началу открытия одного пучка соответствует начало закрытия другого. Конструкция модулятора и скорость его вращения выбраны таким образом, что световой поток прерывается с частотой 50 Гц.

Свет, прошедший через контрольный и измеряемый образец, попадает в интегрирующий шар и после многократного отражения от его стенок освещает фотоэлемент.

Освещенность фотоэлемента в каждый момент времени определяется суммой потоков, прошедших через контрольный и измеряемый образец (или отраженных от них). Если световые потоки равны, освещенность фотоэлемента будет постоянна в любой момент времени, и переменный сигнал на входе усилительной системы будет отсутствовать. При наличии поглощения в измеряемом образце суммарный световой поток на фотоэлементе будет изменяться с частотой 50 Гц и на нагрузке фотоэлемента появится переменное напряжение сигнала той же частоты.

ты. Это напряжение через усилитель подается на обмотку управления электродвигателя отработки, который с помощью фотометрического кулачка поворачивает призму Рошона до тех пор, пока не исчезнет разность световых потоков, вызывающая электрический сигнал на входе усилителя. Одновременно с поворотом призмы происходит перемещение пера, фиксирующего на бланке пропускание, оптическую плотность или коэффициент отражения образца.

Изменение длины волны света, выходящего из монохроматора, производится путем перемещения вдоль спектра средней щели спектрофотометра электродвигателем развертки спектра; одновременно с этим поворачивается барабан записывающего устройства. Таким образом, на бланке, закрепленном на барабане, записывается кривая зависимости коэффициента пропускания, оптической плотности или коэффициента отражения образца от длины волны.

При работе на фиксированной длине волны происходит поворот барабана записывающего устройства без перемещения средней щели спектрофотометра, при этом на бланке записывается кривая изменения коэффициента пропускания (отражения) образца во времени.

Управление спектрофотометром

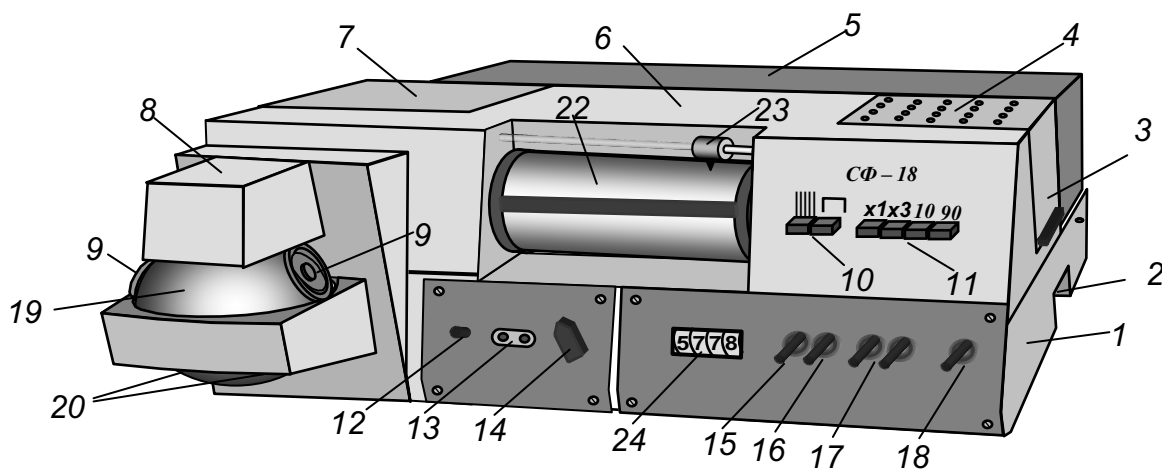


Рис. 5.3. Спектрофотометр СФ-18 (общий вид):

- 1 – основание спектрофотометра; 2 – разъем для сетевого кабеля; 3 – проем для доступа к осветителю; 4 – крышка осветителя; 5 – кожух монохроматора; 6 – кожух фотометрической части; 7 – проем для доступа к фотометрической части; 8 – откидная крышка кюветного отделения; 9 – верхние заглушки шара; 10 – кнопки «режим работы»; 11 – кнопки «скорость регистрации»; 12 – предохранитель; 13 – клеммы контроля; 14 – рукоятка регулировки усиления; 15 – переключатель «запись»; 16 – тумблер «лампа»; 17 – тумблеры «отработка»; 18 – тумблер «сеть»; 19 – фотометрический шар; 20 – нижние заглушки шара; 22 – барабан с бланком записи; 23 – подвижная каретка с пером

На лицевую стенку кожуха 6 (см. рис. 5.3) от коробки скоростей выведены две группы кнопок: две кнопки «РЕЖИМ РАБОТЫ» и четыре

кнопки «СКОРОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ». При нажатии кнопки со знаком «|||||» движение от коробки скоростей передается на барабан записывающего устройства и одновременно на кулачковый механизм длин волн, и далее на каретку средней щели; при нажатии кнопки со знаком «┌┐» движение от коробки скоростей передается только на барабан записывающего устройства.

С помощью кнопок «СКОРОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ» устанавливаются скорости развертки спектра и скорости вращения барабана с бланком. Конструкция коробки скоростей обеспечивает получение четырех скоростей развертки спектра: 10, 30, 90 и 270 нм/мин и, соответственно, четырех скоростей перемещения бланка: 10, 30, 90 и 270 мм/мин. Для получения требуемой скорости необходимо нажать одновременно две кнопки.

Сочетания нажимаемых кнопок и соответствующие им скорости указаны в табл. 5.1.

На лицевой стороне основания *1* расположен пульт управления спектрофотометром и щиток с гнездами «КОНТРОЛЬ» и рукояткой регулировки усиления. На пульте управления расположен тумблер «СЕТЬ» с сигнальной лампой, тумблер «ЛАМПА», два тумблера «ОТРАБОТКА» (тумблер «ОТКЛ» служит для включения и выключения электродвигателя обработки, тумблер «ОБРАТНЫЙ ХОД» – для изменения направления вращения оси электродвигателя), переключатель «ЗАПИСЬ», окно для счетчика длин волн.

В кожухе *6* (см. рис. 5.2) имеются два проема: через проем *3* осуществляется доступ к осветителю и к рукоятке установки ширины входной щели; через проем *7* осуществляется доступ к рукоятке установки ширины выходной щели, к винту точного поворота призмы Рюшона, к рукоятке переключения фотометрических кулачков и к устройству для установки сменных фотометрических кулачков; проемы закрываются крышками *4* и *7*. Под откидной крышкой *8* смонтировано кюветное отделение для установки прозрачных образцов, исследуемых на пропускание; ниже расположен интегрирующий шар *19*.

Прозрачный образец, закрепленный в специальном держателе, устанавливается в кюветное отделение на пути правого пучка.

Измерение пропускания или оптической плотности прозрачных образцов производится относительно пропускания или оптической

Таблица 5.1

Скорости развертки спектра

Скорость, нм/мин и мм/мин	Нажимаемые кнопки	
10	10	×1
30	10	×3
90	90	×1
270	90	×3

плотности эталона, помещаемого на пути левого пучка; пропускание эталона принимается за 100 %, оптическая плотность – равной 0.

Светорассеивающий образец, исследуемый на пропускание, помещается в держатель, который устанавливается в правое верхнее окно шара. Образец, исследуемый на отражение, помещается в кювету, устанавливаемую вместо правой нижней заглушки 20; для закрепления кюветы (или заглушки) служит специальный винт.

Измерение пропускания или отражения светорассеивающих образцов можно производить методом Тейлора или относительным методом (относительно пропускания или отражения эталона).

Внутри шара имеются два экрана, предназначенные для предотвращения попадания света непосредственно от образца на фотоэлемент: верхний экран – при измерении пропускания, нижний – при измерении отражения. Установка экранов осуществляется с помощью двух рукояток, расположенных с левой стороны шара (на рис. 5.2 не видны)

Каждый экран может занимать в шаре два положения. Первое положение соответствует нейтральному расположению экранов по отношению к нижним окнам шара, при этом рукоятки вдвинуты в шар до упора. При измерении отражения относительным методом экраны должны находиться в нейтральном положении относительно нижних окон шара, а исследуемый образец устанавливается вместо правой нижней заглушки, эталон – вместо левой нижней заглушки шара.

Ирисовая диафрагма 12 (см. рис. 5.1), установленная на кронштейне выходного объектива монохроматора, предназначена для ограничения светового пучка при измерениях отражения образцов малых размеров. Величина раскрытия диафрагмы определяется размерами исследуемого образца и подбирается таким образом, чтобы размеры светового пучка, падающего на образец, не выходили за пределы образца; наблюдение при этом удобно вести через верхнее левое окно шара при снятой заглушке. Раскрытие диафрагмы осуществляется вручную поворотом рукоятки при снятой крышке проема 7 (см. рис. 5.1). Диафрагма позволяет измерять отражение образцов размером не менее 6×12 мм.

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Включить спектрофотометр тумблером «СЕТЬ». Дать спектрофотометру прогреться в течение 30 мин.
2. Открыть проем 7 и установить в рабочее положение необходимый фотометрический кулачок в зависимости от задачи и характера измерений исследуемого вещества.

Установка в рабочее положение того или иного фотометрического кулачка осуществляется с помощью рукоятки 27 (см. рис. 5.4), которая может занимать по отношению к винту 28 три положения: Т, D и СМ.

Положение Т соответствует установке постоянного кулачка коэффициентов пропускания, положение D – установке постоянного кулачка оптической плотности, положение CM – установке сменного кулачка.

Винт 28 служит для точного поворота призмы Рошона при установке пера на линию стопроцентного пропускания или на линию нулевой плотности.

Если неизвестны пределы измерений коэффициентов пропускания или оптической плотности исследуемого вещества, необходимо установить кулачок Т (от 1 до 100 %) или D (от 0 до 2,0).

При необходимости увеличения масштаба записи можно использовать кулачки с растяжкой по пропусканию или оптической плотности в различных пределах, для этого нужно установить в рабочее положение соответствующий сменный кулачок.

3. Нажать кнопку «|||||», если необходимо измерить пропускание или оптическую плотность по спектру. Нажать рядом стоящую кнопку «┌┐», если необходимо измерить изменение пропускания или оптической плотности вещества во времени.

4. Установить необходимую скорость развертки спектра: при исследовании веществ, имеющих узкие полосы поглощения, или веществ, поглощение которых резко меняется с длиной волны, необходимо установить скорость развертки спектра 30 мм/мин; при исследовании веществ, поглощение которых плавно меняется с длиной волны, необходимо установить скорость развертки спектра 90 нм/мин. При записи изменения коэффициента пропускания или оптической плотности исследуемого вещества во времени, необходимо установить скорость перемещения бланка в зависимости от характера процесса.

5. Включить электродвигатель развертки спектра переключателем «ЗАПИСЬ» и установить на счетчике длин волн отсчет «400».

6. Отвернуть рукой зажимное кольцо, придерживая барабан записывающего устройства за накатку с правой стороны. Поднять планку барабана, установить бланк в соответствии с установленным фотометрическим кулачком, опустить планку. Опустить перо, повернуть барабан до совмещения пера с линией бланка, соответствующей 400 нм, вернуть зажимное кольцо.

7. Включить тумблер «ЛАМПА» и электродвигатель отработки тумблером «ОТРАБОТКА–ОТКЛ». Винтом 28 (см. рис. 5.4) установить перо на линию бланка «100» при кулачках пропускания, или «0» при

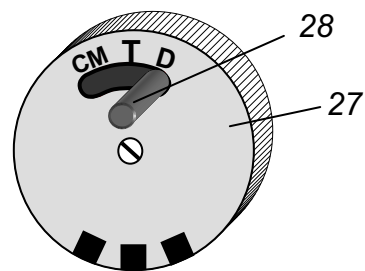


Рис. 5.4. Рукоятка смены фотометрических кулачков

кулачках оптической плотности⁵. Выключить электродвигатель обработки тумблером «ОТРАБОТКА–ОТКЛ».

8. Установите исследуемое вещество и образец сравнения.

В случае измерения пропускания нужно открыть крышку кюветного отделения 8. Прозрачный образец, закрепленный в специальном держателе, устанавливается в кюветное отделение на пути правого пучка. Измерение пропускания или оптической плотности прозрачных образцов производится относительно пропускания или оптической плотности эталона, помещаемого на пути левого пучка; пропускание эталона принимается за 100 %, оптическая плотность – равной 0. Часто за эталон принимается просто воздух, и в левый канал ничего не ставится.

При измерении отражения относительным методом исследуемый образец устанавливается вместо правой нижней заглушки шара, эталон – вместо левой нижней заглушки.

Идеальный эталон представляет собой материал, равномерно отражающий весь падающий на него световой поток. Практическая трудность, с которой сталкиваются в спектрофотометрии, заключается в том, что таких материалов в природе не существует, поэтому идеальный эталон при спектрофотометрических измерениях заменяется материалом, приближающимся к нему по своим физическим свойствам. В качестве, так называемых, белых стандартов применяют спрессованные порошки оксида магния MgO либо сульфата бария BaSO₄, величина коэффициента отражения которых почти равняется единице и заключена в пределах 0,970...0,985, а также образцы белой поверхности, которыми служат специальным образом изготовленные молочные стекла.

9. Установить нейтральное расположение экранов по отношению к нижним окнам шара, при этом рукоятки вдвинуты в шар до упора.

10. Включить электродвигатель обработки тумблером «ОТРАБОТКА–ОТКЛ.» и электродвигатель развертки спектра переключателем «ЗАПИСЬ» и произвести запись спектра исследуемого вещества.

11. Выключить тумблер «ОТРАБОТКА–ОТКЛ.» переключатель «ЗАПИСЬ».

12. Поднять перо. Если предполагается измерение нескольких разных образцов, то для записи спектров обычно используется тот же бланк. Если измерения закончены, отверните зажимное кольцо, поднимите планку барабана и снимите бланк.

⁵ Если при измерении пропускания при установленном кулачке Т, пропускание образца в некотором интервале длин волн окажется менее 1 % и перо отклонится за «0» шкалы пропускания бланка. Когда пропускание образца станет больше 1 %, перо автоматически выйдет на рабочую часть бланка.

ЗАДАНИЕ

1. Изучить оптическую схему спектрофотометра, ознакомиться с назначением и расположением основных узлов прибора, усвоить принцип действия спектрофотометра при автоматическом измерении спектров пропускания и отражения.
2. Изучить порядок работы на спектрофотометре при измерении спектров отражения.
3. Измерить спектры отражения нескольких образцов. Сравнить результаты измерения.
4. Составить для выбранных образцов таблицу с данными $\rho_\lambda = f(\lambda)$ и шагом табулирования $\Delta\lambda = 10$ нм.
5. Рассчитать для этих образцов координаты цвета и цветности при освещении их одним из стандартных источников излучения (A , B , C или D_{65}). Для расчетов использовать необходимые данные, приведенные в приложениях 4 и 5.

ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ

1. Какое практическое применение имеют результаты измерения спектров отражения?
2. В чем состоят отличия зеркального и диффузного отражений?
3. От каких условий зависит цвет объектов?
4. Для какой цели применен двойной монохроматор?
5. Какие функции в спектрофотометре выполняет призма Рошона? Что изменяется при ее повороте вокруг осевого направления?
6. Какие функции в спектрофотометре выполняет призма Волластона?
7. Раскройте суть нулевого метода измерений на спектрофотометре.
8. Для какой цели служит применяемый в спектрофотометре полый шар? Каким требованиям он должен соответствовать?
9. Как установить скорость развертки спектра?
10. Зачем необходимы образцы сравнения при измерении пропускания или отражения? Какие требования к ним предъявляются?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1.1

*Перечень доступных визуальному наблюдению спектральных линий
излучения ртутной лампы*

Цвет линии (условно)	Интенсивность линии (условно)	Длина волны в воздухе, нм
Фиолетовая	средняя	404,7
Фиолетовая	очень слабая	407,8
Синяя	сильная	435,8
Голубая	слабая	491,6
Зеленая	сильная	545,1
Желтая	сильная	577,0
Желтая	сильная	579,1
Оранжевая	слабая	615,2
Красная	слабая	623,2

Таблица 1.2

Длины волны и обозначения главных фраунгоферовых линий

Длина волны, нм	Цвет	Обозначение линий спектра по Фраунгоферу	Элемент, излучающий ли- нию
1153	–	–	He + Ne
1060	–	–	Nd в стекле
766,49	Красный	<i>A'</i>	калий
706,52	Красный	<i>r</i>	гелий
656,28	Красный	<i>C</i>	водород
643,8	Красный	<i>C'</i>	кадмий
589,3	Желтый	<i>D</i>	натрий
587,56	Желтый	<i>d</i>	гелий
546,07	Зеленый	<i>e</i>	ртуть
486,13	Голубой	<i>F</i>	водород
480,0	Голубой	<i>F'</i>	кадмий
435,8	Синий	<i>g</i>	ртуть
434,05	Синий	<i>G'</i>	водород
404,66	Фиолетовый	<i>h</i>	ртуть
365,0	–	<i>i</i>	ртуть

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Данные о градуировке монохроматора УМ-2 по длинам волн n , обратной линейной дисперсии монохроматора $d\lambda/dl$ и относительной спектральной чувствительности фотозлемента Ф-25 $\gamma(\lambda)$

$n,^\circ$	$\lambda, \text{нм}$	$\gamma(\lambda)$	$d\lambda/dl$
1	2	3	4
300	368	0,65	4,24
350	375	0,70	4,52
400	380	0,75	4,72
450	390	0,78	5,16
500	395	0,80	5,39
550	400	0,83	5,63
560	402	0,83	5,72
570	403	0,84	5,77
610	404	0,84	5,82
620	405	0,85	5,87
650	406	0,86	5,92
700	410	0,87	6,12
750	412	0,88	6,22
800	413	0,89	6,27
850	415	0,90	6,38
900	420	0,91	6,64
950	421	0,92	6,69
1000	425	0,93	6,91
1050	428	0,94	7,10
1100	430	0,95	7,20
1110	432	0,95	7,31
1120	433	0,95	7,36
1180	437	0,96	7,60
1190	438	0,96	7,66
1200	440	0,97	7,68
1250	445	0,98	8,10
1300	450	1	8,40
1350	455	0,98	8,72
1400	458	0,96	8,91

$n,^\circ$	$\lambda, \text{нм}$	$\gamma(\lambda)$	$d\lambda/dl$
1	2	3	4
1450	460	0,95	9,05
1500	465	0,94	9,40
1550	468	0,92	9,60
1600	470	0,90	9,70
1650	478	0,88	10,31
1700	480	0,86	10,45
1750	485	0,84	10,83
1800	490	0,83	11,21
1850	495	0,82	11,61
1900	500	0,80	12,01
1950	510	0,79	12,85
2000	515	0,78	13,30
2050	520	0,76	13,73
2100	525	0,75	14,20
2130	527	0,74	14,36
2140	528	0,70	14,46
2265	545	0,68	16,10
2300	555	0,62	17,13
2350	560	0,60	17,66
2360	562	0,59	17,87
2370	564	0,58	18,10
2380	566	0,57	18,31
2385	568	0,56	18,53
2450	580	0,56	19,88
2500	595	0,52	21,80
2550	600	0,50	22,33
2600	615	0,45	24,30

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

*Относительная спектральная плотность потока излучения
источника белого света (лампа накаливания осветителя МУМ
в режиме «НЕДОКАЛ»)*

λ , нм	Φ_{λ} , отн. ед.	λ , нм	Φ_{λ} , отн. ед.	λ , нм	Φ_{λ} , отн. ед.
340	3,2	500	59,0	660	172,1
345	3,7	505	62,1	665	175,5
350	4,3	510	65,3	670	178,8
355	4,9	515	68,6	675	182,0
360	5,6	520	71,9	680	185,1
365	6,4	525	75,3	685	188,2
370	7,2	530	78,7	690	191,5
375	8,2	535	82,2	695	194,7
380	9,1	540	85,7	700	197,7
385	10,2	545	89,3	705	200,5
390	11,4	550	92,8	710	203,4
395	12,6	555	96,4	715	206,1
400	13,9	560	100,0	720	208,9
405	15,3	565	103,7	725	211,6
410	16,8	570	107,3	730	214,3
415	18,4	575	110,9	735	216,9
420	20,1	580	114,5	740	219,5
425	21,8	585	118,1	745	222,0
430	23,7	590	121,7	750	224,4
435	25,6	595	125,3	755	226,6
440	27,7	600	128,9	760	228,9
445	29,8	605	132,6	765	231,0
450	32,0	610	136,3	770	233,1
455	34,3	615	140,0	775	235,1
460	36,7	620	143,6	780	237,0
465	39,2	625	147,2	785	238,9
470	41,8	630	150,9	790	240,7
475	44,4	635	154,5	795	242,5
480	47,2	640	158,1	800	244,2
485	50,0	645	161,7		
490	52,9	650	165,1		
495	55,9	655	168,6		

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Относительное спектральное распределение мощности энергии $S(\lambda)$ в излучениях источников А, В, и С

λ , нм	$S(\lambda)_A$	$S(\lambda)_B$	$S(\lambda)_C$
380	9,79	22,40	33,00
385	10,90	26,85	39,92
390	12,09	31,30	47,40
395	13,36	36,18	55,17
400	14,71	41,30	63,30
405	16,15	46,62	71,81
410	17,68	52,10	80,60
415	19,29	57,70	89,53
420	21,00	63,20	98,10
425	22,79	68,37	105,80
430	24,67	73,10	112,40
435	26,64	77,31	117,75
440	28,70	80,80	121,50
445	30,85	83,44	123,45
450	33,09	85,40	124,00
455	35,41	86,88	123,60
460	37,82	88,30	123,10
465	40,30	90,08	123,30
470	42,87	92,00	123,80
475	45,52	93,75	124,09
480	48,25	95,20	123,90
485	51,04	96,23	122,92
490	53,91	96,50	120,70
495	56,85	95,71	116,90
500	59,86	94,20	112,10
505	62,93	92,37	106,98
510	66,06	90,70	102,30
515	69,25	89,65	98,09
520	72,50	89,50	96,90
525	75,79	90,43	96,78
530	79,13	92,20	98,00
535	82,52	94,46	99,94
540	85,95	96,90	102,10
545	89,41	99,16	103,95
550	92,91	101,00	105,20
555	96,41	102,20	105,67
560	100,00	102,80	105,30
565	103,58	102,92	104,11
570	107,18	102,60	102,30
575	110,80	101,90	100,15
580	114,44	101,00	97,80

λ , нм	$S(\lambda)_A$	$S(\lambda)_B$	$S(\lambda)_C$
585	118,08	100,07	95,43
590	121,73	99,20	93,20
595	125,39	98,44	91,22
600	129,04	98,00	89,70
605	132,70	98,08	88,83
610	136,34	99,50	88,40
615	139,99	99,06	88,19
620	143,62	99,70	88,10
625	147,23	100,36	88,08
630	150,83	101,00	88,00
635	154,42	101,56	87,86
640	157,98	102,20	87,80
645	161,51	103,05	87,99
650	165,03	103,90	88,20
655	168,51	104,59	88,20
660	171,96	105,00	87,90
665	175,38	105,08	87,22
670	178,77	104,90	86,30
675	182,12	104,55	85,30
680	185,43	103,90	84,00
685	188,70	102,84	82,21
690	191,93	101,60	80,20
695	195,12	100,38	78,24
700	198,26	99,10	76,30
705	201,36	97,70	74,36
710	204,41	96,20	72,40
715	207,41	94,60	70,40
720	210,36	92,90	68,30
725	213,26	91,10	66,30
730	216,12	89,40	64,40
735	218,92	88,00	62,80
740	221,66	86,90	61,50
745	224,36	85,90	60,20
750	227,00	85,20	59,20
755	229,58	84,80	58,50
760	232,11	84,70	58,10
765	234,59	84,90	58,00
770	237,01	85,40	59,20
775	239,37	86,10	58,50
780	241,67	87,00	59,10

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

*Координаты цветности и удельные координаты цвета
в системе XYZ*

x_λ	y_λ	z_λ	λ , нм	\bar{x}_λ	\bar{y}_λ	\bar{z}_λ
0,1741	0,0050	0,8209	380	0,0014	0,0000	0,0065
0,1740	0,0050	0,8210	385	0,0022	0,0001	0,0105
0,1738	0,0049	0,8213	390	0,0042	0,0001	0,0201
0,1736	0,0049	0,8215	395	0,0076	0,0002	0,0362
0,1733	0,0048	0,8219	400	0,0143	0,0004	0,0679
0,1730	0,0048	0,8222	405	0,0232	0,0006	0,1102
0,1726	0,0048	0,8226	410	0,0435	0,0012	0,2074
0,1721	0,0048	0,8231	415	0,0776	0,0022	0,3713
0,1714	0,0051	0,8235	420	0,1344	0,0040	0,6456
0,1703	0,0068	0,8239	425	0,2148	0,0073	1,0391
0,1689	0,0069	0,8242	430	0,2839	0,0116	1,3856
0,1669	0,0086	0,8245	435	0,3285	0,0168	1,6230
0,1644	0,0109	0,8247	440	0,3483	0,0230	1,7471
0,1611	0,0138	0,8251	445	0,3481	0,0298	1,7826
0,1566	0,0177	0,8257	450	0,3362	0,0380	1,7721
0,1510	0,0227	0,8263	455	0,3187	0,0480	1,7441
0,1440	0,0297	0,8263	460	0,2908	0,0600	1,6692
0,1355	0,0399	0,8246	465	0,2511	0,0739	1,5281
0,1241	0,0578	0,8181	470	0,1954	0,0910	1,2876
0,1096	0,0868	0,8036	475	0,1421	0,1126	1,0419
0,0913	0,1327	0,7760	480	0,0956	0,1390	0,8130
0,0687	0,2007	0,7306	485	0,0580	0,1693	0,6162
0,0454	0,2950	0,6596	490	0,0320	0,2080	0,4652
0,0235	0,4127	0,5638	495	0,0147	0,2586	0,3533
0,0082	0,5384	0,4534	500	0,0049	0,3230	0,2720
0,0039	0,6548	0,3413	505	0,0024	0,4073	0,2123
0,0139	0,7502	0,2359	510	0,0093	0,5030	0,1582
0,0389	0,8120	0,1491	515	0,0291	0,6082	0,1117
0,0743	0,8338	0,0919	520	0,0633	0,7100	0,0782
0,1142	0,8262	0,0596	525	0,1096	0,7932	0,0573
0,1547	0,8059	0,0394	530	0,1655	0,8620	0,0422
0,1929	0,7816	0,0255	535	0,2257	0,9149	0,0298
0,2296	0,7543	0,0161	540	0,2904	0,9540	0,0203
0,2658	0,7243	0,0099	545	0,3597	0,9803	0,0134
0,3016	0,6923	0,0061	550	0,4334	0,9950	0,0087
0,3373	0,6589	0,0038	555	0,5121	1,0002	0,0057
0,3731	0,6245	0,0024	560	0,5945	0,9950	0,0039
0,4087	0,5896	0,0017	565	0,6784	0,9786	0,0027
0,4441	0,5547	0,0012	570	0,7621	0,9520	0,0021
0,4788	0,5202	0,0010	575	0,8425	0,9154	0,0018

Окончание приложения 5

x_λ	y_λ	z_λ	λ , нм	\bar{x}_λ	\bar{y}_λ	\bar{z}_λ
0,5125	0,4866	0,0009	580	0,9163	0,8700	0,0017
0,5448	0,4544	0,0008	585	0,9786	0,8163	0,0014
0,5752	0,4242	0,0006	590	1,0263	0,7570	0,0011
0,6029	0,3965	0,0006	595	1,0567	0,6949	0,0010
0,6270	0,3725	0,0005	600	1,0622	0,6310	0,0008
0,6482	0,3514	0,0004	605	1,0456	0,5668	0,0006
0,6658	0,3340	0,0002	610	1,0026	0,5030	0,0003
0,6801	0,3197	0,0002	615	0,9384	0,4412	0,0002
0,6915	0,3083	0,0002	620	0,8544	0,3810	0,0002
0,7006	0,2993	0,0001	625	0,7514	0,3210	0,0001
0,7079	0,2920	0,0001	630	0,6424	0,2650	0,0000
0,7140	0,2859	0,0001	635	0,5419	0,2170	0,0000
0,7190	0,2809	0,0001	640	0,4479	0,1750	0,0000
0,7230	0,2770	0,0000	645	0,3608	0,1382	0,0000
0,7260	0,2740	0,0000	650	0,2836	0,1070	0,0000
0,7283	0,2717	0,0000	655	0,2187	0,0816	0,0000
0,7300	0,2700	0,0000	660	6,1649	0,0610	0,0000
0,7311	0,2689	0,0000	665	0,1212	0,0446	0,0000
0,7320	0,2680	0,0000	670	0,0874	0,0320	0,0000
0,7327	0,2673	0,0000	675	0,0636	0,0232	0,0000
0,7334	0,2666	0,0000	680	0,0468	0,0170	0,0000
0,7340	0,2660	0,0000	685	0,0329	0,0119	0,0000
0,7344	0,2656	0,0000	690	0,0227	0,0082	0,0000
0,7346	0,2654	0,0000	695	0,0158	0,0057	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	700	0,0114	0,0041	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	705	0,0081	0,0029	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	710	0,0058	0,0021	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	715	0,0041	0,0015	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	720	0,0029	0,0010	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	725	0,0020	0,0007	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	730	0,0014	0,0005	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	735	0,0010	0,0004	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	740	0,0007	0,0003	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	745	0,0005	0,0002	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	750	0,0003	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	755	0,0002	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	760	0,0002	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	765	0,0001	0,0000	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	770	0,0001	0,0000	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	775	0,0000	0,0000	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	780	0,0000	0,0000	0,0000
				21,3713	21,3714	21,3715

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г.С. Оптика: учебное пособие для вузов. – 6-е изд. стереот. – М: Физматлит, 2003. – 848 с.
2. Гуревич М.М. Фотометрия. Теория, методы и приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 290 с.
3. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию: учебное пособие для студентов. – М.: Наука, 1979. – 480 с.
4. Ильин Р.С., Федотов Г.И., Федин Л.А. Лабораторные оптические приборы: учебное пособие для приборостроительных вузов. – М.: Машиностроение, 1966. – 496 с.
5. Эпштейн М.И. Измерение оптического излучения в электронике. – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.
6. Бабко А.К., Пилипенко А.Т. Фотометрический анализ. Общие сведения и аппаратура. – М.: Химия, 1968. – 388 с.
7. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.: ил.
8. Соловьев В.А, Яхонтова В.Е. Руководство к лабораторным работам по физике: учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. – 340 с.: ил.
9. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: учебное пособие для вузов: в 2-х ч. Физиологическая оптика и колориметрия. – М: Энергоатомиздат, 1989. – Ч. 2. – 432 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРА	3
Лабораторная работа № 2 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ	19
Лабораторная работа № 3 ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКОВ СВЕТА.....	31
Лабораторная работа № 4 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ	42
Лабораторная работа № 5 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ НА СПЕКТРОФОТОМЕТРЕ СФ-18.....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	72
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	73
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	74
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	75
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	78

Учебное издание

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО СПЕЦГЛАВАМ ОПТИКИ**

Методические указания для выполнения лабораторных работ по курсу «Спецглавы оптики» для бакалавров и магистрантов, обучающихся по направлению 200200 «Оптика»

Составитель

ДЕНИСОВ Игорь Петрович

Редактор

А.В. Высоцкая

Верстка

В.П. Аршинова

Дизайн обложки

О.Ю. Аршинова

О.А. Дмитриев

Подписано к печати 18.11.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,21.


Заказ 831. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.