

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

А.Г. АНДРЕЕВ, В.С. ГОРЕЛИК, С.В. БАШКИН, В.Л. ГЛУШКОВ

СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТОФИЛЬТРОВ

Методические указания к лабораторной работе О-64 по курсу общей физики

Под редакцией О.С.ЕРКОВИЧ

МГТУ, 2011

Изложен метод получения зависимости коэффициента пропускания светофильтра от длины волны. Для студентов 2-го курса всех специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Цель работы - исследование спектральных характеристик абсорбционных светофильтров на основе цветного стекла.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При прохождении света через вещество часть световой энергии исходного светового пучка переходит в энергию рассеянного излучения или в тепловую энергию материальной среды. В соответствии с этим происходит ослабление светового пучка на выходе из материальной среды. Такое явление называют поглощением, или абсорбцией света в веществе, а раздел спектроскопии, связанный с анализом поглощения света в среде в зависимости от длины волны (или частоты) исходного излучения, называют абсорбционной спектрометрией.

Если толщина слоя вещества, поглощающего световое излучение, невелика, то можно полагать, что изменение интенсивности светового пучка из вещества пропорционально толщине поглощающего слоя (рис. 1), т.е.

$$dI = -\alpha I dl \quad (1)$$

Здесь I - интенсивность светового пучка, падающего на слой вещества толщиной dl , α - коэффициент, не зависящий от интенсивности I (линейное приближение). Знак «минус» в (1) при $\alpha > 0$ соответствует тому, что свет поглощается в среде.

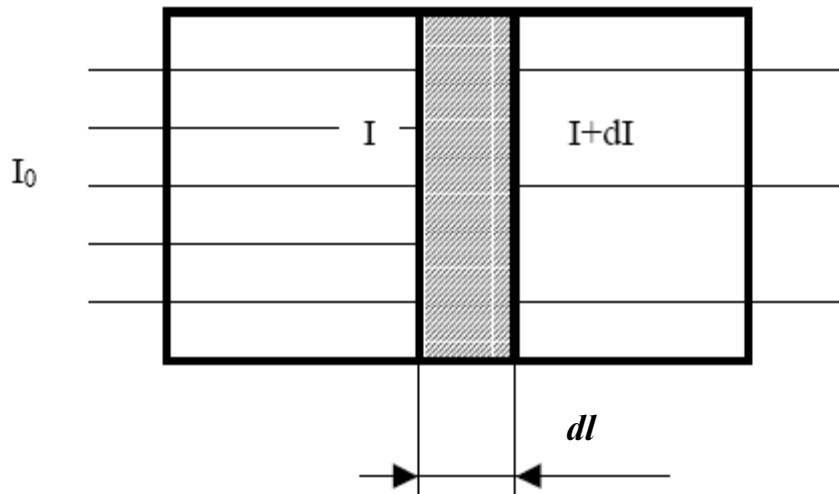


Рис. 1.

Интегрирование (1) приводит к **закону Бугера** (1729 г.) для интенсивности $I(l)$ света на глубине l поглощающего слоя:

$$I(l) = I_0 e^{-\alpha l} \quad (2)$$

где l - толщина поглощающего слоя.

Коэффициент α называют **коэффициентом поглощения (абсорбции)**. В соответствии с (2) физический смысл этого коэффициента состоит в том, что величина $1/\alpha$ численно равна такой толщине вещества, на которой интенсивность падающего света (без учета отражений на границах) уменьшается в e ($\approx 2,72$) раз. Коэффициент α может изменяться в зависимости от длины волны (или частоты) падающего излучения. Зависимость $\alpha(\lambda)$ обычно изображают в виде графика (рис. 2) или таблицы. Такой график называют **спектром поглощения** рассматриваемого вещества.

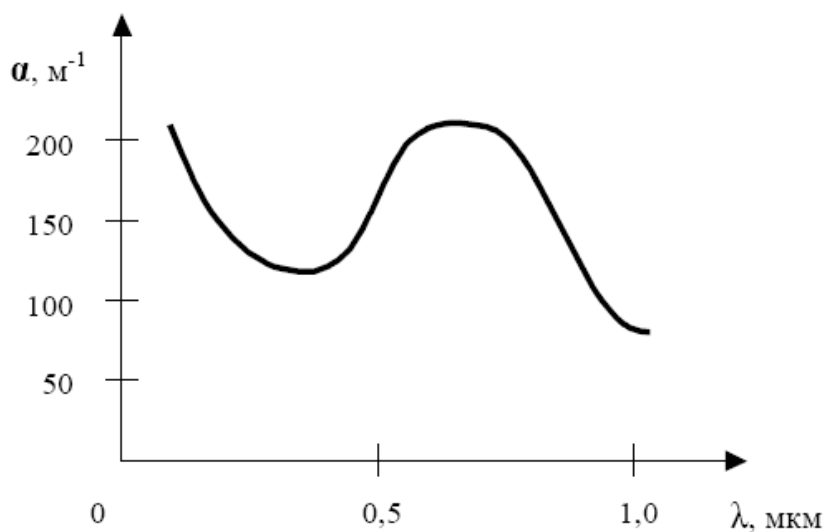


Рис. 2.

Теоретическое обоснование закона Бугера может быть получено на основе простой модели затухающего гармонического осциллятора, соответствующего колебанию электронов атома вблизи положений их равновесия. В реальных средах колебания являются затухающими, это связано с тем, что часть энергии в процессе колебаний переходит в теплоту. Запишем уравнение движения электрона в поле гармонической электромагнитной волны:

$$m\ddot{z} = -bz - g\dot{z} + eE \quad (3)$$

где z – смещение осциллятора из положения равновесия.

Если искать решение (3) в виде $z = z_0 e^{-i\omega t}$, при $E = E_0 e^{-i\omega t}$, то мы приходим к соотношению

$$z_0 = \frac{(e/m)E_0}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \quad (4)$$

где $\omega_0^2 = \frac{b}{m}$, $\gamma = \frac{g}{m}$.

Поляризованность, т.е. дипольный момент единицы объема среды, возникающий под действием внешнего поля E , принимает вид

$$P_0 = ez_0 N_0 = \frac{e^2 N_0 E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \quad (5)$$

где N_0 - число поглощающих молекул или атомов в единице объема, ez_0 – величина дипольного момента атома.

Учитывая комплексный характер поляризованности (5) и $P_0 = \chi \varepsilon_0 E_0 = (\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E_0$, приходим к выводу, что и диэлектрическая проницаемость среды также комплексна: $\hat{\varepsilon} = \varepsilon' + i\varepsilon''$:

$$\hat{\varepsilon}(\omega) = 1 + \frac{e^2 N_0}{\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega - i\gamma\omega)} \quad (6)$$

Диэлектрическая проницаемость $\hat{\varepsilon}$ связана с комплексным показателем преломления

$$\hat{n} = \sqrt{\hat{\varepsilon}(\omega)} = n_1 + in_2 \quad (7)$$

$$\text{При этом } n_1^2 - n_2^2 = \varepsilon'(\omega), \quad 2n_1n_2\varepsilon''(\omega) = \frac{e^2 N_0 \gamma \omega}{\varepsilon_0 m \left[(\omega_0^2 - \omega)^2 + \gamma^2 \omega^2 \right]}.$$

Действительная часть n_1 показателя преломления определяет пространственную периодичность электромагнитной волны, а мнимая часть – ее затухание по мере распространения в глубь вещества. Для плоских световых волн, распространяющихся в поглощающей среде, амплитуда волны следующим образом изменяется с расстоянием:

$$E = E_0 e^{ikl} = E_0 e^{\frac{i\omega}{c} \hat{n}l} = E_0 e^{\frac{i\omega}{c} n_1 l} e^{-\frac{\omega}{c} n_2 l}$$

Соответственно, для интенсивности света, пропорциональной квадрату модуля амплитуды, получаем ($I \sim |E|^2$):

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (8)$$

где

$$\alpha(\omega) = \alpha \left(\frac{2\pi c}{\lambda} \right) = \frac{2\omega}{c} n_2 = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 = \frac{e^2 N_0 \gamma \omega}{\varepsilon_0 m \left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2 \right]} \cdot \frac{\omega}{c n_1} \quad (9)$$

В реальном веществе имеется несколько типов осцилляторов, и выражение для коэффициента $\alpha(\omega)$ может принимать более сложный вид. При этом кривая поглощения является суперпозицией зависимостей типа (9) с различными весовыми коэффициентами $F_i (0 \leq F_i \leq 1)$, т.е.

$$\alpha'(\omega) = \sum_i \frac{e^2 F_i N_0 \gamma_i \omega^2}{\varepsilon_0 m_i \left[(\omega_{0i}^2 - \omega^2)^2 + \gamma_i^2 \omega^2 \right]} c n_1 \quad (10)$$

Как следует из (9) и (10), величина $\alpha'(\omega)$ не зависит от интенсивности падающего света, что и является теоретическим подтверждением закона Бугера.

Из-за того, что коэффициент поглощения α зависит от длины волны, поглощающие вещества окрашены. Например, стекло, слабо поглощающее красные лучи и сильно поглощающее синие и зеленые лучи, при освещении белым светом будет казаться красным, а при освещении синим и зеленым светом – черным из-за сильного поглощения. Это явление используется в светофильтрах, которые в зависимости от химического состава пропускают свет только определённых длин волн. Таким образом, чем больше α для данной длины волны, тем отчетливее обнаружится ослабление соответствующих участков спектра поглощения.

Спектральные характеристики стекол. Спектральные характеристики стекол характеризуется численными значениями **показателя поглощения** k_λ или оптической плотности D_λ для различных длин волн и спектральными кривыми коэффициента пропускания τ_λ и логарифма оптической плотности D_λ .

Показатель поглощения стекла k_λ для света длиной волны λ ; определяется из выражения:

$$k_\lambda = \frac{-\lg \tau_\lambda}{l} \quad (11)$$

где τ_λ - коэффициент пропускания (отношение интенсивностей прошедшего и падающего излучений) стекла толщиной l (мм) для монохроматического света длиной волны λ .

Оптическая плотность D_λ стекла для монохроматического света длиной волны λ связана с показателем поглощения k_λ и коэффициентом пропускания τ_λ следующим соотношением:

$$D_\lambda = -\lg \tau_\lambda = k_\lambda l \quad (12)$$

При расчете оптической плотности светофильтра необходимо учитывать, кроме поглощения света, потери на отражение от двух поверхностей стекла и вводить соответствующую поправку.

Коэффициент пропускания τ_λ светофильтра толщиной l (мм) при перпендикулярном падении монохроматического света данной длины волны равен:

$$\tau'_\lambda = (1 - \rho)^2 \tau_\lambda = (1 - \rho)^2 10^{-k_\lambda l} \quad (13)$$

где ρ - коэффициент отражения (отношение интенсивностей отраженного и падающего излучений).

Оптическая плотность D'_λ светофильтра для данной длины волны равна:

$$D'_\lambda = -\lg \tau'_\lambda = D_\lambda + D_\rho = k_\lambda l + D_\rho \quad (14)$$

где D_ρ - поправка на отражение света от двух поверхностей стекла.

Поправка на отражение определяется из выражения

$$D_\rho = -2\lg(1 - \rho) \quad (15)$$

где коэффициент отражения ρ определяется по формуле Френеля:

$$\rho = \left(\frac{n_1 - l}{n_1 + l} \right)^2 \quad (16)$$

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная установка рис.3 состоит из следующих узлов

1. монохроматор МУМ-01;
2. кюветное отделение;
3. модуль фотоприемника;
4. модуль осветителя;
5. блок обработки сигнала;
6. мультиметр;

В узле излучателя установлен специальный светодиод белого цвета, излучающий в диапазоне 400..700 нм. Узел излучателя закреплен непосредственно перед входной щелью монохроматора на его корпусе. За входной щелью установлен объектив, формирующий параллельный световой пучок, проходящий кюветное отделение и попадающий на фотодиод фотоприемного узла.

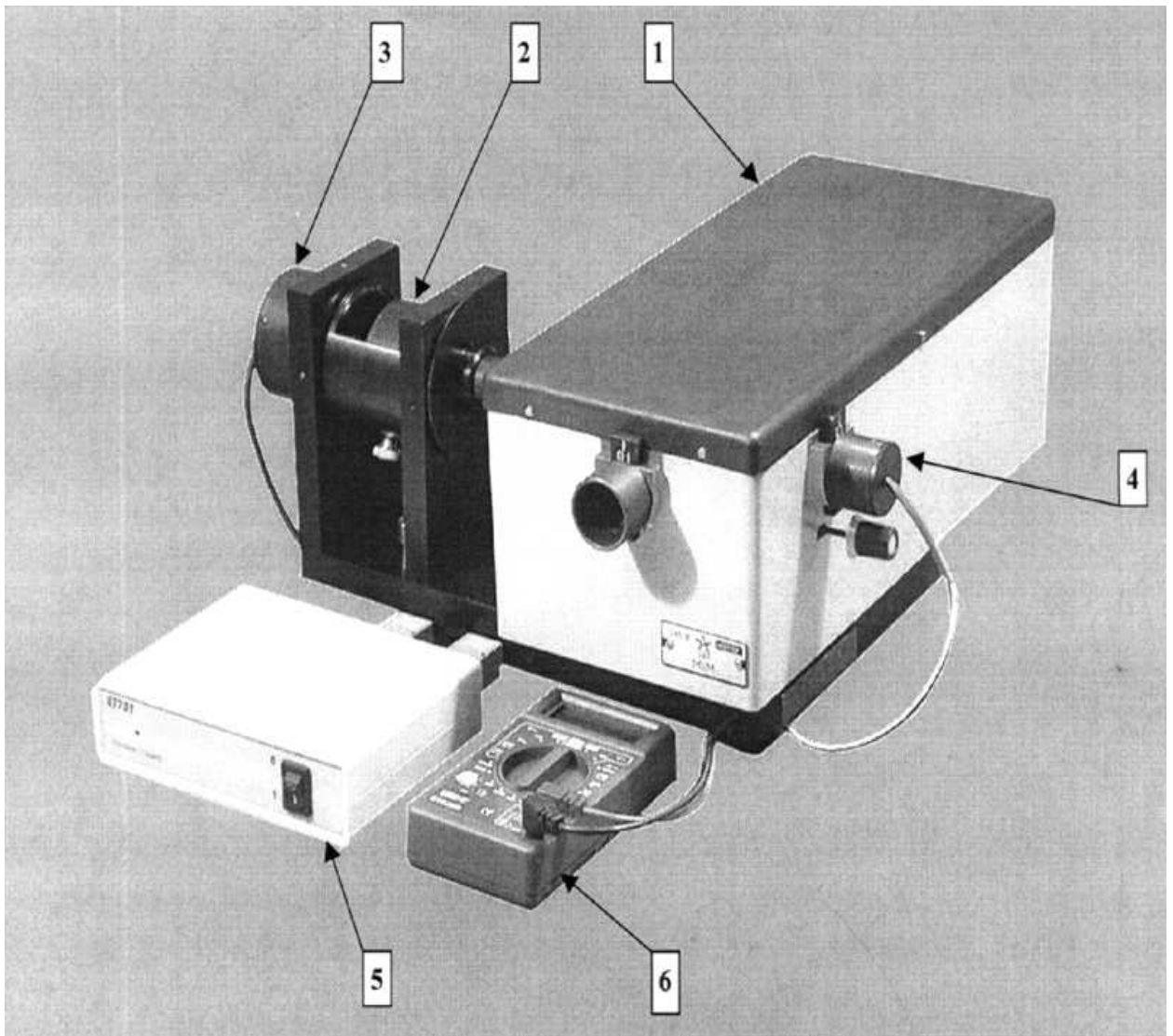


Рис. 3.

Оптическая схема установки приведена на рис. 4. В качестве диспергирующего и фокусирующего элемента в монохроматоре использована вогнутая дифракционная решетка с переменным шагом нарезки и криволинейными штрихами, что дает возможность значительно скомпенсировать расфокусировку и другие aberrации. Излучение от светодиода 1 попадает на входную щель 2 и посредством зеркала 3 направляется на дифракционную решетку 4. Дифракционная решетка строит изображение входной щели 3 в плоскости выходной щели 6. Зеркала 3 и 5 осуществляют излом оптической оси системы для более компактного размещения элементов в корпусе. Кроме того, зеркало 3 может быть выведено из хода лучей с помощью рукоятки на корпусе монохроматора. В этом случае в качестве входной щели может быть использована щель 10 (в настоящей работе этот режим не используется, и щель 10 является резервной). За выходной щелью 6 установлена оптическая система из линз 7, которая формирует параллельный пучок, направляемый через кюветное

отделение с установленным в нем объектом исследования 8 на фотодиод 9 фотоприемного узла.

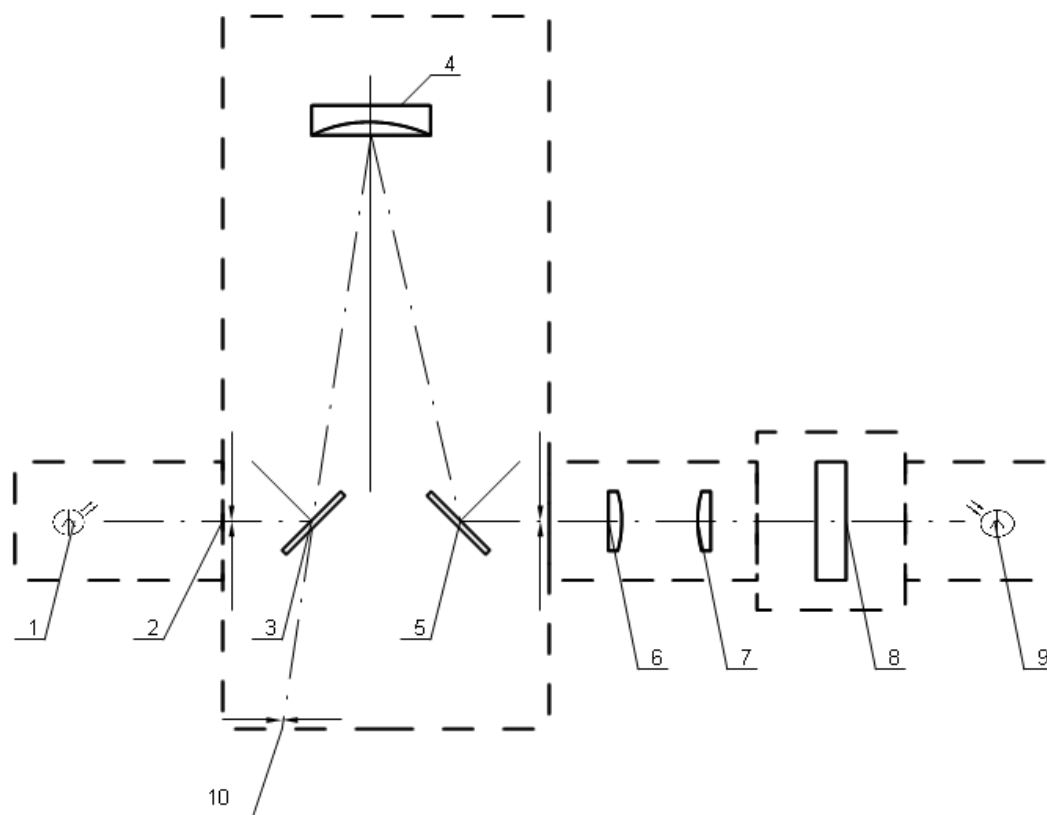


Рис. 4.

Сканирование спектра осуществляется поворотом решетки 4 вокруг оси 0 на угол φ в пределах от $\varphi_0=6^{\circ}54''$ до $\varphi_k=28^{\circ}44''$. Движения решетки обеспечивается синусным механизмом, в котором для перемещения опорной поверхности служит винт.

Основные спектральные характеристики:

Рабочий диапазон длин волн монохроматора 290 - 800 нм,

Рабочий диапазон длин волн спектрофотометрического тракта (излучатель монохроматор фотоприемник) 370 - 700 нм,

Величины обратной линейной дисперсии - 3,2 нм/мм,

Щели на выходе и входе монохроматора сменные, постоянной ширины. Для получения большей спектральной чистоты выделяемого излучения при работе в области спектра от 330 до 660 нм входная и выходная щели устанавливаются в положение I, а при работе в области спектра от 200 до 260 и от 730 до 80 нм щели устанавливаются в положение II, в областях от 260 до 330 нм и от 660 до 730 нм входная - в положение I(II), и выходная в

положение II(I). В настоящей работе фотоприемный тракт работает в диапазоне 370 - 670 нм, поэтому входная и выходная щели могут быть оставлены в положении I.

Исследуемый образец помещают в тубус с закрывающейся крышкой. В качестве объектов для исследования прилагаются светофильтры из цветного оптического стекла.

Функциональная схема блока обработки сигнала приведена на рис. 5.

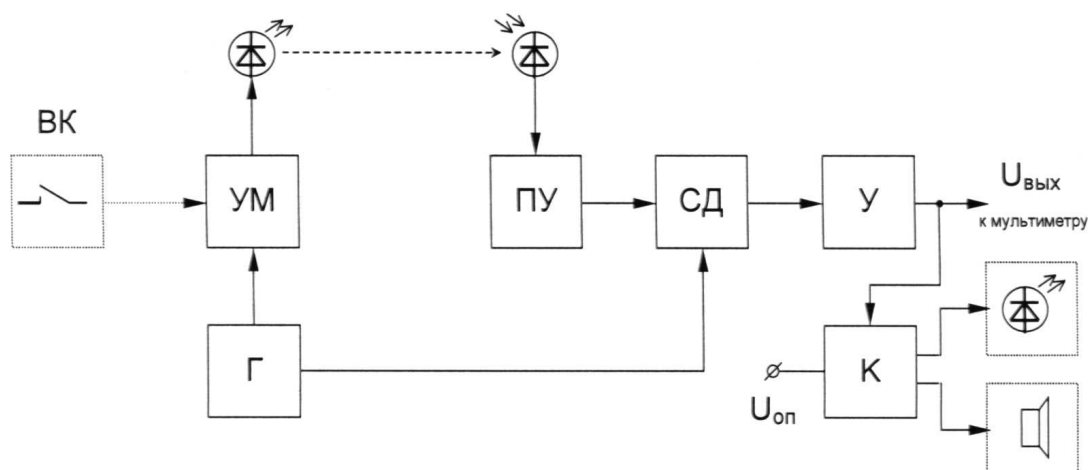


Рис. 5.

Для повышения соотношения сигнал/шум и устранения влияния посторонних засветок питание светодиода излучателя осуществляется модулированным током частотой ~ 20 кГц задаваемой генератором Г. Сигнал с фотодиода фотоприемного узла усиливается предварительным усилителем ПУ и поступает на вход синхронного детектора СД, на который также подается сигнал опорной частоты от генератора Г. Выработываемое синхронным детектором напряжение усиливается и подается на вход измерительного прибора (мультиметра). Одновременно это напряжение поступает на вход компаратора К, на второй вход которого поступает опорное напряжение $U_{оп}$. Величина опорного напряжения соответствует верхней границе динамического диапазона тракта (в пределах этого диапазона сохраняется линейность световой характеристики тракта). При превышении измеряемым сигналом уровня опорного напряжения компаратор включает световую и звуковую индикацию. В этом случае с помощью переключателя ВК следует изменить (уменьшить) ток через светодиод излучателя, что приводит к соответствующему уменьшению мощности излучаемого светового потока.

Порядок выполнения эксперимента и обработки результатов измерений.

Порядок проведения измерений:

1. Включите источник питания и вольтметр. Установите на мультиметре предел измерений 20 В.

2. Установите входную и выходную щели 0,25 мм в положении I.
3. Подождите не менее 5 минут для стабилизации теплового режима приемника излучения.
4. Произведите калибровку оптической системы. Для этого следует при пустом закрытом тубусе кюветного отделения снять зависимость показаний мультиметра U_0 от длины волны λ в диапазоне длин волн от 370 до 830 нм с шагом 10 нм. При необходимости переключайте пределы измерения мультиметра (20В, 2В, 200мВ).
5. Поместите в тубус кюветного отделения, поочередно прилагаемые светофильтры (**нужно выбрать два светофильтра по согласованию с преподавателем**) и снимите соответствующие зависимости показаний мультиметра (U_i) от λ для каждого светофильтра в том же диапазоне длин волн (длину волны рекомендуется устанавливать с тем же шагом, что и в п. 4).

Длина волны λ , нм	Напряжение			Коэффициент пропускания	
	Без светофильтра U_0 , В	Светофильтр 1 U_{11} , В	Светофильтр 2 U_{12} , В	τ_1	τ_2

6. Выключите источник питания и мультиметр.
 - Если измеренное вольтметром напряжение составляет менее 0.1 В, то рекомендуется установить щели большей ширины или снять щель перед источником излучения.
 - При больших световых потоках возможна перегрузка приемника излучения. При этом включается красный мигающий индикатор перегрузки и раздается звуковой сигнал. В этом случае рекомендуется уменьшить мощность источника излучения, переводя переключатель на блоке обработки сигнала в положение 0.
7. Постройте графики зависимости коэффициента пропускания от длины волны $\tau(\lambda)=U_i/U_0$.
8. Сделайте соответствующие физические выводы, охарактеризуйте цвет фильтра по полученной для него спектральной характеристике.

В качестве дополнительного задания предлагается рассчитать и построить графики зависимости коэффициента поглощения и оптической плотности от длины волны. Для упрощения расчетов потери на отражение на входной и выходной гранях светофильтра предлагается принять равными $\sim 3\%$ и не зависящими от длины волны. Толщину светофильтра принять равной 2 мм.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое свет?
2. Напишите закон Бугера и объясните физический смысл коэффициента поглощения α .
3. От чего зависит коэффициент поглощения?
4. Что такое коэффициент пропускания?
5. Назовите спектральные характеристики стекол.
6. Почему для определения коэффициента пропускания, необходимо брать отношение U_1 к U_0 ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: ГИИТП, 1978.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1990.
3. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высш. школа, 1986.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2, М.: Наука, 1988.
5. Литвинов О.С., Горелик В.С. Электромагнитные волны и оптика. М.: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006.