

Интерференционные светофильтры.

Цель работы: изучить принцип действия интерференционных фильтров и определить их спектральные характеристики.

Светофильтрами называются устройства, меняющие спектральный состав или энергию падающей на них световой волны, не меняя (или почти не меняя) формы ее фронта.

Основная характеристика светофильтра - пропускание $T = I/I_0$, где I и I_0 - интенсивности прошедшего и падающего на него света.

Фильтры называются *серыми*, или *нейтральными*, если их пропускание в исследуемом спектральном интервале не зависит от длины волны. Светофильтры, не удовлетворяющие этому условию, называются *селективными*.

Селективные фильтры предназначаются либо для отделения широкой области спектра, либо для выделения узкой спектральной области. Светофильтры последнего типа называются *узкополосными*.

Для создания узкополосных светофильтров может быть использована многолучевая интерференция. Простейший *интерференционный светофильтр* представляет собой интерферометр Фабри - Перо с очень малым промежутком между зеркалами (от $\lambda/2$ до нескольких длин волн).

Интерференционный светофильтр состоит из тонкого плоскопараллельного диэлектрического слоя с показателем преломления n , на обе поверхности которого нанесены отражающие слои с коэффициентом отражения R (рис.1). На выходе системы образуется бесконечная последовательность убывающих по амплитуде лучей с равной разностью хода между ними, которые интерферируют между собой.

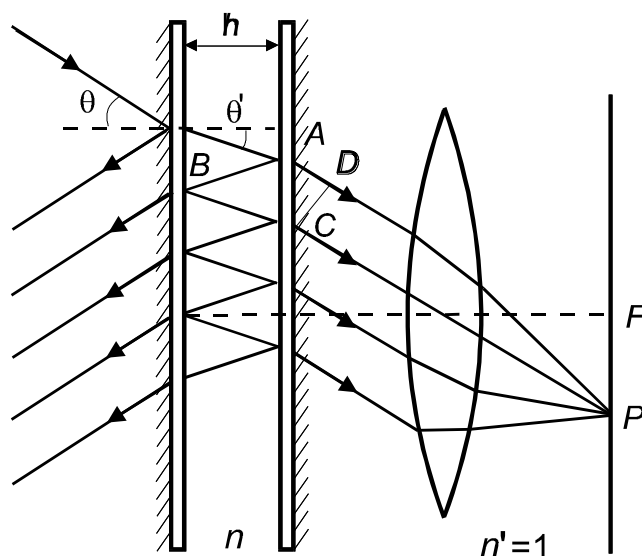


Рис. 1. Образование полос равного наклона при многолучевой интерференции в интерферометре Фабри-Перо.

Отражение света от двух параллельных плоскостей приводит к образованию локализованных в бесконечности (или фокальной плоскости линзы) интерференционных полос равного наклона.

Разность хода двух соседних интерферирующих лучей Δ определяется соотношением:

$$\Delta = n(ABC) - n'(AO) = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = 2hn \cos \theta', \quad (1)$$

где h - толщина диэлектрического слоя, θ - угол падения света, θ' - угол преломления, n - показатель преломления диэлектрика, n' - показатель преломления окружающей среды (предполагается, что $n' = 1$).

В случае, если поглощение в интерферометре отсутствует, то его пропускание описывается формулой Эйри:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{1 + F \sin^2 \delta / 2}, \quad (2)$$

где $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2dn \cos \theta'$.

Максимумы интенсивности в проходящем свете будут расположены там, где Δ составляет целое число длин волн:

$$2nh \cos \theta' = m\lambda. \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

При выполнении условия (3) система является прозрачной и может служить фильтром с максимумами пропускания при $\lambda = \lambda_0$, $\lambda = \lambda_0/2$, $\lambda = \lambda_0/3$ и т.д., соответственно для $m = 1, 2, 3, \dots$

Фрагмент спектра пропускания интерференционного светофильтра при различных значениях коэффициента отражения R , приведен на рис.2, где $\lambda_0 = 2nh \cos \theta'$.

Чем выше коэффициент отражения зеркал, тем селективнее фильтр, т.е. его пропускание быстрее падает с отступлением длины волны света от λ_0 , $\lambda_0/2$, $\lambda_0/3$ и т.д.

Фильтр, предназначенный для выделения первой, наиболее длинноволновой полосы пропускания, называется *фильтром первого порядка* ($m = 1$). Подбором h можно совместить один из максимумов с требуемым значением длины волны λ_0 .

При этом возникает необходимость в подавлении коротковолновых максимумов пропускания с длинами волн $\lambda_0/2$, $\lambda_0/3$ и т.д. Обычно это легко осуществляется либо специальными абсорбционными фильтрами, либо поглощением материала подложки самого фильтра. Оставшийся максимум при достаточно высокой отражательной способности R зеркальных слоев может быть очень узок.

Фильтр второго порядка ($m = 2$), выделяющий длину волны $\lambda_0/2$, нуждается в подавлении одной полосы пропускания с длинноволновой стороны (λ_0) и коротковолновых полос ($\lambda_0/3$, $\lambda_0/4$ и т.д., рис.2). Можно создать фильтры и более высоких порядков.

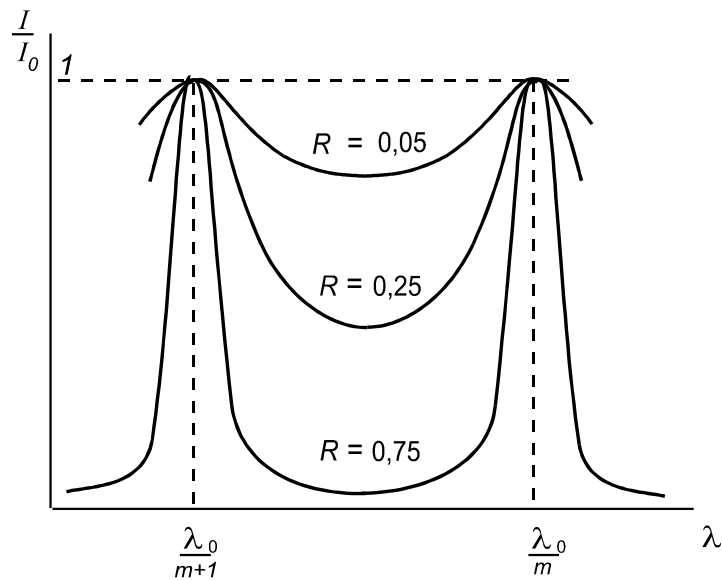


Рис.2. Фрагмент спектра пропускания интерференционного светофильтра

Таким образом, комбинация интерферометра Фабри-Перо с очень маленькой оптической толщиной между отражающими поверхностями и фильтра, выделяющего широкую область спектра, обладает избирательной пропускающей способностью. Такая оптическая система называется *интерференционным светофильтром*.

Важными характеристиками светофильтра являются (рис.3):

- величина максимального пропускания T_{max} ;
- длина волны максимума пропускания λ_{max} ;
- ширина полосы пропускания $\delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, где λ_2 и λ_1 - длины волн, на которых пропускание уменьшается в два раза: $T = T_{max}/2$;
- фактор контраста, который дает отношение максимального и минимального пропусканий.

Ширина полосы пропускания интерференционного светофильтра намного меньше, чем у обычного абсорбционного фильтра (например, у цветного стекла), и может составлять до десятых долей нм при пропускании в максимуме в десятки процентов.

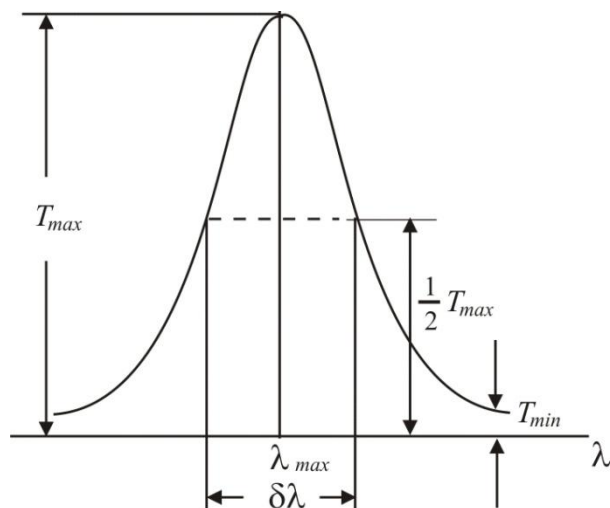


Рис.3. Спектр пропускания интерференционного светофильтра.

Длину волны максимума пропускания λ_{\max} можно сдвигать в сторону меньших значений поворотом интерференционного фильтра, увеличивающим угол падения θ (см. рис.1 и соотношение (1)). Однако область такой перестройки ограничена, поскольку коэффициент отражения R от многослойных диэлектрических зеркал также зависит от угла падения и, в общем случае, максимален для угла θ , на который был рассчитан фильтр.

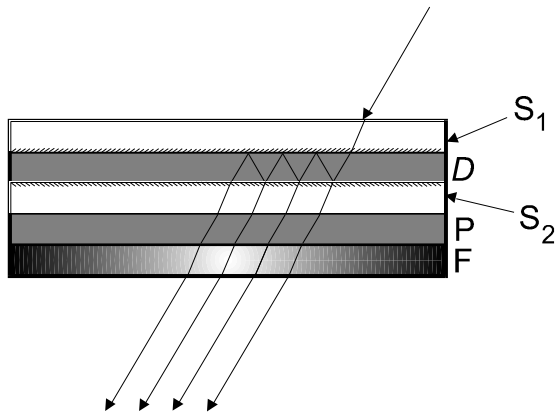


Рис. 4. Устройство интерференционного светофильтра

Интерференционный светофильтр изготавливается следующим образом: на стеклянную или какую - либо другую подложку P , прозрачную в рабочей области фильтра (рис.4), наносится путем испарения в вакууме последовательно полупрозрачное зеркало S_2 , прозрачный разделительный слой D и второе зеркало S_1 (S_1 и S_2 могут быть как металлическими, так и многослойными диэлектрическими зеркалами). F - широкополосный

отражающий или поглощающий фильтр. В настоящее время промышленно изготавливаются интерференционные фильтры для областей спектра от ближнего ультрафиолета до инфракрасной области. В данной работе исследуются интерференционные светофильтры для видимой области спектра.

Решаемые задачи:

- зарегистрировать спектры пропускания интерференционных светофильтров при нормальном падении и определить: T_{\max} , λ_{\max} , $\delta\lambda$, фактор контраста и R ;
- проанализировать зависимость максимума полосы пропускания интерференционного светофильтра от угла падения света.

Оптические элементы и аппаратура (рис.5):

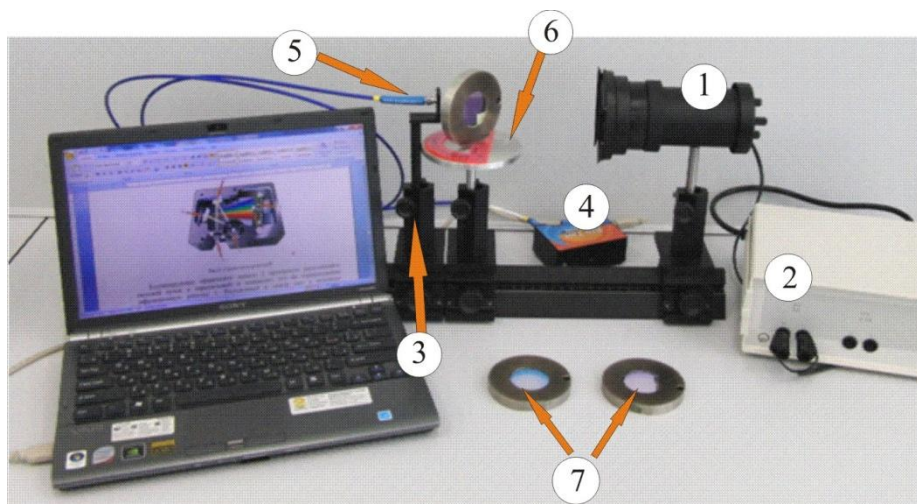



Рис.5. Внешний вид экспериментальной установки

- ✓ Источник излучения, лампа накаливания 1, с блоком питания 2;
- ✓ держатель световода 3;
- ✓ спектрометр Red Tide USB-650 (4);
- ✓ световод 5 (оптическое волокно), связывающий держатель со спектрометром;
- ✓ подставка 6 с транспортом для установки светофильтров;
- ✓ набор интерференционных светофильтров 7 (C1, C2 и C3);
- ✓ компьютер с установленной программой Spectra Suit.

Настройка спектрометра и программной оболочки.

Откройте программу Spectra Suit, используя пиктограмму  на рабочем столе компьютера. Подсоедините спектрометр к компьютеру через USB порт.

Закройте в рабочем окне программы (рис.6) вспомогательные окна 1 и 2. Регистрируемый спектр будет выводиться в окне 3.

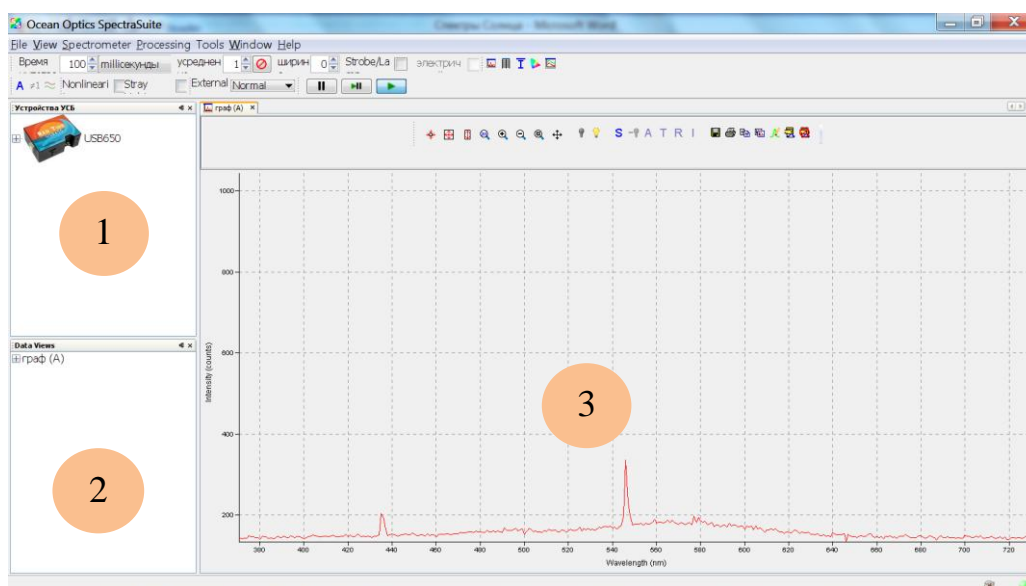


Рис.6. Рабочее окно программы

Кнопки работы со спектрами находятся на панели, показанной на рис.7:

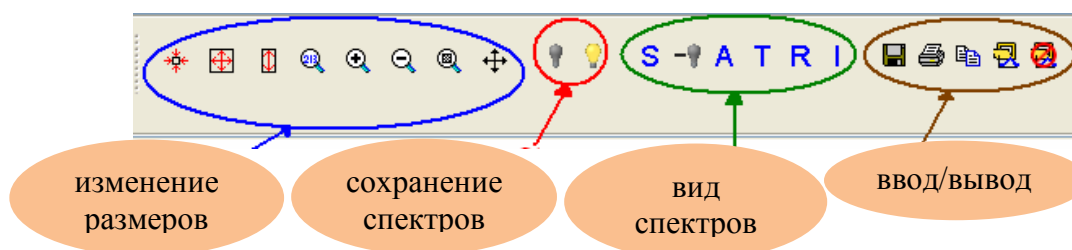


Рис.7. Кнопки работы со спектрами



- вывод на дисплей всего спектрального диапазона (от 350 до 1000 нм).



- масштабирование спектра по осям X и Y на весь экран.




- масштабирование спектра по оси Y на весь экран.



- ручная установка масштабов по осям X и Y.



и  - кнопки увеличения и уменьшения размеров спектра (можно также воспользоваться прокруткой колеса мыши)



- увеличение масштаба выбранной области. Нажав левую клавишу мыши выделите прямоугольную область на экране, которую Вы хотите увеличить.



- кнопка просмотра нескольких спектров на одном слое.



- кнопка сохранения темного спектра.



- кнопка сохранения эталонного спектра.



- выбор режима регистрации.



- вычитание темного спектра.

В зависимости от выбора режима возможна регистрация спектров оптической плотности A , пропускания $T = I/I_0$, коэффициента отражения R и относительной освещенности I .

Группа кнопок позволяет осуществить ввод/вывод спектров:



-сохранение спектра в различных форматах (Grams SPC, JCAMP, binary (only SpectraSuite can read) or tab-delimited (can be opened in an Excel spreadsheet)).



- распечатка спектра.



- копирование спектра в буфер.



- сохранение текущего спектра в качестве верхнего слоя.



- удаление спектров верхнего слоя.

При регистрации спектра важно, чтобы регистрируемый сигнал не превышал 4000 отсчетов (один отсчет соответствует попаданию на светочувствительную матрицу 75 фотонов). Для этого необходимо правильно выбрать время накопления сигнала, которое задается с помощью кнопок «Время», расположенных в верхней левой части экрана (рис.8). Диапазон изменения этого параметра составляет от 3 мс до 65 с. Чем больше время накопления сигнала, тем больше сигнал. Рекомендуется подбирать этот параметр таким, чтобы сигнал не превышал 3500 отсчетов.

С помощью кнопок «Усреднение» можно выводить на экран усредненный спектр. Число спектров, которые Вы хотите усреднить, задается в соответствующем окошке (рис.8).

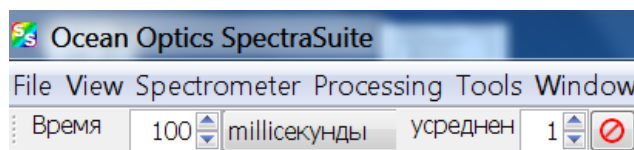


Рис.8. Строка выбора времени регистрации и числа усредняемых спектров.

Принцип работы спектрометра Red Tide USB-650.

Ниже схематично показан путь света через оптический модуль спектрометра.

Свет через оптическое волокно поступает на входную щель 1 (рис.9). Она представляет собой узкую прорезь, сделанную в непрозрачной пластине, и имеет фиксированную ширину 25 мкм.

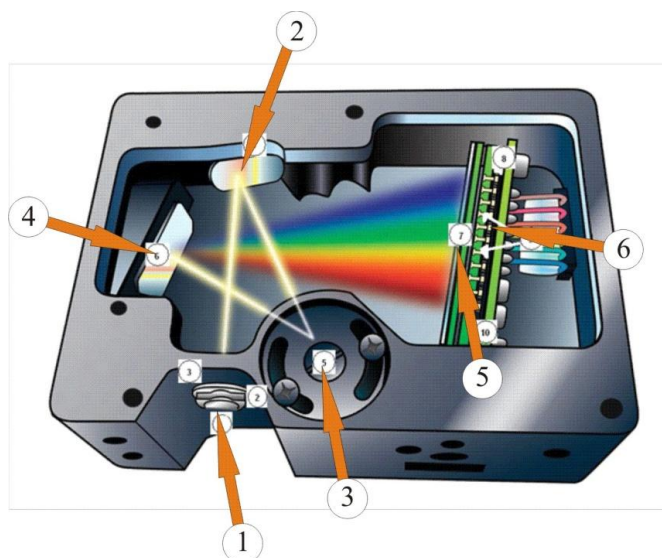


Рис.9. Схема спектрометра


Коллимирующее сферическое зеркало 2 преобразует расходящийся световой пучок в параллельный и направляет его на отражательную дифракционную решетку 3. Разложенный в спектр свет с помощью фокусирующего зеркала 4 и собирающей линзы 5 фокусируется на поверхности детектора 6 (кремниевый линейный ПЗС - детектор). Этот детектор содержит 650 светочувствительных элементов (пикселей), размер которых 14 x 200 мкм. Один отсчет элемента соответствует регистрации 75 фотонов. Все элементы выстроены вдоль одной прямой таким образом, что каждый светочувствительный пиксел соответствует определенной длине волны света. После аналого-цифрового преобразования электрических сигналов с пикселей спектр в цифровом виде передается программе SpectraSuite.


Регистрация спектров пропускания (зависимости пропускания от длины волны).

1. Установите источник света 1, на одном конце оптической скамьи, а на другом – держатель 3, к которому прикреплено оптическое волокно 5 (рис.5).


Другой конец оптического волокна должен быть подсоединен к спектрометру 4.

2. Включите лампу и направьте свет от нее на входное отверстие оптического волокна. На экране появится спектр излучения, попадающего в спектрометр. С помощью кнопки «Время» (рис.8) установите время регистрации такое, чтобы максимальное значение в спектре не превышало 3500 отсчетов.

3. Зарегистрируйте темновой ток. Для этого прикройте ладонью входное отверстие оптического волокна и нажмите кнопку  .

4. Зарегистрируйте эталонный спектр (спектр сравнения). Для этого откройте входное отверстие оптического волокна и нажмите кнопку  .

5. Перейдите в режим регистрации пропускания. Для этого последовательно нажмите кнопки **S** и **T** (рис.7).

6. С помощью кнопки  выберите область спектра примерно от 450 до 900 нм. В этой области будут находиться полосы пропускания исследуемых светофильтров.

Порядок выполнения работы:

Упражнение 1. Определение спектральных характеристик интерференционных светофильтров (нормальное падение).

1. Установите подставку 6 (рис.5) вплотную к держателю оптического волокна. Вставьте интерференционный светофильтр С1 в специальный штырь, расположенный на подставке. Светофильтр можно поворачивать вокруг вертикальной оси, при этом угол поворота отсчитывается по шкале транспортира, находящегося на подставке. Поверните подставку так, чтобы основание транспортира было перпендикулярно оптической скамье. Сориентируйте светофильтр так, чтобы свет падал на него нормально (угол падения при этом равен 0^0).

2. На экране дисплея появится спектр пропускания.

Наведите курсор мыши на поле спектра и щелкните правой кнопкой мыши. В появившемся окне выберите опцию «Graph Layer Options», затем в верхней строке - «Visible Spectrum» и далее «Show visible spectrum layer» - «Clip visible spectrum to trendline».

Обратите внимание, что кроме узкой полосы пропускания в зеленой области спектра, наблюдаются полосы пропускания в красной и синей областях. Это связано с тем, что этот светофильтр специально изготовлен для образовательных целей и у него отсутствуют отрезающие фильтры.

3. Сохраните спектр в формате tab-delimited для того, чтобы в последствии иметь возможность его анализировать с помощью других программных оболочек, например, Excel.

4. Сохраните также спектр в качестве верхнего слоя, нажав кнопку  .

5. Дважды кликните мышью на спектре. Появится линия-курсор. Ее положение по длинам волн (в нм) и величина пропускания на этой длине волны показываются внизу экрана. Линию-курсор можно перемещать по экрану двумя способами: (1) подвести курсор мыши в заданную точку спектра и щелкнуть мышью или (2), набрав интересующую длину волны в нижнем окне и нажав «Enter». Шаг перемещения линии-курсора 1 нм.


6. Определите T_{max} , λ_{max} , $\delta\lambda$, фактор контраста T_{max}/T_{min} и R . Для определения фактора контраста выберите наименьшее значение пропускания слева или справа от λ_{max} . Коэффициент отражения R можно определить по величине фактора контраста (см. формулу Эйри):

$$\frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{(1+R)^2}{(1-R)^2} \quad (4)$$

7. Определите эти характеристики для фильтров С2 и С3. Полученные результаты занесите в таблицу:

Номер светофильтра	T_{max} , %	λ_{max} /нм	$\delta\lambda$ /нм	T_{max}/T_{min}	R
С1					
С2					
С3					

Упражнение 2. Анализ зависимостей λ_{max} и $\delta\lambda$ от угла падения.

1. Последовательно зарегистрируйте спектр пропускания фильтра С1 при разных углах падения с шагом $5 - 10^0$. Каждый спектр сохраняйте в файл и в качестве верхнего слоя, нажав кнопку . При каждом угле ориентации светофильтра определите λ_{max} и $\delta\lambda$.

2. Экспериментальные результаты занесите в таблицу:

Угол падения $\theta, ^0$	T_{max} , %	λ_{max} /нм	$\delta\lambda$ /нм	T_{max}/T_{min}	R

3. Из соотношения (1) следует:

$$\lambda_0^2 = 4h^2n^2 - 4h^2\sin^2(\theta) \quad (5)$$

Постройте зависимость λ_0^2 от $\sin^2(\theta)$ и определите величину h и n .

Вопросы к обсуждению с преподавателем.

1. Осуществление многолучевой интерференции методом деления амплитуды. Интерферометр Фабри - Перо.
2. Интерференционные светофильтры, их характеристики.
3. Просветление оптики. Диэлектрические зеркала.
4. Сформулируйте цель работы, опишите экспериментальную часть и обсудите результаты.

Рекомендуемая литература

1. Бутиков Е.И. Оптика. Изд.2, С-Пб., Невский диалект, 2003. §5.7.
2. Ландсберг Г.С. Оптика, Изд.6, М., Физматлит, 2006. §30.
3. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. Изд.2., М., МГУ, 2004. Лекция 11.

Дополнительная литература:

1. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. - М.: Издательство Московского университета, 1994.
2. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. - М.: Наука 1972.
3. Коломийцов Ю.В. Интерферометры - Л.: Машиностроение, 1976.