

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

А.И. Ефимова, А.В. Зотеев, А.В. Павликов, А.А. Склянкин,  
Е.Д. Баева

---

**ОБЩИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ**

**ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ**

---



## **Цель и содержание работы**

Целью данной лабораторной работы является

1. Знакомство с принципом работы, назначением и основными характеристиками ИК-спектрофотометров различных типов (дисперсионных и с фурье-преобразованием).
2. Наблюдение интерференции в тонких плёнках исследуемых материалов и измерительных кюветах.
3. Экспериментальное определение толщины зазоров измерительных кювет и толщины плёнки полистирола.

## **Аппаратура**

1. Фурье-спектрометр фирмы Bruker модели Tensor 27.
2. Две кюветы, отличающиеся друг от друга толщиной воздушного зазора между стенками.
3. Плёнка полистирола.

## Содержание

1. Введение
  2. Интерференция в тонких плёнках
  3. Принцип работы дисперсионных ИК-спектрометров
  4. Принцип работы интерференционных фурье-спектрометров
    - 4.1. Получение интерферограммы
    - 4.2. Обработка интерферограммы
  5. Порядок выполнения работы
  6. Обработка результатов
- Приложение 1.
- Приложение 2.

# 1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа практикума выполняется на ИК-спектрометре – приборе для регистрации спектров пропускания (или отражения) исследуемых веществ. Образцы этих веществ или представляют собой тонкую плёнку или помещаются (жидкие или газообразные) внутрь измерительной кюветы с плоскопараллельными стенками. Поэтому при регистрации таких спектров помимо полос поглощения света веществом в них зачастую наблюдаются колебания интенсивности интерференционного происхождения. Для решения основной задачи ИК-спектроскопии такие колебания представляют собой «паразитное явление», затрудняющее расшифровку спектра. Однако в рамках данной работы мы не только будем наблюдать «интерференцию в тонкой плёнке», но и используем это явление для получения полезной информации о толщине (или показателе преломления) этой плёнки.

## 2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ

При прохождении света через тонкие прозрачные плёнки и отражении света от их поверхностей возникают когерентные световые пучки, которые способны интерферировать. Роль плёнки может играть также малый воздушный зазор между двумя поверхностями раздела прозрачных сред, как, например, в случае наблюдения колец Ньютона. Схема возникновения таких когерентных пучков при падении света на плоскопараллельную плёнку изображена на рис. 1.

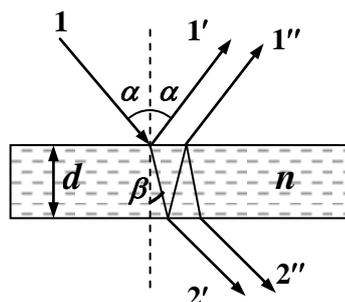


Рис. 1. Оптическая схема возникновения когерентных пучков

Интерференция наблюдается в отражённом свете при взаимодействии когерентных волн, распространяющихся вдоль направлений  $1'$  и  $1''$ , а в проходящем – вдоль  $2'$  и  $2''$ . Если плёнка

плоскопараллельна, то соответствующие пучки могут перекрываться только очень далеко от плёнки («на бесконечности»). Для наблюдения интерференционной картины на конечном расстоянии от плёнки на пути лучей 1' и 1'' (или 2' и 2'') можно поместить собирающую линзу, а в её фокальной плоскости – экран или фотоприёмник.

Можно показать<sup>\*)</sup>, что геометрическая разность хода между соответствующими волнами равна  $2d \cdot \cos\beta$ , где  $\beta$  – угол преломления. Тогда условие максимумов интерференции в проходящем свете для случая свободной плёнки толщиной  $d$ , находящейся в воздухе, можно записать в следующем виде:

$$2dn \cdot \cos\beta = m\lambda, \quad (1)$$

а условие минимумов:

$$2dn \cdot \cos\beta = (m - 1/2)\lambda. \quad (1,a)$$

где  $\lambda$  – длина световой волны **в вакууме**, а  $m = 1, 2, \dots$  – **порядок интерференции**, то есть число, показывающее, сколько длин волн «укладывается» в разности хода.

При записи спектра – зависимости интенсивности света, регистрируемой фотоприёмником, от длины волны  $I(\lambda)$  (или от частоты) излучения – интерференция проявляет себя характерным чередованием максимумов и минимумов интенсивности. Это чередование будет выглядеть строго периодическим, если на дисплей спектрометра (или на ленту самописца) выводить зависимость интенсивности не от самой длины волны  $\lambda$ , а от обратной ей величины – спектроскопического волнового числа  $\bar{\nu} = 1/\lambda$ .<sup>\*\*)</sup> Кроме того, заметим, что в данной работе практикума излучение источника падает на исследуемый образец (плёнку или пустую измерительную кювету) по нормали к его поверхности. Поэтому условия наблюдения максимумов интенсивности имеют совсем простой вид:

---

<sup>\*)</sup> Соответствующий расчёт можно посмотреть, например, в литературе, рекомендованной по курсу.

<sup>\*\*)</sup> Нетрудно видеть, что этот спектроскопический термин используется для величины, равной «обычному» волновому числу  $k = 2\pi/\lambda$  с точностью до коэффициента  $2\pi$ .

$$2dn = m \cdot \lambda \quad \text{или} \quad 2dn \cdot \bar{\nu} = m. \quad (2)$$

Равенство (2) позволяет понять, в частности, как можно экспериментально определить толщину плёнки (или зазора)  $d$  по данным проведённых измерений. Для этого достаточно рассчитать коэффициент пропорциональности между волновым числом  $\bar{\nu}$  и порядком интерференции  $m$ , и воспользоваться знанием показателя преломления материала  $n^*$ ). На практике, однако, экспериментатору неизвестно конкретное значение порядка интерференционного максимума для данного волнового числа  $\bar{\nu}_m$ . Как обойти данную трудность в определении  $d$  мы уточним в разделе, посвящённом обработке результатов проведённых измерений.

В заключение этого пункта, заметим также, что отмеченная линейная зависимость порядка интерференции  $m$  от волнового числа  $\nu$  наблюдается только **при отсутствии дисперсии**, т.е. при постоянстве показателя преломления для разных длин волн.

### 3. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДИСПЕРСИОННЫХ ИК-СПЕКТРОМЕТРОВ

Основное назначение любых спектральных приборов – разложение электромагнитного излучения на монохроматические составляющие – получение спектра, то есть зависимости интенсивности излучения от его длины волны (либо волнового числа или частоты).

Оптическая схема спектральных приборов, как правило, содержит следующие основные элементы (см. рис. 2):

- Источник излучения 1. В ИК-спектрометрах, регистрирующих спектры пропускания или отражения, это, обычно, стержень из карбида кремния, разогреваемый протекающим током до температур 1200 – 1400 К, называемый глобаром.

---

\*) Или, наоборот, при известной заранее толщине плёнки  $d$  исследуемого вещества можно найти его показатель преломления  $n$  (метод «рефрактометрии»).

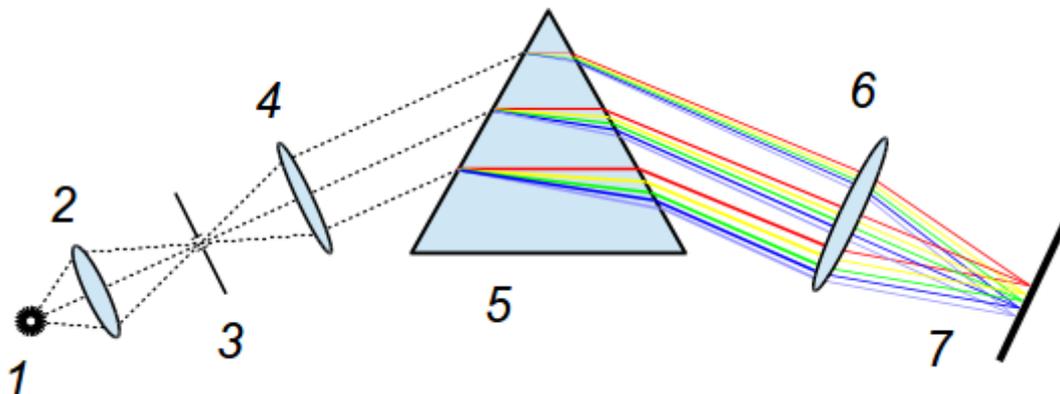


Рис. 2. Принципиальная схема спектрального прибора

- Линза 2, проецирующая излучение источника на узкую регулируемую входную щель 3.
- Коллиматорный объектив 4. Находится на фокусном расстоянии от щели и даёт параллельный пучок спектрально неразложенного (“белого”) света.
- Диспергирующий элемент 5. Призма, изображённая на рис. 2, или дифракционная решётка, которые осуществляют пространственное разложение излучения в спектр.
- Объектив 6, который формирует из параллельных пучков света, соответствующих разным длинам волн, последовательный ряд монохроматических изображений щели в его фокальной плоскости. Их совокупность и образует «спектр».
- Фокальная плоскость 7, в которой находится линейка светочувствительных элементов (ПЗС-матрица) или располагается выходная щель, через которую выходит узкий пучок монохроматического света, направляемый далее на приёмник излучения. Приборы с ПЗС-матрицей называются спектрографами, приборы второго типа – монохроматорами.

Приведённая на рис. 2 схема используется для регистрации спектра испускания источника (в приведённом варианте схемы – самого глобара). Для получения же спектров пропускания

исследуемые образцы помещаются между источником и входной щелью монохроматора.

Одна из главных особенностей техники ИК-спектроскопии связана с тем, что стекло и кварц в средней ИК-области излучения не прозрачны. Поэтому вместо линзовых объективов используются зеркальные, а в качестве материала призм – кристаллы таких солей, как  $NaCl$ ,  $KBr$ ,  $CsJ$ ,  $LiF$ ,  $CaF_2$  и т.д., которые отличаются границей пропускания в ИК-области (в видимой и УФ-областях они все прозрачны). Кристаллы  $KBr$  используются до  $400\text{ см}^{-1}$ , а  $NaCl$  только до  $650\text{ см}^{-1}$ . Гигроскопичность и растворимость в воде кристаллов большинства солей вызывают большие затруднения при работе с ними.

В современных ИК-спектрометрах в качестве диспергирующих элементов применяются не призмы, а дифракционные решётки, обладающие большей разрешающей способностью. Роль фотоприёмников (светочувствительных элементов) ИК-диапазона выполняют болометры (активным элементом является сопротивление с большим температурным коэффициентом), пироэлектрические детекторы (активный элемент – полярный диэлектрик с зависящей от температуры спонтанной поляризацией) или фотодиоды. Выбор типа фотоприёмника и его рабочего материала зависит от диапазона регистрируемого инфракрасного излучения.

## 4. ПРИНЦИП РАБОТЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ

В инфракрасном диапазоне спектра широкое применение находят интерференционные спектрометры с преобразованием Фурье. Будем называть их далее фурье-спектрометры. Используя фурье-спектрометр, оптические спектры исследуемого объекта получают в две стадии. На первой стадии фотоприёмник регистрирует так называемую «интерферограмму». На второй проводится математическая обработка интерферограммы, в результате которой из неё восстанавливается спектральный состав излучения, или просто спектр.

### 4.1. Получение интерферограммы

Рассмотрим процесс регистрации интерферограммы. Основной частью фурье-спектрометра является интерферометр Майкельсона. Его принципиальная оптическая схема показана на рис. 3.

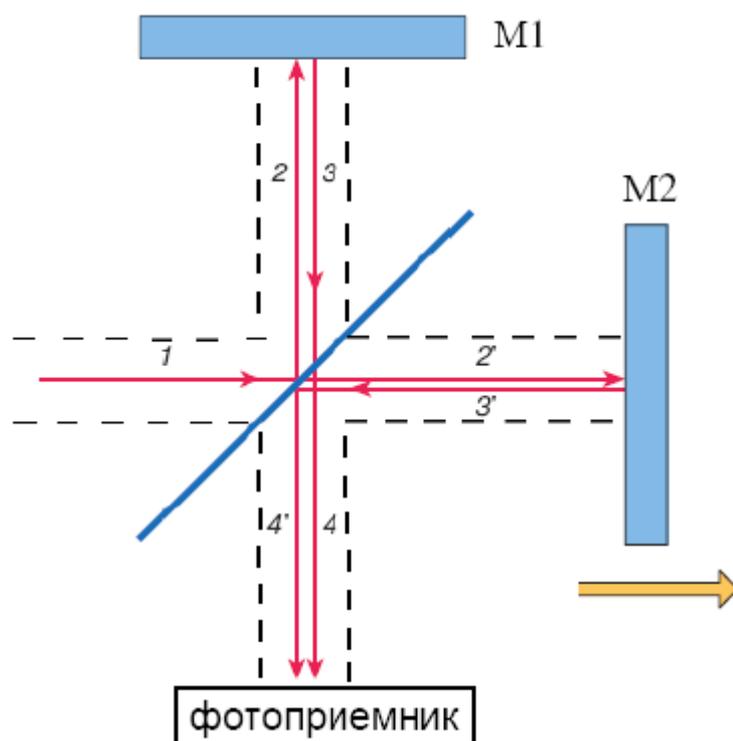


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра Майкельсона

Параллельный пучок излучения  $1$  попадает на полупрозрачное зеркало, называемое светоделителем, которое составляет с пучком  $1$  угол в  $45^\circ$ . Часть излучения отражается от светоделителя вдоль луча  $2$ , другая проходит через него вдоль луча  $2'$ . Волна, распространяющаяся вдоль луча  $2$  отражается от зеркала  $M1$ , снова попадает на светоделитель ( $3$ ) и, пройдя сквозь него, попадает на фотоприёмник ( $4$ ). Похожая судьба и у света, прошедшего светоделитель вдоль луча  $2'$ . Он отражается от плоского зеркала  $M2$  ( $3'$ ) и, частично отразившись от светоделителя вдоль луча  $4'$ , также попадает на фотоприёмник.

Таким образом, на фотоприёмник попадают две волны, получившиеся в результате разделения исходного пучка света  $1$ . Если выполнены условия когерентности, то фотоприёмник регистрирует результат их интерференции. Разность фаз приходящих волн  $\Delta\varphi$  зависит от разности оптических путей, пройденных волнами от точки разделения до фотоприёмника, т.е. от разности хода. Разность хода, в свою очередь, определяется геометрией схемы и, в частности, зависит от положения зеркал  $M1$  и  $M2$ .

В фурье-спектрометре зеркало интерферометра  $M2$  движется поступательно и равномерно в направлении, указанном на рис. 3. Разность хода  $\Delta$  между интерферирующими волнами изменяется со временем по линейному закону и, как следствие, происходит периодическое чередование интерференционных максимумов и минимумов, интенсивности света, попадающего на фотоприёмник. Переменный сигнал, регистрируемый фотоприёмником, называется интерферограммой.

#### **4.2. Обработка интерферограммы**

Обсудим теперь процедуру получения («восстановления») спектра из интерферограммы.

Сначала предположим, что на вход интерферометра попадает монохроматическое излучение частоты  $\omega$ . Пусть волны, приходящие на фотоприёмник вдоль лучей  $4$  и  $4'$ , имеют

одинаковую интенсивность  $I_0/2$ . Интенсивность света, регистрируемая фотоприемником  $I_{\Phi\Pi}$ , при этом равна:

$$I_{\Phi\Pi} = I_0 + I_0 \cdot \cos \Delta\varphi. \quad (3)$$

Пусть в начальный момент времени зеркала М1 и М2 установлены так, что разность хода, а значит и величина  $\Delta\varphi$ , равна нулю. При движении зеркала с постоянной скоростью  $V$  оптическая разность хода  $\Delta = 2V \cdot t$  и, значит, разность фаз  $\Delta\varphi$  волн изменяется со временем по линейному закону:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta = \frac{2\pi}{c \cdot T} \cdot 2Vt = \omega \cdot \tau, \text{ где } \tau = \frac{2V}{c} t. \quad (4)$$

Здесь  $c$  – фазовая скорость света, а пропорциональная времени переменная  $\tau$  введена для упрощения вида записи.

Как уже отмечалось, интерферограммой называется только переменная составляющая интенсивности света, попадающего на фотоприёмник. Её можно представить в виде зависимости от времени следующим образом:

$$\tilde{I}(\tau) = I_0(\omega) \cdot \cos \omega\tau. \quad (5)$$

Допустим теперь, что анализируемое излучение содержит две монохроматические компоненты. Тогда интерферограмма будет суммой двух составляющих:

$$\tilde{I}(\tau) = I_1 \cos \omega_1 \tau + I_2 \cos \omega_2 \tau, \quad (6)$$

где  $I_1, I_2$  – интенсивности монохроматических составляющих излучения с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  соответственно.

Продолжив аналогичный анализ, нетрудно понять, что в том случае, когда спектр анализируемого излучения представляет собой непрерывный набор монохроматических составляющих, каждая из которых имеет соответствующую интенсивность  $I(\omega)$ , то интерферограмме будет соответствовать интеграл вида

$$F(\tau) = \int_0^{\infty} I(\omega) \cos \omega\tau d\omega. \quad (7)$$

Мы видим, что эта регистрируемая прибором функция времени (интерферограмма) является преобразованием Фурье анализируемого оптического спектра излучения  $I(\omega)$ .

Оптический спектр может быть «восстановлен» в явном виде путём обратного преобразования Фурье – и это составляет второй этап получения искомого спектра:

$$I(\omega) = (\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \cos \omega \tau \, d\tau. \quad (8)$$

Быстрое выполнение такой математической процедуры численными методами стало возможным лишь после появления достаточно мощной вычислительной техники, что и позволило реализовать метод фурье-спектроскопии в практике современного эксперимента.

Принципиальным отличием фурье-спектроскопии от традиционной спектроскопии является то, что фурье-спектрометр регистрирует сразу весь спектр исследуемого сигнала, а не его маленький участок, как обычный дисперсионный спектрометр (с призмой или дифракционной решёткой). Соответственно, на порядки возрастают объём получаемой в единицу времени информации и разрешающая способность аппаратуры. Современные фурье-спектрометры позволяют работать в широком спектральном диапазоне – от субмиллиметрового до ультрафиолетового. Спектральное разрешение таких приборов достигает  $10^{-3} \text{ см}^{-1}$ . Фурье-спектрометры для дальней и средней инфракрасной области спектра (область волновых чисел 50–7000  $\text{см}^{-1}$ ) находят широкое применение в химии.

#### ***Замечание к п.4***

Как мы уже отмечали выше, оптическим спектром называются зависимости интенсивности излучения вида  $I = I(\omega)$ , но также и  $I = I(\lambda)$  или  $I = I(\nu)$ . Так, в технике ИК-спектроскопии вместо циклической частоты используется зависимость интенсивности излучения от «спектроскопического» волнового числа  $\bar{\nu} = 1/\lambda$ . Во всех приведённых выше соотношениях для перехода к соответствующим зависимостям достаточно провести замену переменной:  $\omega = 2\pi c \bar{\nu}$ . Существо обсуждаемых вопросов от этого, очевидно, нисколько не изменится.

## **5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

### **Упражнение 1. Подготовка ИК-спектрометра к работе**

Ознакомиться с основными элементами спектрометра. Под руководством преподавателя (или сотрудника практикума) включить ИК-спектрометр Tensor-27 и запустить программу управления прибором "OPUS". Ознакомиться с интерфейсом управления функциями спектрометра и обработки результатов измерений.

ИК-спектрометр Tensor-27 работает в одноканальном режиме. Это означает, что для получения спектра пропускания вначале регистрируют так называемый "спектр сравнения" (спектр излучения источника и поглощения атмосферы) при отсутствии образца в кюветном отделении. После этого в кюветное отделение помещают образец и регистрируют спектр, который является суперпозицией исходного спектра сравнения и спектра пропускания образца. Спектр пропускания образца вычисляется автоматически спектрометром и есть отношение второго спектра к первому.

### **Упражнение 2. Регистрация спектра сравнения**

Установить режим регистрации спектров пропускания.

В отделение для исследуемых образцов прибора установить пустой держатель. Записать спектр сравнения в одноканальном режиме (спектр сравнения автоматически сохраняется в памяти компьютера).

### **Упражнение 3. Регистрация ИК-спектра пустых кювет с воздушным зазором**

1. В держатель для образцов вставить кювету №1 с толщиной воздушного зазора между стенками  $d_1$ . Записать спектр №1 в одноканальном режиме. После регистрации этого спектра

программа автоматически преобразует его в спектр пропускания №1.

2. Повторить измерения для кюветы №2 с другой толщиной воздушного зазора между стенками  $d_2$ .
3. Распечатать полученные спектры пропускания кювет №1 и №2 на принтере, подключенном к спектрометру.

#### **Упражнение 4. Регистрация ИК-спектра пропускания тонкой плёнки полистирола**

1. В держатель для образцов поместить плёнку полистирола. Записать ИК-спектр пропускания полистирола (№3), действуя так же, как и в предыдущих упражнениях.
2. Распечатать полученный спектр №3 на принтере.

### **6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ**

1. Пользуясь полученными в упражнении 3 спектрами №1 и №2, составить для каждого спектра таблицу данных вида:

Таблица 1.

Номер кюветы (спектра) №1	
Номер максимума $m^*$ , ед.	Волновое число $\bar{\nu}$ , $см^{-1}$

.....

Таблица 2.

Номер кюветы (спектра) №2	
Номер максимума $m^*$ , ед.	Волновое число $\bar{\nu}$ , $см^{-1}$

.....

В первой колонке указываются 10 последовательных номеров интерференционных максимумов  $m^*$  (начало отсчёта произвольно), а во второй – соответствующие им волновые числа  $\bar{\nu}$ .

2. По данным, занесённым в таблицы 1 и 2, построить на одном графике две зависимости номера интерференционного максимума  $m^*$  от волнового числа для каждой кюветы. Для корректного построения графиков можно использовать метод наименьших квадратов (МНК). Однако при выполнении работы в рамках физического практикума достаточно лишь качественно руководствоваться принципами этого метода.

3. Из равенства (2) теоретической части данного описания следует, что

$$2dn = \frac{\Delta m}{\Delta \bar{\nu}}. \quad (9)$$

Поэтому хотя конкретное значение порядка интерференционного максимума  $m$  экспериментатор не знает, для расчёта оптической толщины плёнки достаточно определить угловой коэффициент для графика прямой зависимости  $m^* = f(\bar{\nu})$ .

Считая показатель преломления воздуха равным единице, найти экспериментальные значения толщин зазоров  $d_1$  и  $d_2$  между стенками измерительных кювет №1 и №2.

4. Найти в спектре пропускания плёнки полистирола периодически чередующиеся максимумы и минимумы интенсивности предположительно интерференционного происхождения. По согласованию с преподавателем определить толщину данной плёнки таким же способом, как и в предыдущем упражнении. Используйте табличное значение показателя преломления полистирола для среднего ИК-диапазона.

5. По представленному ИК-спектру пропускания полистирола продумать ответ на вопрос, с какими процессами и явлениями связано появление полос (линий) поглощения в спектре.

6. Используя полученные результаты (в п.3), найти порядок интерференции для одного из интерференционных максимумов, указанного преподавателем.

## Приложение 1.

### Описание работы двухлучевого дисперсионного спектрофотометра ИКС-22

Рассмотрим работу дисперсионного ИК-спектрометра на примере двухлучевого спектрофотометра ИКС-22.

На рис. П1 представлена принципиальная оптическая схема двухлучевого спектрофотометра ИКС-22, дополненная кинематической частью фотометрической системы регистрации.

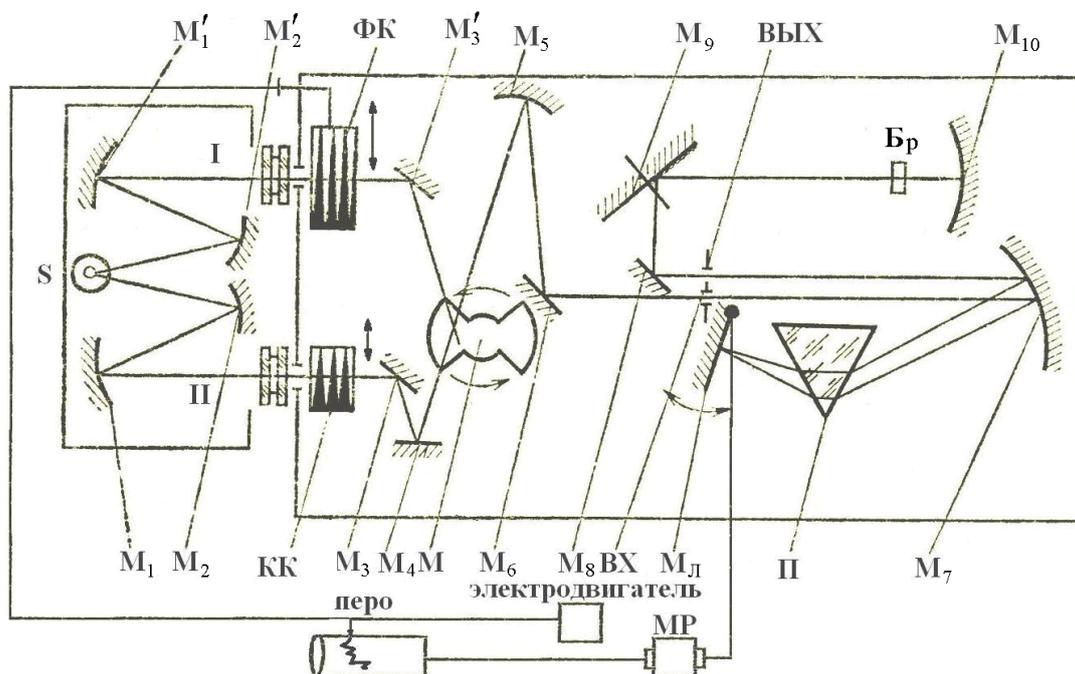


Рис. П1. Принципиальная схема спектрофотометра ИКС-22

Излучение источника  $S$  направляется сферическими зеркалами  $M_1$ ,  $M_1'$ ,  $M_2$ ,  $M_2'$  в каналы I (образца) и II (сравнения). Проходя кювету с образцом I и кювету сравнения II, световые пучки фокусируются в плоскости, в которой расположены фотометрический клин  $\Phi K$  и компенсирующий клин  $KK$ . Отраженное от зеркал  $M_3$ ,  $M_3'$ ,  $M_4$  излучение попадает на вращающийся модулятор (прерыватель) с зеркальными секторами  $M$ , который попеременно выводит излучение из канала образца или из канала сравнения на зеркала  $M_5$ ,  $M_6$ .

Вышеперечисленная совокупность зеркал фокусирует излучение в плоскости входной щели монохроматора  $BX$ . Пройдя входную щель, расходящийся световой пучок попадает на параболический зеркальный объектив  $M_7$  и, отразившись от него, параллельным пучком падает на призму  $П$ . Призма разлагает излучение в спектр. Разложенный в спектр свет, отразившись от плоского зеркала Литтрова (Littrow)  $M_L$ , опять попадает на призму, где происходит повторная дисперсия лучей, и далее фокусируется тем же самым внеосевым параболическим зеркалом  $M_7$  на выходную щель  $BIX^*)$ .

При медленном повороте зеркала Литтрова  $M_L$ , которое осуществляется мотором развёртки  $MP$ , на выходную щель монохроматора последовательно направляются лучи различных длин волн (различные участки спектра). Сама же щель вырезает из спектра узкие по интервалу длин волн (в идеале – монохроматические) лучи. Изображение выходной щели проецируется зеркалами  $M_8$ ,  $M_9$  и  $M_{10}$  на приемную площадку болометра  $B_p$ . Зеркало  $M_{10}$  является эллиптическим, в одном фокусе которого находится выходная щель, а в другом – фотоприёмник.

Мотор развёртки одновременно с поворотом зеркала Литтрова приводит в движение либо барабан с лентой, на которой непосредственно прописывается спектр, либо каретку, на которой закреплено перо самописца. Так происходит движение пера самописца вдоль оси абсцисс, то есть сканирование («развёртка») спектра по волновым числам. Иначе говоря, с ориентацией зеркала Литтрова непосредственно связано волновое число попадающего на фотоприёмник излучения и положение пера самописца на оси абсцисс волновых чисел.

Преимуществом автоколлимационной схемы Литтрова являются удвоенные дисперсия и разрешающая способность, получаемые за счёт

---

\*) Оптическая схема, в которой одно и то же зеркало служит то коллиматором, который преобразует расходящийся световой пучок в параллельный, то камерным объективом, который фокусирует параллельный пучок на выходную щель, называется автоколлимационной. Входная и выходная щели при этом расположены на одной линии непосредственно друг над другом. В призмных монохроматорах обычно используют вышеописанную автоколлимационную схему с зеркалом Литтрова. В решётчатых монохроматорах происходит поворот отражательной решётки вокруг оси, расположенной в её средней части.

двукратного прохождения лучей через одну и ту же призму, а также компактность и экономичность, обусловленные использованием одного и того же зеркала как для коллимации, так и для фокусировки излучения. Кроме того, модуляция светового потока позволяет использовать усилители переменного сигнала, упрощая схему регистрации.

В работе спектрофотометра используется «метод оптического нуля». Излучение источника направляется по двум одинаковым каналам, в один из которых помещают исследуемый образец, а другой служит каналом сравнения<sup>\*\*</sup>). Световые пучки из обоих каналов попадают на вращающееся секторное зеркало, которое попеременно выводит излучение то из канала образца, то из канала сравнения на входную щель монохроматора. При отсутствии поглощения, проходя монохроматор, на фотоприёмник из каждого канала попадают пучки света одинаковой интенсивности. При наличии поглощения в образце на фотоприёмник попеременно попадают пучки разной интенсивности, в результате чего на выходе фотоприёмника возникает переменный электрический сигнал, частота которого равна частоте прерывания (частоте вращения секторного зеркала). Этот сигнал после усиления и преобразования подается на обмотку электродвигателя, который перемещает фотометрический клин, находящийся в канале сравнения, уменьшая до нуля возникшее различие в интенсивностях пучков. Фотометрический клин механически жёстко связан с пером самописца, которое, перемещаясь по ординате, регистрирует на бланке величину пропускания.

---

<sup>\*\*</sup>) Перед началом регистрации спектров (в отсутствие образца) производят выравнивание интенсивностей излучения, попадающих на фотоприемник из обоих каналов. Для этого в канале образца находится так называемый компенсирующий клин, который может вдвигаться в пучок. Клин представляет собой плоскую металлическую гребенку с сужающимися зубьями. При правильной компенсации во всем рабочем спектральном диапазоне в отсутствие образца должна регистрироваться 100%-я линия пропускания.

## Приложение 2.

### Особенности работы инфракрасного фурье-спектрометра Tensor-27

На рис. П2 приведена схема инфракрасного фурье-спектрометра Tensor-27 с установленным образцом. Для контроля скорости перемещения зеркала и оптической разности хода и калибровки шкалы спектрометра по длинам волн используется гелий-неоновый лазер. Для этого лазерный пучок также заводится в интерферометр (центральная часть светоделиителя имеет специальное покрытие для пропускания

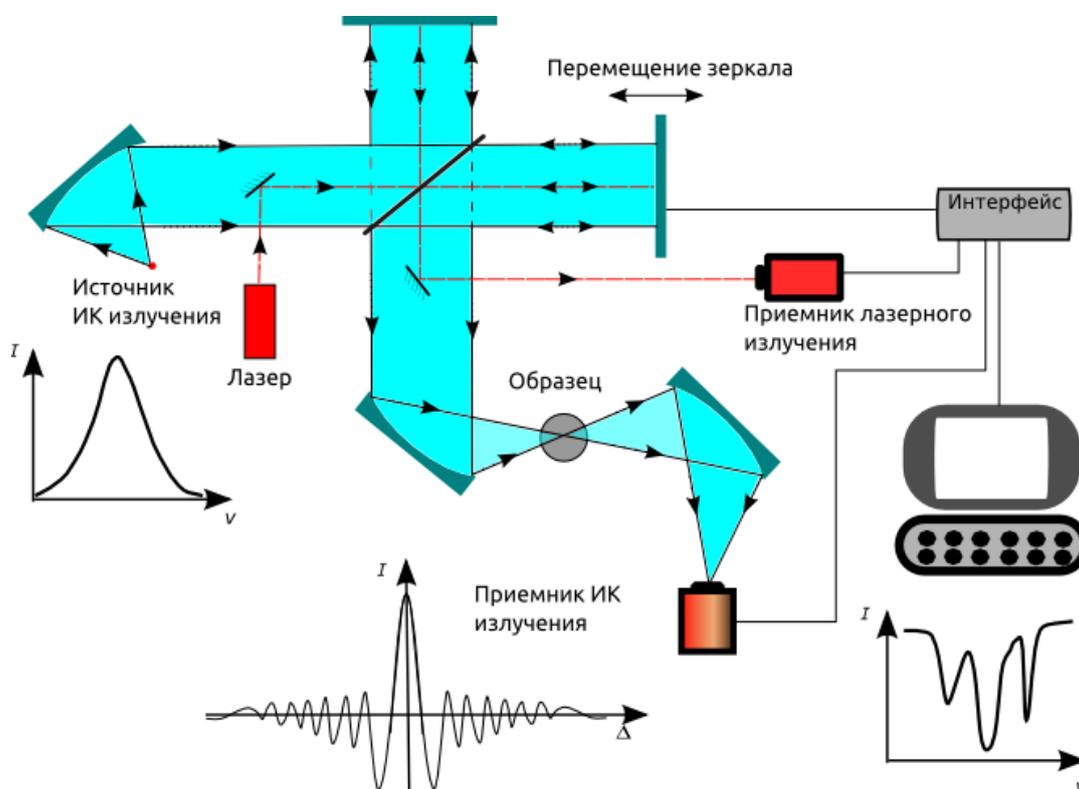


Рис. П2. Схема фурье-спектрометра с установленным образцом

видимого света) и регистрируется интерферограмма лазерного излучения.

Одной из проблем фурье-спектрометров является шумовой сигнал, возникающий из-за случайных угловых биений подвижного зеркала M2

при его плоскопараллельном перемещении. Для их уменьшения используются модифицированные конструкции интерферометра Майкельсона. Так, вместо плоских зеркал используют трехгранные уголкового отражатели. Их называют ретрорефлекторами, потому что свет, попадающий на такое зеркало, отражается точно в обратном направлении. В фурье-спектрометрах серии Tensor интерферометр содержит два ретрорефлектора P1 и P2, синхронно колеблющихся относительно единой оси O (рис. ПЗ). В данной конструкции отсутствует поступательное перемещение отражающих поверхностей, а изменение оптической разности хода происходит за счёт колебательно-вращательного движения.

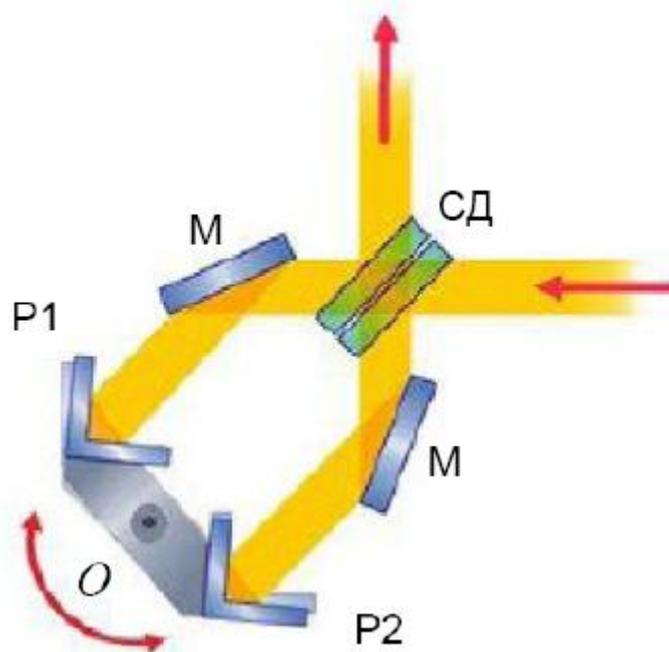


Рис. ПЗ. Схематичное изображение интерферометра в фурье-спектрометре серии Tensor. СД – светоделитель, М – неподвижные зеркала, P1 и P2 – колеблющиеся относительно оси O ретрорефлекторы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С.Н. Козлов, А.В. Зотеев «Колебания и волны. Волновая оптика» Гл. III, §5.
2. Г.С. Ландсберг «Оптика», 6-е изд., М. ФИЗМАТЛИТ, 2003.
3. А.А. Мальцев «Молекулярная спектроскопия», изд. Московского Университета, 1980.
4. Тонков М.В., «Фурье-спектроскопия – максимум информации за минимум времени», Соросовский образовательный журнал, том 7, №1, 2001.
5. А.И. Ефимова, В.Б. Зайцев, Н.Ю. Болдырев, П.К. Кашкаров «Инфракрасная фурье-спектрометрия» М.: Физический факультет МГУ, 2008.