

# МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДВУХЛУЧЕВОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР ОРТО-ELECTRONICS SF-05

Я.Дидковский,  
Н.Дидковская,  
Р.Федорцев  
feod@tut.by

**С**егодня можно говорить о новом этапе в спектральном приборостроении. Хотя в приборах по-прежнему широко используется пространственное разложение излучения в спектр с последующей его фильтрацией, все чаще встречаются устройства, построенные на базе интерферометра Фабри-Перо или с использованием явлений поляризации. Таким является рассматриваемый в статье спектрофотометр **Orto-Electronics модели SF-05, использующий монохроматор Черни-Тернера.**

В последние десятилетия развиваются способы получения спектра путем интерференционной и растровой модуляции исследуемого излучения. При этом увеличение информативности спектральных систем достигается применением интегрально-кодированных преобразований путем представления спектра в виде интеграла по системе ортогональных функций, используя, например, разложение в ряд Фурье – Фурье-спекроскопия, преобразование Адамара-Уолша – Адамар-спекроскопия и др. [1].

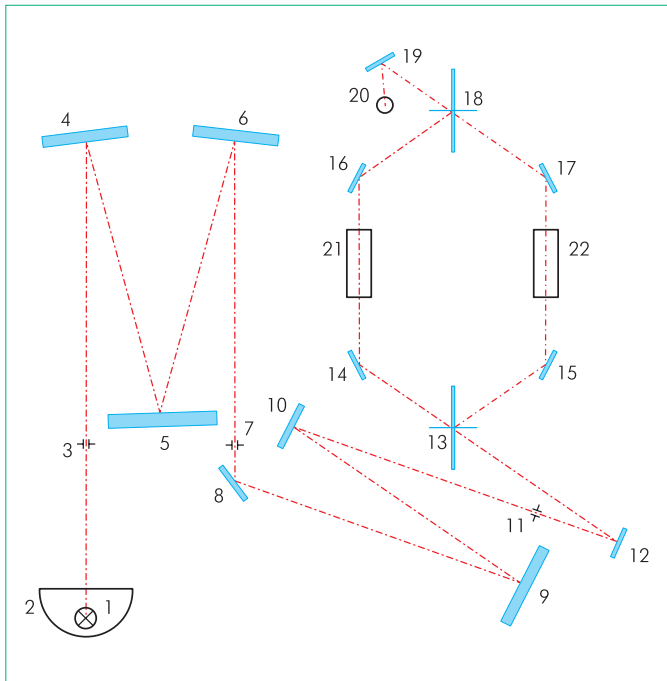
Уже разработаны и серийно выпускаются приборы, в которых в качестве диспергирующих элементов используются призмные системы, а также плоские и вогнутые дифракционные решетки. Существует большое число схем построения монохроматоров с пространственным разложением излучения в спектр. Поэтому основные усилия разработчиков классических щелевых дифракционных спектральных приборов направлены на совершенствование конструкции, применение новых материалов, улучшение характеристик оптических систем, применение новых быстродействующих фотоприемников повышенной чувствительности в более широком спектральном диапазоне, совершенствование характеристик механических узлов и элементов автоматики.

Значительно возросла роль компьютеров в области автоматизации измерений. Спектральные приборы не стали исключением. Представленные на рынке современные приборы имеют либо встроенную микропроцессорную (МП) систему обработки информации, либо возможность подключения к компьютеру. Автоматизируя измерения, МП повышает быстродействие прибора и сокращает время обработки информации [2].

Рассматриваемый спектрофотометр SF-05 позволяет измерять как характеристики твердых сред, например коэффициентов пропускания бесцветных и цветных оптических стекол и монокристаллов, так и жидких веществ, например концентрацию и оптическую плотность растворов. Он предназначен для измерений длин волн в диапазоне 190–1100 нм с разрешением 0,1 нм и спектрального коэффициента пропускания от 0,1 до 100% с точностью 0,1% (она зависит от типа источника света).

## ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРИБОРА

Оптическая схема спектрофотометра представлена на рис.1. Излучение источника света (1), собранное эллипсоидным



**Рис.1** Принципиальная оптическая схема спектрофотометра: 1 – лампа; 2 – эллипсоидный отражатель; 3 – входная щель; 4 – коллиматорный объектив; 5 – дифракционная решетка; 6 – камерный объектив; 7 – выходная щель; 8 – плоское зеркало; 9 – зеркальный объектив; 10 – плоское зеркало; 11 – полевая диафрагма; 12 – зеркальный объектив; 13, 18 – модулятор; 12–17 – плоское зеркало; 19 – зеркальный объектив; 20 – фотоприемник; 21 – эталонный образец; 22 – исследуемый образец

отражателем (2), проходит через монохроматор (состоящий из входной (3) и выходной (7) щелей, коллиматорного (4) и камерного (6) объективов и дифракционной решетки (5)) после преобразования лучей в параллельный пучок системой, состоящей из зеркальных объективов (9 и 11) и плоских отклоняющих зеркал (8 и 10). Обтюратор (12) и зеркала (13 и 14) попеременно направляют пучок лучей в канал с эталонным (20) и исследуемым (21) образцами. Другой обтюратор (17) при помощи системы плоских зеркал (15 и 16) и вогнутого сферического зеркала (18) попеременно направляет на фотоприемник (19) световые потоки, идущие через рабочую и эталонную ветви спектрофотометра.

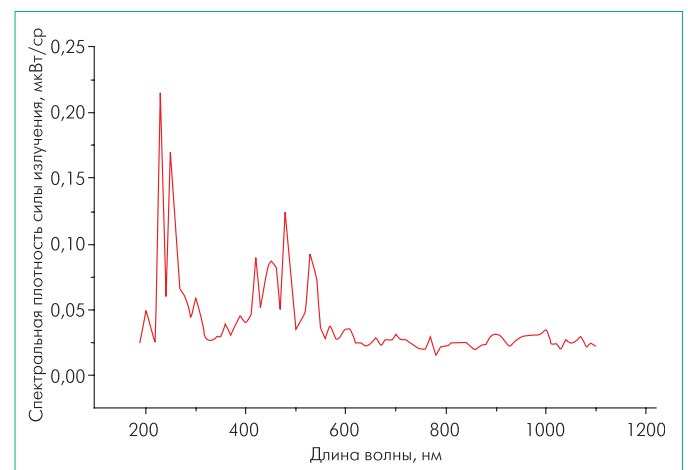
Разложение излучения источника света в спектр осуществляется монохроматором, построенным по схеме Черни-Тернера. Излучение, проходящее через входную щель, установленную в фокальной плоскости коллиматорного объектива, преобразуется в параллельный пучок лучей, падающий на дифракционную решетку. Дифрагированный на решетке свет представлен совокупностью параллельных пучков монохроматических излучений, отклоненных на различные углы в зависимости от длины волны. Камерный объектив фокусирует параллельные пучки, принадлежащие отдельным монохрома-

тическим составляющим, в своей фокальной плоскости, где установлена выходная щель монохроматора. Сканирование по длинам волн осуществляется поворотом дифракционной решетки, в результате чего через выходную щель проходит излучение определенной длины волны, зависящее от положения решетки. Монохроматор обеспечивает среднюю обратную линейную дисперсию 2,6 нм/мм благодаря применению дифракционной решетки с  $N=1200$  штр/мм и зеркальных объективов с фокусным расстоянием  $f'=250$  мм.

Выходящее из монохроматора излучение попадает в фотометрическую часть прибора и, после преобразования системой вспомогательных зеркал в параллельный пучок, направляется с помощью первого обтюратора в каналы с исследуемым и эталонным образцами.

### ОСОБЕННОСТИ ПРИБОРА И ТОЧНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ

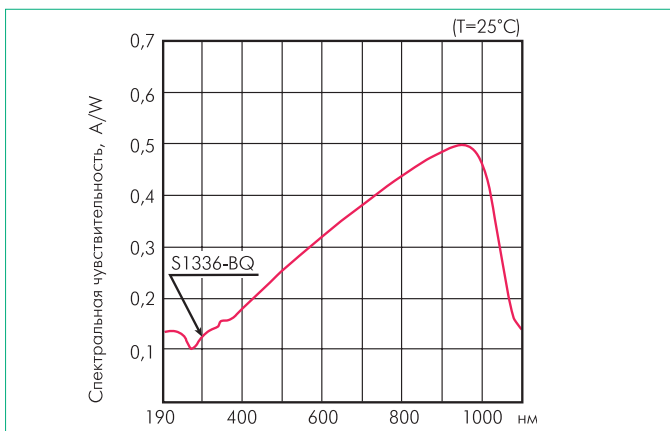
В качестве источника излучения спектрофотометра используется импульсная ксеноновая лампа модели L2448 компании Hamamatsu мощностью 15 Вт с кварцевым окном [3]. Спектральный диапазон излучения лампы – 185–2000 нм – сплошной и характеризуется высокой равномерностью. На его фоне выделяются уширенные линии газов (рис.2). В видимой и УФ-областях распределение энергии такой лампы близко к солнечному свету, причем спектр излучения в УФ-области сплошной. Кроме того, данный тип ламп характеризуется долговечностью ( $1,2 \cdot 10^9$  вспышек) и высоким относительным уровнем световой энергии в импульсе, в 1000 раз превышающей энергию обычной ксеноновой лампы в два раза большей мощности. Применение импульсного источника позволяет обойтись без дополнительного модулятора света.



**Рис.2** Спектральная плотность силы излучения импульсной ксеноновой лампы

Энергетический расчет показывает, что при использовании в качестве приемника излучения фотодиода S1336-BQ компании Hamamatsu (рис.3) [3] силы света лампы достаточно для

работы во всем спектральном диапазоне. В качестве осветителя используется одиночное эллипсоидное зеркало в юстируемой оправе. Особенностью эллипсоидной отражающей поверхности является наличие двух фокусов. Таким образом, установив источник излучения в первом фокусе зеркала, мы получаем его изображение во втором. Использование в качестве осветительной системы такого зеркала позволяет упростить конструкцию прибора и значительно увеличить его светосилу за счет увеличения телесного угла, в пределах которого собирается излучение источника.



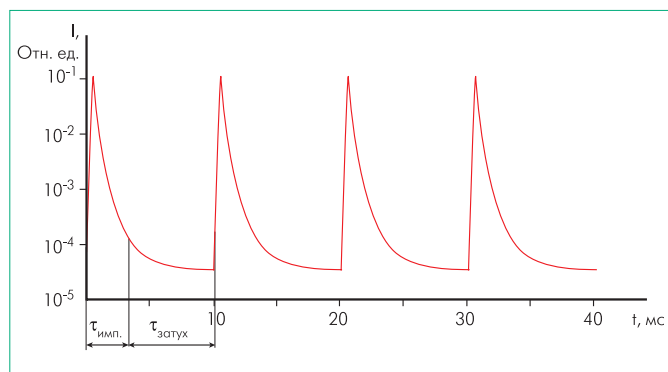
**Рис.3** График спектральной чувствительности фотодиода

Зеркальные объективы не имеют хроматических aberrаций, дают возможность получить хорошее качество изображения спектральных линий при плоской фокальной поверхности и могут быть использованы в широкой спектральной области. Это позволяет применять одну и ту же оптику со сменными диспергирующими элементами для работы в различных областях спектра. Важно и то, что изготовить большое зеркало легче, чем линзу столь же больших размеров.

В приборе применяются шаговые двигатели для привода движущихся элементов кинематической схемы. Двигатели такого типа позволяют гибко управлять движущимися узлами и вести программный контроль точности позиционирования благодаря встроенным в них оптопарам и электронным схемам управления. Например, в узле поворота решетки использование такого двигателя в режиме деления шага (совместно с редуктором, имеющим передаточное число  $n=8$ ) позволяет поворачивать дифракционную решетку на угол  $3,15''$ , что дает минимальный шаг сканирования спектра  $\Delta\lambda=0,023$  нм (то есть точность установки длины волны —  $\lambda = \pm 0,023$  нм).

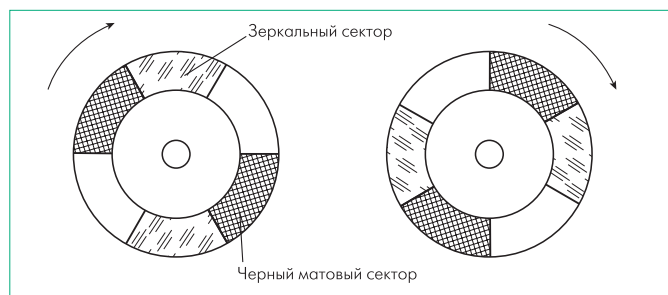
Высокие скоростные характеристики шагового двигателя в сочетании с большой точностью позиционирования позволяют останавливать дифракционную решетку на время считывания с помощью МП фотометрической информации, поступающей на приемник излучения. Реализация данного принципа позволяет избежать волнового сдвига, возникающего из-за механической инерционности частей прибора, даже при больших скоростях сканирования спектра.

Важным является механизм работы ксеноновой лампы в импульсном режиме. График зависимости интенсивности излучения лампы от времени в относительных единицах представлен на рис.4. Количество энергии, сосредоточенной в интервале  $\tau_{\text{имп}}$ , постоянно от импульса к импульсу на протяжении всего срока службы лампы. Флуктуации энергии, составляющие 1% от полного светового потока, носят случайный характер и проявляются на интервале  $\tau_{\text{затух}}$ . В результате может возникнуть ошибка измерения пропускания, связанная с тем, что потоки, вошедшие в эталонную и рабочую ветвь прибора, не будут равны. Это, в принципе, не позволит достичь полученной при энергетическом расчете точности измерения пропускания 0,1%.

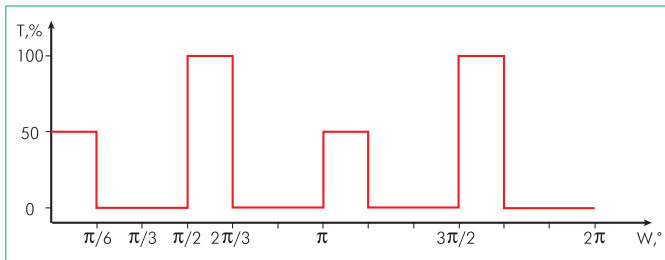


**Рис.4** График временной зависимости силы излучения лампы в относительных единицах

Для устранения указанной погрешности в конструкцию обтюраторов введены два сектора с черным поглощающим покрытием. Обтюратор (рис.5) — это вращающийся диск, состоящий из шести равных секторов, два из которых черные матовые, полностью поглощающие падающее на них излучение. На два сектора нанесено зеркальное отражающее покрытие, а оставшиеся два сектора вырезаны. Одинаковые сектора расположены друг напротив друга. Таким образом, за один оборот диска дважды происходит отражение пучка лучей от зеркальных секторов, а также пропускание света через вырезанные сектора и направление его в канал с исследуемым образцом и в канал сравнения, соответственно. Второй обтюратор аналогичен первому и вращается синхронно с ним с разностью фаз  $30^\circ$ , попеременно направляя излучение, выходящее из обоих каналов, посредством фокусирующего зеркала на светочувствительную площадку



**Рис.5** Конструкция и взаимное положение обтюраторов



**Рис.6** Графическая зависимость суммарной функции пропускания обтюраторов от угла поворота

фотоприемника. На рис.6 приведена зависимость суммарной функции пропускания обтюраторов  $T$  от угла поворота  $\omega$ .

Использование двух модуляторов в сочетании с единственным приемником позволяет минимизировать фотометрический шум, что уменьшает погрешность измерений.

Предлагаемый спектрофотометр работает по методу электрической компенсации. Потoki, прошедшие через два канала, вызывают в приемнике сигналы, сдвинутые по фазе на  $180^\circ$ . Если потоки не равны, то в фотоприемнике возникает переменная составляющая, причем ее фаза зависит от того, какой поток больше. Если переменная составляющая равна нулю (потоки равны), то на выходе усилителя переменного тока сигнал отсутствует.

Спектрофотометр подключается к ПК через интерфейс RS-232C. Программное обеспечение ПК позволяет выводить на экран монитора зависимость коэффициента пропускания или оптической плотности образца от длины волны в графическом или аналитическом виде.

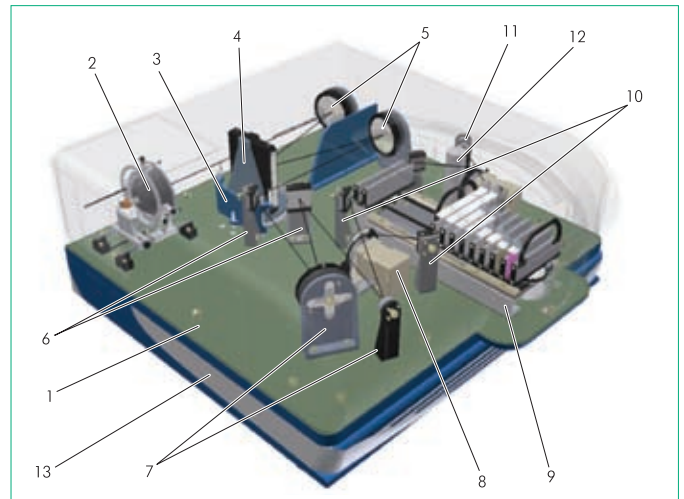
### КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

Модульный принцип построения (рис.7) спектрофотометра обеспечивает удобство сборки и юстировки основных его узлов: осветительной системы (2), зеркальных объективов монохроматора (5), узлов дифракционной решетки (4), приемника излучения (12) и механизма перемещения кювет (9). Высокие требования к стабильности относительного положения оптических элементов предопределили выбор способа их крепления – на монтажной плате (1). Все зеркальные объективы (7) и (11), плоские зеркала (6) и (10) и обтюраторы (8) прибора смонтированы на кронштейнах, закрепленных на этой плате, расположенной на сварной профильной раме (13).

Регулировка ширины щелей (3) дискретная и осуществляется двумя пластинами с щелями различной ширины (6 щелей шириной от 35 до 56 мкм), закрепленными на каретке. На пластине с входными щелями закреплены соответствующие светофильтры, устраняющие спектры высших порядков.

Кюветное отделение имеет восьмипозиционный держатель кювет для жидких образцов и два держателя для твердых образцов: исследуемого и эталонного.

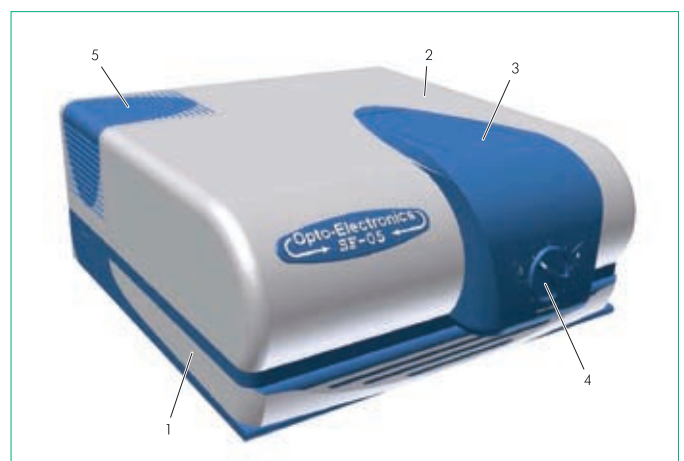
Общий внешний вид спектрофотометра приведен на рис.8. Основными элементами, определяющими конструктивно-компоновочную схему, являются основание (1) и обтекаемый



**Рис.7** Спектрофотометр со снятой крышкой: 1 – плата; 2 – осветительная система; 3 – узел входной и выходной щели; 4 – механизм развертки спектра; 5 – зеркальные объективы монохроматора; 6 – плоские поворотные зеркала; 7 – зеркальные объективы приемной системы; 8 – обтюраторы; 9 – держатель образцов кюветного отделения; 10 – плоские поворотные зеркала; 11 – зеркальный объектив; 12 – узел фотоприемника; 13 – профильная рама

корпус (2), а композиционным центром – крышка кюветного отделения С-образной формы (3) и ручка (4) перемещения кювет.

Созданный спектрофотометр может использоваться для решения задач в области спектроскопии исследователями различного профиля. Работа с ним облегчена применением ПК, позволяющего автоматизировать процесс измерений.



**Рис.8** Внешний вид спектрофотометра модели Opto-Electronics SF-05: 1 – основание; 2 – корпус; 3 – крышка кюветного отделения; 4 – ручка; 5 – вентиляционные отверстия

### ЛИТЕРАТУРА

1. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. – М.: Наука, 1979. – 478 с.
2. Соков И.В. Оптические спектральные приборы: Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
3. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com) – Web-сайт компании "Hamamatsu".