

РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ. ВЫБОР СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ.

Под регистрацией спектров понимают определение зависимости энергии излучения от длины волны с помощью системы регистрации. Система регистрации обычно включает фотоэлектрический приемник излучения, преобразующий энергию электромагнитного излучения в электрический сигнал, аппаратные и программные средства для обработки и визуализации этого сигнала. Построенный график зависимости энергии выходного излучения от длины волны обычно и называют спектром.

В зависимости от типа используемого приемника излучения, различают следующие типы систем регистрации: интегральные и с построением изображения.

К интегральным системам регистрации относятся системы, в которых в качестве приемников излучения используются детекторы, преобразующие в электрический сигнал весь поток излучения (интегральный световой поток), без определения распределения энергии излучения по длинам волн. К такому типу детекторов относятся фотоэлектронные умножители (ФЭУ), фотодиоды и другие типы аналогичных детекторов.

К системам с построением изображения относятся системы, в которых в качестве приемников излучения используются линейные или матричные многоэлементные фотоприемники. Такие системы регистрации применяются в тех случаях, когда кроме собственно измерения количества энергии оптического излучения производится и определение распределения энергии излучения по длинам волн.

РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ.

Для регистрации спектров с помощью интегральных систем регистрации приемник излучения устанавливается непосредственно за выходной щелью спектрального прибора. Ширина выходной щели определяет спектральную полосу излучения, прошедшего через монохроматор, которая рассчитывается как произведение ширины щели на величину обратной линейной дисперсии монохроматора.

Получение спектра с использованием интегральных систем регистрации производится по точкам путем последовательной перестройки монохроматора по длинам волн (сканирования по спектру) с заданным шагом сканирования и с одновременной регистрацией электрического сигнала приемника излучения в каждой точке спектра. Сканирование по спектру осуществляется путем разворота дифракционной решетки относительно оси ее вращения. При этом изменяется спектральный интервал длин волн в фокальной плоскости, и, соответственно, спектральная полоса излучения, прошедшего через выходную щель монохроматора. Детектор регистрирует всю энергию излучения выбранной спектральной полосы.

Для получения корректного графика спектра, процесс сканирования спектра с помощью монохроматора и системы регистрации должен быть синхронизирован. Возможны два варианта такой синхронизации: временная и пошаговая. При временной синхронизации скорость сканирования монохроматора во всем диапазоне сканирования должна быть постоянной (задается в единицах «нм/сек»). При использовании в качестве системы регистрации приемника излучения и самопишущего прибора (самописца), скорость сканирования должна быть соотнесена со скоростью протяжки самописца. В этом случае график спектра визуализируется с помощью самописца. Возможны и другие варианты временной синхронизации - например, с помощью синхроимпульсов, вырабатываемых монохроматором через определенные промежутки длин волн во время сканирования. Но все системы «сканирующий монохроматор - система регистрации» с временной синхронизацией неудобны в практическом использовании.

В сканирующих монохроматорах производства "СОЛАР ТИИ" применен более удобный пошаговый принцип синхронизации процесса сканирования спектра и его регистрации. В качестве одной из составных частей такой системы регистрации является встраиваемая плата АЦП

(аналого-цифровой преобразователь). Эту плату мы предлагаем в качестве опции вместе с некоторыми нашими спектральными приборами. Плата принимает электрические сигналы с фотоприемников - фотодиод, ФЭУ и т.п. - и обрабатывает их с помощью 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя. Плата АЦП встраивается внутрь спектрального прибора.

Управление и спектральным прибором, и платой АЦП производится от компьютера по одному RS-232-интерфейсу. Использование такой платы позволяет на базе спектрального прибора построить спектрально-измерительный комплекс, т. е. производить сканирование по спектру в заданном спектральном диапазоне с заданным шагом сканирования с одновременной

регистрацией сигнала от фотоприемника. Измеренный спектр выводится на экран монитора в виде графического изображения. Управление таким комплексом производится от компьютера с помощью специализированной программы "PSI-Line".

Спектр снимается по точкам. Алгоритм следующий: задается спектральный диапазон сканирования, шаг сканирования и время измерения (усреднения) сигнала с фотоприемника в каждой точке спектра. При запуске процесса сканирования монохроматор перестраивается на начальную длину волны, останавливается и производится измерение сигнала с заданным временем измерения. Затем монохроматор перестраивается на следующую длину волны, отличающуюся от предыдущей на шаг сканирования, останавливается и производится измерение сигнала на этой длине волны, и так далее, проходя последовательно по точкам весь диапазон сканирования. Таким образом, процесс сканирования состоит из последовательного выполнения следующих циклов: цикл перестройки монохроматора на нужную длину волны (точку спектра) и цикл измерения сигнала с фотоприемника на этой длине волны. Визуализация спектра производится одновременно с процессом сканирования.

В каждой точке спектра во время цикла измерения аналого-цифровой преобразователь производит не один отсчет, а несколько, с последующим их усреднением, что позволяет увеличить точность измерения. Период между отсчетами АЦП составляет около 82 мксек. Минимальное задаваемое время измерения в каждой точке спектра - 1 мсек. Таким образом, даже при минимальном времени измерения в каждой точке спектра производится 12 отсчетов АЦП, их усреднение и отображение на графике спектра этого усредненного значения. Чем больше время измерения, тем больше производится отсчетов АЦП (зависимость - линейная) и тем ближе полученное усредненное значение сигнала с фотоприемника к истинному значению - т.е. тем выше точность измерения. Таким образом, меняя время измерения, можно менять и точность измерения. Для достижения необходимой точности измерения, при регистрации слабых сигналов нужно задавать большее время измерения, чем при регистрации больших сигналов. При этом абсолютная величина сигналов при регистрации их с различными временами измерения не меняется - при увеличении времени измерения увеличивается только точность измерения. С учетом такой особенности алгоритма измерения, время измерения в каждой точке спектра и названо как «время усреднения» ("averaging time").

Для такого алгоритма измерения скорость сканирования (в общепринятом понимании) не указывается. Скорость сканирования обычно задается в единицах «нм/сек» и определяется как отношение диапазона сканирования (в нанометрах) к времени сканирования заданного диапазона (в секундах). Для принятого алгоритма сканирования время сканирования одного и того же спектрального диапазона будет различным в зависимости от количества точек спектра и времени усреднения в каждой точке. Это связано с тем, что, как указывалось выше, процесс сканирования состоит из последовательного выполнения циклов перестройки монохроматора в нужную точку спектра и циклов измерения в этой точке.

Минимальное время усреднения в каждой точке спектра равно 1 миллисекунде, максимальное - 5000 миллисекунд.

Минимальный шаг сканирования равен единичному шагу перестройки по длинам волн зависит от параметров установленной решетки (количество штрихов на миллиметр). Например,

для монохроматор-спектрографа MS3501 с решеткой 1200 штр/мм минимальный шаг сканирования равен 0,01 нм.

В связи с тем, что сканирующие монохроматоры производства "СОЛАР ТИИ" имеют два выходных порта, на которые могут быть одновременно установлены два интегральных приемника излучения, плата АЦП также имеет два входа для приема сигналов с двух приемников. Каждый детектор может быть подключен к одному из входов.

Переключение выходных портов сканирующего монохроматора производится с помощью автоматизированного выходного зеркала по команде от компьютера. Выходной порт, на который с помощью выходного зеркала направлено излучение, называется активным. Соответственно, и детектор, установленный на активном выходном порту, также называется активным. Если используются два детектора, то в любой момент времени активным может быть только один из них. Плата АЦП может одновременно принимать сигнал только от одного приемника, подключенного к ее активному входу. Выбор активного входа платы АЦП производится либо автоматически, в зависимости от положения выходного зеркала, либо вручную.

В качестве приемников излучения интегральных систем регистрации наиболее часто используют фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и фотодиоды.

ФЭУ является фотоприемником с внешним фотоэффектом и представляет собой вакуумный элемент с внутренним усилением фототока в результате вторичной эмиссии. ФЭУ содержит фотокатод и большое количество вторичных эмиттеров (динодов), между которыми приложены ускоряющие разности потенциалов. Вылетевшие из фотокатода под действием света электроны ускоряются электрическим полем и направляются на первый диод, и образовавшиеся вторичные электроны также ускоряются и направляются на следующий диод, и т. д. Форма фотокатода и диодов, их взаимное расположение и величины ускоряющих полей рассчитываются так, чтобы все электроны, вылетевшие с одного диода (и фотокатода) попали на последующий. Таким образом, слабый фототок, обусловленный вылетевшими из фотокатода под действием света электронами, усиливается диодной системой и формирует на коллекторе (аноде) выходной токовый сигнал. Коэффициент усиления ФЭУ определяется количеством диодов.

Для использования с нашими сканирующими монохроматорами мы предлагаем ФЭУ, модель PMT R928. Этот детектор предназначен для регистрации оптического излучения в спектральном диапазоне от 185 до 900 нм. В качестве фоторегистрирующего элемента в детекторе используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), тип R928, производства фирмы Hamamatsu. Детектор устанавливается непосредственно на выходную щель спектральных приборов производства «СОЛАР ТИИ».

Фотодиод является фотоэлектрическим приемником с внутренним фотоэффектом. В этом приемнике используется эффект фотопроводимости - увеличение электропроводности полупроводника при поглощении фотонов.

Существует большое количество разновидностей фотодиодов в зависимости от материала полупроводника. Они различаются как рабочим спектральным диапазоном, так и чувствительностью. Наибольшее распространение получили фотодиоды на базе кремниевых структур - кремниевые фотодиоды (Si), германиевые (Ge) и индий-галий-арсенидовые (InGaAs) фотодиоды. Эти фотодиоды предназначены для работы в спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области спектра (от 0,2 до 2,3 мкм). Для более длинноволновой области спектра (от 1,5 до 5,5 мкм) могут использоваться InAs и InSb фотодиоды или фотосопротивления на базе PbS, PbSe или HgCdTe полупроводников. Для дальней инфракрасной (от 2 до 40 мкм) области спектра используются пироэлектрические детекторы или термопары.

Более подробную информацию о всех предлагаемых нами типах фотодиодов Вы можете найти на нашем сайте www.solartii.ru.

Одним из основных недостатков фотодиодов является их невысокая, по сравнению с ФЭУ чувствительность. ФЭУ, являясь фотоприемником с внутренним усилением фототока, имеет чувствительность на несколько порядков выше, чем фотодиоды. Но ФЭУ для работы требуют высокого питающего напряжения (до 2500 В), что иногда ограничивает их использование. При использовании фотодиодов требуется низкое питающее напряжение, что позволяет создавать компактные детекторы.

Основным достоинством фотодиодов является широкий спектральный рабочий диапазон. Спектральный диапазон ФЭУ определяется материалом фотокатода и обычно ограничен ультрафиолетовой и видимой (от 200 до 650 нм), а иногда и ближней инфракрасной (до 900 нм) областью спектра. ФЭУ для инфракрасной области (до 1,3 мкм) достаточно дорогие, и их чувствительность невысокая.

Одним из достоинств ФЭУ является их быстрое действие и малая выходная емкость, что позволяет создавать на базе ФЭУ быстродействующие детекторы для регистрации быстропротекающих процессов.

При использовании интегральных систем регистрации важно, чтобы все излучение, прошедшее через выходную щель, попадало на приемную площадку фотоприемника. Излучение, выходящее из щели монохроматора, распространяется не в виде параллельного пучка, а расходится в определенном телесном угле. Поэтому оптимальным было бы устанавливать приемник излучения непосредственно за выходной щелью, где апертура пучка минимальна, но это не всегда практически реализуемо. Некоторые приемники излучения (например ФЭУ РМТ R928 или фотодиод с приемной площадкой размером 10x10 мм) имеют достаточно большой размер приемной площадки. Детекторы, изготовленные на базе таких приемников, можно устанавливать непосредственно на выходную щель монохроматора. Для детекторов с приемной площадкой менее 5 мм необходимо использовать специальный узел сопряжения, который с помощью тороидального зеркала переносит изображение выходной щели на фоточувствительную поверхность приемника излучения. В этом случае все выходное излучение монохроматора попадает на приемную площадку приемника излучения без потерь. При необходимости мы можем рассчитать и изготовить нужный узел сопряжения для Ваших детекторов.

РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ С ПОСТРОЕНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ.

При регистрации спектров с помощью систем регистрации с построением изображения приемник излучения устанавливается в фокальной плоскости спектрального прибора. Выходная щель в этом случае не используется, а дифракционная решетка устанавливается в положении, при котором в фокальной плоскости формируется заданный спектральный интервал длин волн.

В системах регистрации с построением изображения используются линейные или матричные многоэлементные фотоприемники.

Линейный фотоприемник (детектор) состоит из большого количества (до нескольких тысяч) фоточувствительных элементов, сориентированных в линию. Часто эти фоточувствительные элементы линейного фотоприемника называют «пикселями», от английского "pixel" - (минимальный) элемент изображения. Линейный детектор устанавливается в фокальной плоскости спектрального прибора (в этом случае он называется *спектрографом*) таким образом, чтобы пространственно разложенное в спектр выходное излучение располагалось вдоль линейки фоточувствительных элементов (пикселей). Каждый пиксель линейного детектора регистрирует энергию излучения спектральной полосы, ширина которой определяется линейной шириной пикселя и дисперсией прибора. Регистрация сигналов со всех фоточувствительных элементов

линейного детектора производится одновременно. Если визуализировать результат измерения сигналов с линейного детектора в виде графика, ось ординат которого будет отображать интенсивность сигнала от фоточувствительного элемента, а ось абсцисс - порядковый номер этого элемента, то полученный график будет являться графиком зависимости энергии выходного излучения от длины волны, т.е. спектром.

Например, для монохроматор-спектрографа MS3501 с решеткой 1200 штр/мм обратная линейная дисперсия (средняя) равна 2,37 нм/мм. При регистрации спектра с помощью детектора HS102H, ширина одного пикселя которого равна 14 мкм, спектральная полоса, регистрируемая одним пикселем, будет равна $2,37 \text{ [нм/мм]} \times 0,014 \text{ [мм]} = 0,033 \text{ [нм]}$. Принимая во внимание, что общее количество пикселей этого детектора равно 2048, можно рассчитать спектральный интервал длин волн, регистрируемый всем детектором: $2048 \times 0,033 \text{ [нм]} = 68 \text{ [нм]}$.

Для того, чтобы зарегистрировать весь спектр, необходимо регистрировать его по частям, последовательно поворачивая дифракционную решетку в спектрографе с определенным шагом, производя на каждом шаге регистрацию спектра. Обычно регистрируют наиболее информативную для пользователя часть спектра. Для поиска этой части спектра используют решетки, которые позволяют увеличить спектральный диапазон длин волн, одновременно регистрируемый линейным детектором. Например, при использовании решетки 150 штр/мм в спектрографе MS3501, обратная линейная дисперсия (средняя) будет равна примерно 17 нм/мм, и, следовательно, одновременно регистрируемый линейным детектором спектральный диапазон длин волн составит около 487 нм ($17 \times 0,014 \times 2048$). Выбрав в зарегистрированном с помощью такой решетки спектре (его иногда называют «обзорным») нужный, более узкий, диапазон, далее этот диапазон регистрируют более детально, используя решетки с большим количеством штрихов на миллиметр. Для организации такого метода регистрации необходимо использовать спектрограф со сменными решетками. Наиболее удобны в этом отношении спектрографы с четырехпозиционной автоматизированной турелью на 4 дифракционные решетки. Смена решеток производится автоматически, по командам с компьютера.

В случае заказа спектрографа совместно с линейным детектором в качестве системы регистрации, последний поставляется калиброванным по длинам волн. Управление и спектрографом, и линейным детектором в этом случае производится от компьютера с помощью специализированной программы "PSI-Line". Для установленной выходной длины волны спектрографа программа точно рассчитывает регистрируемый линейным детектором спектральный интервал длин волн в зависимости от характеристик спектрографа и параметров установленной решетки.

Линейные детекторы широко используются в малогабаритных спектрографах с фиксированным положением решетки. В таких спектрографах, в отличие от сканирующих, нет движущихся частей; решетка устанавливается под определенным фиксированным углом. В зависимости от угла разворота решетки и ее параметров, в фокальной плоскости формируется спектр нужного спектрального интервала. Спектрограф со встроенной системой регистрации называется *спектрометром*. "СОЛАР ТИИ" предлагает несколько моделей малогабаритных спектрометров - серии SL40-2 (см. стр.8) и серии S150-2 (см. стр.18).

Наряду с линейными фотоприемниками, в системах регистрации с построением изображения используются матричные фотоприемники, в которых фоточувствительные элементы расположены в виде поля (матрицы) из большого количества линий, называемых строками. Детекторы с матричными фотоприемниками могут быть применены в качестве линейных, используя аппаратное суммирование требуемого количества строк или выделяя на матрице необходимое количество линеек.

Наиболее широко системы регистрации с матричными фотоприемниками применяются в многоканальной спектроскопии (Multi-track Spectroscopy), где в качестве спектрального прибора используется спектрограф *изображения* (Imaging Spectrograph). Если на вход такого спектрографа

подать пространственно разнесенное излучение от нескольких источников, то в фокальной плоскости сформируются пространственно разнесенные спектры от каждого отдельного источника. Расположив матричный фотоприемник таким образом, чтобы спектры располагались вдоль строк матрицы, и используя для визуализации только те строки, на которые попадает выходное излучение, можно одновременно регистрировать спектры от нескольких источников.

При выборе системы регистрации необходимо учитывать спектральный диапазон работы детектора и скорость регистрации спектров.

Скорость (время) регистрации спектров.

Скорость регистрации спектров с использованием систем регистрации с построением изображения, в которых одновременно регистрируется весь спектральный интервал длин с

использованием интегральных систем регистрации, в которых регистрация спектров производится последовательно попадающий по точкам. При регистрации достаточно слабых световых потоков для систем

регистрации с построением изображения необходимо увеличивать время экспозиции. В то же время, если в интегральной системе регистрации применяется высокочувствительный детектор(например, ФЭУ), регистрация аналогичного слабого светового потока может производиться с большей скоростью, и в этом случае скорости регистрации спектров обоими системами

регистрации могут быть сопоставимы, особенно если требуется зарегистрировать спектр в узком интервале длин волн. Системы регистрации с построением изображения обладают неоспоримым преимуществом, по сравнению с интегральными системами, при регистрации спектров быстропротекающих

Спектральный диапазон.

Спектральный диапазон регистрируемого интервала длин волн в большинстве случаев зависит от области спектральной чувствительности приемника излучения, так как обычно спектральные приборы могут обеспечить достаточно широкий интервал длин волн выходного излучения.

Линейные и матричные детекторы на базе кремниевых структур имеют область спектральной чувствительности от 200 до 1100 нм (ультрафиолетовая, видимая и ближняя инфракрасная область спектра). Это наиболее широко используемые линейные детекторы в силу своей относительной дешевизны. Линейные детекторы для ближней инфракрасной области спектра - область спектральной чувствительности от 900 до ~2500 нм - достаточно дорогие. Линейные детекторы для других спектральных диапазонов либо очень дорогие, либо не производятся вообще. Таким образом, одним из ограничений использования линейных детекторов является их достаточно узкий диапазон спектральной чувствительности.

Интегральные детекторы имеют гораздо более широкую область спектральной чувствительности. В зависимости от типа детектора, они могут регистрировать излучение в диапазоне длин волн от 190 нм до 40 мкм.

Подробную информацию о всех системах регистрации, предлагаемых СП "СОЛАР ТИИ", Вы можете найти на нашем сайте www.solartii.ru.

При необходимости наши специалисты помогут выбрать систему регистрации наилучшим образом подходящую для Ваших задач.