

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. ВЫБОР СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРА.

Спектральными называются оптические приборы, в которых осуществляется разложение электромагнитного излучения оптического диапазона на монохроматические составляющие. Такие приборы используются для качественного и количественного исследования спектрального состава света, излучаемого, поглощаемого, отражаемого или рассеиваемого веществом. Эти исследования позволяют судить о свойствах вещества, его химическом составе и характере физических процессов, связанных с излучением или взаимодействием света с веществом. Спектральные приборы применяются также для получения излучения заданного спектрального состава.

Предлагаемые "СОЛАР ТИИ" спектральные приборы являются «классическими» по способу осуществления спектрального разложения излучения. В этих приборах в качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решетка, которая осуществляет пространственное разложение излучения в спектр (по длинам волн).

«Классические» приборы можно разделить на две группы: монохроматоры и спектрографы.

**Монохроматоры** предназначены для выделения излучения в пределах заданного спектрального интервала. Оптическая система монохроматора включает в себя входную щель, коллиматорный объектив, дифракционную решетку, фокусирующий объектив и выходную щель, которая выделяет излучение, принадлежащее узкому интервалу длин волн. В монохроматорах всегда имеется возможность сканирования спектра путем поворота дифракционной решетки вручную либо с помощью специального механизма.

**Спектрографы** предназначены для одновременной регистрации относительно широкой области спектра. В отличие от монохроматоров, в фокальной плоскости фокусирующего объектива вместо выходной щели устанавливается многоэлементный приемник (фотодиодная линейка, ПЗС линейка, ПЗС матрица и др.), позволяющий регистрировать оптическое излучение в пределах определенного поля. Спектрографы используются преимущественно в ультрафиолетовой (УФ), видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра, что обусловлено имеющимися в настоящее время многоэлементными приемниками излучения (190 - 2600 нм).

Основными характеристиками спектральных приборов, определяющими их свойства и возможности, являются:

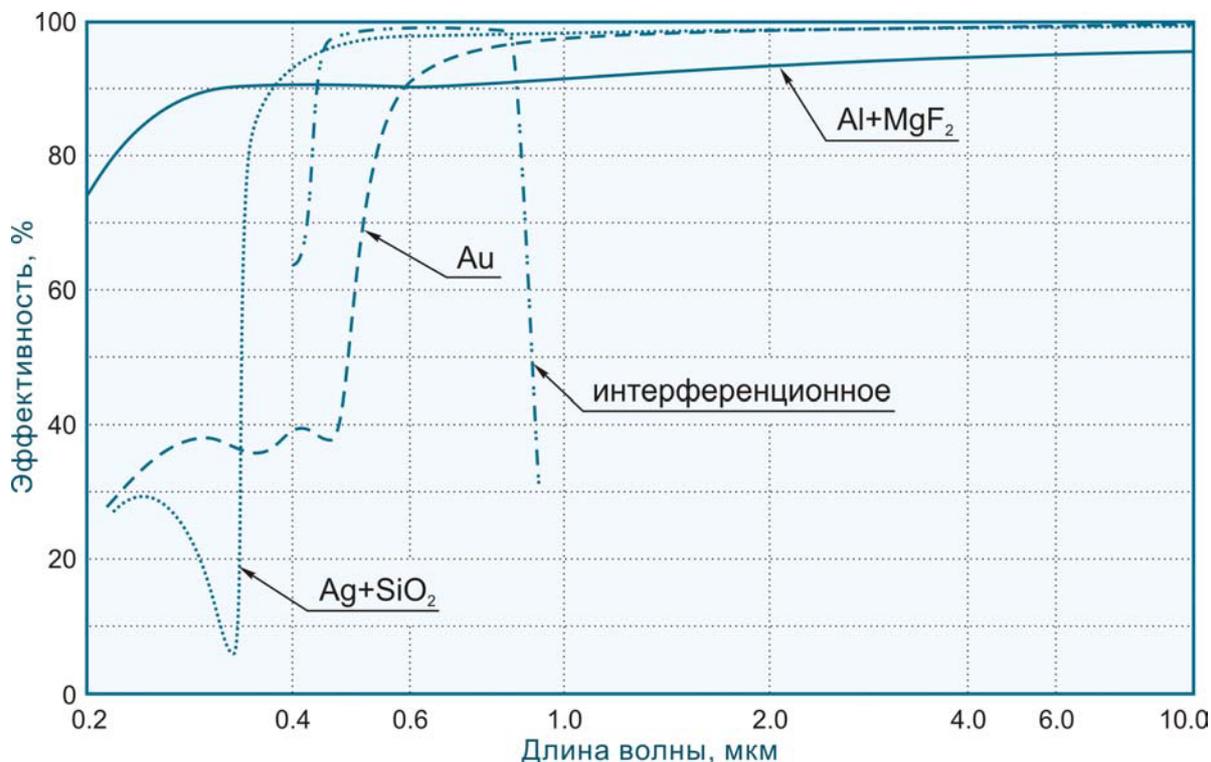
- рабочий спектральный диапазон,
- светосила и относительное отверстие,
- дисперсия и разрешающая способность,
- уровень рассеянного света,
- компенсация астигматизма.

### РАБОЧИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ДИАПАЗОН ПРИБОРА.

Оптическое излучение занимает обширную область электромагнитного спектра. Мы предлагаем приборы, которые позволяют работать в спектральной области от 0,18 до 60 мкм. Коротковолновой диапазон ограничен тем, что воздух становится непрозрачным для длин волн короче 180 нм. Измерения в более коротковолновой области требуют применения специальных вакуумных спектральных приборов.

Наиболее широкий спектральный диапазон имеют приборы с зеркальной оптикой. В этих приборах рабочий диапазон определяется параметрами дифракционной решетки и типом покрытий, наносимых на отражающие поверхности оптических элементов (зеркал, решеток). В зеркально-линзовых спектральных приборах рабочий спектральный диапазон определяется в основном материалом, из которого изготовлена линзовая оптика.

Мы предлагаем 4 типа покрытий:  $\text{Al}+\text{MgF}_2$ ,  $\text{Ag}+\text{SiO}_2$ , Au и интерференционное. Интерференционное покрытие не является стандартным и изготавливается в случае необходимости согласно требованиям заказчика. Выбор типа покрытия является очень важным, так как определяет пропускание спектрального прибора. График зависимости коэффициента отражения зеркальной поверхности для различных типов покрытий представлен на рисунке.



Выбор рабочего спектрального диапазона прибора также определяется параметрами дифракционных решеток. Мы предлагаем широкий выбор дифракционных решеток для УФ, видимого и ИК диапазонов. Правильный выбор дифракционной решетки позволяет получить наилучшее сочетание высокой энергетической эффективности и минимального рассеянного света для различных областей спектра. Вы можете выбрать нужную решетку из нашего перечня (стр. 60-61) сами, либо проконсультироваться с нашими специалистами.

Каждая дифракционная решетка, имеет свой рабочий спектральный диапазон длин волн, который определяется одной из характеристик решетки - длиной волны в угле блеска (углом блеска). Эффективность решетки в угле блеска максимальна и уменьшается как для длинных, так и для коротких волн. Диапазон длин волн, для которых эффективность решетки составляет не менее 40 процентов относительно эффективности на длине волны в угле блеска, и есть рабочий диапазон длин волн данной решетки.

При выборе дифракционных решеток следует учитывать такой важный параметр, как «угол разворота решетки» в приборе. В монохроматорах/спектрографах угол разворота решетки определяется конструкцией прибора. Например, в монохроматор-спектрографе MS3501 угол разворота решетки составляет от  $0^\circ$  до  $55^\circ$ , что в пересчете на длину волны соответствует 0-1290 нм для решетки 1200 штр/мм. Для дифракционных решеток с различным числом штрихов этот параметр различен и изменяется пропорционально соотношению числа штрихов. Для решетки 600 штр/мм и 300 штр/мм максимальная длина волны будет соответственно в 2 раза и в 4 раза больше, чем для решетки 1200 штр/мм, т.е. 2580 нм и 5160 нм. А для решетки 1800 штр/мм и 2400 штр/мм максимальная длина волны будет соответственно в 1,5 и 2 раза меньше и составит соответственно 860 нм и 645 нм.

Пример 1. Угол разворота решетки 1200 штр/мм в монохроматор-спектрографе MS3501 составляет 0-1290 нм. При использовании решетки с длиной волны в угле блеска 250 нм ее рабочий диапазон длин волн составит от 170 до 500 нм (диапазон, в котором эффективность решетки составляет не менее 40 процентов относительно эффективности на длине волны в угле блеска). Рабочий же спектральный диапазон прибора составит 180-500 нм, т.к. излучение с длинами волн короче 180 нм будет поглощаться воздухом.

Пример 2. Угол разворота решетки 1800 штр/мм в MS3501 составляет 0-860 нм. При использовании решетки с длиной волны в угле блеска 750 нм ее рабочий диапазон длин волн составит от 500 до 1100 нм. Рабочий же спектральный диапазон прибора составит 500-860 нм, т.к. длинноволновая граница рабочего спектрального диапазона прибора будет ограничена не рабочим диапазоном самой решетки (500-1100 нм), а максимальным углом разворота решетки в приборе.

### СВЕТСИЛА И ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ОТВЕРСТИЕ.

Светосила спектрального прибора характеризует освещенность, создаваемую в фокальной плоскости фокусирующего объектива, или поток излучения, падающий на приемник и з л у ч е н и я . Энергия излучения, проходящего через спектральный прибор и попадающего на приемник излучения, определяется относительным отверстием коллиматорного и фокусирующего объективов. Объектив с круглым входным зрачком диаметра  $d$  с фокусным расстоянием  $f$  характеризуется относительным отверстием

$$\varepsilon = \frac{d}{f} \text{ или фокальным числом равным } \frac{1}{\varepsilon}$$

Объектив с прямоугольным входным зрачком со сторонами  $a$  и  $h$  характеризуется относительным отверстием

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{ah}}{f}$$

Например, если фокусное расстояние коллиматорного зеркала составляет 380 мм, а его размеры - 70x70 мм, то относительное отверстие  $\varepsilon=1/4,8$ , а фокальное число равно 4,8.

Чем меньше фокальное число, тем большая часть излучения от источника, проходя через спектральный прибор, попадает на приемник. Поэтому, если источник излучения очень слабый, необходимо выбирать спектральный прибор с меньшим фокальным числом (с большим относительным отверстием). Однако следует учитывать, что с уменьшением фокального числа, характеризующего большую светосилу прибора, ухудшается его разрешающая способность из-за увеличения аберраций (сферической и комы).

### ДИСПЕРСИЯ И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ.

Важными характеристиками спектрального прибора являются его угловая и линейная дисперсии. Угловая дисперсия есть характеристика диспергирующего устройства (дифракционной решетки). Эта величина определяет его способность отклонять излучение различных длин волн на разные углы. Если лучи двух близких длин волн  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$  отклоняются соответственно на углы  $\theta$  и  $\theta + d\theta$ , то угловая дисперсия определяется как производная  $d\theta / d\lambda$ .

Для дифракционной решетки угловая дисперсия

$$D = \frac{kN}{\cos \varphi}, \text{ где}$$

$k$  - порядок дифракционного спектра,

$N$  - число штрихов/мм решетки,

$\varphi$  - угол дифракции.

Очевидно, что угловая дисперсия тем больше, чем больше число штрихов/мм (штр/мм) у решетки и чем больше угол дифракции, а также в случае работы в высоких порядках спектра.

Линейная дисперсия является характеристикой прибора в целом. Если  $dl$  есть расстояние на поверхности изображения между двумя близкими спектральными линиями, разность длин волн которых равна  $d\lambda$ , то тогда линейная дисперсия находится как производная  $dl/d\lambda$ .

Часто спектральные приборы характеризуются величиной, называемой обратной линейной дисперсией  $d\lambda/dl$  и выражаемой в нм/мм:

$$\frac{d\lambda}{dl} = \frac{\cos\delta}{2Df}, \text{ где}$$

$f_2$  - фокусное расстояние фокусирующего объектива,

$\delta$  - угол наклона поверхности изображения.

Важной характеристикой спектрального прибора является предел разрешения, определяемый как наименьшая разность длин волн  $\delta\lambda$  двух монохроматических спектральных линий равной интенсивности, которые разрешаются, т.е. наблюдаются отдельно.

Для количественной оценки способности прибора различать отдельно две близко расположенные спектральные линии вводится понятие разрешающей способности как отношения длины волны к пределу разрешения:

$$k = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

Рассмотрим связь между разрешающей способностью и дисперсией.

$$k = \frac{\lambda}{b_1} \frac{dl}{d\lambda}, \text{ где}$$

$b_1$  - наименьшее расстояние между двумя разрешаемыми монохроматическими линиями.

Таким образом, разрешающая способность прибора пропорциональна его линейной дисперсии. Для увеличения разрешающей способности применяют монохроматоры со сложением дисперсии (см. MSDD1000, стр.46) и эшелле монохроматоры, работающие в высоких порядках спектра (см. MSE750, стр.50).

### УРОВЕНЬ РАССЕЯННОГО СВЕТА.

Во всех монохроматорах на выходную щель всегда попадает, помимо разложенного в спектр излучения, еще и некоторое количество паразитного (рассеянного) излучения других длин волн. Объяснить это можно многократным отражением света от оптических деталей, бликами на их оправах и внутренних стенках прибора, рассеянием света на поверхностях оптических деталей.

Рассеянный свет снижает точность спектрофотометрических измерений особенно тогда, когда яркость источников или чувствительность приемников излучения в исследуемой области спектра невелика. Чтобы уменьшить уровень рассеянного света, мы черним оправы и внутренние стенки с помощью специальных покрытий, а также устанавливаем внутри приборов перегородки и применяем дополнительные светофильтры.

Наиболее надежным способом устранения рассеянного света является применение монохроматоров с двойной дисперсией (см. MSDD1000, стр.46) и двойных монохроматоров (см. DM160, стр.21). Наличие в двойном монохроматоре промежуточной щели позволяет на три порядка снизить уровень рассеянного света, что делает эти приборы незаменимыми в лазерной рамановской спектроскопии, где измеряемые сигналы на десять порядков меньше сигналов лазера.

## **КОМПЕНСАЦИЯ АСТИГМАТИЗМА (IMAGING).**

Из большого количества aberrаций, присущих оптическим системам, мы хотели бы остановиться на астигматизме, т.к. эта aberrация характерна для всех «классических» спектральных приборов.

Зеркальные объективы, применяемые в спектральных приборах, не имеют оси симметрии и обладают помимо aberrаций, свойственных обычным центрированным системам, еще и aberrацией децентрировки (астигматизм). Вследствие этой aberrации точка на входной щели прибора изображается в фокальной плоскости в виде вертикальной линии. В большинстве приборов "СОЛАР ТИИ" предусмотрена опция, в которой астигматизм скорректирован за счет использования специальной оптики. Такие приборы принято называть монохроматорами или спектрографами изображения (imaging spectrograph).

Если на входную щель такого спектрографа подать разнесенное по высоте щели излучение от нескольких точечных источников, то в фокальной плоскости сформируются разнесенные по высоте спектры. Это позволяет использовать приборы с компенсацией астигматизма в многоканальной спектроскопии (Multi-track Spectroscopy), когда полученные в фокальной плоскости разнесенные по высоте спектры одновременно регистрируются матричным фотоприемником.

Использование оптической схемы с компенсацией астигматизма позволяет также минимизировать потери света в случае, если приемник излучения имеет малые размеры. Это характерно для ИК-приемников, размеры которых, как правило, очень малы вследствие необходимости снижения шумов.

## **ВОЗМОЖНОСТЬ УСТАНОВКИ ДЕТЕКТОРОВ.**

Для регистрации спектра, полученного с помощью спектрального прибора, могут использоваться различные системы регистрации - детекторы (подробнее о системах регистрации см. стр. 62). В зависимости от типа, детектор может устанавливаться либо непосредственно на выходной порт, либо на выходную щель спектрального прибора.

Для интегральных 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.

Мы предлагаем адаптеры для наших стандартных детекторов и адаптеры для установки детекторов других производителей.

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРИБОРАМИ.**

Большинство приборов производства "СОЛАР ТИИ" имеют высокую степень автоматизации, которая обеспечивается надежной встроенной электроникой. Процессы поворота дифракционной решетки, переключения дифракционных решеток (для моделей с турелью), установки ширины раскрытия спектральных щелей, смены выходного порта, а также управление работой дополнительных устройств таких, как фильтровое колесо, быстрый затвор и другие, полностью автоматизированы. Вам необходимо лишь задать с помощью компьютера или пульта ручного управления соответствующие параметры работы прибора для данного измерения и система автоматически произведет все замены и настройки.

Для управления спектральным прибором используется специальная программа, которая поставляется вместе с прибором бесплатно.