

*Л.Е. СТАРОВОЙТОВ, М.Е. МИКОЛУЦКИЙ,  
О.В. РЫЖКОВ, С.С. ГУСЕВ*

## **МАКЕТ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИНФРАКРАСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА**

*Предложена схема и экспериментально реализован инфракрасный автоматизированный рефлектометр на базе серийного спектрофотометра UR-20, снабженного эффективным поляризатором отражения и набором оптико-механических устройств внутреннего отражения. Продемонстрированы возможности экспериментального использования установки при получении спектров внутреннего отражения пленок полимеров и автоматизированного расчета показателей преломления и поглощения этих полимеров по алгоритму трансцендентных уравнений Френеля.*

### **Введение**

На современном этапе развития методов прикладной молекулярной спектрофотометрии наряду с традиционными структурно-аналитическими способами адсорбционного анализа по пропусканию, развиваются направления, основанные на использовании высокочувствительных к свойствам объекта фазовых характеристик света. Особенно эффективными в этом плане при анализе и контроле материалов являются условия внешнего и внутреннего отражения света. Экспериментальная реализация и обеспечение таких условий при исследовании нетрадиционных свойств поверхностей раздела фаз и субмикронных по толщине неоднородных планарных структур (покрытия, пленки, порошки, волокна) сдерживаются отсутствием соответствующей отечественной спектральной аппаратуры. Анализ достижений мировой практики в спектральном приборостроении показывает, что имеющиеся образцы единичных разработок узко функциональны и дорогостоящи. Поэтому идея создания на базе известных серийных фотометров комплекса, позволяющего в рамках общепринятой фотометрической воспроизводимости измерять энергетические коэффициенты отражения света, является актуальной и своевременной.

В результате предыдущих исследований было показано, что для этих целей можно раздельно использовать ряд оптико-механических устройств, в определенной мере обеспечивающих спектральные методы анализа конденсированных сред по параметрам света в условиях полного внутреннего отражения (НПВО) [1].

### Основная часть

Ниже излагаются данные по созданию и применению комплекса, позволяющего измерять, в том числе и в поляризованном свете, спектральные коэффициенты внутреннего отражения в оптическом диапазоне 2,5-25 мкм.

Основная практическая проблема при измерениях коэффициентов отражения – это поиск путей достижения минимума энергетических потерь, если в сложившуюся оптическую схему фотометра вносится дополнительное число нестандартных оптических элементов. Известно, что функциональные возможности для качественной идентификации пробы с помощью любого двухлучевого спектрофотометра еще сохраняются, если энергетические потери при измерениях не превышают 95% по фотометрической шкале. Снижению указанного предела способствуют следующие факторы. Дополнительные устройства в конструкциях должны содержать отражающие (для ИК диапазона это плоские зеркала) и прозрачные оптические элементы. Потоки излучения в каналах должны быть максимально коаксиальны, с минимальным угловым расхождением (апертурой). Для измерений в поляризованном свете аналогичные требования накладываются на элементы поляризатора с достижением высокой степени поляризации в широком спектральном диапазоне. И естественно, необходимо, чтобы технологические габариты оптической скамьи фотометра позволяли размещать элементы дополнительных устройств без изменения спектрально-оптических параметров установки в целом. Нам неизвестна ни одна модель современного фотометра, будь то с дифракционным или Фурье разложением и сканированием спектра, которая позволила бы в целом выполнить перечисленные выше требования. С одной стороны – это принципиальная невозможность абсолютных количественных измерений интенсивностей потоков, например при Фурье разложении, с другой, – отсутствие доступных мест расположения оптических элементов из-за компактности современных фотометров. Тем не менее, из прежних моделей, по нашему мнению, внимание заслуживает фотометр типа UR-20 производства фирмы Карл Цейс (Иена, Германия). Выполненная по классическому варианту двухлучевая оптическая схема технологически позволяет на своем основании разместить одновременно несколько дополнительных оптических устройств. И самое существенное, что наличие в оптической схеме колиматорного зеркала с большим фокусным расстоянием позволяет измерять энергии пучков в условиях их минимального углового расхождения.

Принципы реализации оптической схемы макета рефлектометра на базе модели UR-20 демонстрируются на рис. 1. В каналах лучей размещаются соответствующие оптические устройства.

1. Поляризирующее устройство (П) представляет собой трехзеркальный оптический элемент прямого прохождения одновременно для обоих пучков. Одно зеркало алюминиевое, а два германиевых зеркала выставлены относительно осей пучков под углом Брюстера. Устройство полностью прозрачно в области 2,5-25 мкм со степенью поляризации 99%. Кстати, по такой высокой степени поляризации аналоги данному устройству неизвестны.

2. На рисунке 2а представлена схема устройства однократного внутреннего отражения (НПВО) с переменным углом падения [2]. Рабочий элемент в виде полуцилиндра изготовлен из прозрачного в указанном спектральном диапазоне материала (КРС-6, КРС-5 или германий). При смене угла падения происходит автоматическое перемещение двух плоских зеркал таким образом, что совершенно исключает разъюстировку для всего устройства в целом. Энергетические потери при использовании последнего не выше 60%. Для лучшего серийного аналога подобные потери порядка 80%. При использовании второго идентично-

го устройства в канале сравнения возможно проведение количественных оценок коэффициентов отражения. Пределы изменения углов падения  $30^\circ \div 70^\circ$ .

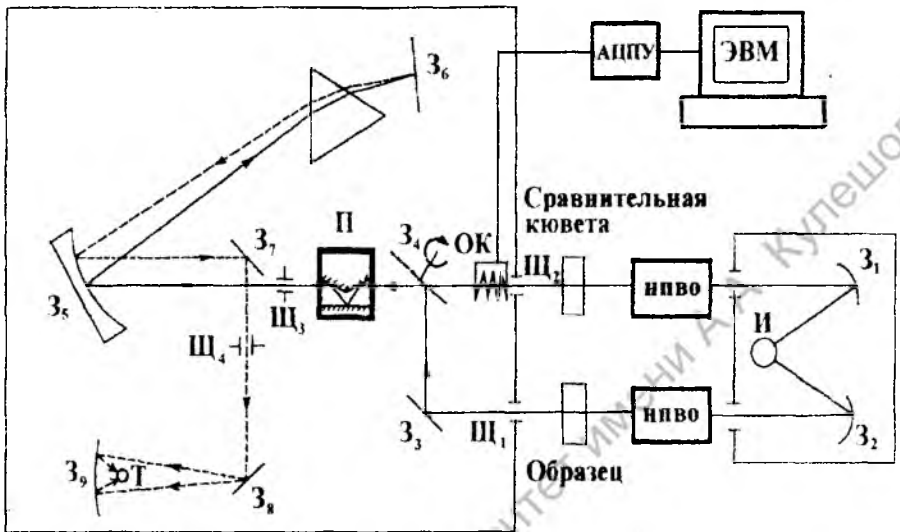


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема рефлектометра.

Пояснения дополняются текстом. ОК – оптический клин,

И – источник излучения, П – поляризатор, Т – термостолбик, Щ – щелевые группы

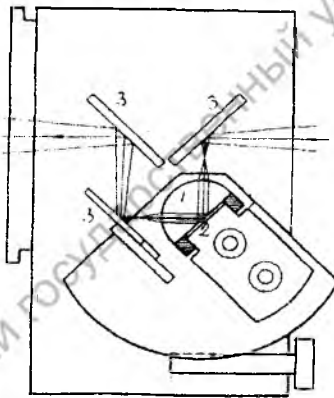


рис 2,а

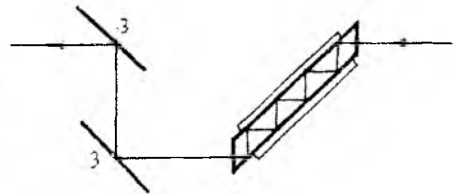


рис 2,б

Рис. 2. Оптические схемы устройств внутреннего отражения:

а) – однократного с переменным углом падения:

1 – элемент в виде полуцилиндра,

2 – в контакте с элементом исследуемая пленка; 3 – зеркала.

б) – многократного отражения; элемент в виде параллелепипеда с расположенными образцами пленок, 3 – зеркала

3. Устройство многократного внутреннего отражения (МНПВО) (рис. 2, б) прямого прохождения в виде плоскопараллельных световодов со скошенными гранями из выше указанных прозрачных материалов обеспечивают получение спектров МНПВО слабо поглощающих объектов. В нашем наборе таких устройств использовались пары элементов с углами падения  $45^\circ$  и  $55^\circ$ . Число отражений можно было выбирать из ряда 8, 12, 14, 18.

4. Через прецизионный потенциометр, жестко связанный с оптическим клином, реализована система перевода значений степени отражения в электрический сигнал, который через АЦПУ заводится в системный блок ЭВМ. В процессе записи спектра последовательностью электрических сигналов автоматически управляет встроенный рядом с оптическим клином кодировщик длин волн. Он работает в широком интервале задаваемых спектральных параметров и скоростей сканирования. Накопленный цифровой массив можно с помощью ЭВМ обрабатывать по заданным математическим алгоритмам. Используется набор как стандартных машинных программ с целью обработки и улучшения спектральной информации, так и некоторые оригинальные программы. В частности, для нас таковыми являлись программы расчета спектральных функций коэффициентов преломления и поглощения по соотношениям Крамерса-Кронига и по формулам Френеля [3; 4].

В качестве примера на рисунке 3а приведены фрагменты спектров пленок полиэтилентерефталата в вариантах пропускания и НПВО. Сравнением соответствующих степеней отражения (пропускания) подтверждаются преимущества способа НПВО, если требуется обнаружить тонкие особенности спектра поглощения.

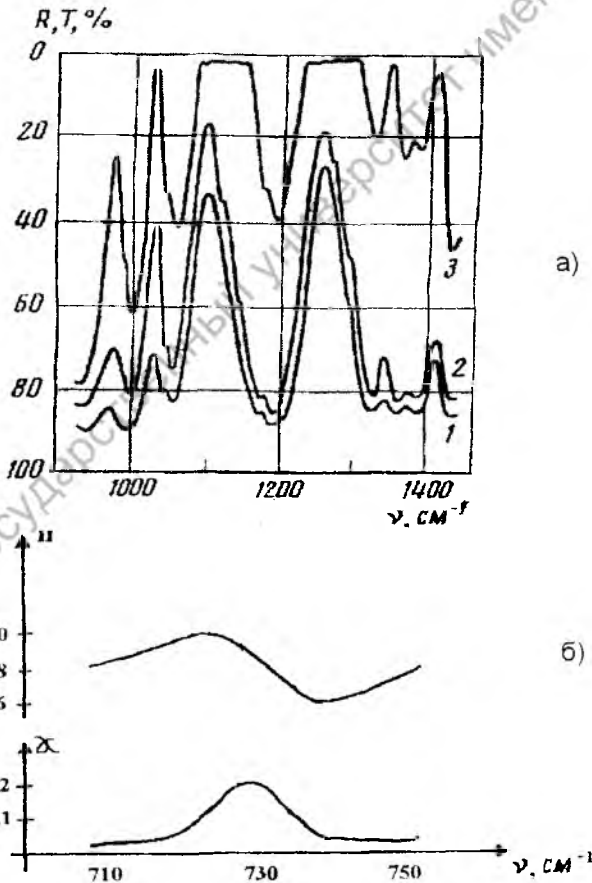


Рис. 3. Фрагменты спектров промышленных образцов пленок полиэтилентерефталата (лавсана):

- а) спектры МНПВО пленок р-(1) и s-(2) компонент поляризованного излучения;  
 3 – спектр поглощения аналогичной пленки.  
 б) рассчитанные спектральные функции показателей преломления и поглощения той же пленки, но с использованием спектров однократного внутреннего отражения

Рисунком 3б демонстрируются результаты автоматизированного расчета спектральных функций показателей преломления и поглощения промышленной полиэфирной пленки. Здесь в эксперименте использовались устройства НПВО (схема рис. 2, а), S-компонента поляризованного излучения. Запись спектра НПВО производилась при двух углах падения  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ . Расчет произведен по машинному алгоритму решений комплексных уравнений Френеля при указанных условиях записи энергетических коэффициентов отражения.

С применением использованного выше блока АЦПУ решена проблема автоматизации записи спектральных распределений и другого спектрофотометра серии ИКС-29. При этом, естественно, всегда также сохранялись возможности целевых обработок этой информации по соответствующим алгоритмам.

### Заключение

Созданный и протестированный макет инфракрасного рефлектометра с набором адаптированных к нему оптико-механических устройств может обеспечивать экспериментальное получение данных при исследованиях конденсированных состояний по следующим направлениям прикладной оптики: – неразрушающее тестирование поверхности и приповерхностных зон фазового раздела с изменяющейся глубиной, получение функций показателей преломления и поглощения тех же зон в широком диапазоне длин волн.

В представленном варианте макет используется для научных исследований. В упрощенных вариантах макет внедрен и используется при проведении лабораторных работ в рамках специальных практикумов, обеспечивая подготовку и обучение студентов старших курсов по специальности физическая оптика.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Харрик, Н. Спектры внутреннего отражения. / Н. Харрик. – М.: Мир, 1970. – 335 с.
2. Гусев, С.С. Приставка НПВО к спектрометрам UR – 10 и UR – 20 / С.С. Гусев, В.И. Головачев // Приборы и техника эксперимента. – 1974. – № 6. – С. 115-118.
3. Гусев, С.С. Оптическая ячейка МПВО к спектрофотометрам серии ИКС – 29 / С.С. Гусев, В.И. Головачев, О.Е. Осаенко // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова. – 2000. – № 2-3(6). – С. 89-91.
4. Старовойтов, Л.Е. Одноугловой способ решения обратной задачи полного внутреннего отражения / Л.Е. Старовойтов, О.Е. Осаенко, С.С. Гусев. Оптика неоднородных структур: материалы республиканской научно-практической конференции. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2004. – С. 64-67.