

Схемы построения прецизионных спектрополяриметров для физико-химического анализа

© Г.И. Уткин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Описаны схемы построения спектрополяриметров для исследования физико-химических свойств оптически активных веществ и биоструктур. Приведены методы повышения их точности и помехоустойчивости.

Ключевые слова: *оптическая активность, поляриметрия, оптико-электронный поляриметр, спектрополяриметр.*

В настоящее время все больше внимания уделяют проблеме создания новых высокочистых материалов и биоструктур, важных для таких приоритетных направлений научно-технического прогресса, как микроэлектроника, оптоэлектроника, биотехнология и медицина. Причем подавляющее большинство физиологически активных веществ и биоструктур наших организмов обладают оптической анизотропией, в частности оптической активностью. Синтез новых материалов и биоструктур невозможен без наличия высокоточных быстродействующих методов и средств контроля их состава и структуры, работающих в реальном масштабе времени. Наиболее чувствительной характеристикой оптического излучения к симметричным преобразованиям пространственной структуры сложных объектов является его поляризация. Поэтому при интегральной быстрой оценке пространственной структуры объектов наилучшие по информативности результаты получают с использованием оптических поляризационных методов исследования. По сравнению с рентгеновскими и химическими методами поляризационные методы обладают такими преимуществами, как очень высокая точность измерений, высокая разрешающая способность, объективная возможность проведения непрерывной самокалибровки приборов по физическим константам излучения, широкий оптический спектральный диапазон, бесконтактный неразрушающий метод измерения, а также компактность, экологичность и простота обслуживания поляриметрической аппаратуры.

Дисперсия оптической активности (ДОВА) служит основным эффективным методом обнаружения слабой оптической активности. Этот метод широко применяют в аналитической химии при определении конфигурации органических соединений, качественного и количе-

ственного состава веществ. Кривые ДОВ служат эффективным инструментом для идентификации различных веществ в биотехнологии и фармацевтике. [1]. Со времени появления первых фотоэлектронных поляриметров теоретическое объяснение строения спектров ДОВ получило значительное развитие [2]. Однако дальнейший прогресс в этой области сдерживается: требуется создание еще более точных и чувствительных спектрополяриметров, построенных по новым схемам с использованием появившейся новой прецизионной элементной базы оптических и электронных компонентов. Описанию оригинальных и перспективных схем построения спектрополяриметров для исследования физико-химических реакций посвящена данная статья.

Измерением угла вращения плоскости поляризации с высокой точностью отличается спектрополяриметр с комбинированной растровой системой измерения угла поворота с интерференционной системой межштриховой интерполяции шага углоизмерительного раstra (рис. 1) [3].

Световое излучение источника 1, прошедшее монохроматор 2, модулируется по азимуту поляризации поляризатором 3, приводящимся электромагнитом 6 в колебательное движение. Далее световой поток проходит кювету 25 с исследуемым образцом, анализатор 26, ахроматическую четвертьволновую пластинку 27 и собирается объективом 30 на фотоприемнике 31. В зависимости от оптической активности образца, а следовательно, угла разворота им плоскости поляризации света, изменяется соотношение частотных гармоник переменной составляющей сигнала с фотоприемника. Первая гармоника модулирующего сигнала усиливается селективным усилителем 32 и подается на управляющую обмотку двигателя привода 33, который вращает анализатор вместе с растром 29 до тех пор, пока первая гармоника не исчезнет из сигнала. Угол разворота анализатора измеряется с точностью до величины шага углового раstra подсчетом штрихов раstra, пересекающих поле зрения датчика грубого отсчета. Этот датчик содержит осветитель 36 и фотоприемник 37, с которого импульсы тока поступают на счетный информационный вход электронного вычислительного блока (ЭВБ) 38. Синхронно с колеблющимся поляризатором работает точный угломерный канал прибора. Колебания оправы поляризатора приводят к наклону кронштейнов 7, 7' и перемещению трипель-призм 11, 11' дифференциального интерферометра, изменяя разность оптических путей обоих плеч интерферометра. При этом луч лазера 20 через полупрозрачный светоделитель попадает на трипель-призмы. Лучи, прошедшие трипель-призмы, отражаются плоскими зеркалами 12, 12', установленными перпендикулярно направлению падающих лучей, и возвращаются по тому же пути. На полупрозрачном светоделителе создается интерфе-

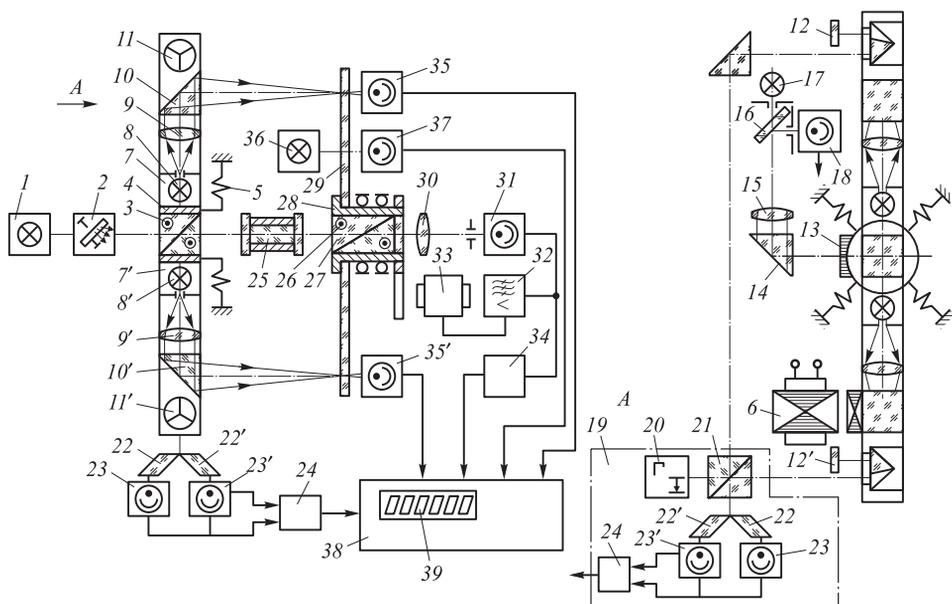


Рис. 1. Схема спектрополяриметра с интерференционным интерполятором шага измерительного раstra:

1 — источник излучения; 2 — монохроматор; 3 — колеблющийся поляризатор; 4 — оправа поляризатора; 5 — система упругих пружин, обеспечивающая угловые колебания поляризатора вокруг оптической оси прибора; 6 — электромагнит возбуждения колебаний; 7, 7' — кронштейны на оправе поляризатора; 8, 8' — полупроводниковые лазеры; 9, 9' — линзы; 10, 10' — отражательные призмы; 11, 11' — концевые отражатели интерферометра в виде трипель-призм; 12, 12' — плоские зеркала; 13 — зеркало, жестко скрепленное с оправкой поляризатора; 14 — автоколлимационный датчик опорного направления; 15 — объектив; 16 — полупрозрачная пластина; 17 — источник света автоколлиматора; 18 — фотоприемник автоколлиматора; 19 — интерферометрический точный угловой датчик в виде дифференциального интерферометра Майкельсона; 20 — лазер; 21 — светоделитель; 22, 22' — призмы пространственного светоделителя; 23, 23' — фотоприемники; 24 — реверсивный счетчик; 25 — цилиндрическая кювета для исследуемого вещества; 26 — поляризационный анализатор; 27 — ахроматическая четвертьволновая пластинка; 28 — оправа анализатора; 29 — радиальный угломерный растр; 30 — линзовый объектив; 31 — фотоприемник поляриметрического тракта; 32 — селективный усилитель первой гармоники частоты модуляции; 33 — привод вращающегося анализатора; 34 — компаратор напряжения; 35, 35' — фотоприемники синхронизации угломерных каналов; 36 — осветитель и 37 — фотоприемник датчика грубого углового отсчета по штрихам радиального раstra; 38 — электронный вычислительный блок; 39 — встроенное информационное табло

ренционная картина. Разделительными призмами 22, 22' она направляется на фотоприемники, подключенные к счетным входам реверсивного счетчика 24, информация с которого поступает в ЭВБ. Точное измерение угла поворота поляризатора в пределах углового шага раstra 29 осуществляется с помощью подсчета интерференционных полос реверсивным счетчиком 24.

Для определения направления перемещения поляризатора фотоприемники 23, 23' юстируют пространственными перемещениями до получения между сигналами фотоприемников сдвига фаз на 90° . Угловые перемещения поляризатора с помощью интерферометра измеряются с точностью до 0,1 угловой секунды в диапазоне до $3...5^\circ$. Для учета дрейфа нейтрали колебаний поляризатора используется автоколлимационный датчик 14 опорного направления, который вырабатывает импульс с фотоприемника 18 на ЭВБ в момент прохождения блика от зеркала 13, укрепленного на оправе 4. При колебаниях поляризатора сфокусированные на плоскость раstra световые пучки оптических каналов, укрепленных на кронштейнах, сканируют по измерительному радиусу угломерного раstra, причем при пересечении изображения точечных источников 8, 8' диаметрально противоположных штрихов раstra фотоприемники 35, 35' вырабатывают импульсы синхронизации работы угломерных каналов грубого и точного отсчета, поступающие на дополнительные импульсные входы ЭВБ.

Для точной синхронизации работы поляриметрического и угломерных каналов спектрополяриметра сигнал фотоприемника 31 поляриметрического тракта дополнительно подается на компаратор 34 напряжения, вырабатывающий импульс на вход ЭВБ в момент прохождения минимума сигнала фотоприемника 31. Измеряя временные задержки между импульсами, поступающими с фотоприемников 18, 35, 35', компаратора 34, и обрабатывая информацию, поступающую с реверсивного счетчика 24 и фотоприемника 37, ЭВБ выдает результат измерения угла разворота плоскости поляризации исследуемым образцом на встроенное информационное табло 39 с учетом дрейфа нуля колеблющего поляризатора 3 и эксцентриситета раstra (см. рис. 1).

При реализации в предложенной конструкции спектрополяриметра синхронной работы поляриметрического канала в плоскости поляризации света, интерферометрического прецизионного датчика точного углового отсчета и широкодиапазонного растрового датчика грубого углового отсчета резко повышаются точность и стабильность работы спектрополяриметра в широком диапазоне измеряемых углов вращения. В связи с этим расширяются возможности идентификации оптически активных веществ на данном приборе. Использование для внутришаговой интерполяции угловых отсчетов колебательного режима поляризационного модулятора-поляризатора позволяет исключить применение дополнительных синхронизирующих устройств для связи поляриметрического и точного угломерного каналов, упростить конструкцию интерферометрического датчика точного углового отсчета, учесть дрейф нейтрали колебаний поляризатора и в сумме

повысить тем самым надежность работы спектрополяриметра, а также автоматизировать процесс измерений оптической активности образцов и регистрацию результатов. Благодаря отмеченным выше преимуществам предложенный спектрополяриметр широко используют в системах неразрушающего технологического контроля микробиологической, пищевой и химической промышленности, а также при разработке комплекса прецизионных метрологических средств измерений для оптико-механической промышленности страны.

Однако наивысшую точность при измерении угла вращения плоскости поляризации исследуемым образцом можно обеспечить в случае применения схемы спектрополяриметра с лазерным гиromетром в качестве измерителя угла поворота (рис. 2). Лазерный гиromетр является сложным и дорогостоящим узлом спектрополяриметра, поэтому для его более эффективного использования было предложено дополнительное расширение функциональных возможностей прибора за счет проведения эллипсометрических измерений при увеличении точности измерения [4].

Световое излучение источника *1* света собирается конденсором *2* на входной щели монохроматора *3* и после прохождения монохроматора концентрируется линзой *4* в плоскости точечной диафрагмы в центре фотоприемника *5*. Излучение, прошедшее точечную диафрагму, коллимируется объективом *6* в параллельный пучок и направляется на поляризатор *7*, разделяющий излучение на два пучка равной интенсивности, но ортогонально поляризованные. В поляриметрический тракт прибора излучение поступает с бокового выхода поляризатора, проходит через поляриметрическую кювету *10* с исследуемым раствором, вращающим плоскость поляризации проходящего света, на зеркальную входную диафрагму *12* вращающегося анализатора *11*, в котором излучение разделяется на два ортогонально поляризованных световых потока, выходящих параллельно из кристалла и проходящих через отверстия *13* и *14* выходной маски анализатора. Излучение, прошедшее через центральное отверстие *13*, не изменяет своего пространственного положения при вращении анализатора и по волоконному световоду направляется на фотоприемник *24*. Световой поток, прошедший через боковое отверстие *14* выходной маски, при вращении анализатора сканирует в пространстве по кольцевой поверхности торца световода *26*, коаксиально расположенной по отношению к оси вращения, и концентрируется световодом *26* на фотоприемник *25*.

Подобная конструкция поляризационного вращающегося анализатора обеспечивает одновременное измерение интенсивности ортогонально поляризованных компонент принимаемого излучения и позволяет тем самым компенсировать в ЭВБ *36* влияние флуктуаций

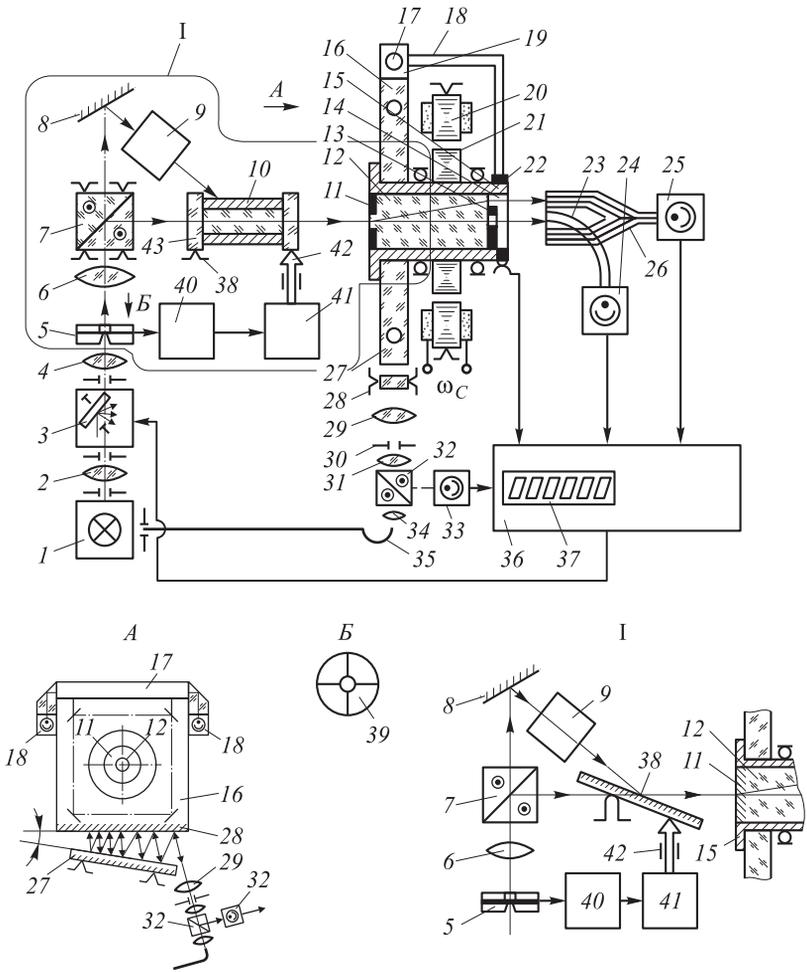


Рис. 2. Структурная схема спектрополяриметра с лазерным гиометром:

1 — источник излучения; 2 — линзовый конденсор; 3 — монохроматор; 4 — линза; 5 — квадрантный фотоприемник с точечной диафрагмой в центре; 6 — объектив осветителя; 7 — поляризатор; 8 — плоский отражатель; 9 — оптический вращатель плоскости поляризации излучения; 10 — кювета; 11 — вращающийся анализатор; 12 — входная зеркальная круглая диафрагма; 13 — выходная непрозрачная маска; 14 — отверстие в маске; 15 — оправа вращающегося анализатора; 16 — моноблок кольцевого лазера; 17 — блок совмещения встречных лучей кольцевого лазера; 18, 19 — фотоприемники; 20 — статор электродвигателя; 21 — ротор электродвигателя; 22 — вращающийся коллектор; 23 — круглый волоконный жгут; 24 и 25 — фотоприемники; 26 — кольцевой волоконный световод; 27 — вращающееся зеркало; 28 — неподвижное зеркало; 29 — объектив; 30 — точечная диафрагма; 31 — окуляр; 32 — поляризационный светоделитель в виде двулучевой призмы; 33 — фотоприемник; 34 — линза; 35 — волоконный световод; 36 — электронный вычислительный блок; 37 — информационное табло; 38 — эллипсометрический образец; 39 — точечная диафрагма; 40 — дифференциальный четырехканальный усилитель; 41 — линейный привод; 42 — толкатель, изменяющий угловое положение кюветы или образца; 43 — зеркальная диафрагма на передней поверхности окна кюветы

интенсивности источника и изотропного поглощения растворов в кювете на точность измерения положения плоскости поляризации анализируемого излучения. Применение волоконных световодов значительно снижает также влияние поляризационной чувствительности фотоприемников 24 и 25 на точность измерений.

При проведении эллипсометрических измерений используется световой поток, прошедший через торцовый выход поляризатора и ортогонально поляризованный по отношению к потоку, поступающему из поляризатора в поляриметрический канал. Световой поток с торцового выхода поляризатора отражателем 8, плоскость отражения которого совпадает с плоскостью поляризации падающего излучения, направляется в оптический вращатель 9 плоскости поляризации, который поворачивает плоскость поляризации излучения на дополнительный угол, соответствующий оптимальным условиям проведения эллипсометрических измерений. При этом вращатель либо ахроматизован путем изготовления его сердечника из пластин с различной дисперсной оптической активностью или двулучепреломления, либо влияние дисперсии угла вращения в данном вращателе учитывается программно в ЭВБ. Излучение, вышедшее из вращателя, отражается исследуемой поверхностью образца 38 и воспринимается вращающимся анализатором, разделяющим и регистрирующим световой поток, как при работе в поляриметрическом тракте. Коммутация потоков поляриметрического и эллипсометрического каналов проводится непрозрачными боковыми стенками кюветы, а также нерабочей поверхностью образца.

Для ускорения процесса измерений и повышения точности ориентации образцов в измерительном тракте, значительно влияющей на точность поляризационных измерений, в приборе предусмотрена следящая оптико-электронная система, использующая автоколлимационное отражение краевой части рабочих потоков от зеркальной диафрагмы 12 при измерениях в эллипсометрическом тракте, и от зеркальной диафрагмы 43 при работе поляриметрического тракта.

Если кювета и образец имеют неправильную пространственную ориентацию, то автоколлимационный блик коллимируется объективом 6 на чувствительные площадки 39 квадрантного фотоприемника, включенные по мостовой балансной схеме через четырехканальный дифференциальный усилитель 40 на управляющие входы электромеханического следящего привода 41, который по возникающему сигналу разбаланса, перемещая толкатель 42, упирающийся в кювету или образец, корректирует их угловую ориентацию до исчезновения сигнала разбаланса.

Угловое положение вращающегося анализатора непрерывно определяется с помощью кольцевого лазера 16, жестко закрепленно-

го на его оправе. На оправе 15 закреплен ротор 21 электродвигателя вращения анализатора, на корпусе прибора — статор электродвигателя 20. При вращении лазера фотоприемники 18, 19, воспринимая излучение, выходящее из блока совмещения встречных лучей лазера 17, вырабатывают сигналы, поступающие через вращающийся коллектор 22 на вход ЭВБ. Интегрируя эти сигналы во времени, ЭВБ непрерывно определяет угловое положение анализатора. Информация об ориентации анализатора считывается электронным блоком в момент равенства сигналов, поступающих с фотоприемников 24 и 25, и в моменты минимизации любого из сигналов, поступающих с этих двух фотоприемников, что позволяет повысить достоверность и скорость поляризационных измерений на данном приборе.

Для учета дрейфа нуля лазера в ЭВБ поступают опорные импульсы, вырабатываемые датчиком опорного направления (ДОН) в моменты строго определенного углового положения вращающихся лазера и анализатора относительно корпуса прибора. В этот момент зеркало 27 ориентировано относительно неподвижного зеркала 28 таким образом, что в результате многократного отражения из системы зеркал 27 и 28 выходит автоколлимационный блик, причем излучение в систему зеркал поступает от источника излучения через волоконный световод 35, коллимирующую линзу 34, светоделитель 32, окуляр 31, точечную диафрагму 30 и объектив 29. В результате наклонного многократного отражения от зеркал 27 и 28 изменяется состояние поляризации автоколлимационного блика относительно состояния поляризации падающего света, и отраженное излучение отклоняется поляризационным светоделителем 32 на фотоприемник 33. Для обеспечения работы предложенного датчика главная плоскость поляризационного светоделителя развернута вокруг оси автоколлиматора относительно плоскости падения зеркал 27, 28 на угол, позволяющий получить максимальный световой поток на фотоприемнике 33. Зависимость разности фаз ортогонально поляризованных компонент многократно отраженного излучения от ориентации зеркала 28 позволяет дополнительно повысить точность работы датчика опорного направления.

По окончании цикла поляризационных измерений на одной длине волны ЭВБ вырабатывает сигналы, перестраивающие монохроматор на другую измерительную длину волны излучения. Благодаря совместной работе поляриметрического и эллипсометрического каналов прибора расширяются его функциональные возможности при исследовании состава и структуры многокомпонентных и многослойных сред и образцов в микроэлектронике, аналитической химии, электрохимии, микробиологии. Одновременное исследование многослойных прозрачных структур в проходящем и отраженном свете,

осуществимое данным прибором, позволяет увеличить информативность проводимых поляризационных измерений, повысить надежность идентификации их структурных параметров с применением сложных эллипсометрических моделей, что особенно важно для исследований в области микроэлектроники, химии жидких кристаллов. При этом существенно сокращается необходимый объем парка аппаратуры, используемой в лабораториях, особенно производственных, увеличивается коэффициент использования прибора, уменьшается соответственно площадь производственных помещений, занимаемая измерительной аппаратурой.

Спектрополяриметр с развертывающим принципом измерений [5] обладает наиболее технологичной и простой углоизмерительной системой (рис. 3).

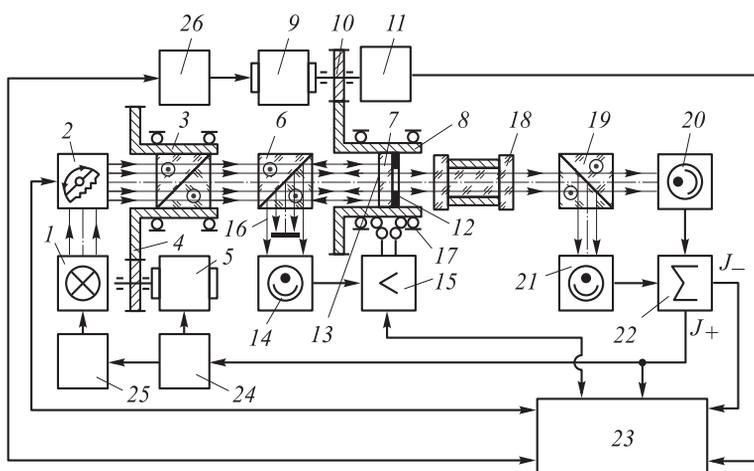


Рис. 3. Структурная схема развертывающего спектрополяриметра:

1 — источник полихроматического излучения; 2 — управляемый монохроматор; 3 — вращающийся поляризатор; 4 — электромеханический привод; 5 — двигатель ослабителя; 6 — неподвижный поляризатор; 7 — вращающийся фазовый компенсатор в виде электрооптического кристалла; 8 — вращающаяся оправа компенсатора; 9 — развертывающий двигатель; 10 — привод; 11 — преобразователь угол-код; 12 — кольцевая зеркальная металлическая диафрагма; 13 — сплошное прозрачное электропроводящее покрытие; 14 — фотоприемник фазометрического канала; 15 — высоковольтный усилитель; 16 — кольцевая диафрагма с непрозрачным центром; 17 — кольцевой коллектор; 18 — кювета; 19 — поляризационный анализатор; 20, 21 — фотоприемники; 22 — схема суммарно-разностной обработки сигнала; 23 — устройство определения временного сдвига между опорными сигналами; 24 — блок сравнения сигналов; 25 — усилитель; 26 — контроллер развертывающего двигателя

Излучение полихроматического источника 1 проходит управляемый монохроматор 2, падает на вращающийся поляризатор 3, поворачиваемый вокруг оптической оси с помощью электромеханического привода 4 и двигателя 5. Поляризатор предназначен для осуществ-

ления оптической автоматической регулировки усиления и в исходном положении находится под углом, близким к углу скрещивания с неподвижным поляризатором 6. Ослабленный неподвижным поляризатором поток проходит через его торцовый выход и попадает на вращающийся фазовый компенсатор 7 в виде электрооптического кристалла, установленного во вращающейся оправе 8, которая связана кинематически через привод 9 с двигателем 10 и преобразователем 11 угол–код. На заднюю по ходу луча поверхность электрооптического кристалла напылена кольцевая зеркальная металлическая диафрагма 12, а на переднюю поверхность кристалла нанесено сплошное прозрачное или в виде кольца электропроводящее покрытие 13.

Периферическая часть светового потока, вышедшего из неподвижного поляризатора, проходит электрооптический кристалл, отражается зеркальной диафрагмой–электродом, проходит в обратном направлении второй раз электрооптический кристалл и возвращается в неподвижный поляризатор. Поскольку в электрооптическом кристалле происходит преобразование состояния поляризации излучения, появляется компонента ретроотраженного излучения, ортогонально поляризованная измерительному излучению, которая отклоняется поляризатором и выходит из него через боковой выход на фотоприемник 14 фазометрического канала, подключенный на управляющий вход высоковольтного усилителя 15. В центре поля зрения фотоприемника 14 установлена кольцевая диафрагма 16 с непрозрачным центром, экранирующая ретроотраженное излучение центральной части измерительного пучка.

Выход усилителя подключен через кольцевой коллектор 17 к напыленным электродам 12 и 13 электрооптического кристалла. Кольцевой коллектор может быть заменен вращающимся тороидальным трансформатором с броневым сердечником. Описанная оптико-электронная петля обратной связи поддерживает напряжение на электродах электрооптического кристалла таким образом, чтобы фазовый сдвиг в кристалле соответствовал величине $\lambda/2$ на текущей длине волны излучения. Таким образом, фазовый компенсатор при изменении длины волны облучающего света всегда имеет полуволновый сдвиг, т. е. работает в режиме эквивалентной ахроматизированной полуволновой пластинки. В этом случае плоскость поляризации излучения, прошедшего центральную зону электрооптического кристалла, поворачивается на угол, превышающий угол поворота пластинки ровно в 2 раза. Измерив текущий угол поворота фазового компенсатора с помощью преобразователя угол–код, можно точно определить угол азимута излучения, падающего на измерительную кювету 18 с исследуемым образцом. Исследуемый образец, помещенный в кювету, довра-

чивает плоскость поляризации падающего излучения на определенный угол, зависящий от его оптической активности.

После измерительной кюветы излучение поступает на вход поляризационного анализатора 19, который разделяет излучение на две ортогонально поляризованные компоненты, одновременно регистрируемые фотоприемниками 20 и 21, подключенными к информационным входам схемы 22 суммарно-разностной обработки. Выход разностного сигнала схемы 22 соединен с информационным входом устройства 23. Величина сигнала на выходе схемы 22 используется для определения момента компенсации поляриметрического тракта и идентификации полуволновой разности фаз фазового компенсатора. При этом устройство 23 определяет временной сдвиг между опорными сигналами, вырабатываемыми преобразователем угол-код, и разностным сигналом и по измеренному промежутку времени устанавливает величину оптической активности исследуемого образца. Выход суммарного сигнала схемы 22 соединен со вторым информационным входом устройства 23 и входом блока 24 задержанной оптико-электронной автоматической регулировки усиления, предназначенным для снижения нелинейных искажений оптико-электронного тракта. В блоке 24 сигнал, поступивший с выхода суммарного сигнала схемы 22, сравнивается с уровнями опорного напряжения задержанной автоматической регулировки усиления.

В случае если амплитуда сигнала превышает первый опорный уровень, то в блоке 24 вырабатывается сигнал рассогласования, который поступает на электродвигатель 5 электромеханического привода вращающегося поляризатора. Двигатель вращает поляризатор до тех пор, пока амплитуда суммарного сигнала не сравняется с первым опорным уровнем. Если первоначально уровень суммарного сигнала превышает величину первого и второго опорных уровней, то в блоке 24 вырабатывается сигнал, поступающий через усилитель 25 на вход управления мощностью источника излучения: в результате быстро снижается мощность излучения, поступающего в оптический тракт, тем самым предотвращается быстродействующая импульсная перегрузка фотоприемников 20 и 21. Одновременно в блоке 24 формируется сигнал для канала вращающегося поляризатора, который с меньшим быстродействием, но с большими точностью и динамическим диапазоном регулирует величину оптического сигнала и восстанавливает режим работы источника излучения. После выполнения операции измерения оптической активности на одной длине волны света от устройства 23 поступает команда монохроматору изменить длину волны проходящего излучения на один дискрет и алгоритм измерения, описанный ранее, повторяется циклически, пока не будет пройден весь исследуемый спектральный диапазон.

Использование дифференциальной схемы поляриметрического тракта в прецизионном спектрополяриметре путем оптической коммутации света на разнотипных фотоприемниках позволяет снизить шумы фотоприемной системы в целом [6]. Структурная схема прецизионного спектрополяриметра показана на рис. 4.

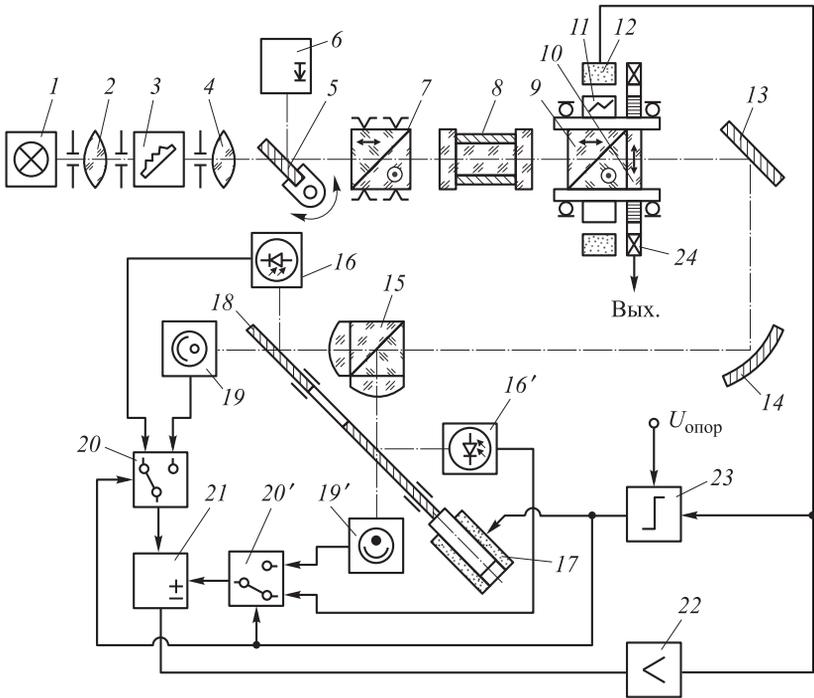


Рис. 4. Структурная схема прецизионного спектрополяриметра:

1 — источник излучения; 2 — линзовый конденсор; 3 — монохроматор; 4 — линза; 5 — поворотное зеркало; 6 — лазер; 7 — поляризатор; 8 — кювета; 9 — поляризационный ортогональный светоделитель в виде призмы Рошона; 10 — ахроматизованная четвертьволновая пластинка; 11 — пустотелый ротор двигателя с постоянными магнитами; 12 — статор двигателя; 13 — плоское зеркало; 14 — параболическое зеркало; 15 — пространственный светоделитель; 16, 16' — фотодиоды грубого слежения; 17 — электромагнит привода оптического коммутатора; 18 — зеркальная шторка оптического коммутатора с отверстием; 19, 19' — фотоэлектронные умножители точного канала слежения; 20, 20' — электронные коммутаторы; 21 — схема суммарно-разностной обработки сигнала; 22 — усилитель; 23 — амплитудный дискриминатор; 24 — преобразователь угол-код

Световое излучение источника 1 собирается конденсором 2 на входной щели монохроматора 3 и после прохождения монохроматора коллимируется линзой 4 в параллельный пучок, направляемый ею на узел поворотного зеркала 5. Данное зеркало служит для коммутации световых потоков, выходящих из монохроматора или из лазера 6 и используемых в дальнейшем в измерительной части прибора. Световой поток, прошедший через узел поворотного зеркала, пропускается

затем через неподвижно закрепленный поляризатор 7 и кювету 8 и направляется на вход вращающегося поляризационного ортогонального светоделителя, выполненного в виде двулучевой поляризационной призмы 9, например призмы Рошона или Сенармона. На выходе из призмы световой поток разделяется на два ортогонально поляризованных пучка, один из которых распространяется вдоль оптической оси тракта, а другой — под небольшим углом наклона к оптической оси тракта. На выходе из призмы установлена четвертьволновая пластинка 10, которая преобразует линейные ортогональные поляризации световых пучков, выходящих из призмы, в ортогональные циркулярные поляризации. Это позволяет исключить эффекты, связанные с изменением чувствительности фотоприемников, в зависимости от угла азимута плоскости поляризации излучения, падающего на них.

Излучение, направленное вдоль оптической оси тракта, не изменяет своего пространственного положения при вращении анализатора. Поэтому после отражения зеркалом 13 оно фокусируется зеркальной параболой 14 на отражающей центральной площадке светоделительного кубика 15. После отражения центральной зоной аксиально направленное излучение через линзовый конденсатор, наклеенный на боковую поверхность кубика, попадает на зеркальную поверхность оптического коммутатора 18, от которой отражение поступает на фотодиод 16. Второй пучок света, выходящий наклонно к оптической оси из призмы, после отражения зеркалом фокусируется на прозрачной периферийной зоне светоделительного кубика. Этот световой поток при вращении анализатора сканирует в пространстве по кольцевой периферийной зоне кубика, коаксиально расположенной по отношению к оси вращения и прозрачной для падающего излучения. При этом излучение, прошедшее через кубик, собирается конденсорной линзой, наклеенной на торцовую поверхность кубика, и отражается зеркалом оптического коммутатора на второй фотодиод 16'.

Выходы фотодиодов 16 и 16' через нормально замкнутые контакты коммутаторов 20 и 20' подключены к информационным входам блока суммарно-разностной обработки. Сигнал с разностного выхода, нормированный по амплитуде суммарного уровня принимаемых сигналов, через усилитель 22 поступает на двигатель, в пустотелом валу которого укреплен вращающийся анализатор и фазовая пластинка. Одновременно сигнал с выхода усилителя поступает на информационный вход компаратора 23, выход которого параллельно подключен к управляющим входам электронных коммутаторов 20 и 20', а также к исполнительному соленоиду 17 оптического коммутатора.

В начале процесса измерения интенсивность аксиально идущего пучка велика из-за нескрещенности положений поляризатора и ана-

лизатора, поэтому данный пучок воспринимается фотодиодом $16'$, который не подвержен эффекту избыточных шумов последействия.

Вблизи положения скрещенности поляризаторов оптического тракта интенсивность аксиального пучка резко уменьшается. Когда фотоэлектрический сигнал с фотодиода $16'$ становится меньше заданного порогового напряжения, поступающего на опорный вход компаратора, компаратор вырабатывает управляющий сигнал, поступающий на соленоид, который перемещением зеркал оптического коммутатора переключает принимаемое оптическое излучение с фотодиодов 16 и $16'$ на фотокатоды фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) 19 и $19'$.

Одновременно коммутаторы 20 и $20'$ переключают входы суммарно-разностной схемы с выходов фотодиодов 16 , $16'$ на выходы ФЭУ. Таким образом, начальные высокоинтенсивные световые потоки воздействуют на фотодиоды, которые имеют низкую чувствительность, но не ослепляются сильными световыми потоками. Фотокатоды ФЭУ находятся в этот момент в полной темноте, что резко снижает уровень их избыточного шума. После достижения интенсивности измерительных потоков ниже уровня, вызывающего эффект ослепления фотокатода ФЭУ, для приема измерительных оптических сигналов автоматически включаются ФЭУ, обладающие более высокой чувствительностью к оптическому сигналу, вплоть до счета единичных фотонов. Благодаря этим преимуществам резко снижается влияние шумов ФЭУ на работу поляриметрического тракта и тем самым улучшается точность работы спектрополяриметра.

Конструктивные отличия прецизионного спектрополяриметра позволяют увеличить точность поляриметрических измерений в 2—4 раза, повысить надежность работы прибора [7].

Отмеченные преимущества описанных выше схем построения поляриметров использованы при создании ряда высокоточных спектрополяриметров для научных исследований и неразрушающего технологического контроля в различных отраслях промышленности, в частности в кристаллографии, аналитической химии, биотехнологии и микробиологии. Данные приборы активно применяют в институтах РАН при проведении фундаментальных исследований по синтезу новых кристаллических сред и биоактивных препаратов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пентин Ю.А., Вилков Л.В. *Физические методы исследования в химии*. Москва, Мир, Изд-во АСТ, 2003, 683 с.
- [2] Iniesta J.C. del Toro. *Introduction to Spectropolarimetry*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004.

- [3] Уткин Г.И. Спектрополяриметр. Патент 1371167 РФ, МКИ G01J 4/04 № 3989469/24-25, заяв. 16.12.1885, опублик. 04.02.1993. *Открытия, изобретения*, 1993, № 5, 6 с.
- [4] Уткин Г.И. Спектрополяриметр. Патент 1374909 РФ, МКИ G01J 4/04 № 4010753/24-25, заяв. 25.11.1985, опублик. 04.02.1993. *Открытия, изобретения*, 1993, № 5, 4 с.
- [5] Уткин Г.И. Спектрополяриметр. Патент 1579175 РФ, МКИ G01J 4/04 № 4482800/31-25, заяв. 26.07.1988, опублик. 04.02.1993. *Открытия, изобретения*. 1993, № 5, 8 с.
- [6] Уткин Г.И. Прецизионный спектрополяриметр. Патент 1742635 РФ, МКИ G01J 4/04 № 4874794/25, заяв.13.08.1990, опублик. 23.06.1992, *Открытия, изобретения*, 1992, № 23, 6 с.
- [7] Evdishchenko E.A., Konstantinova A.F., Nabatov B.V., Utkin G.I. Alekseev S.V. Volnov U.V. Spektropolarimetric device for determination of optical anisotropic parameters of crystals. *Lightmetry: Metrology, Spectroscopy and Testing Techniques Using Light*, Pluta M. (ed.). *Proc. of SPIE*, 2001, vol. 4517, pp. 178–183.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Уткин Г.И. Схемы построения прецизионных спектрополяриметров для физико-химического анализа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/941.html>

Уткин Геннадий Иванович родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, лауреат премии Ленинского комсомола в области науки и техники (1985). Автор более 110 опубликованных научных работ и 22 изобретений в области оптической поляриметрии и оптического приборостроения. Научный руководитель отраслевой лаборатории «Оптическая поляриметрия» Российской академии наук (РАН), директор (1991–2009) ФГНУ «Государственный научно-исследовательский и инженерный центр научного приборостроения», член Международного оптического общества SPIE, член Комиссии РАН по работе с молодежью. Области научных интересов: научное приборостроение, оптическая поляриметрия, прецизионные оптико-электронные системы и приборы. e-mail: utkin@bmstu.ru