

РАМАНОВСКИЕ МИКРОСКОПЫ HORIBA SCIENTIFIC

М.Трусов, к.ф.-м.н., руководитель направления Raman/AFM, ЗАО "Найтек Инструментс";
С.Жохов, к.х.н.

Нoriba Scientific – всемирно известный производитель измерительного и аналитического оборудования, подразделение группы компаний Horiba. Компания Horiba была основана в 1945 году Масао Хориба (Masao Horiba), студентом-физиком Университета г. Киото. Первой продукцией компании стали рН-метры, их производство началось в 1950 году. Сегодня группа компаний Horiba – это крупный международный концерн, включающий 42 компании более чем в 15 странах мира. Horiba производит широкий спектр измерительных и аналитических приборов для научно-исследовательских центров и лабораторий, медицинских учреждений и клиник, экологического мониторинга, контроля производственных процессов, полупроводниковой промышленности, автомобильной отрасли.

Horiba Scientific – мировой лидер в спектроскопии комбинационного рассеяния (рамановской спектроскопии). Французские компании Jobin Yvon и Dilor, вошедшие в свое время в состав концерна, стояли у истоков создания рамановского оборудования; они конструируют и производят рамановские спектрометры уже более 40 лет. Ими были разработаны такие новинки, как первый в мире коммерческий рамановский микроскоп, первый в мире удаленный оптоволоконный зонд.

Закрытое акционерное общество "Найтек Инструментс", основанное в 2003 году – генеральный партнер Horiba Scientific в России и странах ЕАЭС, один из главных поставщиков рамановских спектрометров, спектрофлуориметров, спектрометров тлеющего разряда и другого спектрального оборудования. Компания дважды была признана лучшим дилером Horiba Scientific на территории России. Партнерами "Найтек Инструментс" являются также компании AIST-NT (сканирующие зондовые микроскопы), Rigaku Raman (портативные спектрометры), EuroVector, и другие известные производственные фирмы. В числе клиентов "Найтек Инструментс" – ведущие промышленные и научные организации России,

такие как Росатом, Норильский Никель, золотодобывающая компания "Полюс", Московский и Санкт-Петербургский университеты, ВНИИОФИ, целый ряд институтов РАН и многие другие организации в различных регионах России.

В рамках прошедшей в апреле этого года выставки "Аналитика Экспо", представители ЗАО "Найтек Инструментс" провели семинар, на котором были представлены новейшие образцы рамановских микроскопов, производимых корпорацией Horiba Scientific.

Рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния) – неразрушающий, бесконтактный, быстрый метод физико-химического анализа, не требующий специальной пробоподготовки. Можно анализировать твердые, жидкие, порошкообразные образцы, газы, водные растворы, взвеси, суспензии и т.д. Иногда можно даже анализировать упакованную продукцию без вскрытия упаковки, так как полиэтилен и другие прозрачные полимеры, а также стекла, обладают очень малым сечением рамановского рассеяния. При измерениях не нужно создавать вакуум или иные специальные условия, спектры обычно регистрируются при атмосферном давлении и комнатной темпера-

туре (хотя при необходимости можно работать в самом широком диапазоне температур, давлений, контролируемой атмосфере – современные спектрометры снабжаются широким выбором дополнительных опций и модулей для решения подобных задач).

Явление комбинационного рассеяния света было теоретически предсказано Адольфом Смекалом в 1923 году после открытия эффекта Комптона. Смекал предположил, что аналогичное явление рассеяния фотона со смещением частоты может иметь место не только для рентгеновского излучения, но и для оптических длин волн. Экспериментально эффект комбинационного рассеяния был обнаружен в 1928 году, независимо и практически одновременно, двумя группами исследователей – в Москве Мандельштамом и Ландсбергом, и в Калькутте индийскими учеными Раманом и Кришнаном. В России (СССР) за эффектом закрепилось название "комбинационное рассеяние света", изначально предложенное Мандельштамом, в западной же литературе его традиционно называют эффектом Рамана или рамановским рассеянием, а оптические приборы, построенные на этом принципе – рамановскими спектрометрами.

Физическая природа явления комбинационного рассеяния состоит в следующем. Падающий на образец фотон может быть поглощен молекулой, находящейся в собственном квантовом состоянии с определенной энергией. В результате поглощения молекула переходит в виртуальное состояние, а затем, испустив фотон, вновь в собственное состояние, которое, вообще говоря, может быть отлично от первоначального. В таком случае испущенный фотон имеет энергию, отличную от энергии начального фотона на величину, равную расстоянию между конечным и начальным уровнями энергии, которое может быть положительным (стоксов сдвиг) или отрицательным (анти-стоксов сдвиг). Стоксов сдвиг статистически более вероятен, так как именно он имеет место, когда молекула изначально находится в основном (низшем) состоянии.

Как мы видим, процесс комбинационного рассеяния является неупругим в отличие от обычного упругого (или рэлеевского) рассеяния, когда энергия фотона не меняется. Заметим, что поскольку описанный эффект требует и поглощения, и испускания фотона, вероятность его очень мала по сравнению с рэлеевским рассея-

нием, и регистрация спектров требует использования высокочувствительных детекторов.

Ключевой особенностью эффекта комбинационного рассеяния, предопределившей его применение как мощного метода спектрального анализа, является тот факт, что разница энергий поглощенного и испущенного фотонов (или сдвиг частоты, что одно и то же с точки зрения квантовой теории), в точности равна энергии перехода между уровнями молекулы. Таким образом, спектральный набор таких сдвигов является уникальной характеристикой для каждого определенного химического соединения, и служит своего рода "паспортом" или "отпечатком пальца" молекулы вещества.

Рамановские сдвиги, регистрируемые спектрометром, как правило, имеют размерность волновых чисел, и выражаются обычно в обратных сантиметрах (см^{-1}). Получаемые спектры дают качественную и количественную информацию. Положение пиков указывает на природу химического соединения и его функциональных групп, интенсивность – на концентрацию, ширина линии служит показателем структурного беспорядка окружения. Важную информацию дает также смещение положения пика при изменении температуры или давления.

Вместе с инфракрасной (ИК) рамановская спектроскопия образует группу методов, называемую колебательной спектроскопией. Оба метода изучают одни и те же колебательные уровни молекул, но разными способами: ИК-спектрометры регистрируют поглощение (или испускание), а рамановские – неупругое рассеяние света. Оба метода дополняют друг друга, дают комбинированную информацию о структуре сложных молекул, содержащих функциональные группы разных типов. Например, рамановские спектры, в отличие от инфракрасных, показывают интенсивные сигналы неполярных функциональных групп, двойных и тройных углеродных связей, симметричных колебаний ароматических колец. В противоположность тому, в ИК-спектрах лучше видны колебания полярных заместителей, в частности, гидроксильных, карбонильных и аминогрупп. Заметим также, что в отличие от ставшей уже традиционной фурье-техники в ИК-спектроскопии в рамановских приборах, как правило, используется классическая дисперсионная схема с дифракционной решеткой и многоканальным спектральным



детектором, что обуславливает ряд преимуществ КР-спектроскопии (о них речь пойдет ниже).

Источником падающих фотонов для рамановского спектрометра традиционно является лазер. Поскольку сечение рамановского рассеяния обратно пропорционально 4-й степени длины волны, а наиболее эффективные многоканальные детекторы для спектрометра на сегодняшний день – это кремниевые CCD с красной границей рабочего диапазона ~900 нм, оптимально использовать лазеры от ближнего УФ до ближнего ИК (200–800 нм). Чаще всего используются относительно недорогие лазеры видимого диапазона (633 нм He-Ne, 514 нм Ar, 473 нм твердотельный и т.п.), изредка лазер 1064 нм Nd:YAG. Лазеры с большей длиной волны в рамановской спектроскопии практически не применяются.

Возможность подключать к рамановскому спектрометру различные лазеры очень важна для практических приложений. Использование лазеров ближнего ИК-диапазона позволяет, например, убрать из спектра мешающие сигналы флуоресценции. С другой стороны, для некоторых соединений и функциональных групп зависимость сечения КР-процесса от длины волны имеет резкие резонансные максимумы в синей и УФ-областях, и для таких образцов оптимально подбирать лазер по длине волны, близкой к резонансу.

Современные профессиональные рамановские спектрометры, как правило, стыкуются с оптическим микроскопом, в том числе с конфокальным. Такие приборы, называемые рамановскими микроскопами, или микроспектрометрами, обладают рядом важных преимуществ. Поскольку в таком приборе возбуждающий лазер фокусируется в малой области вблизи фокуса объектива микроскопа размером порядка длины волны излучения, то из этой же области идет и спектральный рамановский сигнал. Тем самым мы обеспечиваем локализацию измерений с возможностью привязки спектров к различным точкам поверхности образца. Более того, использование конфокальной схемы с достаточно малой апертурой позволяет обеспечить трехмерную локализацию измерения спектра. Можно исследовать оптически прозрачный объемный образец послойно, причем каждый слой образца (толщиной ~ 1 мкм) можно изучать отдельно, не разрушая образец и не изготавливая поперечных срезов, как таковых.

Микроспектрометры, как правило, оснащаются высокоточными моторизованными сканирующими столиками для выполнения двумер-

ной (трехмерной) поточечной съемки спектров из заданной области (объема) образца. Такой режим работы называется рамановским картированием.

Важно заметить, что поскольку весь световой поток лазера фокусируется в небольшой прифокальной области, а сильный объектив микроскопа собирает большую часть рассеянного света, даже малой мощности лазера (~1 мВт) оказывается достаточно для эффективной работы прибора. С другой стороны, трехмерная пространственная фильтрация в микроскопе благодаря конфокальной диафрагме (апертуре) позволяет вообще избавиться в приборе от входной щели, и тем самым обойти давнюю проблему оптической спектроскопии – необходимость компромисса между светосилой прибора и его разрешающей способностью.

Для регистрации рамановских спектров чаще всего используются кремниевые CCD-матрицы. Современные технологии позволяют эффективно охладить матрицу детектора без охлаждающих агентов (типа жидкого азота), используя вакуумную теплоизоляцию и холодильник Пельтье, и снизить практически до нуля темновой ток, а быстрая высококачественная электроника детектора имеет очень низкий шум считывания. Таким образом, если раньше определяющим шумом при записи спектра был именно шум от детектора (тепловой шум и шум электроники), то теперь таковым стал случайный шум входящего светового потока (дробовой шум), описываемый распределением Пуассона, никак не связанный с работой самого детектора. Относительный уровень дробового шума обратно пропорционален корню из числа пришедших фотонов и при правильном выборе параметров эксперимента (мощность иницирующего лазера, время экспозиции) может быть сведен к минимуму. Также важно отметить, что несколько лет назад на рынке появились CCD-детекторы с функцией умножения фототока (EM-CCD), позволяющие регистрировать даже отдельные падающие фотоны, обеспечивая быстрое снятие спектров даже при малом сечении рассеяния.

Если вернуться к затронутой выше теме сравнения методов ИК-фурье спектроскопии и дисперсионной рамановской спектроскопии, то можно сказать, что все традиционно обозначаемые недостатки дисперсионной схемы относительно фурье-схемы (медленная скорость работы, низкая светосила, низкий уровень сиг-



нал/шум) в рамановских микроспектрометрах успешно преодолены. Более того, у дисперсионных КР-спектрометров есть ряд важных преимуществ над ИК-Фурье приборами. Можно использовать маломощные лазеры для возбуждения без опасения нагрева образца, его разрушения и появления мешающих линий теплового (планковского) излучения. В сочетании с конфокальной микроскопией, КР-спектроскопия обеспечивает гораздо лучшее пространственное разрешение (~ 1 мкм по сравнению с 20–30 мкм у хороших ИК-Фурье микроскопов) и возможность трехмерного картирования. На качество спектров практически не влияет атмосфера, в том числе наличие паров воды, поэтому не требуется осушение или вакуумирование кюветного отделения, что является традиционной проблемой ИК-спектроскопии. Можно проводить количественный анализ спектров водных растворов, в том числе органических соединений, не опасаясь, что спектральные линии будут неконтролируемо поглощаться водой.

С появлением рамановских конфокальных микроспектрометров открылись широкие возможности использования метода КР-спектроскопии в самых разных областях науки и техники. В фармацевтике можно получать химическое изображение поверхности таблеток и лекарственных препаратов, то есть визуализировать распределение компонентов. Можно проводить даже профилирование по глубине и оптическое секционирование. Стал возможным экспресс-анализ качества и подлинности сырья, в том числе через прозрачную упаковку без ее вскрытия. В химической лаборатории можно наблюдать за синтезом полимеров и конверсией мономеров в реальном времени. (Для введения непосредственно в толщу реакционной смеси спектрометры оснащаются специальными выносными оптоволоконными зондами). В полупроводниковой промышленности можно проводить картирование напряжений и растяжений слоев кремния, изучать распределение примесей и загрязнений. Используя инвертированный оптический микроскоп, можно делать трехмерное спектральное сканирование живых клеток, в том числе непосредственно в живых организмах, изучать белки, аминокислоты, липиды. Благодаря субмикронному разрешению современных конфокальных микроскопов, рамановское картирование находит широкое применение в нанотехнологиях.

С его помощью можно анализировать спектры нанотрубок, листов графена и других наноматериалов. В криминалистике можно провести быстрый неразрушающий анализ химического состава пробы. Наконец, рамановские спектрометры находят себя в такой необычной сфере, как археология и искусствоведение. Они используются для определения подлинности экспонатов и выявления происхождения артефактов, идентификации художественных пигментов и драгоценных камней на больших образцах. Портативные рамановские спектрометры можно легко взять с собой для измерений непосредственно на археологических раскопках или в музеях.

При выборе рамановского спектрометра экспериментатору следует обратить внимание на ряд ключевых характеристик, определяющих его работу. Это, в первую очередь, параметры возбуждающего лазера (лазеров): длина волны, апертура и расходимость пучка, стабильность линии; важность использования различных лазеров в КР-эксперименте мы обсуждали выше. Затем следует, разумеется, рабочий спектральный диапазон прибора, спектральное разрешение, конструктивное исполнение спектрографа (качество отображения входной апертуры, отсутствие аберраций, подавление переотражений, линейность развертки спектра), пространственное разрешение прибора (если рассматривается микроспектрометр), уровень потерь полезного сигнала, минимальное и максимальное значения измеряемого рамановского сдвига (для стокса и анти-стокса), качество применяемых спектральных детекторов, наличие средств автоматизации, гибкость конфигурирования и наличие дополнительных опций/модулей под специфические задачи заказчика (измерения при низкой/высокой температуре, измерения в жидкости, в газовой среде, измерения в магнитном поле и т.д.), возможность работать с поляризованным излучением, возможность подключения выносного зонда для удаленных и *in situ* анализов в химических, биологических и других лабораторных условиях.

Наличие нижнего ограничения по измеряемому сдвигу – неустраняемая черта любого рамановского прибора. Она связана с тем, что из спектра рассеянного света необходимо максимально полно удалить упруго рассеянные (т.е. без изменения частоты) фотоны возбуждающего излучения. В противном случае, их поток неизбежно через серию переотражений попадет внутрь

спектрографа, засветит матрицу детектора, и увидеть на этом фоне слабый рамановский сигнал будет просто невозможно. К сожалению, физически не существует способа убрать из спектра строго определенную длину волны – только некоторую полосу конечной ширины, отсюда и возникает обсуждаемое ограничение. В то же время для некоторых КР-экспериментов измерения именно малых рамановских сдвигов (или, как еще говорят, низких частот в спектре) очень важно. Поэтому минимальное значение измеряемого сдвига, то есть возможность подходить вплотную к длине волны возбуждения – очень важная характеристика рамановского спектрометра.

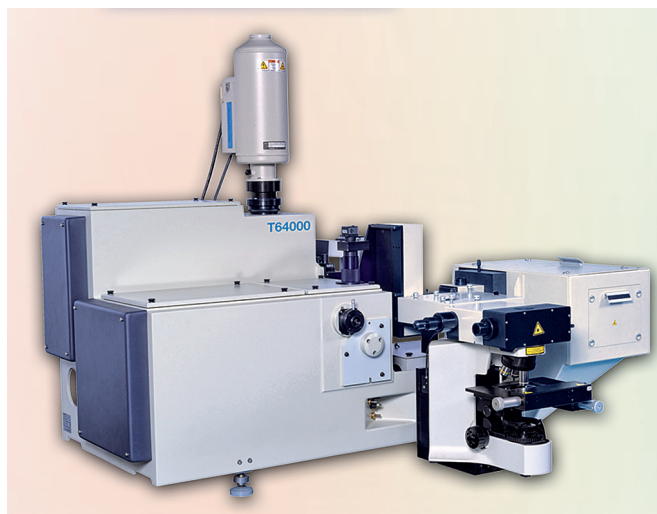
Для отсекающей исходной падающей линии традиционно используются два пути: голографические фильтры, отсекающие определенную длину волны, или дополнительный двойной монохроматор, работающий в режиме вычитания дисперсий. Второй способ намного сложнее реализовать технически, поскольку он требует наличия дополнительных двух каскадов монохроматора, точно синхронизированных механизмов поворота дифракционных решеток, компенсации aberrаций в оптике спектрографа и точной установки ножей промежуточной щели. Однако пока это остается единственным решением, позволяющим измерять рамановские сдвиги максимально близко к линии возбуждения на любых длинах волн возбуждения, от УФ до ИК, в том числе при использовании перестраиваемых лазеров. И на сегодняшний день единственным коммерчески доступным рамановским прибором, собранным по такой схеме,

является прибор T64000 от компании Horiba Scientific.

В приборе T64000 реализовано три последовательных каскада монохроматора. Два из них могут работать согласованно в режиме вычитания дисперсий, обеспечивая фильтрацию линии возбуждения и возможность измерять как стоксовы так и анти-стоксовы сдвиги от 3 см^{-1} . Оптика монохроматора и специальные неплоские дифракционные решетки с искривленным штрихом, установленные на синхронизированные синусные механизмы, обеспечивают практически полную компенсацию aberrаций и точное отображение входной апертуры (конфокальной диафрагмы) на промежуточную щель и затем на выходную плоскость прибора. Прибор полностью ахроматичен во всем рабочем спектральном диапазоне от УФ до ближнего ИК. По своим возможностям прибор T64000 является уникальным решением для самых сложных исследовательских задач в КР-спектроскопии.

Однако такой прибор при всех своих преимуществах может оказаться дорогим и сложным в эксплуатации, и тогда экспериментатору имеет смысл присмотреться к более простым оптическим схемам на базе отсекающих голографических фильтров. Подобные приборы предлагают сейчас многие компании-производители, в том числе, разумеется, и компания Horiba Scientific – в ее линейке есть известные марки LabRAM и Xploa. Рассмотрим, что является существенным при конструировании подобного прибора и при его выборе для решения той или иной экспериментальной задачи.

Отсекающий фильтр может убирать из спектра либо все длины волн, меньшие данной, тогда он называется краевой (edge); такие фильтры применяются для изучения стоксовых сдвигов. Либо может убирать небольшую полосу в спектре длин волн вблизи данной, тогда он называется полосовой (notch); с такими фильтрами можно изучать как стоксовы, так и анти-стоксовы сдвиги. В обоих случаях, фильтр имеет конечную переходную полосу, задающую как раз тот минимальный сдвиг, который он позволяет наблюдать. Для краевых фильтров эта величина (полуширина переходной полосы) обычно составляет примерно 50 см^{-1} , для полосовых примерно 100 см^{-1} . Не так давно на рынке появились специальные отсекающие полосовые фильтры на видимых длинах волн, сделанные по технологии объемных брэгговских решеток (VBC).



T64000

РАМАНОВСКИЕ СПЕКТРОМЕТРЫ HORIBA Scientific

САМЫЕ ПОПУЛЯРНЫЕ РАМАНОВСКИЕ СПЕКТРОМЕТРЫ НА РОССИЙСКОМ И МИРОВОМ РЫНКЕ

САМЫЙ ШИРОКИЙ ВЫБОР КОНФИГУРАЦИЙ ОБОРУДОВАНИЯ
ПОД ЛЮБЫЕ ЗАДАЧИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ СЕРВИС, ТЕХНИЧЕСКАЯ И МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА



XploRA PLUS

компактный, полностью автоматизированный спектрометр; идеальное решение для аналитической лаборатории



LabRAM HR Evolution

гибкая модульная система с уникальными характеристиками для сложных научных задач



XploRA INV

спектрометр с инвертированным оптическим микроскопом для задач биологии и химии

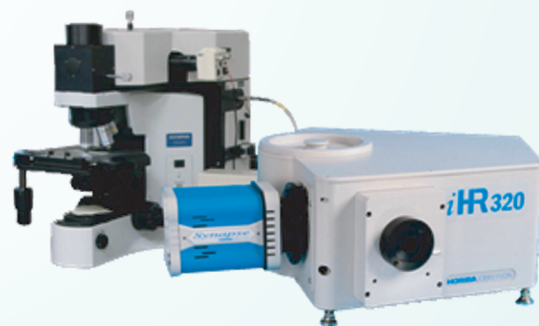
HORIBA

Scientific

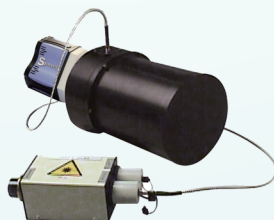


T64000

спектрометр на базе тройного монохроматора для фундаментальных исследований



Модульные системы



Удаленные и in-situ измерения



NYTEK
instruments

Генеральный партнер в России – ЗАО «Найтек Инструментс»
107031, г. Москва, Малый Кисельный пер., д. 3, стр. 2
Тел.: (495) 661-0681; e-mail: nytek@nytek.ru; сайт: www.nytek.ru



Для них полуширина полосы составляет всего 5 см⁻¹! Однако они доступны пока что только для ограниченного набора длин волн. Также нужно понимать, что при использовании отсекающих фильтров для оптимизации (уменьшения ширины) их переходной характеристики очень важна их точная настройка по углу падения входного пучка. Особенно это критично для фильтров VBG – даже при небольшой ошибке положения они просто перестают работать. Также очевидно, что на каждую длину волны лазера, с которой предполагается работать на приборе, требуется свой фильтр отсекающего, и при смене возбуждающего лазера фильтр нужно заменить (и выставить по углу). Подчеркнем, что проблемой является не приобретение самого фильтра на нужную длину волны – фильтры сейчас доступны практически на любой лазер пригодный для КР-экспериментов, проблема именно в его установке, замене и подстройке положения. Оптимально для экспериментатора, если эти операции будут происходить при минимальном участии человека, лучше всего полностью автоматически. Таким образом, мы сформулировали важное требование к рамановскому прибору: автоматическая смена (переключение) фильтров отсекающего с автоподстройкой их углового положения.

Именно такая функциональность присутствует в обоих вышеупомянутых марках приборов Horiba Scientific: LabRAM и Xploa. В приборе LabRAM, помимо этого, имеется возможность переключения и подстройки вышеописанных фильтров VBG, что делает такой спектрометр максимально универсальным решением для сложных задач КР-спектроскопии, при этом очень простым в эксплуатации.

Рассмотрим прибор LabRAM более подробно. Его базовая оптическая схема была впервые предложена примерно 15 лет назад, и с тех пор существенных изменений не претерпела. В прибор устанавливается один внутренний возбуждающий лазер (633 нм, He-Ne), и через оптический порт можно подключать любые другие внешние лазеры, без ограничений. Все оптические соединения в приборе сделаны напрямую, без оптоволокон, что позволяет управлять поляризацией возбуждающего лазера и измерять поляризацию рассеянного света.

Монохроматор прибора построен по асимметричному варианту Черни-Тернера с использованием асферических (тороидальных) зеркал, что

обеспечивает абсолютно минимальный (из коммерчески доступных ныне приборов) уровень переотражений и ложной засветки детектора, а также полное отсутствие хроматических aberrаций. Использование неплоских компенсирующих дифракционных решеток позволяет полностью исключить пространственные aberrации в двух первых порядках и обеспечить превосходное качество отображения малой входной апертуры на выходную плоскость детектора – в пределах 40 мкм, то есть менее двух пикселей по ширине на стандартной CCD-матрице. Отметим, что решетки в приборе пользователь легко может заменить в процессе работы в зависимости от условий эксперимента. Horiba Scientific предлагает большой выбор высококачественных решеток собственного производства. Также прибор LabRAM имеет рекордно высокую линейность развертки спектра, ошибка не превышает 0,5 см⁻¹.

Благодаря высокому качеству построения изображения и большому фокусному расстоянию спектрографа (800 мм), прибор LabRAM имеет рекордно высокое спектральное разрешение: 0,2 см⁻¹ на длине волны 633 нм с решеткой 2400 штрихов на 1 мм. Важно отметить, что спектральное разрешение подобного прибора помимо фокусного расстояния зависит от многих других параметров: при его определении необходимо как минимум указывать длину волны лазера возбуждения и параметры решетки. Высокое спектральное разрешение необходимо для различения близко расположенных линий, анализа изменения формы линий, определения малых спектральных сдвигов при изменении давления и температуры. Величина спектрального разрешения является одной из важнейших характеристик рамановского спектрометра.

Прибор LabRAM интегрирован с оптическим микроскопом исследовательского класса Olympus (прямым, опционально инвертированным), а также с блоком входной оптики, имеющим управляемую конфокальную диафрагму. Таким образом, этот прибор является полноценным рамановским конфокальным микроспектрометром. Пространственное разрешение прибора LabRAM соответствует предельным формулам теоретической оптики, в частности на длине волны 488 нм с объективом 100X/NA=0,9 латеральное разрешение не превышает 0,5 мкм, а аксиальное 1,5 мкм (пространственное разрешение всегда определяется при конкретной рабочей длине волны и конкретном объективе

микроскопа). Заметим, что компания Horiba Scientific является единственным крупным производителем рамановских микроскопов на мировом рынке, предлагающем подобные приборы с полноценной конфокальной трехмерной пространственной фильтрацией – LabRAM и Xploa.

Современная версия прибора LabRAM под названием LabRAM HR Evolution была впервые представлена производителем в 2012 году и тут же была удостоена престижной международной награды Best New Scientific Instruments Award. Ключевые особенности, отличающие новую версию прибора от предыдущей – улучшенное качество оптики, полная автоматизация, большое количество новых дополнительных модулей для измерений в специальных условиях, возможность быстрого рамановского картирования, возможность работать с VBG фильтрами для наблюдения низкочастотных переходов, о которой мы уже говорили выше.

Оптический диапазон LabRAM HR Evolution расширен до рекордного интервала – от 200 нм до 2200 нм. Во входном каскаде прибора имеются два независимых переключающих оптических канала: линзовый, оптимизированный под минимальные потери в видимом спектральном диапазоне, и зеркальный, полностью ахроматичный, для работы в УФ- и ИК-областях.

Автоматика LabRAM HR Evolution включает в себя управление коммутацией лазеров (внутреннего и внешних), управление мощностью падающего излучения (посредством нейтрального фильтра), управление фильтрами отсека, управление поляризаторами и анализаторами, управление конфокальной диафрагмой, средства прецизионной автоподстройки оптического пути и средства автокалибровки (для снижения дрейфов), управление моторизованным столиком образца.

На приборе LabRAM HR Evolution можно установить до трех оптических портов под спектральные детекторы. Horiba Scientific предлагает их своим клиентам в большом разнообразии: от обычных CCD до быстрых EM-CCD, детекторы под ближний ИК на основе InGaS, PbS и т.п., различные виды ФЭУ.

К прибору LabRAM HR Evolution предлагается огромный выбор различных дополнительных опций и модулей, в частности, различные виды термо-ячеек, ячейку высокого давления, криостаты, магниты, оптический пинцет, защитный кожух, средства для макро-измерений спектра с большой площади (объема) образца, специальные

выносные оптические головки и выносные оптоволоконные зонды для удаленных измерений и измерений "in-situ", различные варианты моторизованных столиков для 2D- и 3D-картирования.

В целом, можно сказать, что по уровню гибкости с точки зрения конфигурирования под задачи пользователя, по уровню автоматизации и по техническим характеристикам прибор LabRAM HR Evolution является абсолютным лидером на рынке среди систем аналогичного класса, и уже более 15 лет (если считать вместе с предыдущей версией) является самым популярным КР-спектрометром в мире, приобретаемым научными лабораториями.

Прибор Xploa, впервые выпущенный в 2010 году, компания Horiba Scientific позиционирует как компактный и легкий в освоении прибор, удобный как для решения научных задач начального уровня, так и для аналитической лаборатории. Прибор выпускается в двух вариантах: Xploa Plus (на основе прямого микроскопа Olympus BX) и Xploa Inv (на основе инвертированного микроскопа Nikon Ti). Как и предыдущие рассмотренные нами приборы, он является полноценным конфокальным микроспектрометром, оснащенным средствами моторизованного картирования, и обеспечивающим надлежащее пространственное разрешение.

В приборе Xploa установлены три твердотельных лазера (длины волн 532 нм, 638 нм, 785 нм). Они размещены непосредственно в корпусе прибора, поэтому длина оптического пути минимальна. Оптические соединения выполнены без оптоволокон. Есть возможность управления поляризацией.

Монохроматор прибора Xploa собран также по схеме Черни-Тернера с качественным построе-



LabRAM Evolution



Xploa Plus

нием изображения входной апертуры. Фокусное расстояние монохроматора небольшое (200 мм), но внутри установлена турель с 4-мя дифракционными решетками различной плотности штриха. Выбор соответствующей решетки позволяет иметь контролируемое спектральное разрешение в пределах $1,5 \text{ см}^{-1}$ на всем рабочем диапазоне волновых чисел ($50\text{--}3500 \text{ см}^{-1}$).

Прибор Xploa отличают небольшие габариты (не более $50 \times 50 \text{ см}$ для варианта Xploa Plus). Он не требует специальных условий для установки и работы. Интерфейс удобен настолько, что его могут освоить даже неквалифицированные пользователи. Прибор полностью автоматизирован – переключение лазеров, фильтров, поляризаторов, решеток и других элементов производится из программного обеспечения.

Прибор Xploa Inv сохраняет полную функциональность высококлассного инвертированного микроскопа Nikon Ti, что позволяет проводить на образце одновременно оптические и спектральные исследования, измерять спектры флуоресценции, использовать высокоапертурные иммерсионные объективы. По словам производителя, прибор представляет собой оптимальное решение для биологических и биохимических лабораторий.

Приборы LabRAM HR Evolution и Xploa Plus/Inv управляются современным программным обеспечением Horiba LabSpec. Его текущая (6-я) версия обладает рядом заметных достоинств. В ней реализован многопользовательский интерфейс с ключами защиты и разным уровнем доступа

к настройкам прибора, возможность управления всей автоматикой прибора, встроены средства визуализации (в том числе 3D), средства макропрограммирования, средства спектрального анализа, расширенные средства обработки спектральных данных, их экспорт и импорт в различных форматах, средства генерации отчетов. Ядро программы поддерживает многопоточную обработку и позволяет справляться сочень большими четырехмерными массивами данных при трехмерном рамановском картировании. Дружественный гибкий интерфейс позволяет легко освоить работу на приборе даже неспециалистам. Дополнительно к базовой функциональности программного обеспечения может быть установлен модуль анализа спектров малых частиц (удобен при работе с оптическим пинцетом), модуль мультивариантного анализа, модуль идентификации спектра, а также пакеты баз данных рамановских спектров различных химических соединений в соответствии с потребностями пользователей.

Отдельно следует сказать о программных средствах для 2D и 3D рамановского картирования посредством моторизованного столика. В LabSpec 6 (как для LabRAM, так и для Xploa) реализована специальная функция SWIFT, обеспечивающая высокоскоростной пакетный стробированный съем данных с многоканального детектора синхронизованно с движением столика без его остановки. Особенно данная функция полезна при работе с быстрым детектором EM-CCD, так как позволяет полностью задействовать его скоростные качества и сократить время выдержки (прохождения данной точки образца) до 1 мсек.

Подводя итог, подчеркнем, что на сегодняшний день компания Horiba Scientific предлагает своим клиентам самый широкий на рынке выбор КР-спектрометров под самые разные задачи: от фундаментальных научных до рутинных аналитических, причем отвечающих самым высоким требованиям, самые богатые возможности по конфигурированию приборов под нужды пользователя, разнообразнейший выбор дополнительных модулей и компонентов приборов для специальных измерений. ЗАО "Найтек Инструментс" – генеральный партнер Horiba Scientific, всегда радо предложить своим клиентам высокопрофессиональный сервис, консультации квалифицированных специалистов, техническую и методическую поддержку, обучение, возможность стажировки в лабораториях Horiba.