

СТРОЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ, КВАНТОВАЯ ХИМИЯ, СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 681.785.574;543.424;535.375.54

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

© 2020 г. И. Б. Винтайкин^{1,2}, Ил. С. Голяк^{1,2*}, Иг. С. Голяк¹,
А. А. Есаков¹, А. Н. Морозов^{1,2}, С. Е. Табалин^{1,2}

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: iliyagol@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2019;

после доработки 30.09.2019;

принята в печать 21.10.2019

Рассмотрено использование спектроскопии комбинационного рассеяния света для проведения экспресс-анализа химических веществ. Для сокращения времени анализа предложено использовать фурье-спектрометр на основе статического интерферометра Майкельсона, в котором происходит пространственная развертка интерферограммы. Приведены две схемы реализации макета статического фурье-спектрометра: с матричным фотоприемным устройством, которое позволяло получить лучшее спектральное разрешение, и с линейным фотоприемным устройством, преимуществом которого является лучшая чувствительность. Регистрацию спектров комбинационного рассеяния проводили в спектральном диапазоне 800–1050 нм, что позволило выполнять анализ в дневное время. В качестве источника возбуждающего излучения использовали лазер с длиной волны $\lambda = 785$ нм и мощностью 1.5 Вт. Приведены интерферограммы, полученные на обоих макетах фурье-спектрометров, восстановлены спектры комбинационного рассеяния света тестовых веществ: 1,4-бис(5-фенил-2-оксазолил) бензол (РОРОР, $C_{24}H_{16}N_2O_2$), стильбена ($C_{14}H_{12}$), хлороформа ($CHCl_3$), этилового спирта (C_2H_5OH), приведены их матрицы корреляции.

Ключевые слова: статический фурье-спектрометр, комбинационное рассеяние света, двумерные интерференционные картины, односторонняя интерферограмма, беспробоотборная методика регистрации.

DOI: 10.31857/S0207401X20100118

ВВЕДЕНИЕ

Для мониторинга экологии окружающей среды на различных объектах в настоящее время применяются различные методы регистрации и анализа спектров химических веществ. К наиболее актуальным относятся методы дистанционного обнаружения и идентификации: спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), фотолюминесценция, ИК-спектроскопия и др. [1–10]. Для проведения беспробоотборного дистанционного экспресс-анализа веществ хорошо зарекомендовали себя методы, основанные на регистрации спектров люминесценции и комбинационного рассеяния света [4–10], которые позволяют проводить анализ веществ по заранее созданной спектральной базе данных с целью их определения или классификации по характерным спектральным признакам.

Преимуществом применения люминесцентной спектроскопии является большая интенсивность регистрируемого вторичного излучения,

что позволяет проводить анализ веществ при малых концентрациях и на больших расстояниях. Сечение рассеяния люминесценции существенно больше, чем для комбинационного рассеяния света, и для большинства веществ его величина составляет 10^{-22} см²/молекул · ср. Недостатком метода является его низкая селективность.

Этого недостатка лишена спектроскопия комбинационного рассеяния света. Селективность этого метода позволяет анализировать вещества по спектральным базам данных, которые включают в себя спектры рассеяния порядка 8000–12000 веществ [11–14]. Ограничение применения его связано с малым сечением рассеяния, порядка 10^{-30} см²/молекул · ср, что требует применения светосильных спектральных приборов для регистрации спектров КРС. Комбинирование этих двух методов позволяет проводить комплексный анализ, включающий предварительную классификацию с использованием люминесцентной

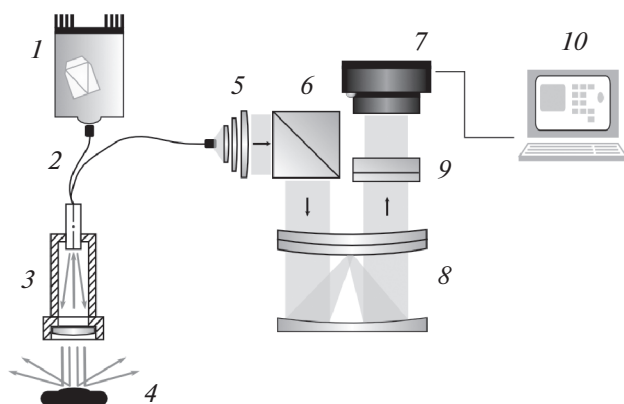


Рис. 1. Схема макета статического фурье-спектрометра: 1 — источник возбуждающего излучения (лазер, $\lambda = 785$ нм), 2 — оптоволоконный зонд, 3 — фокусирующий объектив, 4 — исследуемый образец, 5 — коллиматорный объектив, 6 — светоделительный кубик, 7 — ФПУ, 8 — зеркальный объектив, 9 — цилиндрическая линза, 10 — ПК.

спектроскопии и более специфичную — с использованием спектроскопии КРС.

В том случае, когда за короткое время необходимо провести исследование вещества, следует использовать спектрометры, обладающие большой чувствительностью. В настоящее время для такого анализа применяются динамические [15, 16] и статические фурье-спектрометры [17–19], а также дифракционные спектрометры [20, 21]. Создание макетов статических фурье-спектрометров (СФС) стало возможным при использовании в них многоэлементных фотоприемных устройств (ФПУ). В отличие от динамических фурье-спектрометров (ДФС), где осуществляется временная развертка, в СФС происходит пространственная развертка интерферограммы.

Достоинствами СФС являются их малые габаритные размеры и высокая устойчивость к внешним воздействиям. К недостаткам относятся меньшие, по сравнению с ДФС, светосила и спектральное разрешение. В работах [18, 19, 22] авторы, используя статический фурье-спектрометр, продемонстрировали возможность применения люминесцентной спектроскопии для анализа и определения неизвестных веществ.

В настоящей работе исследуется возможность проведения экспресс-анализа веществ по спектрам КРС в диапазоне длин волн 800–1050 нм, получаемых на макетах статических фурье-спектрометров. Другим применением метода КРС и предложенных макетов может стать исследование процессов [23, 24], в которых требуется регистрировать слабые сигналы.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СТАТИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

Основным элементом разработанных макетов статического фурье-спектрометра является светоделительный кубик, выполненный в виде склейки двух треугольных равнобедренных призм с нанесенным зеркальным покрытием на одну грань каждой призмы. В такой схеме, в отличие от классических интерферометров Майкельсона, интерференционная картина пространственно разрешена и представляет собой набор полос равного наклона. Период формируемой интерференционной картины в такой системе определяется углом наклона зеркальных катетов [25]. Предлагаемая схема и процесс формирования интерференционной картины подробно описаны авторами в работах [17–19].

На рис. 1 показана схема статического фурье-спектрометра, предназначенного для регистрации спектров КРС в диапазоне длин волн 800–1050 нм. Излучение от лазерного источника 1 проходит через оптоволоконный зонд 2 и с помощью объектива 3 фокусируется на исследуемом образце 4. Регистрируемый сигнал от образца 4 через фокусирующий объектив 3 и оптоволоконный зонд 2 поступает на вход осветительного коллиматорного объектива 5, который формирует на входе светоделительного кубика 6 равномерный поток излучения. В светоделительном кубике происходит формирование двумерной интерференционной картины, мнимое изображение которой располагается на зеркальных гранях. Для переноса изображения в плоскость матрицы фотоприемного устройства 7 использовался зеркальный объектив 8. Перед ФПУ дополнительно установлена цилиндрическая линза 9, которая позволяла преобразовать излучение в узкую линию. Регистрируемая на фотоприемном устройстве 7 интерференционная картина передается на персональный компьютер (ПК) 10 для последующей обработки и анализа.

Критерием качества оптической системы является обеспечение максимальной частотной передаточной функции, близкой к дифракционной, по всему полю изображения. Ее уменьшение и неравномерность по полю изображения могут приводить к уменьшению размаха интерференционной картины и пороговой чувствительности. Кроме того, необходимо обеспечить минимальные дисторсию и хроматизм, приводящие к искривлению интерференционной картины и изменению периода интерферограммы, с чем связано уменьшение интенсивности спектральных линий и появление частот, которые отсутствуют в эталонном спектре.

Углы наклона α к горизонтальной плоскости зеркальных отражающих граней светоделительного кубика рассчитывали по следующей форму-

ле при условии, что на ширину одной полосы приходится не менее трех точек:

$$\alpha = \lambda / 4mnl = 0.7^\circ,$$

где n — показатель преломления для кварцевого стекла, равный 1.51, на длине волны $\lambda = 800$ нм; l — размер фоточувствительного элемента; $m = 3$ — число пикселей фотоприемного устройства, приходящихся на период интерференционной полосы.

Максимальный угол расходимости пучка лучей на входе в светоделительный кубик ограничен следующим соотношением:

$$\varphi \leq (2/R_0)^{1/2},$$

где R_0 — теоретическая разрешающая способность фурье-спектрометра.

Для проведения беспробоотборного дистанционного анализа с применением спектроскопии КРС требуется обеспечить хорошее спектральное разрешение. При условии, что на период одной интерференционной полосы приходится не менее трех точек, необходимо регистрировать порядка 950 периодов, что соответствует числу фоточувствительных элементов, равному 2850, в матрице ФПУ. Для уменьшения габаритов макета оптимально регистрировать одностороннюю интерферограмму с небольшой правой частью для симметризации и проведения процедуры фазовой коррекции. Для этого при склейке светоделительного кубика добиваются смещения области нулевой разности оптического хода ближе к краю матрицы ФПУ.

Для регистрации двумерных интерференционных картин использовали матрицу ФПУ, содержащую 3400×2700 фоточувствительных элементов (размер одного пикселя 3.7 мкм). Применение матричного приемника при наличии искажений интерференционной картины, вносимых оптической системой, позволяет проводить ее коррекцию. Также использование матричного ФПУ позволяет увеличить отношение сигнал/шум в $M^{1/2}$ раз при усреднении по M строкам.

Перед матричным приемником была установлена цилиндрическая линза, которая позволяла “стянуть” интерференционную картину в узкую полосу шириной 1 мм, что соответствовало числу элементов в матрице ФПУ, равным 300. Это увеличило пороговую чувствительность макета спектрометра. Уменьшение ширины полосы приводило к значительному ухудшению контраста регистрируемой интерференционной картины. Для дальнейшего увеличения отношения сигнал/шум проводили процедуру усреднения по 300 строкам матрицы, что повысило данное соотношение в 17 раз.

Выбор длины волны источника возбуждающего излучения и спектральная чувствительность матричного приемника определяют спектральный диапазон работы спектрометра. В качестве

источника возбуждения применен лазер с длиной волны $\lambda = 785$ нм, мощностью 1.5 Вт и шириной спектральной линии $\delta\lambda = 0.15$ нм. Выбор такого источника обусловлен необходимостью “отстроиться” от люминесцентного излучения, которое наблюдается у некоторых образцов при использовании источников с меньшими длинами волн [26, 27] и необходимостью устранить влияние внешней солнечной засветки, что позволит регистрировать спектры КРС в дневное время.

Фокусировку лазерного излучения на исследуемом образце и формирование излучения на входе приемной системы осуществляли с помощью оптоволоконного зонда, конструкция которого включала в себя два оптоволоконных жгута — диаметром 100 мкм для лазерного источника и диаметром 200 мкм для приемной системы. Чтобы исключить релеевское рассеяние света и внешнюю засветку естественного освещения в конструкции оптоволоконного зонда были установлены: узкополосный НОТЧ-фильтр (notch-filter) с коэффициентом подавления излучения более шести порядков и ИК-фильтр. На торце оптоволоконного зонда установлен фокусирующий объектив с числовой апертурой $NA = 0.44$ и рабочим отрезком, равным 7 мм.

Увеличение чувствительности спектрометра может быть осуществлено за счет использования более чувствительного детектора, для чего была проведена модификация оптической системы с заменой матричного фотоприемного устройства на линейный, содержащий 2048×70 фоточувствительных элементов (размер одного элемента 14 мкм). Детектор выполнен по технологии “обратной засветки” (back-illuminated sensor).

Для обеспечения лучшего спектрального разрешения, так же как в спектрометре с матричным ФПУ, регистрируется односторонняя интерферограмма. При уменьшении числа регистрирующих фотоэлементов теоретическое спектральное разрешение дает величину 20 см^{-1} . Ухудшение спектрального разрешения приведет к частичной потере информации сигнала в спектре за счет того, что некоторые линии не будут разрешаться, но за счет этого можно увеличить входную апертуру спектрометра, что приведет к повышению чувствительности. Для переноса интерференционной картины, формируемой на зеркальных гранях светоделительного кубика, использовали зеркальную систему, дополненную телескопическим объективом трехкратного увеличения для растягивания изображения на весь размер линейного ФПУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве тестовых образцов выбраны вещества с хорошо известным спектром КРС излучения: 1,4-бис(5-фенил-2-оксазол) бензол (РОРОР,

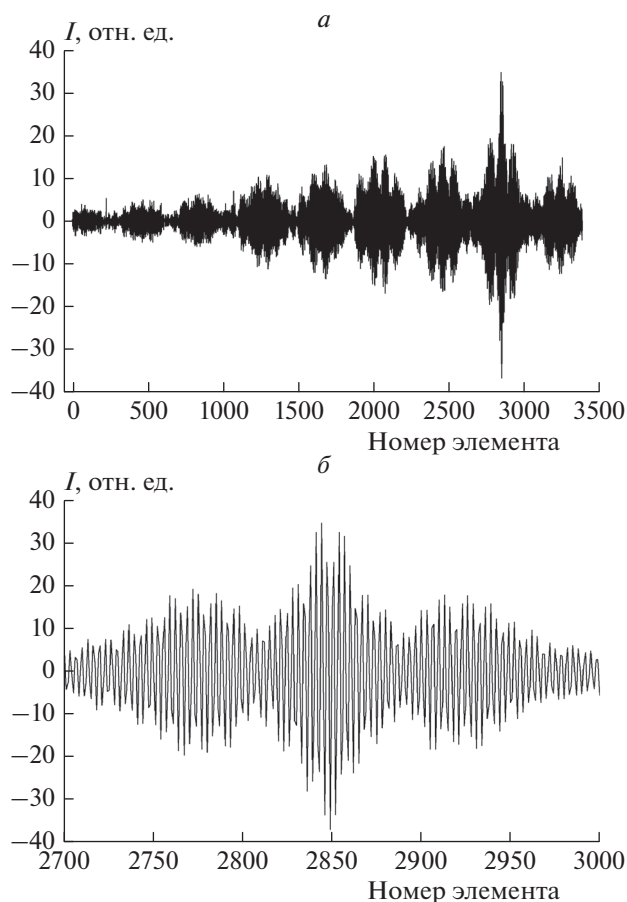


Рис. 2. Регистрируемая интерферограмма КРС тестового образца РОРОР, полученная на СФС с матричным ФПУ: *а* — полная интерферограмма, *б* — центральная часть.

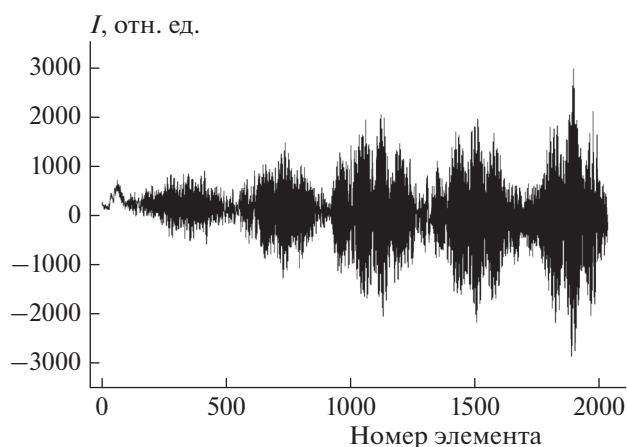


Рис. 3. Регистрируемая интерферограмма КРС тестового образца РОРОР, полученная на СФС с линейным ФПУ.

$C_{24}H_{16}N_2O_2$), стильбен ($C_{14}H_{12}$), хлороформ ($CHCl_3$), этиловый спирт (C_2H_5OH) [18, 28]. Рамановский зонд закрепляли в штативе и оптически сопряга-

ли с выходом блока возбуждающего излучения и входом спектрального блока макета с установленным матричным или линейным ФПУ. Включали лазерный источник с длиной волны $\lambda = 785$ нм и по очереди подносили тестовые вещества. Расстояние до анализируемого объекта выставляли равным 7 мм. На регистрируемых интерференционных картинах при приближении к краям наблюдалось падение интенсивности, связанное с неравномерностью засветки светоделительного кубика.

Пример регистрируемой интерферограммы КРС тестового образца РОРОР на СФС с матричным приемником после “вычитания” постоянной составляющей представлен на рис. 2. На рис. 2*а* приведена полная интерферограмма размером 3400 элементов, а на рис. 2*б* — ее центральная часть (300 элементов). Интерферограмма получена за один кадр при времени накопления сигнала, равным 0.5 с.

Представленная интерферограмма имеет выраженный центральный максимум, который соответствует нулевой оптической разности хода, и сигналу, уменьшающемуся по амплитуде, при увеличении смещения между плечами интерферометра (рис. 2*а*). Нулевой оптической разности хода соответствует 2850-й элемент, что обеспечивает величину спектрального разрешения макета СФС, равную 14 см^{-1} .

Симметричный вид регистрируемой интерферограммы позволяет сделать заключение об отсутствии смещения нулевой разности хода для разных длин волн видимого и ближнего ИК-диапазона вследствие несоосности оптической системы или наличия дисперсии. Поэтому дополнительные методы коррекции изображения не применялись.

Пример интерферограммы КРС тестового вещества РОРОР, полученной на спектрометре с линейным ФПУ, приведен на рис. 3. Время накопления сигнала — 0.5 с. Интерферограмма имеет ярко выраженный максимум на 1895-м элементе. Всплеск на краю (см. рис. 3) связан с краевыми эффектами низкочастотных фильтров, которые возникают при удалении постоянной составляющей в интерферограмме.

Применяя фурье-преобразование, из полученных интерферограмм восстанавливали спектры КРС [29–31]. На рис. 4 и 5 приведены восстановленные спектры КРС тестовых веществ — РОРОР и стильбена, полученные на фурье-спектрометре с матричным ФПУ. Значения интенсивности представлены в относительных единицах, значения по оси абсцисс даются с учетом рамановского сдвига относительно длины волны возбуждающего излучения. Время накопления сигнала на ФПУ составлялось равным 0.5 с.

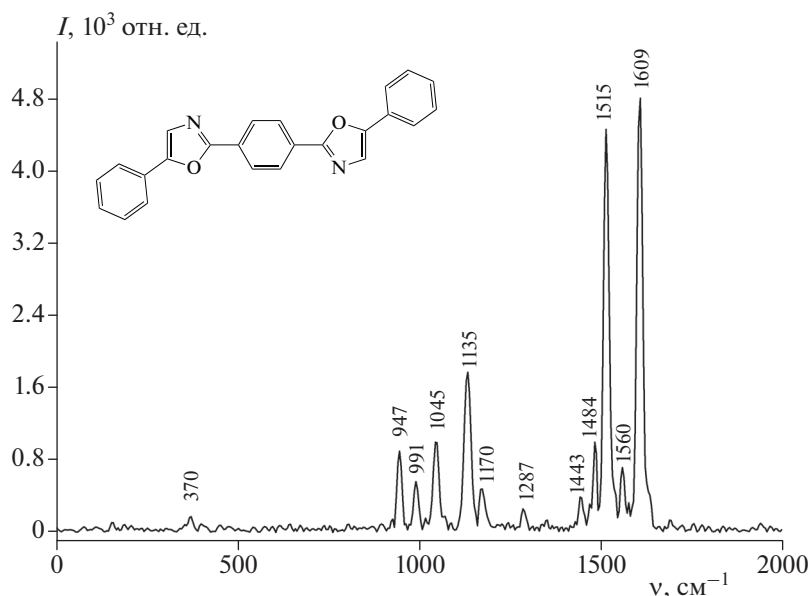


Рис. 4. Восстановленный спектр КРС тестового образца РОРОР, полученный на СФС с матричным ФПУ.

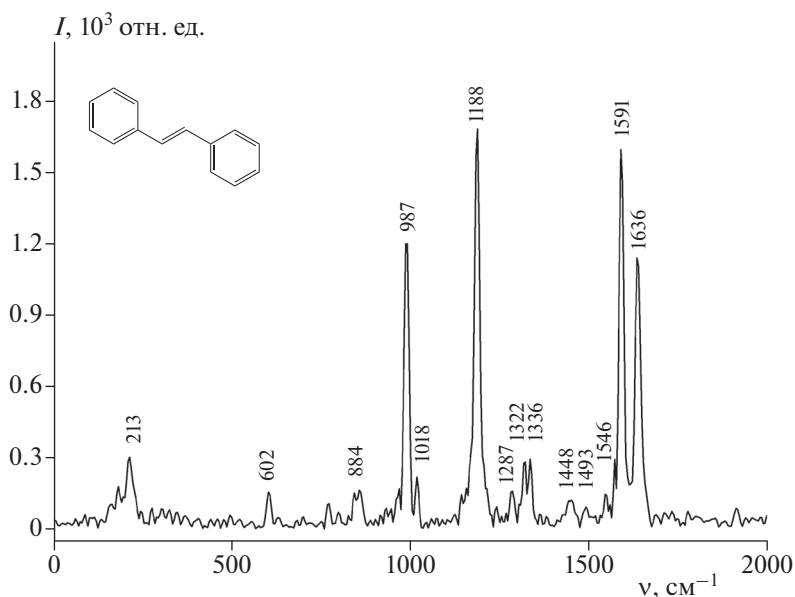


Рис. 5. Восстановленный спектр КРС тестового образца стиблена, полученный на СФС с матричным ФПУ.

Для большей наглядности на рисунках приведена информативная часть спектров, в которой содержится сигнал. На представленных спектрах наблюдаются отдельно выраженные пики максимумов излучения, которые соответствуют КРС. Основные спектральные линии КРС тестового вещества РОРОР (рис. 4) находятся при следующих волновых числах ν : 1609, 1560, 1515, 1484, 1443, 1287, 1170, 1135, 1045, 991, 947, 370 см^{-1} . Основные пики максимумов излучения в спектре

КРС тестового образца стиблена (рис. 5) находятся при следующих волновых числах ν : 1636, 1591, 1546, 1493, 1448, 1336, 1322, 1287, 1188, 1018, 987, 884, 602, 213 см^{-1} .

Положения пиков максимумов зарегистрированных спектров излучения соответствуют волновым числам эталонных спектров [28]. Несущественные различия в положении максимумов излучения при сравнении с эталонными спектрами связаны с хроматизмом, вносимым оптической

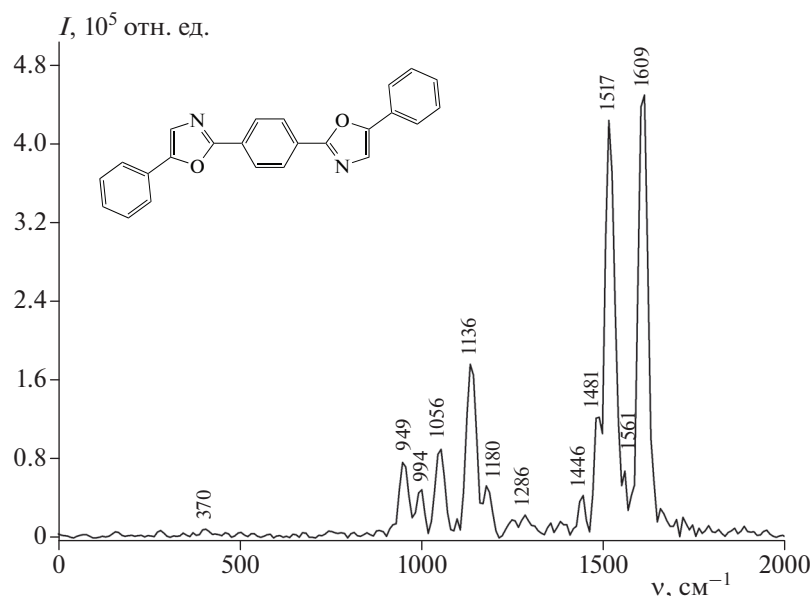


Рис. 6. Восстановленный спектр КРС тестового образца РОРОР, полученный на СФС с линейным ФПУ.

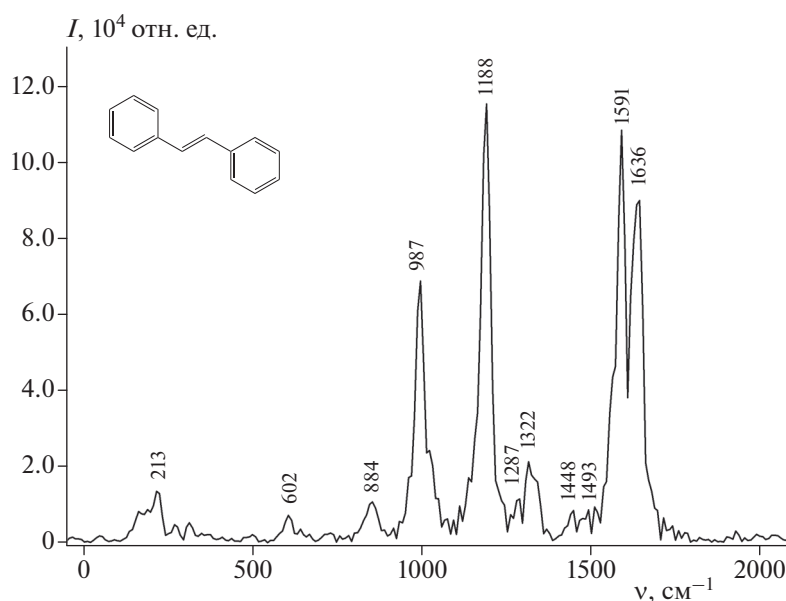


Рис. 7. Восстановленный спектр КРС тестового образца стильбена, полученный на СФС с линейным ФПУ.

системой. Отношение сигнал/шум для спектра КРС РОРОР равно 205.8, а для спектра КРС стильбена — 99.6. Измеренное спектральное разрешение в регистрируемых спектрах соответствует расчетному значению и равняется 14 см^{-1} .

Восстановленные спектры КРС тестовых веществ, зарегистрированные на макете статического фурье-спектрометра с линейным ФПУ, приведены на рис. 6 и 7. На спектрах этих веществ сохра-

няется положение основных спектральных линий излучения.

Измеренное спектральное разрешение СФС с линейным ФПУ составляет 24 см^{-1} , что в 1.2 раза хуже по сравнению с теоретическим значением. Это, возможно, связано с наличием остаточных aberrаций оптической системы более высоких порядков. При сравнении с макетом СФС с матричным ФПУ разрешение хуже в 1.7 раз. Это приводит к тому, что некоторые линии в реги-

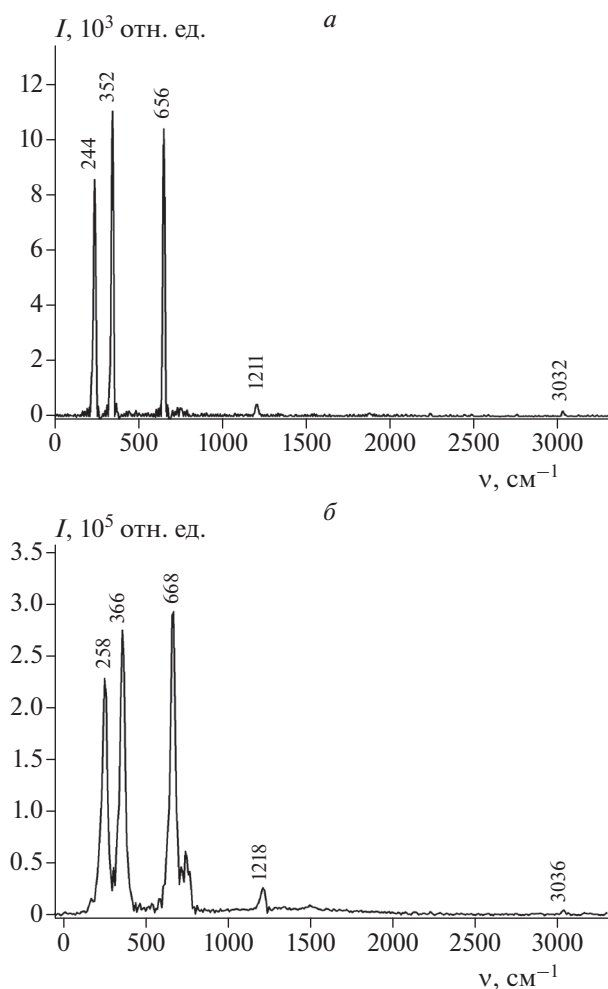


Рис. 8. Спектры КРС хлороформа, полученные на СФС с использованием: *а* – матричного ФПУ, *б* – линейного ФПУ.

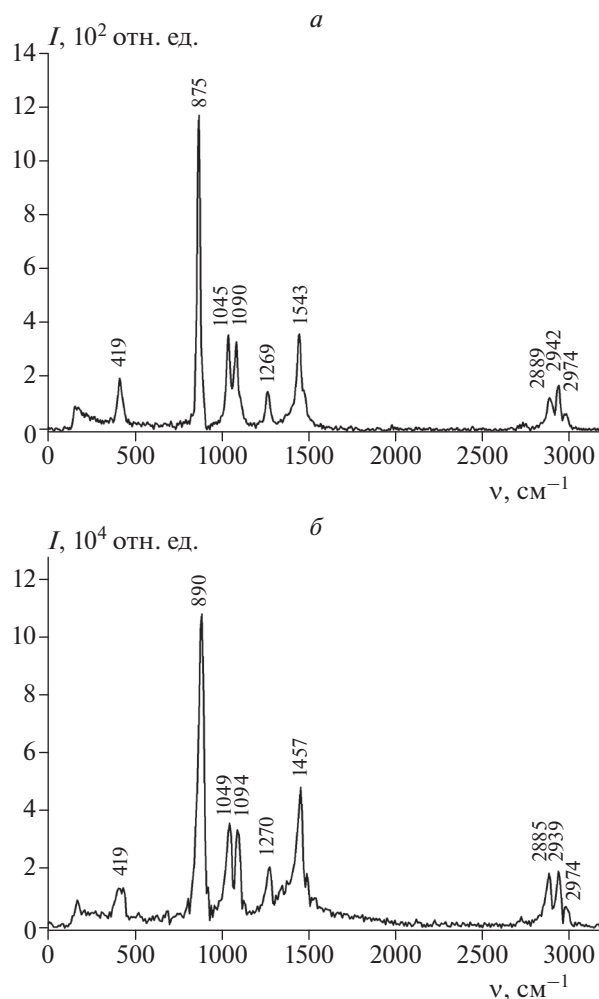


Рис. 9. Спектры КРС этилового спирта, полученные на СФС с использованием: *а* – матричного ФПУ, *б* – линейного ФПУ.

стрируемых спектрах КРС начинают плохо разрешаться. В спектре КРС, например, стильбена (рис. 6) отсутствуют линии при волновых числах: 1546, 1018, 1336 cm^{-1} , а в спектре КРС РОРОР – при волновом числе 1565 cm^{-1} (рис. 7). Рассчитанное отношение сигнал/шум в спектре КРС образца РОРОР составляет 433.4, а для спектра КРС стильбена – 253.5, что оказывается в 2.1 и 2.6 раза лучше, чем при использовании СФС с матричным ФПУ.

На рис. 8 и 9 приведены спектры КРС тестовых образцов хлороформа и этилового спирта, полученных как на макете статического фурье-спектрометра с матричным ФПУ (рис. 8*а*, рис. 9*а*), так и на макете СФС с линейным ФПУ (рис. 8*б*, рис. 9*б*). Формы спектров КРС, полученных на обоих макетах, совпадают. В области волновых

чисел около 3000 cm^{-1} наблюдаются линии, связанные с наличием СН-связей.

Матрицы корреляции для зарегистрированных спектров КРС, полученных на обоих макетах, приведены на рис. 10 и 11. Видно, что тестовые вещества существенно отличаются друг от друга. Для спектров КРС, полученных на макете СФС с матричным ФПУ, максимальная корреляция не превосходит значения 0.23 (РОРОР – стильбен). Минимальная корреляция наблюдается для спектров КРС образцов РОРОР и хлороформа.

Для спектров КРС, полученных на макете СФС с линейным ФПУ, значение максимальной корреляции оказывается хуже и достигает величины в 0.65 (этанол – метанол), что связано с меньшим спектральным разрешением. Минимальная корреляция наблюдается также для спектров КРС образцов РОРОР и хлороформа – 0.04.

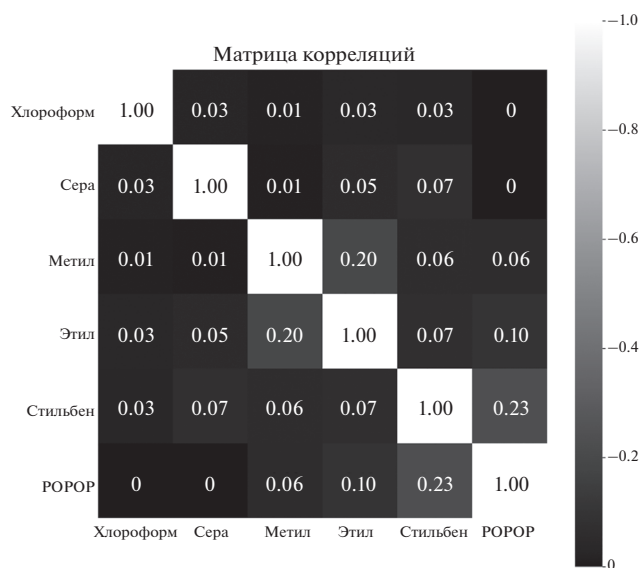


Рис. 10. Матрица корреляций спектров КРС, полученных на СФС с матричным ФПУ.

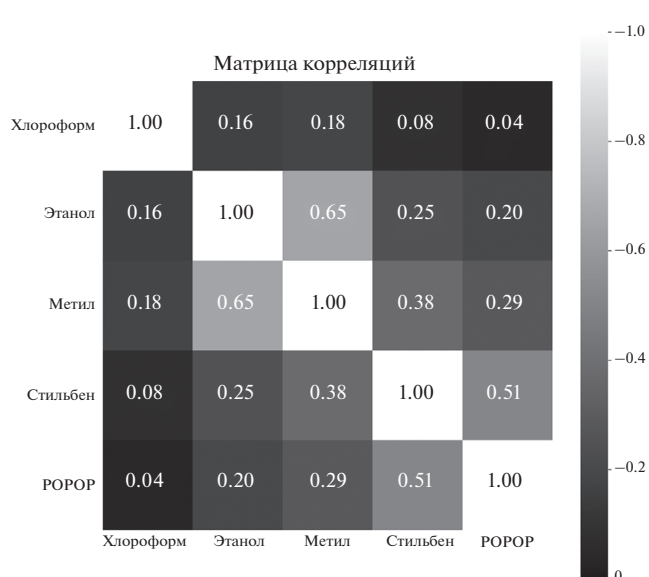


Рис. 11. Матрица корреляций спектров КРС, полученных на СФС с линейным ФПУ.

ВЫВОДЫ

1. В работе рассмотрено применение спектроскопии комбинационного рассеяния света для проведения экспресс-анализа веществ с использованием статического фурье-спектрометра.

2. Преимуществами использования СФС являются: большая светосила, что обеспечивается большой входной апертурой, и устойчивость к внешним воздействиям за счет отсутствия подвижных частей в конструкции.

3. Созданы макеты СФС с матричным и линейным приемниками излучения для регистрации спектров КРС в спектральном диапазоне 800–1050 нм при возбуждении лазером с длиной волны $\lambda = 785$ нм и мощностью 1.5 Вт.

4. Для обоих макетов СФС измерены спектральные разрешения и проведено их сравнение с теоретическими. Спектральное разрешение равно 14 см^{-1} для макета СФС с матричным ФПУ и 24 см^{-1} для макета СФС с линейным ФПУ.

5. С использованием спектроскопии КРС на макетах СФС зарегистрированы и восстановлены спектры КРС тестовых веществ: стильбена, РОРОР, хлороформа и этилового спирта за время накопления сигнала, равное 0.5 с.

6. Продемонстрировано хорошее совпадение полученных результатов с эталонными спектрами, приведенными в литературе. Для полученных спектров рассчитано отношение сигнал/шум и показано, что для спектров КРС образцов РОРОР и стильбен, полученных с использованием линейного ФПУ, оно больше в 2.1–2.5 раза.

7. Для тестовых веществ была построена матрица корреляции, из которой видно, что анализируемые вещества существенно отличаются друг от друга.

8. Проведенный анализ демонстрирует возможность применения метода КРС и разработанных макетов фурье-спектрометров для проведения экспресс-анализа веществ с целью их идентификации.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-29-09625 офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубков Г.В., Григорьев Г.Ю., Набиев Ш.Ш. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 10. С. 47.
2. Набиев Ш.Ш., Григорьев Г.Ю., Лагутин А.С. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 49.
3. Голяк И.С., Морозов А.Н., Светличный С.И. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 3.
4. Movasaghi Z., Rehman S., Rehman I.U. // Appl. Spectrosc. Rev. 2007. V. 42. P. 493.
5. Nagli L., Gaft M. // Proc. SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2007. № 6552. P. 1; <https://doi.org/10.1117/2.1200712.0880>
6. Zachhuber B., Ramer G., Hobro A. et al. // Anal Bioanal Chem. 2011. V. 400. № 8. P. 2439; <https://doi.org/10.1007/s00216-011-4715-y>
7. Sorak D., Herberholz L., Iwascek S. et al. // Appl. Spectrosc. Rev. 2012. V. 47. № 2. P. 83.

8. *Smith E., Dent G.* Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach. Chichester, UK: J. Wiley & Sons, 2005.
9. *Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И.* Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972.
10. *Бункин Н.Ф., Голяк Иг.С., Голяк Ил.С. и др.* // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2019. № 1. С. 48; <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-1-48-65>
11. *Купцов А.Х., Жижин Г.Н.* Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М.: Физматлит, 2001.
12. *McCreery R.L.* Raman Spectroscopy for Chemical Analysis. New York, USA: J. Wiley & Sons, 2005.
13. *Vandenabeele P.* Practical Raman Spectroscopy: An Introduction. Chichester, UK: J. Wiley & Sons, 2013.
14. Handbook of Raman Spectroscopy / Eds. Lewis I.R., Edwards H.G.M. N.Y. — Basel: Dekker, 2001.
15. *Балашов А.А., Голяк Ил.С., Голяк Иг.С., Морозов А.Н. и др.* // ЖПС. 2018. Т.85. № 5. С. 815.
16. *Балашов А.А., Вагин В.А., Голяк Ил.С., Морозов А.Н. и др.* // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 3. С. 83.
17. *Винтайкин И.Б., Васильев Н.С., Голяк Ил.С., Голяк Иг.С., Есаков А.А., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е., Фуфурин И.Л.* // Изв. РАН. Энергетика. 2016. № 6. С. 144.
18. *Голяк Ил.С., Есаков А.А., Васильев Н.С., Морозов А.Н.* // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 6. С. 990.
19. *Васильев Н.С., Голяк Ил.С., Голяк Иг.С., Есаков А.А., Морозов А.Н., Табалин С.Е.* // ПТЭ. 2015. № 1. С. 181.
20. *Sharma S.K., Angel S.M., Ghosh M. et al.* // Appl. Spectrosc. 2002. V. 56. № 6. P. 699; <https://doi.org/10.1366/000370202760077630>
21. *Misra A.K., Sharma S.K., Acosta T.M. et al.* // Ibid. 2012. V. 66. № 11. P. 1279; <https://doi.org/10.1366/12-06617>
22. *Глаголев К.В., Голяк Иг.С., Голяк Ил.С., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е.* // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110. № 3. С. 486.
23. *Корец А.Я., Крылов А.С., Миронов Е.В.* // Хим. физика. 2007. Т. 26. № 7. С. 58.
24. *Тухватуллин Ф.Х., Ташкенбаев У.Н., Жумабаев А.Ж. и др.* // Хим. физика. 2003. Т. 22. № 6. С. 26.
25. *Морозов А.Н., Светличный С.И.* Основы фурье-спектрорадиометрии. М.: Наука, 2014.
26. *Zhou P.* // Choosing the Most Suitable Laser Wavelength For Your Raman Application; <http://bwtek.com/appnotes/choosing-the-most-suitable-laser-wavelength-for-your-raman-application/>
27. <http://www.spectroscopyonline.com/recent-developments-handheld-raman-instrumentation-industry-pharma-police-and-homeland-security-532>
28. Chemical Book—Chemical Search Engine; https://www.chemicalbook.com/CASDetailList_15400_EN.htm
29. *Васильев Н.С., Винтайкин И.Б., Голяк Ил.С., Голяк Иг.С. и др.* // Компьютерная оптика. 2017. Т.41. № 5. С. 626; <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-5-626-635>
30. Fourier Transform Infrared Spectrometry / Eds. Griffiths P.R., De Haseth J.A., Winefordner J.D. 2nd Edition. Hoboken, N.Y.: Wiley & Sons, 2007.
31. *Kauppinen J., Partanen J.* Fourier Transforms in Spectroscopy. Berlin: WILEY–VCH, 2001.