

# ДИСТАНЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЕЩЕСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

*с.н.с., д.ф.-м.н. Голяк И.С.<sup>1</sup>, г.н.с., д.т.н. Балашов А.А.<sup>1,2</sup>,  
д.ф.-м.н., проф. Морозов А.Н.<sup>1,2</sup>, инж. Хорохорин А.И.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана»

<sup>2</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН  
iliyagol@mail.ru

В работе описан макет динамического фурье-спектрометра для регистрации спектров комбинационного рассеяния света (КРС) в спектральном диапазоне 800 - 1100 нм при возбуждении лазерным источником с длиной волны  $\lambda = 785$  нм. В спектрометре реализован канал белого света для проведения суммирования интерферограмм по нескольким сканам и референтный канал с частотой дискретизации  $\lambda/4$ . С использованием разработанного статического макета были проведены эксперименты по регистрации спектров КРС тестовых веществ и рассчитаны отношения сигнал / шум. В работе приводятся спектры КРС 1,4-бис(5-фенил-2-оксазол) бензола (РОРОР,  $C_{24}H_{16}N_2O_2$ ), ацетилсалициловой кислоты ( $C_9H_8O_4$ ) зарегистрированные на динамическом фурье-спектрометре на расстоянии 100 мм.

**Ключевые слова:** комбинационное рассеяния, дистанционный анализ, динамический фурье-спектрометр, уголкового отражатели

В работе рассмотрена возможность использования динамического фурье-спектрометра для дистанционной регистрации и восстановления спектров КРС веществ в спектральном диапазоне 800 – 1100 нм. Для возбуждения спектров КРС используется лазерный источник с длиной волны  $\lambda = 785$  нм и спектральной шириной  $\Delta\lambda = 0,2$  нм [1-3].

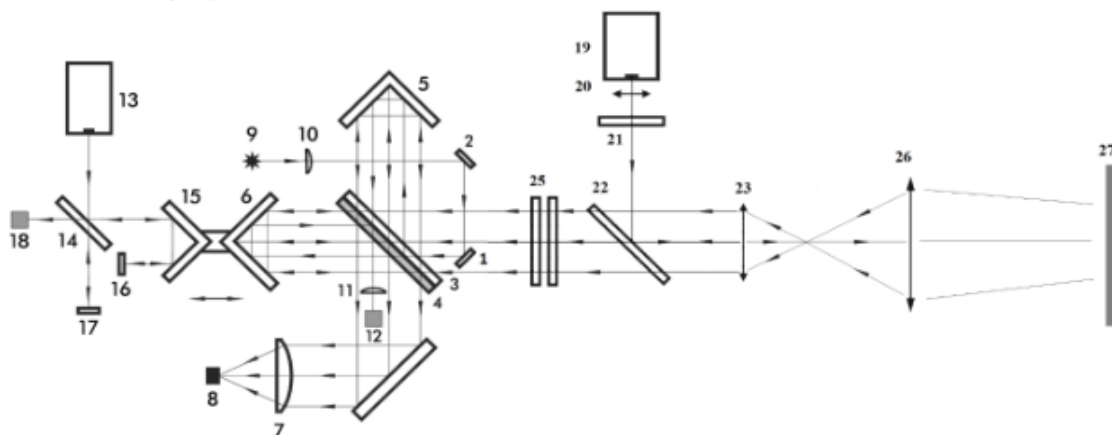
Основным элементом разработанного макета прибора является интерферометр Майкельсона, в котором в качестве отражателей в плечах интерферометра используются зеркальные триэдры с угловой апертурой 2,5 дюйма и угловым отклонением 1 с [4, 6]. Один триэдр установлен на подвижной каретке, перемещающейся посредством двигателя магнитоэлектрического типа. В качестве линейной направляющей использована направляющая ЛМ с шариковым сепаратором. В референтном канале реализована система позволяющая измерять разность хода с частотой  $\lambda/4$ , что приводит к увеличению точности

дискретизации. Для накопления и суммирования интерферограмм по нескольким сканам, с целью увеличения отношения сигнал / шум, реализован канал белого света.

Спектрометр состоит из четырех основных частей [5-7]:

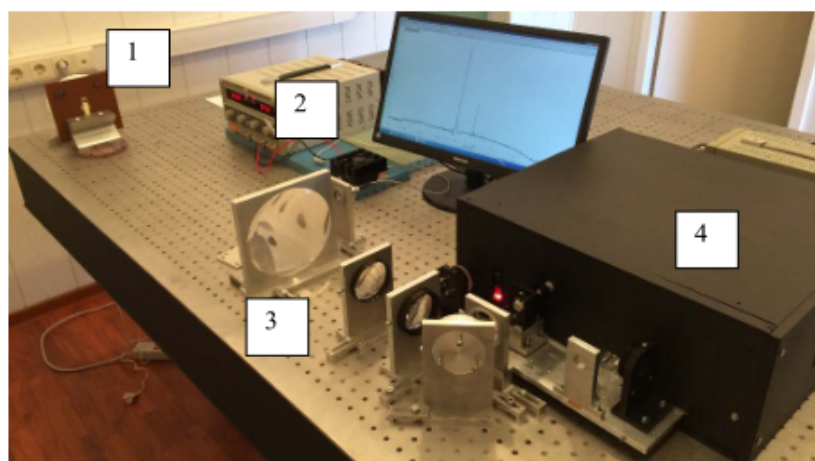
- измерительного (основного) канала, который предназначен для измерения исследуемого излучения и формирования модулируемого сигнала в виде интерферограмм на приемнике;
- канала «белого света» [5], который осуществляет точную привязку по шкале оптической разности хода, измеряемых интерферограмм;
- референтного канала, измеряющего оптическую разность хода в интерферометре;
- рамановской приставки, предназначенной для фокусирования излучения от лазерного источника на исследуемом образце и сбора, фильтрации и формирования параллельного потока на входе спектрометра [7].

Оптическая схема динамического фурье-спектрометра для дистанционной регистрации спектров КРС представлена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Оптическая схема рамановского фурье-спектрометра. 1, 2, 3, 16, 17 – плоские зеркала; 3 – светоделитель; 4 – компенсатор; 5, 6 – триздры; 7, 11, 23 – фокусирующие линзы; 8 – приемник излучения основного канала; 9 – излучатель канала белого света; 10, 20 – расширяющая линза; 12 – приемник канала белого света; 13 – лазер 632 нм; 14 – светоделитель референтного канала; 15 – диэдр; 18 – приемник референтного канала; 19 – лазер 785 нм; 21 – полосовой фильтр; 22 – дихроичный фильтр; 24 – образец; 25 – длинноволновые фильтры; 26 – телескопический объектив, 27 – исследуемое вещество.

Внешний вид динамического фурье-спектрометра представлен на рисунке 2. Входная угловая апертура спектрометра равняется 4 град. Размер области фокусируемого излучения от 10 мм. Дистанция до объекта составляет 100 мм.



**Рис. 2.** Внешний облик динамического фурье-спектрометра. 1 - исследуемое вещество, 2 – лазер 785 нм, 3 – система фокусировки и сбора КРС, 4 – динамический фурье-спектрометр.

На рисунке 3 представлены экспериментальные спектры КРС веществ (РОРОР и ацетилсалициловой кислоты), полученных на динамическом фурье-спектрометре (рисунок 1 (а) и рисунок 1 (б)) при возбуждении лазером с длиной волны  $\lambda = 785$  нм и мощностью 1500 мВт. Спектры КРС были зарегистрированы при усреднении по 16 сканам и с экспозицией 0,25 с в одном скане.

На приведенных спектрах КРС наблюдаются отдельно выраженные максимумы излучения. Основные спектральные линии КРС РОРОР находятся на следующих частотах  $\nu$ : 1606  $\text{см}^{-1}$ , 1561  $\text{см}^{-1}$ , 1515  $\text{см}^{-1}$ , 1487  $\text{см}^{-1}$ , 1481  $\text{см}^{-1}$ , 1140  $\text{см}^{-1}$ , 1178  $\text{см}^{-1}$ , 1054  $\text{см}^{-1}$ , 1000  $\text{см}^{-1}$ , 954  $\text{см}^{-1}$ . Положения основных максимумов в обоих спектрах совпадают, при этом для некоторых линий есть небольшая ошибка, которая связана со спектральным разрешением и дискретностью простановки волновых чисел. Основные максимумы излучения КРС ацетилсалициловой кислоты лежат на частотах  $\nu$ : 3068  $\text{см}^{-1}$ , 2936  $\text{см}^{-1}$ , 1604  $\text{см}^{-1}$ , 1297  $\text{см}^{-1}$ , 1042  $\text{см}^{-1}$ , 748  $\text{см}^{-1}$ , 552  $\text{см}^{-1}$ . Положение максимумов зарегистрированных спектров излучения соответствует частотам эталонных спектров [56].

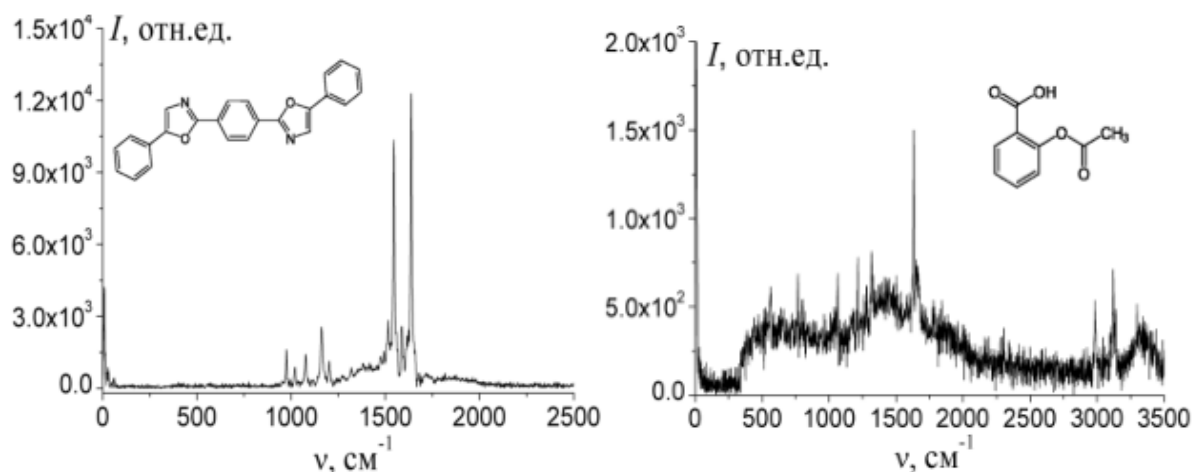


Рис. 3. Спектры КРС тестовых веществ.

Спектры КРС ацетилсалициловой кислоты оказываются более зашумленным по сравнению со спектрами КРС РОРОР и стилибена, что объясняется его меньшим сечением рамановского рассеяния.

Расчитанное отношение сигнал / шум для спектра КРС РОРОР составляет 307, а для спектра КРС ацетилсалициловой кислоты 34.

#### Выводы

Была собрана и настроена система для дистанционной регистрации спектров КРС. С применением предложенного динамического фурье-спектрометра были зарегистрированы спектры КРС РОРОР и ацетилсалициловой кислоты на дистанции 100 мм.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-09625.

#### Список литературы

1. Vandenabeele P. Practical Raman Spectroscopy: An Introduction. John Wiley & Sons. 2013. 161 p.
1. Smith E. Dent G. Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach. John Wiley & Sons. 2005. 202 p.
2. Griffiths P.R., De Haseth J.A., Winefordner J.D., Fourier Transform Infrared Spectrometry. 2nd Edition, Wiley, 2007. 560 p.
3. Васильев Н.С., Голяк Ил.С., Голяк Иг.С., Есаков А.А., Морозов А.Н., Табалин С.Е. Статический фурье-спектрометр для проведения экспресс-анализа химических веществ // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 181–182.
4. Винтайкин И.Б. Рамановский спектрометр на основе статического интерферометра Майкельсона / И.Б. Винтайкин, Н.С. Васильев, Ил.С. Голяк, Иг.С. Голяк, А.А. Есаков, А.Н. Морозов, С.И. Светличный, С.Е. Табалин, И.Л. Фуфурин // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 6. С. 144–152.
5. Морозов А.Н., Светличный С.И. «Основы фурье-спектрометрии», 2-е изд., испр. и доп., М.: Наука, 2014. 456 с.
6. A. A. Balashov, Il. S. Golyak, Ig. S. Golyak, A. N. Morozov, I. N. Nesteruk, A. I. Khorokhorin. Multichannel Dynamic Fourier-Transform IR Spectrometer/ Journal of Applied Spectroscopy, 2017, V. 84, №. 4, pp 664–667
7. Балашов А.А. Раман-спектрометр на основе динамического фурье-спектрометра видимого и ближнего ИК диапазона / В.А. Вагин, Ил.С. Голяк, А.Н. Морозов, И.Н. Нестерук, А.И. Хорохорин // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. №3. С. 83–89.
8. A. A. Balashov, Il. S. Golyak, Ig. S. Golyak, A. N. Morozov, I. N. Nesteruk, A. I. Khorokhorin. Recording Raman Spectra Using a Dynamic Fourier Transform Spectrometer/ Journal of Applied Spectroscopy, 2018, V. 85, № 5, pp 923–930.