

Аппаратурный комплекс для спектральных наблюдений в диапазоне частот 85–116 ГГц на радиотелескопе РТ-22 КрАО

А. В. Антюфеев, С. Ю. Зубрин, А. Н. Король, А. М. Королев, В. В. Мышенко, В. И. Подъячий, А. В. Поладич, В. И. Шкодин, В. М. Шульга

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: zubrin@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 8 июня 2010 г.

Разработан аппаратурный комплекс диапазона частот 85 ÷ 116 ГГц для спектральных наблюдений молекулярного радиоизлучения галактических объектов на радиотелескопе РТ-22 КрАО. Описаны структура комплекса, реализованные режимы наблюдений и методика калибровки, даны рекомендации по использованию возможных режимов наблюдений. Приведены результаты спектральных и континуальных наблюдений.

1. Введение

Чувствительность радиоастрономического инструмента определяется тремя основными факторами: параметрами антенны, шумовой температурой приемной системы и величиной поглощения сигнала в атмосфере. Необходимость уменьшения влияния последних двух факторов стимулировала разработку криоохлаждаемых приемников с минимальными собственными шумами и стремление к размещению антенн значительно выше уровня моря. В результате эффективная шумовая температура радиотелескопа как целостной приемной системы ($T_{\text{сис}}$) для современных инструментов составляет на миллиметровых волнах около 200 ÷ 300 К [1, 2]. Вместе с тем известно несколько эффективно работающих радиотелескопов, расположенных в обсерваториях на уровне моря: Онсала (Швеция), Метсахови (Финляндия) и Крымская астрофизическая обсерватория – КрАО (пос. Симеиз, Украина). Построенные во второй половине прошедшего столетия эти телескопы активно используются для радиоастрономических наблюдений в миллиметровом диапазоне, хотя поглощение в атмосфере

ограничивает предельно достижимую чувствительность.

Украинский радиотелескоп РТ-22 КрАО (диаметр главного зеркала 22 м) в сантиметровом и миллиметровом диапазонах использует систему облучения, построенную по схеме Кассегрена. Поверхность главного зеркала изготовлена со среднеквадратичным отклонением от параболоида ~ 0.25 мм, вследствие чего эффективная площадь антенны составляет несколько десятков квадратных метров в диапазоне частот 85 ÷ 116 ГГц [3]. На протяжении 15 лет для радиотелескопа РТ-22 было разработано несколько типов приемников миллиметрового диапазона – с мазерным усилителем, со сверхпроводниковыми и полупроводниковыми структурами [4-6]. С учетом эксплуатационных характеристик предпочтение отдано криогенному (температура охлаждения 15 К) приемнику со смесителем на диоде Шоттки, который с 2006 г. обеспечивает надежные и стабильные наблюдения. Шумовая температура приемника в двухполосном режиме ($T_{\text{пр}}$) не превышает 85 К в диапазоне частот 85 ÷ 116 ГГц и 70 К в диапазоне 97 ÷ 110 ГГц, т. е. вполне соответствует современному мировому уровню. Это достигнуто благодаря раз-

работке смесителя со сниженными потерями преобразования, сверхмалозащумящего рНЕМТ-усилителя, облучателя и всех элементов входной цепи с предельно низкими потерями [7]. Эффективная шумовая температура атмосферы в месте расположения РТ-22 может достигать до 100 К, поэтому дальнейшее снижение $T_{пр}$ не приводит к существенному улучшению чувствительности.

С учетом характеристик антенны радиотелескопа РТ-22 разработанный приемный комп-

лекс был адаптирован для исследования молекулярного излучения из областей звездообразования, а также излучения молекулярных облаков Галактики.

2. Описание аппаратного комплекса

Структурная схема приемного комплекса приведена на рис. 1. Приемник с системой облучения, калибровки и модуляции (chopper-wheel) установлен во вторичном фокусе антенны.

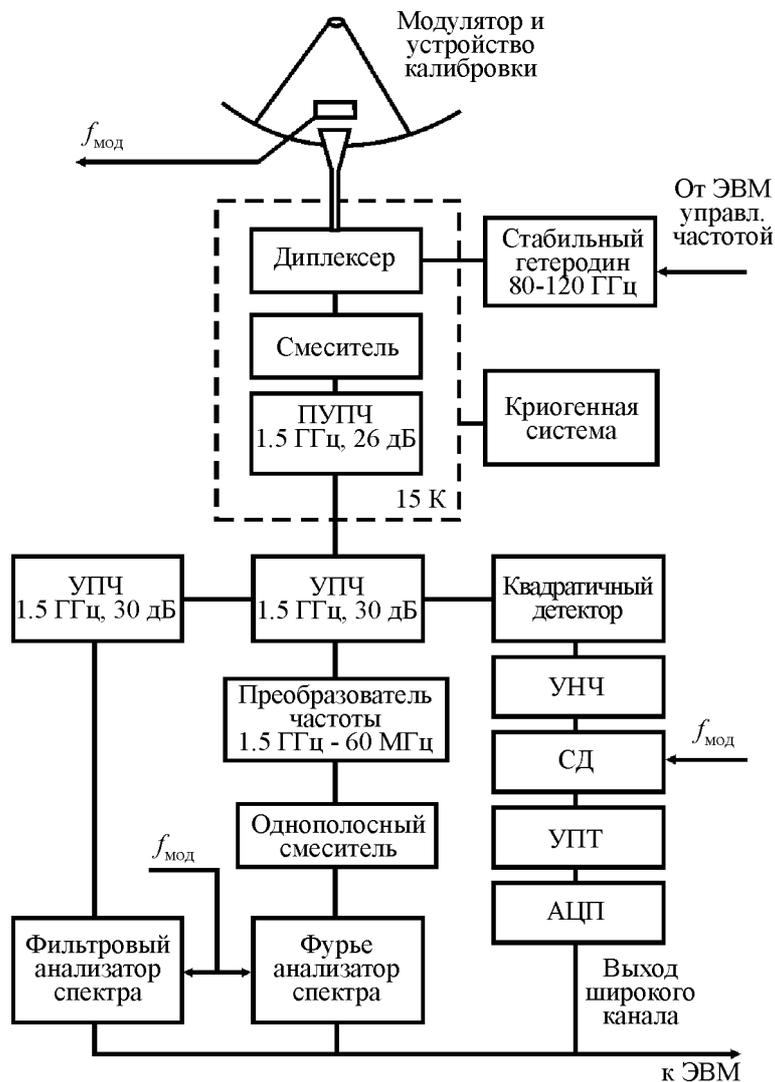


Рис. 1. Структурная схема аппаратного комплекса для спектральных наблюдений в диапазоне частот $85 \div 116$ ГГц: ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, УНЧ – усилитель нижней частоты, СД – синхронный детектор, УПТ – усилитель постоянного тока, АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Облучение контррефлектора проводится таким образом, что уменьшение напряженности поля, создаваемого облучателем, от центра к краю контррефлектора составляет 13 дБ. Диаграмма направленности антенны на частоте 87.7 ГГц составляет $47'' \pm 5''$ [3]. Обтюраторный модулятор позволяет осуществлять переключение диаграммы направленности антенны на $7'$ по азимуту с частотой 33 Гц. Сигнал модуляции подается на имеющиеся в составе комплекса анализаторы спектра и синхронный детектор широкополосного канала приема. В фильтровом анализаторе спектра и синхронном детекторе широкополосного канала приема он используется при аналоговом синхронном детектировании, а в фурье-анализаторе спектра – при синхронном детектировании, организованном программно.

Подробное описание криогенного приемника приводилось ранее в [7]. Частотная зависимость шумовой температуры приемника, измеренная на входе облучателя, показана на рис. 2.

Гетеродин собран по схеме синтезатора частоты с системой фазовой автоподстройки частоты, оконечный каскад которого выполнен на лампе обратной волны ОВ-71. Источником опорной частоты 5 МГц служит кварцевый генератор типа “Гиацинт”. В качестве опорного синтезатора применен синтезатор прямого цифрового синтеза на базе микросхемы AD9834, аналогичный предложенному в [8]. Частота гетеродина изменяется в диапазоне $80 \div 120$ ГГц и задается программно, что используется при реализации режима частотной модуляции.

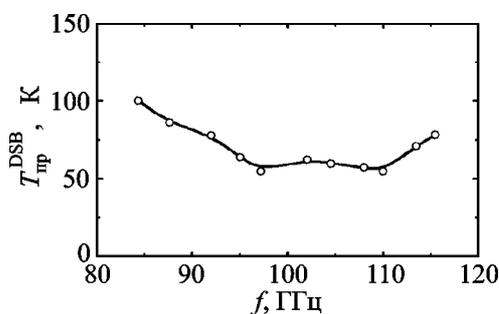


Рис. 2. Зависимость шумовой температуры T_{np}^{DSB} криогенного приемника 3-миллиметрового диапазона от частоты гетеродина f

После преобразования сигнал усиливается на промежуточной частоте 1.5 ГГц и подается на систему обработки и регистрации сигнала, которая состоит из однополосных преобразователей частоты и двух анализаторов спектра. Первый – анализатор спектра высокого разрешения (полоса частот 14, 10 или 8 МГц при количестве каналов 512, 2048 или 8192 в зависимости от выбранного режима измерений), использующий быстрое преобразование Фурье. Второй – фильтровый анализатор спектра (полоса частот 64 МГц, частотное разрешение 1 МГц). Описание отдельных схемотехнических решений анализаторов спектра можно найти в работах [9-11].

Для проведения радиометрических наблюдений в широкой полосе частот в составе комплекса имеется широкополосный (0.4 ГГц) канал приема с отдельными квадратичным и синхронным детекторами и 14-разрядным АЦП. Значение флуктуационной чувствительности, измеренное в широкополосном канале при времени накопления 1 с, в зависимости от погодных условий составляет $30 \div 100$ мК. С использованием этого канала определялась $T_{сис}$ методом вертикального разреза атмосферы [3, 12]. Значение $T_{сис}$ (двухполосный режим приема) в зависимости от угла места источника ($40^\circ \div 70^\circ$) и погодных условий во всем рабочем диапазоне частот ($85 \div 116$ ГГц) находится в пределах $215 \div 350$ К.

3. Система управления и сбора данных

В настоящее время для управления радиотелескопом РТ-22 используется штатная система управления, которая обеспечивает сопровождение источника с использованием его экваториальных координат, заданных на текущий момент времени. Для организации режимов, применяемых при спектральных наблюдениях молекулярных линий, для сканирования источника, а также для сбора информации, поступающей в приемную аппаратуру, была разработана дополнительная система управления телескопом и сбора данных (СУСД). Эта система позволяет проводить следующие виды наблюдений:

– спектральные наблюдения в режиме диаграммной модуляции (осуществляется перенаведением антенны радиотелескопа),

– спектральные наблюдения в режиме диаграммной модуляции с использованием обтюраторного модулятора,

– спектральные наблюдения в режиме частотной модуляции,

– сканирование источника с использованием широкополосного канала приема.

Фильтровый анализатор спектра и широкополосный канал приема подключены через LPT-порт компьютера. Фурье-анализатор спектра при своей работе использует центральный процессор персонального компьютера и является, таким образом, совмещенным с СУСД. Управление антенной осуществляется подачей команд через СОМ-порт компьютера на штатную систему управления РТ-22.

СУСД является системой реального времени, ее программная часть включает в себя модуль для расчета астрономических параметров наблюдаемого источника. Кроме основных режимов, СУСД имеет набор тестов для проверки аппаратуры. Программа содержит также математический блок, позволяющий осуществлять первичную обработку результатов измерений: аппроксимацию экспериментальных данных гауссовой кривой и полиномом (0 ÷ 15 -ой степени), суммирование и усреднение результатов нескольких наблюдений.

4. Режимы работы аппаратурного комплекса

В течение 2006–2009 гг. проводились испытания режимов наблюдений с целью выяснения возможности их практической применимости с учетом особенностей конкретного радиотелескопа и места его расположения.

Калибровка для всех режимов наблюдений проводилась стандартным методом по излучению черного тела и неба [13]. В соответствии с этим методом скорректированная антенная температура источника определяется из соотношения

$$T_a = \frac{S_{\text{source}} - S_{\text{sky}}}{S_{\text{BB}} - S_{\text{sky}}} T_{\text{cal}},$$

где S_{source} – уровень сигнала в канале анализатора спектра при наблюдении источника, S_{sky} – уровень сигнала в канале анализатора спектра при наблюдении неба, S_{BB} – уровень сигнала в канале анализатора спектра при наблюдении черного тела, T_{cal} – так называемый калибровочный множитель, значение которого зависит от выбора модели атмосферы. При обработке измерений используется изотропная модель атмосферы, в которой яркостная температура атмосферы определяется соотношением вида

$$T_{\text{atm}} = T_M(1 - e^{-\tau}),$$

где T_M – эффективная температура атмосферы, τ – оптическая толщина атмосферы.

Для нахождения значения калибровочного множителя имеется два способа задания эффективной температуры атмосферы: T_M полагается равной непосредственно температуре нижних слоев атмосферы (в этом случае оптическая толщина атмосферы не влияет на величину калибровочного множителя) либо T_M и τ определяются по разрезам атмосферы. Использование второго способа дает более точные результаты, однако требует проведения разрезов атмосферы при каждом наблюдении, что занимает достаточно большое время. Практическая работа на телескопе показала, что относительная погрешность измерения величины T_a двумя этими способами уменьшается с увеличением угла места источника и не превышает 5 %. Стабильность приемника позволяет проводить калибровку не чаще 1 раза в час при хорошей погоде.

Режим частотной модуляции оптимален для тех источников, ширина спектра которых существенно меньше полосы анализа фурье-анализатора спектра. Характерным примером таких источников являются источники мазерного излучения. Пример наблюдений источника мазерного излучения в режиме частотной модуляции приведен на рис. 3.

Если ширина спектра исследуемого источника сравнима с полосой анализа фурье-анализатора спектра (случай широких тепловых

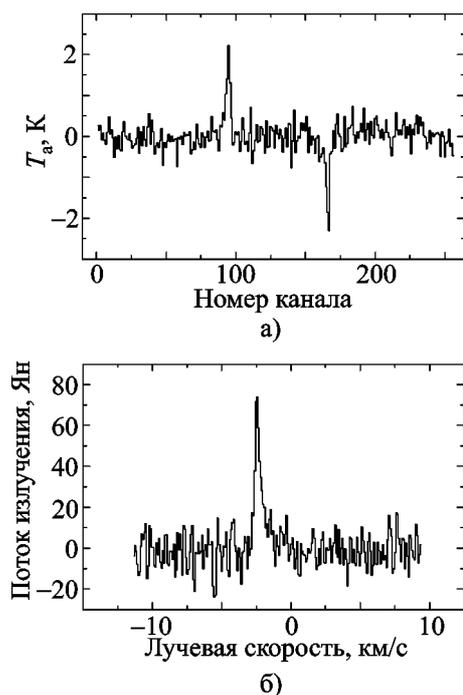


Рис. 3. Спектр мазерного излучения молекулы CH_3OH на переходе $8_0 - 7_1 A+$ (95.169 ГГц) в направлении источника DR21W, полученный в режиме частотной модуляции фурье-анализатором спектра, до (а) и после (б) обработки. Время накопления полезного сигнала 300 с

линий или одновременного наблюдения нескольких линий), необходимо использовать режим диаграммной модуляции, хотя в этом случае требуется вдвое больше времени для наблюдений. Пример записи спектра в этом режиме приведен на рис. 4.

На результаты наблюдений в этом режиме заметно влияют погодные условия, что обусловлено расположением телескопа на уровне моря. Для устранения этого влияния можно использовать режим диаграммной модуляции с применением обтюраторного модулятора. Основной недостаток данного режима заключается в том, что его нельзя использовать при исследовании объектов, угловые размеры которых превышают $7'$. Требуется также вдвое больше времени для наблюдений по сравнению с режимом диаграммной модуляции и в четыре раза больше времени по сравнению с режимом частотной модуляции.

На рис. 5 приведены примеры сканирования Венеры и источника DR21 с использованием широкополосного канала приема на частоте 86.2 ГГц.

Фильтровый анализатор спектра целесообразно использовать в случае исследований

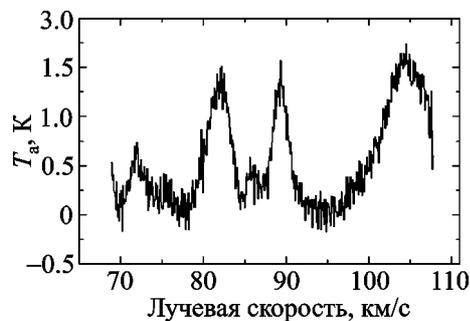


Рис. 4. Спектр излучения молекулы ^{13}CO на переходе $J = 1 - 0$ (110.201 ГГц) в направлении источника G33.6+0.1, полученный в режиме диаграммной модуляции фурье-анализатором спектра. Время накопления полезного сигнала 250 с

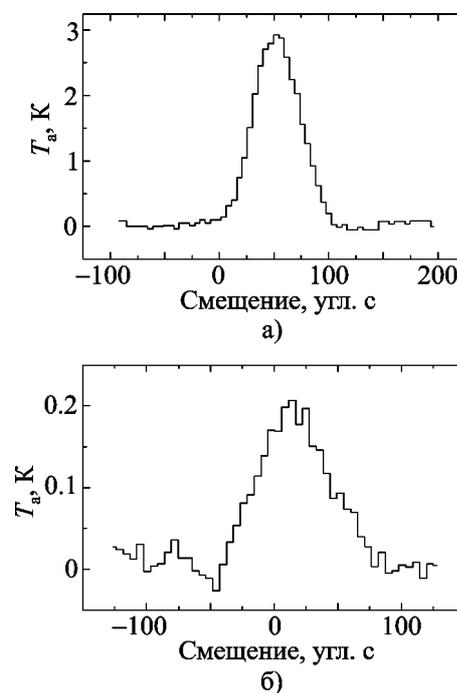


Рис. 5. Сканы Венеры (а) и источника DR21 (б) с использованием широкополосного канала приема на частоте 86.2 ГГц. Время накопления одной точки скана 1 с

очень широких спектральных линий, а также при проведении поисковых работ, когда изначально не известны лучевые скорости исследуемых источников.

5. Заключение

Описанный аппаратный комплекс в настоящее время успешно используется для проведения исследований излучения космических молекул в диапазоне частот $85 \div 116$ ГГц на телескопе РТ-22 КраО. Результаты наблюдений в 2006–2009 гг. продемонстрировали его надежность и стабильность. Отработаны методики калибровки, наведения и сопровождения, измерений в различных режимах модуляции и спектрального анализа. Показано, что чувствительность и полоса обзора созданного комплекса, спектральное разрешение штатных анализаторов спектра позволяют эффективно проводить исследования молекулярного излучения из областей звездообразования и молекулярных облаков Галактики при различных, часто неблагоприятных, погодных условиях.

Работа частично поддержана грантом НАН Украины для молодых ученых 2009–2010 гг.

Литература

- Urquhart J. S., Busfield A. L., Hoare M. G., Lumsden S. L., Oudmaijer R. D., Moore T. J. T., Gibb A. G., Purcell C. R., Burton M. G., Marechal L. J. L., Jiang Z., and Wang M. The RMS survey. 13CO observations of candidate massive YSOs in the northern Galactic plane // *Astron. Astrophys.* – 2008. – Vol. 487. – P. 253-264.
- Bains I., Wong T., Cunningham M., Sparks P., Brisbin D., Calisse P., Dempsey J. T., Deragopian G., Ellingsen S., Fulton B., Herpin F., Jones P., Kouba Y., Kramer C., Ladd E. F., Longmore S. N., McEvoy J., Maller M., Minier V., Mookerjee B., Phillips C., Purcell C. R., Walsh A., Voronkov M. A., and Burton M. G. Molecular line mapping of the giant molecular cloud associated with RCW 106 - I. ^{13}CO // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2006. – Vol. 367, No. 4. – P. 1609-1628.
- Антюфеев А. В., Зубрин С. Ю., Мыщенко В. В., Зинченко И. И., Вольвач А. Е., Шульга В. М. Исследование параметров антенны РТ-22 КраО на длине волны 3.42 мм // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2009. – Т. 14, №4. – С. 345-352.
- Зинченко И. И., Буров А. Б., Вдовин В. Ф., Воронцов В. Н., Демкин В. Н., Кисляков А. Г., Красильников А. А., Лапинов А. В., Пирогов Л. Е., Шанин В. Н., Юрков В. М. Спектральные радиоастрономические наблюдения в интервале длин волн 2-4 мм // *Письма в АЖ.* – 1987. – Т. 13, №7. – С. 582-588.
- Шульга В. М., Зинченко И. И., Нестеров Н. С., Мыщенко В. В., Андриянов А. Ф., Исаев В. Ф., Князьков Л. Б., Лапинов А. В., Литвиненко Л. Н., Мальцев В. А., Пирогов Л. Е., Шанин В. Н., Штанок А. М. Наблюдения молекулярных линий в диапазоне 85–90 ГГц на РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории АН СССР с мазерным приемником // *Письма в АЖ.* – 1991. – Т. 17, №12. – С. 1084-1089.
- Зинченко И. И., Барышев А. М., Вдовин В. Ф., Замятин И. В., Кошелец В. П., Лапинов А. В., Лапкин И. В., Мыщенко В. В., Нестеров Н. С., Пирогов Л. Е., Шитов С. В., Шульга В. М. Спектральные радиоастрономические наблюдения на РТ-22 КраО с СИС-приемником диапазона длин волн 3 мм // *Письма в АЖ.* – 1997. – Т. 23, №2. – С. 145-148.
- Piddyachiy V. I., Shulga V. M., Korolev A. M., and Myshenko V. V. High doping density Schottky diodes in the 3mm wavelength cryogenic heterodyne receiver // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 2005. – Vol. 26, No. 9. – P. 1307-1315.
- Алексеев Е. А., Захаренко В. В. Синтезатор прямого цифрового синтеза в микроволновой спектроскопии // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2007. – Т. 12, №2. – С. 205-213.
- Антюфеев А. В., Шульга В. М. Спектроанализатор на базе персонального компьютера для радиоастрономических исследований // *Радиотехника.* – 2005. – №10. – С. 145-148.
- Королев А. М., Король А. Н., Поладич А. В., Шкодин В. И. Измерительный диодный квадратичный детектор // *Приборы и техника эксперимента.* – 2009. – №6. – С. 36-38.
- Антюфеев А. В., Королев А. М., Поладич А. В. Многоканальное 16 бит устройство сбора/передачи данных // *Приборы и техника эксперимента.* – 2010. – №4. – С. 163-165.
- Майорова Е. К., Трушкин С. А. Применение методов вертикальных разрезов атмосферы на РАТАН-600 // *Радиотехника и электроника.* – 1987. – Вып. 9. – С. 1930-1937.
- Ulich B. and Haas R. Absolute calibration of millimeter-wavelength spectral lines // *Asrophys. J. Suppl. Ser.* – 1976. – Vol. 30. – P. 247-258.

**Апаратурний комплекс
для спектральних спостережень
в діапазоні частот 85–116 ГГц
на радіотелескопі РТ-22 КрАО**

**О. В. Антюфеев, С. Ю. Зубрин,
А. М. Король, О. М. Корольов,
В. В. Мищенко, В. І. Піддячий,
А. В. Поладич, В. И. Шкодин,
В. М. Шульга**

Розроблено апаратурний комплекс діапазону частот 85–116 ГГц для спектральних спостережень молекулярного радіовипромінювання галактичних об'єктів на радіотелескопі РТ-22 КрАО. Описано структуру комплексу, реалізовані режими спостережень та методику калібрування, є рекомендації щодо особливостей використання можливих режимів спостережень. Наводяться результати спектральних та континуальних спостережень.

**Instrumental Complex for Spectral
Observations at 85 to 116 GHz
at the CrAO RT-22 Radio Telescope**

**A. V. Antyufeyev, S. Y. Zubrin,
A. M. Korol, O. M. Korolev,
V. V. Myshenko, V. I. Piddyachiy,
A. V. Poladich, V. I. Shkodin,
and V. M. Shulga**

The instrumental complex for spectral lines investigation of the molecular radiation from different galactic sources at frequencies from 85 to 116 GHz at the CrAO RT-22 radio telescope was developed. The complex structure, observational modes and calibration technique are described. Possible observational modes are compared. Examples of the measured spectra are presented.