

УДК 539.194, 543.42

ДИОДНО-ЛАЗЕРНЫЙ МОДУЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР С ДВУМЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ

© 2013 А.К. Чернышов, Е.А. Воронцова

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Поступила в редакцию 26.11.2013

Разработан модуляционный спектрометр для исследования паров воды вблизи 830 нм. Отличительной особенностью спектрометра является возможность работы в двух режимах – быстродействующем и чувствительном. В качестве источника зондирующего излучения использован квантоворазмерный диодный лазер с коротким внешним резонатором оригинальной конфигурации.

Ключевые слова: спектроскопия с модуляцией длины волны, диодные лазеры с коротким внешним резонатором, пары воды.

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопия с модуляцией длины волны (WMS) обеспечивает измерения с повышенной чувствительностью, что необходимо для анализа газовых смесей, как в фундаментальных исследованиях, так и при решении прикладных задач [1, 2]. Однако WMS-спектрометр на основе аналогового синхронного детектора обладает достаточно низким быстродействием. Типичная продолжительность одного измерительного цикла у таких приборов может составлять от десятков секунд до нескольких минут. Тем не менее, в ряде важных спектроскопических методик, требуется одновременная регистрация нескольких линий поглощения в режиме реального времени [3].

В данной работе предлагается WMS-спектрометр, в котором предусмотрена возможность переключения между двумя режимами работы – быстродействующим и чувствительным. Быстродействующий режим работы предназначен для проведения предварительной настройки прибора на заданный участок спектра путем регистрации в реальном времени нескольких близко расположенных высоко интенсивных линий поглощения. Чувствительный режим работы спектрометра позволяет измерять малые концентрации газов в смеси, либо исследовать профили слабых молекулярных линий.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема двухрежимного диодно-лазерного WMS-спектрометра изображена на рис.1. В качестве источника зондирующего излучения **ДЛ** был исполь-

Чернышов Александр Константинович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории когерентной оптики.

E-mail: chak@fian.smr.ru

Воронцова Екатерина Александровна, инженер лаборатории когерентной оптики. E-mail: cat.chernyshova@fian.smr.ru

зован диодный лазер (ELD83NPT50, Roithner Lasertechnik) с несколькими квантовыми ямами (MQW) в активной области. За счет более широкого контура усиления MQW-диодные лазеры позволяют увеличить спектральный диапазон, перекрываемый с одним излучателем, но при этом излучают несколько продольных мод. В данной работе для подавления многомодовой генерации между выходной лазерной гранью и коллимирующими объективом были установлены два тонких покровных стекла **M**, которые формируют связанные интерферометры [4, 5]. Несмотря на низкую добродельность подобных интерферометров, они позволили эффективно проредить спектр лазера благодаря сильной конкуренции продольных мод по усилинию. С помощью пьезокерамической подвижки с прикрепленными покровными стеклами **M**, резонансы внешних интерферометров перестраивались по частоте. Это позволяло выделять в спектре различные продольные моды и осуществлять грубую дискретную перестройку излучаемой длины волны лазера. Точная настройка длины волны излучения диодного лазера на молекулярную линию обеспечивалась изменением температуры кристалла с помощью элемента Пельтье и контроллера температуры **T**.

Для выполнения WMS-спектроскопии в контроллер тока накачки **I** подавались управляющие сигналы от двух генераторов. Пилообразный сигнал частотой $f_s \sim 10^2 - 10^3$ Гц от генератора (**Скан.**) обеспечивал плавное сканирование лазерной частоты (вдоль нескольких десятков ГГц). Сигнал синусоидального напряжения от генератора (**Мод.**) частотой $f_m \sim 1 - 4$ кГц использовался для быстрой ЧМ-модуляции лазера и в качестве опорного сигнала аналогового синхронного детектора Unipan-232B. С помощью решеточно-го монохроматора (**МН**) и конфокального интерферометра Фабри-Перо (**ФП**) осуществлялся контроль спектральных характеристик зондирующего лазерного излучения.

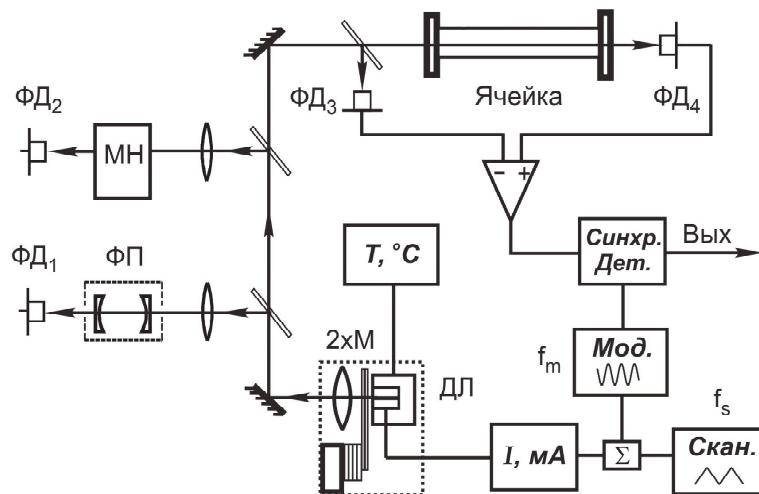


Рис. 1. Схема спектрометра:

ДЛ – диодный лазер; М – покровное стекло; Синхр.Дет. – синхронный детектор; ФП – интерферометр Фабри-Перо; ФД – фотодетектор; МН – монохроматор

Для демонстрации возможностей спектрометра в качестве исследуемого газа использованы пары воды, поскольку они легко доступны и к настоящему времени накоплен большой массив данных о ИК линиях поглощения H_2O [6]. Пары воды напускались в измерительную 2х проходную ячейку длиной 1 м из стеклянной колбы с небольшим количеством дистиллированной воды (ГОСТ 6709-72). Предварительная откачка ячейки выполнялась с помощью форвакуумного насоса (2НВР-5ДМ) и вакуумметра (термодат-12ВТС). С целью ослабления вариаций мощности оптического излучения, которые не связаны с поглощением в парах воды, в спектрометре применялась балансная схема детектирования, образованная фотодиодами $\Phi\Delta_3$, $\Phi\Delta_4$ и разностным усилителем.

При измерениях с высокой чувствительностью экспериментальная установка работает как WMS-спектрометр с синхронным детектором, выделяющим наибольшую 1-ю гармонику на частоте модуляции f_m в спектре сигнала от разностного усилителя. В этом режиме форма 1f-сигнала, регистрируемого синхронным детектором, будет близка к 1-ой производной от контура молекулярной линии. Из-за необходимости медленного сканирования лазерной длины волны ($f_s \sim 10^{-3}$ Гц) выходной сигнал синхронного детектора должен записываться в течение нескольких минут, например с помощью цифрового осциллографа, или аналогового графо-построителя, как в данной работе.

Во втором режиме с высоким быстродействием в схеме на рис.1 генератор (**Мод.**) отключался от синхронного детектора и контроллера тока лазера **I**, а частота пилообразного напряжения от генератора (**Скан.**) увеличивалась до $f_s \sim 0,1 - 1$ кГц. Синхронный детектор переводился в режим дифференцирующего усилителя, для чего часто-

та отсечки входного ВЧ-фильтра настраивались на удвоенную частоту сканирования f_s , а выходной НЧ-фильтр отключался. Для подтверждения возможности регистрации молекулярного спектра в реальном времени выходной сигнал от дифференцирующего усилителя (синхронного детектора) теперь наблюдался на экране аналогового осциллографа. В этом случае форма осцилограммы 2-ой гармоники от сигнала разностного усилителя напоминает 2-ю производную от контура спектральной линии или 2f-сигнал. Выбор спектра вторых производных обусловлен тем, что он похож на спектр исходный молекулярных линий (наибольшая амплитуда в центре линии) и слабо зависит от изменений лазерной мощности не связанных с поглощением в ячейке с парами воды.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Вначале был определен полный спектральный интервал, перекрываемый с выбранным диодным лазером. Для этого спектрометр был переключен в быстродействующий режим работы так, чтобы на экране двухлучевого аналогового осциллографа С1-103 наблюдались 2-е производные от линий поглощения H_2O и резонансы пропускания контрольного интерферометра **ФП** с областью свободной дисперсии 1,4 ГГц. С помощью вариации положения покровных стекол **М** и изменения температуры излучателя **ДЛ**, спектрометр последовательно перестраивался вдоль доступного интервала длин волн. Границы перекрываемого спектра грубо оценивались по монохроматору **МН**. Затем граничные частоты уточнялись через сопоставление небольших наблюдаемых участков спектра поглощения H_2O с модельными спектрами из базы данных HITRAN [6]. Результаты подобных измерений представлены на рис. 2. В вер-

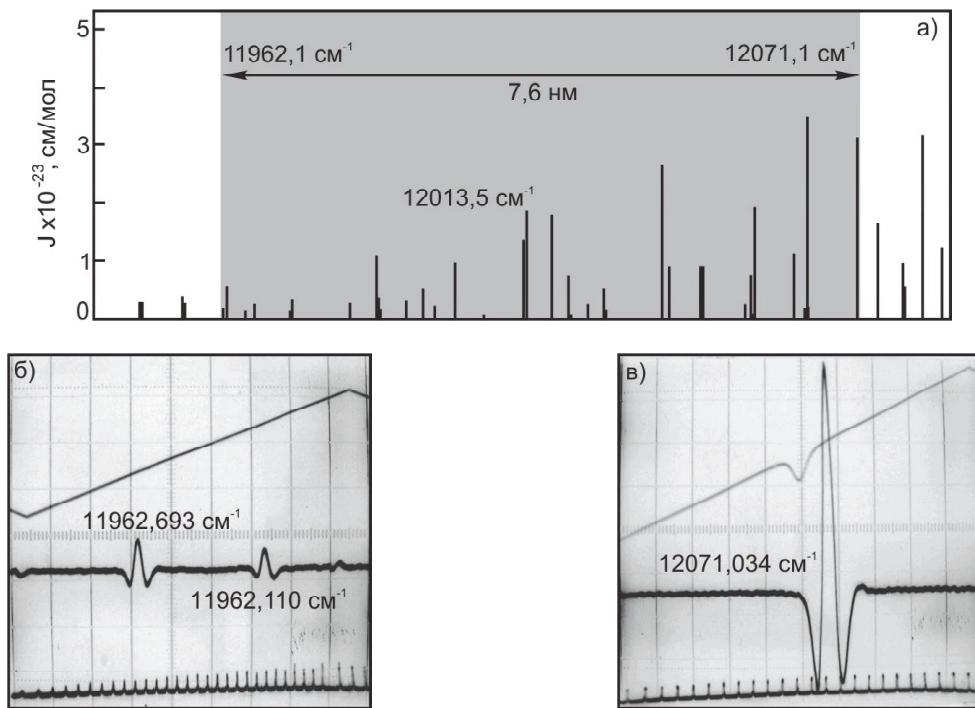


Рис. 2. Доступный участок спектра молекул H_2O в комбинационной полосе 0,0,0 – 2,1,1:
а – модельный спектр HITRAN. Серым выделен участок, перекрываемый спектрометром; б, в – молекулярные линии, зарегистрированные на низкочастотной и высокочастотной границе доступного участка спектра. Верхние осциллограммы отображают сигналы прямого поглощения, средние осциллограммы показывают 2f-спектр. Внизу расположены резонансы пропускания контрольного интерферометра ФП

хней части рисунка показан модельный спектр молекул воды центрированный на частоте 12 013,5 cm^{-1} , на который наложена полоса шириной 7,6 нм, перекрываемая с помощью использованного лазера. В нижней части рис. 2 приведены осциллограммы 2f-сигналов соответствующие наиболее длинноволновой (слева) и коротковолновой (справа) линиям H_2O из доступного набора.

Затем был определен максимальный спектральный интервал непрерывной токовой перестройки MQW-диодного лазера с коротким внешним резонатором. Для этого был выбран участ-

ток спектра H_2O между 12055 и 12050 cm^{-1} , содержащий семь близко расположенных интенсивных линий рис. 3а. Согласно HITRAN частотный интервал между крайними линиями 1 и 7 составляет 2,8 cm^{-1} . С помощью монохроматора МН диодный лазер при постоянном токе накачки настраивался на середину исследуемого участка спектра. Затем спектрометр переключался в быстродействующий режим работы. Постепенно увеличивая амплитуду сканирования тока накачки и при этом, подстраивая величину постоянной составляющей тока, температуру ДЛ и положение покровных

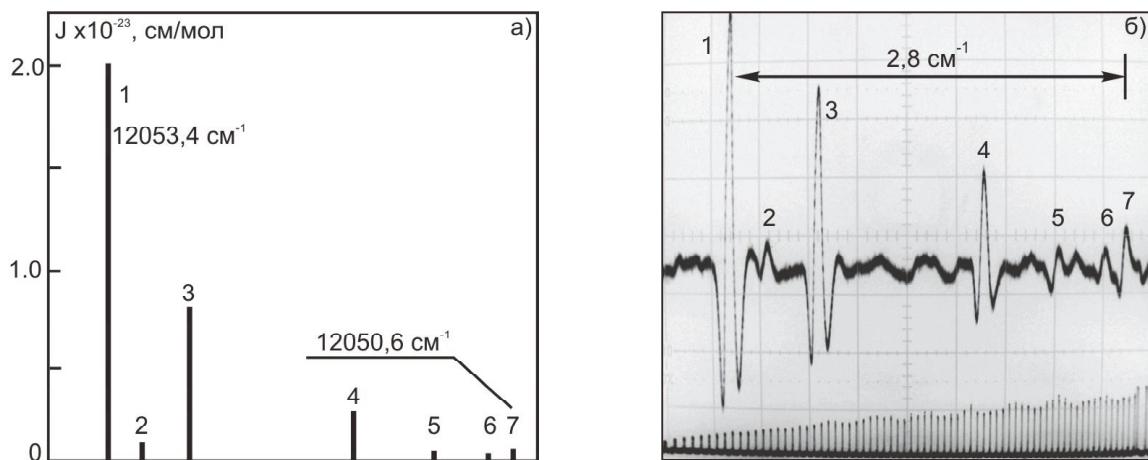


Рис. 3. Быстродействующий режим работы спектрометра.

Одновременное наблюдение нескольких линий поглощения H_2O :

а – модельный спектр HITRAN; б – экспериментальный 2f-спектр на экране аналогового осциллографа

стекол М, добивались появления на экране осциллографа максимального числа молекулярных линий и/или резонансов контрольного интерферометра ФП. Полученные результаты демонстрируются на рис. 3б, где верхняя осциллограмма представляет спектр 2-х производных от линий поглощения H_2O . Кроме узких молекулярных линий отмеченных цифрами на этой осциллограмме видны широкие резонансы, соответствующие паразитной интерференции, возникающей в оптическом тракте. Нижняя осциллограмма на рис. 3б показывает резонансы пропускания контрольного ФП. Изменение их амплитуды вызвано увеличением выходной оптической мощности лазера при возрастании тока накачки в процессе перестройки. Практически эквидистантное расположение резонансов ФП по горизонтали соответствует одночастотной генерации ДЛ во всем интервале изменения тока накачки, что подтверждает непрерывный характер перестройки оптической частоты. Полный интервал перестройки лазерной частоты, определенный по резонансам ФП на рис. 3б, равен 96,6 ГГц или $3,22 \text{ см}^{-1}$. Поскольку амплитуда изменения тока накачки в данном случае равна 9 мА, то величина коэффициента токовой перестройки использованного диодного лазера составляет 11 ГГц/мА. Кроме того, одновременное наблюдение на экране аналогового осциллографа 7-ми молекулярных линий, наглядно иллюстрирует способность описанного WMS-спектрометра работать в режиме реального времени.

Для сравнения чувствительности спектрометра в двух измерительных режимах участок спектра между линиями 4 – 7 на рис. 3 был исследован дополнительно. В верхней части рис. 4 в

логарифмическом масштабе (по оси Y) построен модельный спектр указанного участка, на котором теперь видны линии поглощения H_2O с интенсивностями порядка $10^{-26} \text{ см}/\text{мол}$. На рис. 4б слева показан исследуемый участок спектра, зарегистрированный в быстродействующем режиме работы спектрометра. При этом дополнительных линий вблизи линии 4 не наблюдается, а наиболее слабая линия 6 имеет интенсивность $3,8 \cdot 10^{-25} \text{ см}/\text{мол}$, что соответствует чувствительности по поглощению $5 \cdot 10^{-5}$. Тот же участок спектра, прописанный в режиме работы спектрометра с повышенной чувствительностью и при регистрации 1-f сигнала, показан справа на рис. 4в. Видно, что в этом случае слева от линии 4 отчетливо наблюдается слабый резонанс, который соответствует линии 8 модельного спектра. Интенсивность линии 8 согласно HITRAN равна $7,7 \cdot 10^{-26} \text{ см}/\text{мол}$, что означает увеличение чувствительности спектрометра по поглощению примерно в 5 раз до $9 \cdot 10^{-6}$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан диодно-лазерный модуляционный спектрометр с быстродействующим и чувствительным режимами измерений. Для расширения доступного спектрального диапазона в качестве источника зондирующего излучения в приборе используется MQW-диодный лазер с коротким tandemным внешним резонатором, образованный двумя тонкими покровными стеклами. В быстродействующем режиме работы исследуемый спектр наблюдается в реальном времени на экране аналогового осциллографа. Это позволяет быстро идентифицировать наблюдаемый участок, перенастроить лазер на интересующую

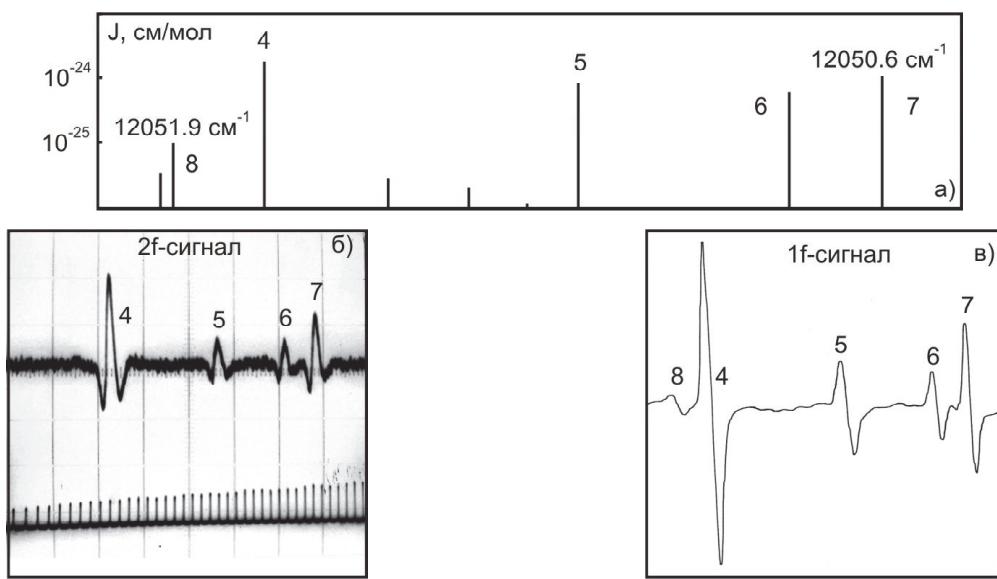


Рис. 4. Чувствительный режим работы спектрометра:

а – модельный спектр HITRAN; б – экспериментальный 2f-спектр записанный при скорости развертки 1 мсек/см. Линия 8 не наблюдается; в – экспериментальный 1f-спектр, записанный в течение 10 минут. Линия 8 наблюдается с хорошим отношением С/Ш

молекулярную линию и, переключившись во второй режим работы, зарегистрировать спектр с большей чувствительностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Richard E.C., Kelly K.K., Winkler R.H., et al.* A fast-response near-infrared tunable laser absorption spectrometer for *in situ* measurements of CH₄ in the upper troposphere and lower stratosphere // Applied Physics B, 2002, v. 75, p. 183–194.
2. *Megenin A.V., Chernyshov A.K., Azyazov V.N.* The calibration of the spectroscopic diode laser sensor for the water vapour diagnostics at output of singlet oxygen generator for COIL // Proc. SPIE, 2004, v. 5773, p.7-11.
3. *Bolshov M.A., Kyritsyn Y.A., Liger V.V., et.al.* Measurements of the temperature and water vapor concentration in a hot zone by tunable diode laser absorption spectrometry // Applied Physics B, 2010, v. 100, p. 397–407.
4. *Zybin A., Niemax K.* Improvement of the wavelength tunability of etalon-type laser diodes and mode recognition and stabilization in diode laser spectrometers // Spectrochimica Acta Part B, 1997, v. 52, p. 1215-1221.
5. *Chernyshov A.K., Chernyshova E.A.* Diode-laser derivative spectroscopy without lock-in amplifier // Physics of Wave Phenomena, 2011, v.19, №2, p.89-92.
6. <ftp://cfa-ftp.harvard.edu/pub/HITRAN2008/>

TUNABLE DIODE LASER SPECTROMETER WITH TWO OPERATING MODES

© 2013 A.K. Chernyshov, E.A. Vorontsova

Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences

In this work wavelength modulation spectrometer was developed for the water vapor investigation near 830 nm. The distinctive feature of this spectrometer is two operating modes – high speed and sensitive regime. Quantum well diode laser with original short external cavity was used as a light source.

Key words: wavelength modulation spectroscopy, short external cavity diode lasers, water vapors.

Aleksandr Chernyshov, Candidate of Physics and Mathematics,
Senior Research Fellow at the Coherent Optics Laboratory.
E-mail: chak@fian.smr.ru
Ekaterina Vorontsova, Engineer at Coherent Optics Laboratory.
E-mail: cat.chernyshova@fian.smr.ru