

Ю.Н. Пономарев, И.С. Тырышкин

Увеличение чувствительности и отношения сигнал-шум в лазерном спектрофотометре с 30-метровой поглощающей кюветой

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 09.09.2003 г.

Дано описание усовершенствованного лазерного спектрометра с 30-метровой поглощающей кюветой и перестраиваемым по длине волны излучения узкополосным импульсным лазером на александрите.

Приведены технические характеристики модифицированных юстировочных узлов для зеркал многоходовой оптической системы и системы измерения отношения амплитуд импульсных сигналов фотоприемников. В результате достигнуто увеличение длины оптического хода от 1800 до 2400 м и снижена погрешность измерения спектра пропускания с 1 до 0,2%.

Введение

Перестраиваемые по длине волны импульсные лазеры видимого и ближнего ИК-диапазонов, такие как лазер на рубине, александрите, сапфире с титаном, красителях, достаточно широко используются в лидарах дифференциального поглощения и рассеяния (DIAL) для зондирования, например, профилей концентрации водяного пара. Линии поглощения H_2O в коротковолновой области спектра слабы. Коэффициенты поглощения в максимуме линий, используемых как реперные, обычно не превышают величины $5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. Параметры таких слабых линий поглощения, существенные для восстановления значений концентрации H_2O вдоль трассы зондирования с погрешностью ~5–10%, а именно: интенсивность линии, ее полуширина, коэффициент сдвига давлением воздуха, коэффициенты температурной зависимости, должны быть измерены с погрешностью не хуже 1–2%. Причем эти измерения целесообразно проводить с тем же лазерным излучателем, который используется в DIAL-системе, чтобы автоматически учесть влияние формы и ширины линии излучения лазера на измеренный спектр поглощения.

Наиболее точные измерения интенсивности линий обеспечивают лазерные спектрометры с поглощающими ячейками большой длины [1–3], которые снабжены многоходовыми оптическими системами, позволяющими получить общую длину оптического пути от сотен метров до нескольких километров. Один из этих спектрометров [1] предназначен для точных измерений абсолютных значений коэффициентов поглощения H_2O , O_2 и других молекул в спектральном диапазоне, в который попадают полосы генерации лазеров на рубине, александрите, сапфире с титаном, т.е. в отдельных участках от 690 до 780 нм. Применение стандартной аппарату-

ры для измерения отношения интенсивностей излучения на входе в поглощающую ячейку и на выходе из нее (импульсные фотодетекторы, импульсные вольтметры с погрешностью измерения амплитуды электрического импульсного сигнала ~ (1–5%)) позволяют определить значения коэффициента поглощения для заданной длины волны импульса с неопределенностью до $5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ [1], что соответствует $\Delta k/k = 10^{-2}$ (или $\Delta D/D$), где k – коэффициент поглощения, см^{-1} ; D – оптическая толщина поглощающего слоя при $k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$. Однако в настоящее время использование новой технической базы измерения импульсных сигналов [4–6] в принципе дает возможности измерения оптической толщины поглощающего слоя D даже для импульсного зондирующего излучения на уровне $\Delta D/D \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$ [5].

В настоящей статье дано описание модифицированного варианта спектрометра с 30-метровой поглощающей кюветой и перестраиваемым по длине волны излучения узкополосным импульсным лазером на александрите, в который внесены изменения как в многоходовую оптическую систему, так и в систему измерения отношения амплитуд импульсных сигналов, снимаемых фотоприемником на входе и выходе из поглощающей кюветы. Проведен сравнительный анализ спектров H_2O и O_2 , получаемых в стандартном варианте спектрометра и регистрируемых модернизированной аппаратурой.

Описание спектрометра, процедуры измерений и обработки сигналов

Функциональная схема спектрометра приведена на рис. 1.

Излучение лазера на александрите 1 с помощью светоделителей направляется на измерители

длины волны и ширины спектра излучения 2, 3, на опорный фотоприемник 4, пропускается через оптическую систему многоходовой газовой кюветы (МГК) 5 и попадает на измерительный фотоприемник 6. В качестве фотоприемников используются фотоэлементы типа Ф-32. Сигналы с фотоэлементов регистрируются импульсными вольтметрами типа В4-17 7, 8 и через АЦП 9, 10 вводятся в ПЭВМ. Для грубого измерения длины волны излучения используется коммерческий измеритель 2 типа Спектрон ИВ, в состав которого входят 4 вакуумизированных интерферометра Физо с базами от 0,005 до 40 мм.

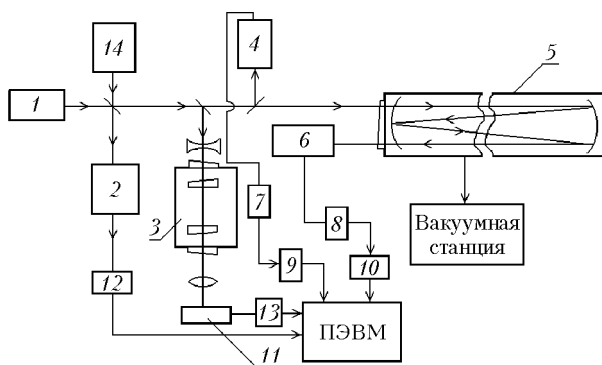


Рис. 1. Блок-схема спектрофотометра

Для более точного измерения длины волны и ширины спектра излучения служит вакуумизированный интерферометр Фабри–Перо 3 с базой 80 мм. Интерференционная картина на выходе интерферометра регистрируется линейкой ПЗС 11. Сигналы со Спектрона ИВ и линейки ПЗС через АЦП 12, 13 вводятся в ПЭВМ.

Технические характеристики спектрометра приведены в таблице.

Параметры	До модернизации	После модернизации
МГК		
длина, м	30	30
диаметр, м	1,1	1,1
диапазон давлений, мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-5} - 10^3$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^3$
диапазон температур, К	288–350	288–350
длина оптического хода, м	60–1800	60–2400
лазера		
диапазон перестройки, нм	720–780	720–780
ширина спектра излучения, см^{-1}	$< 5 \cdot 10^{-3}$	$< 5 \cdot 10^{-3}$
шаг перестройки	$\geq 5 \cdot 10^{-3}$	$\geq 5 \cdot 10^{-3}$
частота следования импульсов, Гц	$\leq 0,5$	≤ 5
длительность импульса, с	$\geq 180 \cdot 10^{-9}$	$\geq 180 \cdot 10^{-9}$
энергия в импульсе, Дж	$\geq 10^{-3}$	$\geq 10^{-3}$
системы регистрации		
погрешность определения центров линий, см^{-1}	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$
погрешность измерения пропускания кюветы с газом, %	≤ 1	$\leq 0,2$
погрешность измерения давления, мм рт.ст.	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
пороговая чувствительность, см^{-1}	$5 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}

Пропускание слоя исследуемого газа определяется выражением

$$T_\lambda = (U_\lambda^{\text{вх}} / U_\lambda^{\text{вх}}) / (U_{0\lambda}^{\text{вх}} / U_{0\lambda}^{\text{вх}}). \quad (1)$$

Здесь U – сигналы фотоприемников, индексы «вх», «вх» соответствуют значениям U на выходе из кюветы и на входе в нее, индекс «0» обозначает значения U , полученные при кювете, откачанной до давления $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Значения коэффициента поглощения определяются из (1) по закону Бугера:

$$T_\lambda = e^{k_\lambda L}, \quad (2)$$

где L – длина оптического пути в многоходовой кювете.

Результаты измерений спектров поглощения паров воды, полученные до модернизации спектрофотометра, приведены в работе [7]. Погрешность определения интенсивностей сравнительно сильных линий поглощения, как правило, не превышает 5%. Из-за трудностей, связанных с увеличением длины оптического хода излучения в кювете, погрешность измерения слабых линий значительно больше.

Модернизация описанного выше спектрометра ставила своей целью: увеличение длины оптического хода за счет увеличения долговременной стабильности многоходовой оптической системы кюветы и точности измерения амплитуды сигналов, снимаемых с опорного и зондирующего фотоприемников.

Увеличение стабильности многоходовой оптической системы

В прежнем варианте спектрометра каждый держатель зеркала трехзеркальной оптической системы Барской [8] устанавливается на подвижный стол, который через систему тяг, зубчатых колес, вакуумных уплотнений и червячной передачи можно было снаружи кюветы вручную перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Такая система крепления и управления зеркалами обеспечивала сравнительно стабильную работу на длине оптического пути до 1800 м при диаметрах зеркал объективов 15 см и 20×30 см зеркала коллектива.

С увеличением длины оптического хода расстояние между точками раstra на зеркале коллектива становится сравнимым с диаметром зондирующего пучка света. Разъюстировка системы за счет изменения температуры и вибраций приводит к обрезанию пучка на элементах системы, и, как следствие, резко увеличивается погрешность измерений пропускания.

Для исключения указанных недостатков были разработаны управляемые дистанционно юстировочные узлы зеркал с электромеханическими приводами, у которых люфты сведены к минимуму. Новый юстировочный узел (рис. 2) работает следующим образом: к основанию 1 жестко крепится

плита 2, на которой закреплена пластинчатая пружина 3. К пружине крепится промежуточная плита 4. Зеркало 6 закреплено на плите 5, которая также через пружину прикреплена к промежуточной плите 4. Деформация пружин и, соответственно, отклонение зеркала в горизонтальной и вертикальной плоскостях осуществляются микровинтом 7, который вращается шаговым двигателем 8. Двигатель и микровинт помещены в герметизированный кожух и работают при атмосферном давлении. Связь с управляемой плитой осуществляется через сильфон. Для управления микровинтами использованы шаговые двигатели ДШ 78-0,16-1. Специально разработанные для них источники питания обеспечивают как пошаговое (на один шаг), так и непрерывное вращение микровинта. Управление осуществляется с ручного пульта, который через разъемы может быть подключен на обоих торцах кюветы.

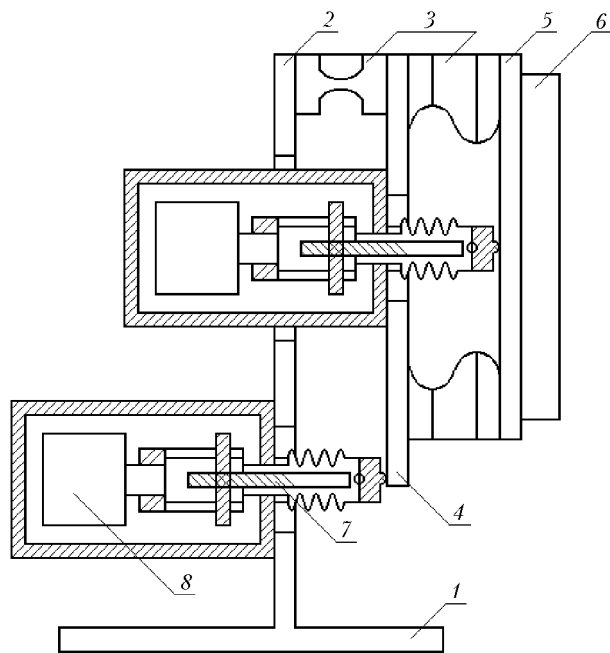


Рис. 2. Юстировочный узел

Испытания стабильности оптико-механической системы старого образца и модернизированной проводились следующим образом. Луч непрерывного He-Ne-лазера, используемого для настройки, пропусклся через многоходовую оптическую систему и направлялся на двухкоординатную линейку. Для создания вибраций рядом с юстировочным узлом на пол без прокладок ставился форвакуумный насос. При работе насоса в прежней конструкции наблюдалось размытие выходного луча лазера по вертикали на величину до 5 мм.

С новыми юстировочными узлами отклонения или размытия выходного луча практически не наблюдалось как при вибрациях основания кюветы, так и при изменениях температуры в помещении на величину $\sim 10^\circ\text{C}$. После замены юстировочных узлов оптическая длина хода, при которой обеспечивалась стабильность измерений, увеличилась с 1800 до 2400 м.

Модернизация измерителя амплитуды сигналов фотоприемников

Двухканальный измеритель амплитуды электрических импульсов, снимаемых с опорного и выходного фотоприемников с вводом данных в компьютер, был разработан для замены ранее используемых импульсных вольтметров.

Схема измерителя показана на рис. 3.

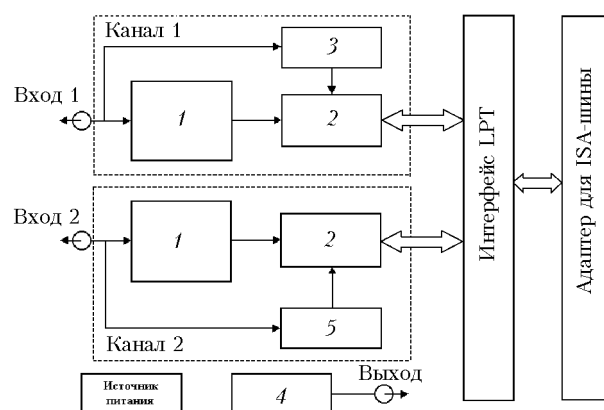


Рис. 3. Двухканальный измеритель амплитуды электрических импульсов

Каждый из каналов измерителя амплитуды импульсов состоит из блока обнаружения максимума 3, согласующего усилителя 1 и АЦП 2. Блок обнаружения максимума предназначен для выработки импульса запуска АЦП в момент достижения входным импульсом максимального значения. Блок обнаружения максимума — это пиковый детектор, в котором входной импульс нормируется и поступает на зарядный каскад, обеспечивающий заряд конденсатора. АЦП преобразует амплитуду импульса в двоичный цифровой двенадцатиразрядный код. Применен однокристалльный двенадцатиразрядный АЦП фирмы MAXIM со встроенным устройством выборки-хранения, удовлетворяющий условиям точности преобразования.

Интерфейс предназначен для программирования АЦП, формирования и передачи управляющих сигналов от персонального компьютера, а также считывания выходных цифровых данных в компьютер.

Калибратор 4 является источником стабилизированного напряжения для проверки в автономном режиме работоспособности обоих каналов АЦП. Согласующий усилитель предназначен для согласования высокого выходного сопротивления фотоприемника с относительно низким входным сопротивлением АЦП.

Программное обеспечение позволяет работать с устройством (калибровка, ввод и сохранение данных), а также обеспечивает оперативное отображение данных как в цифровом, так и графическом виде и их первоначальную обработку.

Испытания измерителя проводились во время работы спектрометра с импульсным лазером на александрите, характеристики которого приведены в таблице. На вход обоих каналов измерителя

Заключение

подавался сигнал с одного фотоприемника, чтобы исключить погрешности, обусловленные различием характеристик фотоприемников. Испытания показали, что при вариации амплитуды выходного сигнала фотоприемника от 0,1 до 4 В погрешность измерения отношения сигналов от 1-го и 2-го каналов не превышает 10^{-3} .

Во второй колонке таблицы приведены те характеристики спектрометра, которые удалось получить после модернизации его основных систем.

На рис. 4 приведены образец записи контура линии поглощения паров воды на модернизированном спектрометре и его сравнение с расчетным доплеровским контуром. Запись контура проводилась при давлении паров воды около 1 мм рт. ст. и длине оптического хода 2000,64 м (68 проходов излучения через кювету). Полученные экспериментальные значения коэффициента поглощения методом наименьших квадратов подгонялись к доплеровскому контуру.

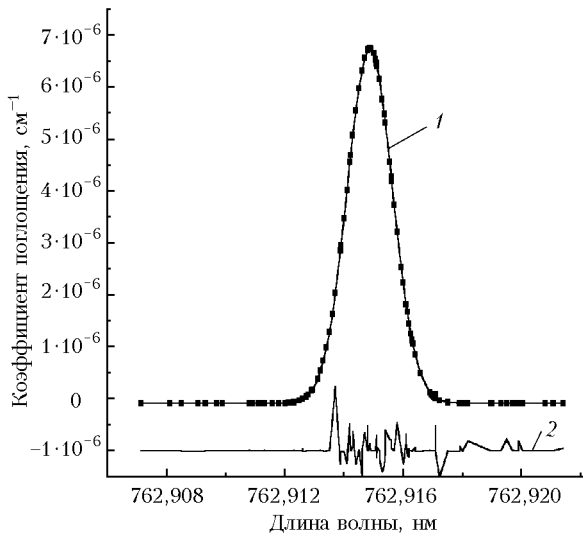


Рис. 4. Образец записи контура линии поглощения: кривая 1: — эксперимент, — — теоретический контур Доплера; кривая 2 — $(k_{\text{эксп}} - k_{\text{расч}}) \cdot 50$

Под контуром на рисунке приведена кривая, соответствующая разности экспериментальных точек расчетным, умноженная на 50. Как следует из рис. 4, максимальное различие между расчетным и экспериментальным контурами не превышает 0,5%.

Yu.N. Ponomarev, I.S. Tyryshkin. Improvement of the sensitivity and signal-to-noise ratio in laser spectrophotometer with 30-m absorbing cell.

An enhanced laser spectrometer with a 30-m absorbing cell and a tunable narrow-band pulsed alexandrite laser is described.

Technical characteristics of modified alignment units for mirrors of a multipass optical system and a system for measurement of the amplitude ratio of pulsed photodetector signals are presented. As a result, the optical path length was extended from 1800 to 2400 m and the error of measurement of the transmission spectrum was reduced from 1 to 0.2%.

В результате модернизации системы юстировки зеркал оптической системы и системы измерения отношения сигналов фотодетекторов на входе и выходе из поглощающей газовой среды относительную погрешность измерений спектрального коэффициента поглощения лазерным спектрометром с 30-метровой кюветой удалось снизить более чем в 5 раз. При использовании импульсного лазера, длина волны которого дискретно перестраивается от импульса к импульсу, $\Delta k \sim 4 \cdot 10^{-3}$ при значении $k \sim 7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$.

Работа выполнена в рамках Программы отделения физических наук РАН № 2.10 и при частичной поддержке гранта РФФИ (проект № 01-05-65152а) и ЦКП «Атмосфера».

1. Пономарев Ю.Н., Тырышкин И.С. Спектрофотометрический комплекс для измерения поглощения лазерного излучения ИК-, видимого и УФ-диапазонов молекулярными газами // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 360–368; Пономарев Ю.Н., Тырышкин И.С. Спектрофотометрический комплекс на основе многоходовых кювет с базой 110 и 30 м // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 3. Уникальные измерительные комплексы / Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1998. 237 с.
2. Carleer M., Jenouvrier A., Vandaele A.C., Bernath P.F., Merienne M.-F., Colin R., Zobov N.F., Polyansky O.L., Tennison J., Savin S.A. The near infrared, visible, and ultraviolet overtone spectrum of water // J. Chem. Phys. 1999. V. 111. N 6. P. 2444–2450.
3. Ballard J., Srong K., Remedios J.J., Page M., and Jonson W.B. A coolable long path absorption cell for laboratory spectroscopic studies of gases // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1994. V. 52. N 5. P. 677–691.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3 т. М.: Мир, 1993. Т. 1. 815 с.
5. Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990. 354 с.
6. 1996 designer's reference manual. MAXIM integrated products. 1996. 413 p.
7. Тырышкин И.С., Пономарев Ю.Н., Быков А.Д., Воронин Б.А., Науменко О.В., Савельев В.Н., Синица Л.Н. Спектр поглощения водяного пара в диапазоне 13300–13800 см^{-1} // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 9. С. 825–828.
8. Барская Е.Г., Кузовая И.Л. Многоходовая газовая кювета МХК-2 // Оптико-механ. промышленность. 1972. № 6. С. 61–62.