

А.М. Солодов, В.Н. Савельев

ПРИМЕНЕНИЕ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Приведено описание спектрометра, разработанного на базе импульсных диодных лазеров, работающих в области 1,8 – 2,4 мкм. Автоматизация измерений и их обработки выполнены на основе аппаратуры «КАМАК» и ЭВМ IBM PC/AT. Предложена методика суммирования импульсов, отличающихся скоростью перестройки частоты.

В последнее время наблюдается повышенный интерес к исследованию сдвига спектральных линий давлением. Это объясняется тем, что во многих прикладных задачах, таких как зондирование, распространение лазерного излучения и др., неучет сдвига приводит к значительным ошибкам в полученных результатах [1]. Кроме того, коэффициенты сдвига дают новую информацию о молекулярных взаимодействиях и могут быть использованы для определения констант межмолекулярного потенциала [2].

Коэффициенты сдвига для основных атмосферных газов находятся в диапазоне $(0,001 - 0,015) \text{ см}^{-1}/\text{атм}$, и для их измерения необходима высокоточная спектральная аппаратура. Поэтому очень важным является разработка такой аппаратуры или ее совершенствование с использованием возможностей новейшей вычислительной техники.

В данной статье дано описание диодного спектрометра высокого разрешения с автоматизированной системой регистрации и обработки данных и приведены результаты апробирования спектрометра при измерении сдвига линии поглощения водяного пара давлением азота.

В качестве источника излучения в спектрометре используются диодные лазеры на основе GaInAsSb, генерирующие в диапазоне 1,8 – 2,4 мкм и работающие в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов до 100 Гц. Длительность импульсов генерации составляла 1500 мкс, диапазон непрерывной перестройки частоты одной моды – $(0,3 - 1) \text{ см}^{-1}$. Мгновенная ширина спектра излучения этих лазеров, измеренная ранее в [3], составляет менее 60 МГц. Типичный вид временной развертки интенсивности и спектра излучения приведен на рис. 1.

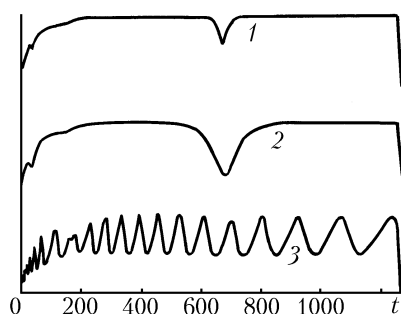


Рис. 1. Одновременная запись функции пропускания реперной кюветы с парами H_2O (1), кюветы с водяным паром, уширенным азотом (2) и интерферометра Фабри-Перо (3). Область дисперсии интерферометра – $0,0819 \text{ см}^{-1}$

Изменение длины волны генерации лазеров в более широком диапазоне производилось изменением температуры кристалла лазера. Для этого лазер монтировался на микрохолодильнике Пельтье, который, в свою очередь, устанавливался на хладопровод азотного наливного криостата.

Такая конструкция позволяла быстро изменять температуру лазерного кристалла в диапазоне (80 – 300) К и тем самым перестраивать частоту генерации лазера в пределах около 400 см⁻¹.

Для стабилизации температуры лазерного кристалла в заданной точке использовалась схема, описанная в [4], которая обеспечивала точность стабилизации, равную 0,01 К. Как будет показано ниже, при использовании специальной процедуры суммирования импульсов такая точность вполне достаточна для проведения спектроскопических измерений.

Измерение длины волны генерации лазера производилось монохроматором МДР-23 с точностью до 1 см⁻¹. Для более точных относительных измерений, а также для привязки длины волны лазера к реперным линиям поглощения использовались интерферометры Фабри–Перо, которые обеспечивали точность лучше 0,001 см⁻¹.

Однопроходная (реперная) и многоходовая (измерительная) кюветы позволяли моделировать исследуемые газовые среды при комнатной температуре. Давление в кюветах измерялось ртутным и масляным манометрами.

В данном спектрометре была применена одновременная регистрация всей необходимой спектроскопической информации в течение одного импульса генерации лазера. Как показывает опыт работы, трехканальная схема регистрации, позволяющая одновременно измерять функцию пропускания эталона Фабри–Перо, а также сигналы до и после кюветы с исследуемым газом, дают возможность получить все параметры контура линии поглощения за один импульс.

Зарегистрированные спектрометром сигналы поступали на автоматизированную систему регистрации и обработки данных, полученных на спектрометре. Система разработана на базе электронных блоков, выполненных в стандарте «КАМАК», и персонального компьютера IBM PC/AT. Программное обеспечение системы регистрации и обработки данных позволяет производить одновременную регистрацию по трем каналам необходимого количества импульсов, их усреднение, восстанавливать частотную шкалу спектрометра и определять параметры изолированных и перекрывающихся контуров линий поглощения с использованием различных теоретических моделей для контура.

Аналого-цифровое преобразование сигналов производилось с помощью трех АЦП-10/1, управляемых через крейт-контроллер от ЭВМ. Максимальное быстродействие АЦП – 1 мкс, разрядность – 10 бит, емкость буферной памяти – 4 килобайта. Время считывания цифрового кода сигналов одного импульса длительностью 1500 мкс из буферной памяти трех АЦП в оперативную память ЭВМ составляет 60 мс. После записи необходимого количества импульсов производилась их обработка.

Результаты восстановления различных моделей частотной шкалы

N п/п	$X^{1/2}$	$\text{Exp}(X^2)$	$\text{Ln}(X)$	$\text{Exp}(X)$	$1/X$
1	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$-3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$
2	$-1,3 \cdot 10^{-2}$	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$-7,5 \cdot 10^{-4}$	$-5,4 \cdot 10^{-4}$
3	$-4,9 \cdot 10^{-3}$	$-1,9 \cdot 10^{-2}$	$-1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$-2,4 \cdot 10^{-4}$
4	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$-2,3 \cdot 10^{-2}$	$-2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$-4,4 \cdot 10^{-4}$
5	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$-1,0 \cdot 10^{-2}$	$-2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$-4,3 \cdot 10^{-4}$
6	$-1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$-2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$
7	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$-1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$
8	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$-1,6 \cdot 10^{-2}$	$-1,0 \cdot 10^{-2}$	$-3,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
9	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$-7,4 \cdot 10^{-3}$	$-1,7 \cdot 10^{-3}$	$-2,6 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$
10	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$-5,0 \cdot 10^{-3}$	$-1,8 \cdot 10^{-3}$
11	$-2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$-2,1 \cdot 10^{-3}$	$-1,1 \cdot 10^{-3}$
12	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$-2,4 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$

Одной из самых важных процедур обработки сигналов спектрометра, определяющей точность измерения положения центров спектральных линий и их сдвигов, является восстановление частотной шкалы. Для определения закона изменения частоты ν (см⁻¹) от координаты x по импульсу были использованы функции: $f(\sqrt{x})$, $f(1/x)$, $f(\ln(x))$, $f(e^x)$, $f(e^{x^2})$. Наилучшие результаты по восстановлению частотной шкалы были получены с функцией

$$\nu(\text{см}^{-1}) = - [A/(x - B)] + C, \quad (1)$$

где A, B, C – постоянные, определяемые путем минимизации по методу наименьших квадратов. В таблице представлены отклонения положения 12 центров максимумов пропускания интерферометра от теоретической кривой при разных моделях частотной шкалы. Можно ожидать, что точность определения центров спектральных линий будет выше, чем отклонение центров максимумов интерферометра от теоретической кривой, так как отклонения в таблице, помимо неточностей самой шкалы, еще включают неточность в определении центров максимумов интерферометра из-за наличия шума.

Использование ЭВМ в спектрометре позволяет производить накопление и суммирование импульсов для увеличения отношения сигнал-шум. В данной статье при суммировании импульсов учитывается не только их относительное смещение, как это делалось в [5], но и обнаруженная нами нестабильность скорости перестройки частоты от импульса к импульсу (рис. 2). Последнее обстоятельство приводит к необходимости суммирования импульсов по нелинейному закону.

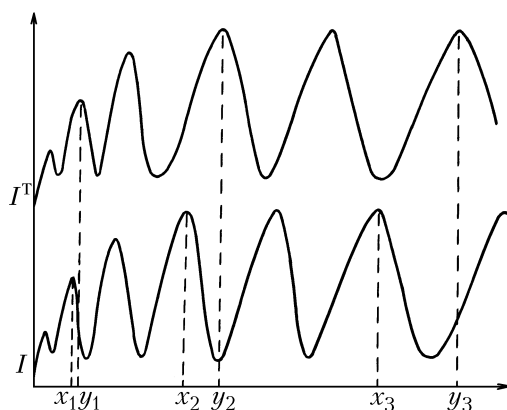


Рис. 2. Схема суммирования импульсов лазера, имеющих разные скорости перестройки частоты

Как уже указывалось выше, нелинейный характер изменения частоты наиболее точно подчиняется гиперболическому закону, поэтому для определения функции сложения (1) двух последовательных импульсов достаточно определить координаты трех соответствующих максимумов пропускания интерферометра на обоих импульсах. На рис. 2 x_1, x_2, x_3 – координаты трех максимумов первого импульса, y_1, y_2, y_3 – координаты максимумов второго импульса. Определив постоянные A, B, C , получаем взаимно однозначное соответствие точек импульсов I и I' . При сложении необходимо учесть дискретность оцифровки импульсов, т. е. если целому отсчету (координате) n первого импульса соответствует координата y второго импульса, находящаяся между целыми отсчетами m и $m + 1$, так что $m \leq y < m + 1$, то результат суммирования соответствующих точек импульса будет получен по следующей формуле:

$$I'_S = I_n + I'_m + (I'_{m+1} - I'_m)(y - m), \quad (2)$$

где $y = -a/(n - b) + c$. С помощью этой же самой функции суммируются соответствующие сигналы остальных двух каналов.

С помощью описанного выше спектрометра были проведены пробные измерения сдвига центра линии водяного пара с $\nu = 5521,9039 \text{ см}^{-1}$ давлением азота. Для этого в многоходовую кювету напускалась смесь паров воды и азота, а в реперную – только чистый водяной пар. После этого производилась одновременная регистрация (с накоплением 20 импульсов) максимумов пропускания интерферометра и контуров линий поглощения чистого и уширенного азотом паров H_2O (см. рис. 1). Затем с помощью ЭВМ определялся сдвиг относительно центра линии водяного пара в реперной кювете. Полученное нами значение сдвига $\delta\nu = 0,0089 \pm 0,0004 \text{ см}^{-1}$ хорошо совпадает с $\delta\nu = 0,0092 \pm 0,0008 \text{ см}^{-1}$, измеренным в [6] на Фурье-спектрометре.

1. Zuev V.V., Ponomarev Yu.N., Solodov A.M., et al.// Optics Lett. 1985. V. 10. № 7. P. 318–320.
2. Быков А.Д. Анализ спектров поглощения водяного пара в коротковолновой области: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО РАН, 1994. 34 с.

3. Аветисов В.Г., Баранов А.Н., Именюков А.Н. // Диодная лазерная спектроскопия. М: Наука, 1990. С. 240–247.
4. Барышевский В.Г., Голубев Ю.В., Евдокимов В.А. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1983. С. 190–192.
5. Засавицкий И.И., Ильин В.М., Максимов Г.А. и др. // Диодная лазерная спектроскопия. М: Наука, 1990. С. 168–189.
6. Chevillard J.P., Mandin J.Y., Flaud J.M. et al. // Can. J. Phys. 1991. V. 69. P. 1286–1298.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
26 июля 1995 г.

A.M. Solodov, V.N. Saveljev. Application of Pulse Diode Lasers to Line Shift Measurement.

Multichannel pulse-tunable diode laser spectrometer, operating in 1,8–2,4 μm wavelength range is described. IBM PC/AT computer is used for the automatic spectrometer operation. New method for the laser pulses accumulation is proposed.