

Член-корреспондент АН СССР В. Е. ЗУЕВ, В. П. ЛОНАСОВ,
М. М. МАКОГОН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ГАЗОВ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Получение полностью разрешенного спектра поглощения атмосферных газов и многих других веществ в газовой фазе существующими стандартными методами невозможно (1). Одним из методов получения такого спектра может стать метод лазерной спектроскопии. Нами предпринята попытка создания макета лазерного спектрометра на основе использования рубинового ОКГ. Для исследования монохроматического коэффициента поглощения атмосферных газов в области излучения ОКГ использовалось излучение твердотельного ОКГ при скоростной развертке спектра. Рубиновый ОКГ работал в режиме сканирования длины волны в течение импульса генерации, так как именно такой режим наиболее пригоден для целей лазерной спектроскопии. Подбором накачки и параметров резонатора можно добиться плавного сдвига длины волны генерации в результате нагрева кристалла. Кроме того использовалось разработанное нами управляемое электрооптическое сканирование (2), которое позволяет более точно и в большем интервале изменять длину волны генерации.

Экспериментальная установка. Экспериментальная схема измерения коэффициента поглощения в многоходовой вакуумной кювете представлена на рис. 1. Регистрация амплитуды излучения на входе и выходе из кюветы производится двумя фотоэлементами Ф-5 (18) и двухлучевым осциллографом С1-7 (17) (перед фотоэлементами устанавливаются поглощающие и рассеивающие фильтры, обеспечивающие равномерную засветку фотокатода и работу фотоэлементов в линейном режиме). Временная развертка спектра (интерферограмма) излучения регистрируется после интерферометра ИТ-51-30 (2) скоростной камерой СФР-Л (1). Сканирование длины волны осуществляется двумя способами — используется естественное (А) и электрооптическое (Б) сканирование. Плотность пассивного фильтра в системе А (раствор криптоцианина в нитробензоле) подбирается такой, чтобы генерировалось 10—15 пичков. Основные параметры установки следующие: перестройка

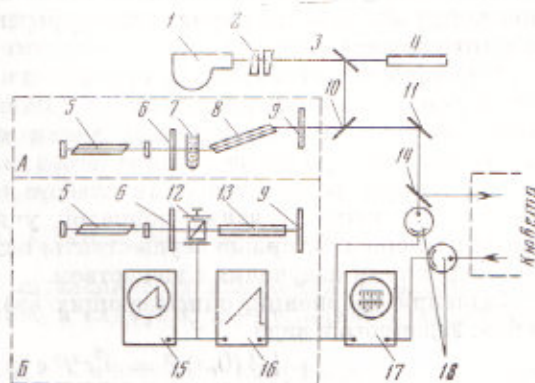


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — скоростная камера СФР-Л, 2 — интерферометр ИТ-51-30, 3, 10, 11, 14 — делительные и поворотные зеркала, 4 — стабилизированный ОКГ, 5 — юстировочный ОКГ, 6, 9 — зеркала рубинового ОКГ, 7 — пассивный фильтр, 8 — рубиновый стержень $\varnothing = 14$ мм, длина 130 мм, 12 — электрооптический затвор, 13 — рубиновый стержень $\varnothing = 6,5$ мм, длина 75 мм, 15 — контрольный осциллограф, 16 — генератор пилообразных импульсов, 17 — осциллограф, 18 — фотоэлементы

длины волны в течение импульса 0,5 Å (А) и 1,4 Å (Б), статическая перестройка от импульса к импульсу в пределах 5 Å (осуществляется нагревом кристалла), ширина спектра излучения в пичке порядка 0,01 Å, погрешность определения положения линии излучения рубинового ОКГ при использовании интерферометра с оптимальной базой $\pm 0,005$ Å.

Измерение длины волны излучения. Измерение длины волны излучения производится с помощью эталона Фабри—Перо сравнением с интерферограммой излучения стабилизированного гелий-неонового лазера ($\lambda_r^B + 6329,9146 \pm 2 \cdot 10^{-4}$ Å) по формуле

$$\lambda_p^B = \frac{n_p^2}{n_r^2} \frac{(2n_p^2 t / \lambda_r^B) (1 + 2\Delta n) + \epsilon_r}{n_r^2 (2n_p^2 t / \lambda_p^B) (1 + 2\Delta n) + \epsilon_p} \lambda_r^B, \quad (1)$$

которая выведена из условия интерференции $2n_i t = (N_i + \epsilon_i) \lambda_i$. Здесь n_p , n_r ; λ_p , λ_r определяют соответственно показатель преломления и длину волны излучения рубинового и газового ОКГ; t — база эталона Фабри—Перо; N_i — порядок интерференции, $2\Delta n$ определяет поправку на длину волны газового и рубинового ОКГ за счет отклонений атмосферных условий от нормальных⁽³⁾. Начальное грубое определение λ_p осуществляется из специально снятой графической зависимости λ_p от температуры, так как показано⁽⁴⁾, что она сильно зависит от конкретного исполнения генератора. Подсчет дробной части порядка интерференции ϵ_i производится по диаметрам пяти колец⁽⁵⁾.

Учет искажения контура линии поглощения. При изучении контура линии поглощения с помощью излучения со спектральной шириной, сравнимой с шириной линии поглощения, следует учитывать искажение контура за счет кажущегося отклонения от закона Бугера—Бера⁽¹⁾. При распространении слабого импульсного квазимонохроматического излучения введение поправок, учитывающих искажение контура линии поглощения, проще осуществить, исходя из рассмотрения процессов взаимодействия излучения с веществом.

Решения уравнений, описывающих взаимодействие импульсного излучения, заданного в виде

$$|A(0, t)|^2 = A_0^2 c^2 t^2 \exp(-\kappa t/20),$$

с веществом можно привести к закону Бугера⁽⁶⁾:

$$I(x, t) = I_0(0, t) \exp(\sigma_1 \Delta_0 x)$$

(A_0 — амплитуда входного сигнала, c — скорость света; κ — ширина линии излучения; I_0 и I — интенсивности входящего и выходящего из среды излучения; Δ_0 — разность заселенности уровней перехода). При $y = \kappa/\gamma < 1$ (γ — ширина линии поглощения) взаимодействие импульсного излучения с двухуровневой поглощающей средой приводит к изменению поперечника перехода

$$\sigma_1 = \frac{2\pi |\mu_{mn}|^2}{\omega c \hbar} \frac{1/2 \gamma (1-y)}{(1/2 \gamma)^2 (1-y)^2 + \Delta^2}, \quad (2)$$

где $|\mu_{mn}|$ — квадрат дипольного момента перехода и $\Delta = \omega_{mn} - \omega$, а следовательно, и к изменению коэффициента поглощения, т. е. к искажению контура линии поглощения.

Если за истинный коэффициент поглощения считать величину $k_\lambda^{\text{ист}} = \sigma_0 \Delta_0$ (где $\sigma_0 = \sigma_1$ при $y \simeq 0$), то его можно вычислить из выражения

$$k_\lambda^{\text{ист}} = k_\lambda^{\text{эксп}} \left[1 + \frac{(1/2 \gamma)^2 (1-y) - \Delta^2}{(1/2 \gamma)^2 (1-y)^2 + \Delta^2} y \right]^{-1}. \quad (3)$$

С уменьшением y различие между истинным и экспериментальным контурами уменьшается.

Аппаратура, методика и предварительные результаты измерений. Многоходовая вакуумная кювета (м.в.к.), позволяю-

щяя получить значительные оптические толщй поглощающей среды, представляет собой трубу (длина 6 м, диаметр 0,5 м) из нержавеющей стали, обладающей малым газоотделением и большой стойкостью к коррозии. Софокусное расположение оптической системы Уайта (7) за счет многократного прохождения базового расстояния $l_0 = 5415$ мм обеспечивает получение длины оптического хода луча до $L = 4nl_0 = 1200$ м (n — число прохождений). Рабочий диапазон температуры поглощающих газов в кювете можно варьировать от 20 до 80° С, давление — от 10^{-7} до 2 атм. При исследовании спектра поглощения водяных паров в м.в.к. измерение парциального давления P_{H_2O} производится конденсационным датчиком с погрешностью $< 2,5\%$ (8).

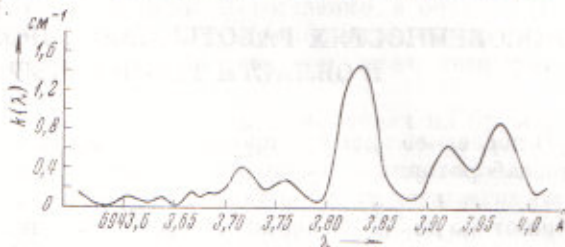


Рис. 2. Монохроматический коэффициент поглощения искусственной атмосферы при $T_{кюв} = 29^\circ$ С; $P_{общ} = 740$ тор (воздух); $P_{H_2O} = 16,35$ тор; $w = 0,318$ см

Для уменьшения погрешности измерения монохроматического коэффициента поглощения при исследованиях в м.в.к. наиболее приемлем метод искусственного изменения влажности при постоянной, оптимальной длине оптического хода луча в кювете. Ослабление излучения самой оптической системой, вернее, уровень отношения сигналов $I_{вых}^{вак}/I_{вх}^{вак}$ при отсутствии поглощающих газов в кювете в пределах исследуемого участка спектра считается постоянным с хорошей степенью точности. Спектральный коэффициент поглощения k_λ^0 определяется из выражения

$$k_\lambda^0 = \frac{1}{w} (\ln(I_1(\lambda)/I_0(\lambda)) - \ln(I_1^B(\lambda)/I_0^B(\lambda))),$$

где $I_1(\lambda)$, $I_0(\lambda)$, $I_1^B(\lambda)$, $I_0^B(\lambda)$ — интенсивности излучения на входе и выходе кюветы, соответственно в газе и вакууме; w — толщина осажденного слоя.

Погрешность измерения монохроматического коэффициента поглощения обусловлена: 1) неточностью в измерениях абсолютной влажности, 2) нестабильностью работы приемно-регистрирующей системы, 3) погрешностью в определении величины сигнала при обработке, 4) различием в оптической настройке системы для пространственно разделенных пучков излучения, 5) наличием фона рассеянного излучения, 6) погрешностью измерения длины волны излучения каждого пучка. Результирующая погрешность измерений коэффициента поглощения по предварительным оценкам не превышает 10—12%.

В качестве примера, иллюстрирующего возможности созданного макета лазерного спектрометра, на рис. 2 представлен монохроматический коэффициент поглощения искусственной атмосферы в области излучения рубинового ОКГ, полученный с помощью этого спектрометра (показан истинный коэффициент поглощения, вычисленный с учетом (3)).

Институт оптики атмосферы
Сибирского отделения Академии наук СССР
Томск

Поступило
18 I 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Е. Зуев, Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере, 1970. ² В. П. Лопасов, М. М. Макогоц, Оптика и спектроскопия, 28, в. 3 (1970). ³ E. Edlen, Metrologia, 2, № 2, 71 (1966). ⁴ П. Н. Коханенко, А. Б. Антипов, Изв. высш. учебн. завед., сер. физ., № 5, 1969. ⁵ Н. Р. Батарчукова, Новое определение метра, 1964. ⁶ В. Г. Савельев, Радиотехника и электроника, 12, № 2, 362 (1967). ⁷ J. V. White, J. Opt. Soc. Am., 32, 258 (1942). ⁸ Влажность, принципы и методы измерения влажности в газах, Сборн. статей, 1, 1947.