Теплофизика и аэромеханика, 2021, том 28, № 5

УДК 535.375

Измерение температуры и состава газов в пламени пропана методом комбинационного рассеяния с фокусирующей резонаторной системой*

Б.Ф. Бояршинов, С.Ю. Федоров

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: boyars49@mail.ru

Описан спектрометр комбинационного рассеяния, в котором для увеличения рассеяния обеспечивается полное использование энергии зондирующего лазерного излучения при его многократном прохождении через объект исследования. В пламени смеси пропана и воздуха выполнены одновременные измерения локальных значений температуры и состава газов с широкополосной регистрацией спектров комбинационного рассеяния. Приведены результаты их обработки с применением оригинального программного обеспечения.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние света, структура пламени, фокусирующая резонаторная система.

Введение

Метод комбинационного рассеяния (КР) света позволяет одновременно измерять температуру и состав многокомпонентных смесей с пространственным разрешением ~ 0,1 мм, что имеет значение при изучении химически реагирующих газовых потоков. Применение КР имеет ряд особенностей. Известно [1], что интенсивное рассеяние света происходит при использовании лазерного излучения в ультрафиолетовой области. В лабораторной практике обычно применяются лазеры, создающие излучение в видимой области. При этом существенно упрощается настройка аппаратуры, но снижается интенсивность рассеяния. В экспериментах, связанных с изучением горения газов, в спектрах рассеянного излучения, как правило, присутствует интенсивная засветка из объекта, превышающая полезный сигнал. Кроме того, применение острой фокусировки лазерного излучения для получения необходимого пространственного разрешения ограничивается из-за приближения к пороговой плотности мощности, приводящей к оптическому пробою.

В работе [2] приемлемый уровень сигнала КР из водородо-воздушного пламени при повышенном давлении достигался с использованием мощного лазера с излучением в видимой области при увеличенной длительности светового импульса. В работе [3] проводились исследования горения углеводородов с применением импульсно-периодического лазера с высокой средней мощностью излучения, но при небольшой энергии одиночных импульсов. Известны многоходовые схемы [4, 5], в которых многократное использование имеющегося лазерного излучения позволяет увеличить слабый световой сигнал.

* Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИТ СО РАН (№ АААА-1210318000217-8).

© **Бояршинов Б.Ф., Федоров С.Ю., 2021**

В их число входит оптическая схема [6], апробированная в работе [7] для широкополосных спектральных измерений в диффузионном пламени водорода.

В широкополосных КР-спектрах кроме линий комбинационного рассеяния присутствует линия релеевского рассеяния, интенсивность которого превосходит на несколько порядков сигнал КР. В пламени углеводородов возникают дополнительные помехи, обусловленные собственным свечением объекта. В экспериментах [8], например, при исследовании структуры цилиндрического пламени метана и пропана, сгорающих в воздухе, вблизи фронта пламени не удалось провести измерения из-за интенсивного свечения из зоны горения. Затруднения, обусловленные наложением отдельных спектральных линий в КР-спектрах при горении углеводородов, обсуждались в статье [7].

Перечисленные проблемы проявились и в настоящей работе. Авторами представлен вариант их преодоления с помощью оптической схемы эффективного возбуждения и сбора рассеянного света, пригодной для исследований состава и температуры в пламени углеводородов методом КР.

Оптическая схема

Фокусирующая резонаторная система [9] представляет собой оптический резонатор, включающий два возвратных зеркала, два дихроичных зеркала и две линзы. Излучение последовательно проходит через все элементы оптической схемы и остается в резонаторе, повторяя затем весь пройденный путь в том же направлении. В результате многократных прохождений возвращенного лазерного излучения интенсивность полезного сигнала аппаратуры увеличивается. При этом за счет применения минимального количества требующих юстировки оптических элементов, образующих оптический резонатор, значительно упрощается процедура настройки этой фокусирующей системы по сравнению с описанной в работе [7] многоходовой системой.

На рис. 1 представлена схема фокусирующей резонаторной системы с кольцевым оптическим резонатором. Система содержит дихроичные зеркала *1* и *5*, пропускающие излучение лазера с исходной частотой и отражающие преобразованное излучение

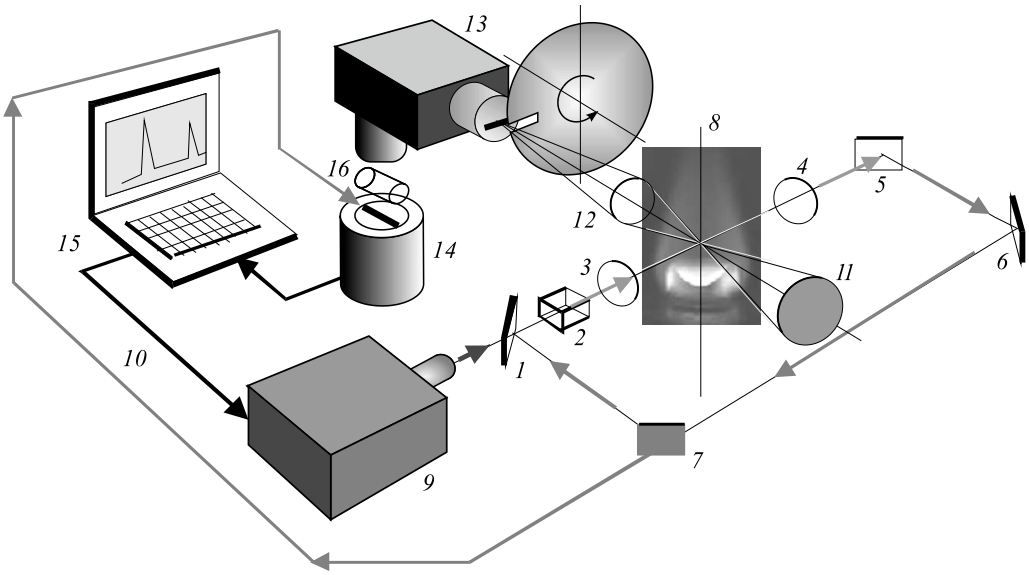

Рис. 1. Фокусирующая система с кольцевым резонатором.

1 — первое дихроичное зеркало, *2* — кристалл генератора второй гармоники, *3* — первая фокусирующая линза, *4* — вторая фокусирующая линза, *5* — второе дихроичное зеркало, *6* — первое возвратное зеркало, *7* — второе возвратное зеркало, *8* — объект исследования, *9* — лазер, *10* — световод, *11* — возвращающее сферическое зеркало для рассеянного излучения, *12* — приемная оптическая система с Notch-фильтром, *13* — спектрограф, *14* — многоканальный фотоприемник, *15* — компьютер, *16* — цилиндрическая линза.

с удвоенной частотой; кристалл генератора второй гармоники *2*, удваивающий частоту излучения лазера; фокусирующие линзы *3* и *4*, возвратные зеркала *6* и *7*. Дихроичные зеркала *1* и *5* вместе с возвратными зеркалами *6* и *7* образуют оптический резонатор, в котором лазерное излучение направляется так, что оно многократно попадает в измерительный объем, при этом число проходов определяется величиной затухания излучения в резонаторе. Вторая фокусирующая линза *4* установлена на двойном фокусном расстоянии от первой фокусирующей линзы *3*, а между ними находится объект исследования *8*. Предлагаемая оптическая схема максимально упрощена, она не требует изготовления специальных оптических элементов и вызывает минимальные искажения лазерного пучка.

В экспериментах использовалось инфракрасное излучение (длина волны 1064 нм) импульсного Nd:YAG-лазера с преобразованием этого излучения во вторую гармонику с частотой $\omega_0 = 18788$ см$^{-1}$ (длина волны 532 нм) с помощью кристалла *2*. Длительность импульсов излучения лазера и частота повторения составляли соответственно ~ 15 нс и ~ 10 Гц. Энергия в импульсе преобразованного излучения даже при одном проходе не превышала 50 мДж и при использовании линзы *3* с фокусным расстоянием 300 мм не вызывала оптического пробоя при фокусировании в исследуемой среде. При многократном прохождении пучков через объект измерений плотность мощности также не превышала критического уровня, потому что излучение попадало в измерительный объем при каждом последующем проходе с задержкой по времени, величину которой можно установить выбором длины резонатора. Измерения длительности светового импульса в резонаторе показали его увеличение примерно в 4,5 раза по сравнению с одним проходом.

Изображение перетяжки под прямым углом к лазерному пучку проецируется собирающей системой *12* (рис. 1) с 3,5-кратным увеличением на входную щель (с шириной 0,05 мм) спектрографа УМ-2 (*13*), при этом направление пучка лазера ориентировано вдоль щели. Обратное сферическое зеркало *11* возвращает в собирающую систему свет, рассеянный в обратном направлении. На пути света, направляемого в спектрограф, устанавливался Notch-фильтр, избирательно подавляющий засветки с длиной волны удвоенного лазерного излучения. За спектрографом располагался многоканальный оптический регистратор спектров *14* (изготовитель ООО МОРС, г. Троицк) с усилителем яркости. Фоточувствительная линейка содержит 2048 элементов с общим размером 25×0,2 мм. Поперечный размер измерительного объема (50×50 мкм) определялся диаметром перетяжки лазерного пучка, ориентированного параллельно входной щели, на которую он проектировался. Вблизи фотокатода многоканального приемника параллельно линейке была установлена цилиндрическая линза *16*, которая представляет собой стеклянный цилиндр диаметром 5 мм. Она позволила увеличить яркость света, попадающего на фотокатод, путем одномерного сжатия изображения, что привело также к увеличению продольного размера измерительного объема примерно до 300 мкм.

В тестовых измерениях применение фокусирующей резонаторной системы позволило увеличить интенсивность спектров КР в 13,8 раза, а использование цилиндрической линзы — еще примерно в 5 раз.

Для ослабления засветок от пламени перед входной щелью был установлен вращающийся диск радиусом 100 мм с прорезью шириной 0,8 мм. Строб усилителя яркости (2,7 мкс) подавался в период нахождения прорези диска на входной щели. Кадр линейки с длительностью 20 мс и вспышка лазера были синхронизованы с диском. Для контроля мощности излучения лазера последнее подавалось на край линейки по световоду *10* и регистрировалось вместе с каждым спектром КР.

Экспериментальные данные

Объектом исследования служила стационарная ячейка богатого пламени пропана-бутана (рис. 1). Соотношение объемных расходов горючего и воздуха составляло 4:75. Описание горелки приводилось в работе [10]. Исследовалось изменение полного состава газов и температуры при переходе через фронт пламени. Для этого измерялись широкополосные спектры КР при удалении 1 – 4 мм по вертикали от горелки диаметром 10 мм со смещением на 2 мм от ее оси в горизонтальном направлении. В каждой точке пламени регистрировались серии по 1200 спектров, из которых 600 моноимпульсных спектров полного сигнала КР вместе с фоном были получены во время вспышек лазерного излучения, а другие 600 спектров от фона регистрировались в промежутках между вспышками. Дальнейшая обработка таких серий выполнялась с применением собственной программы «CARSspectra» [11]. Окончательный спектр рассчитывался суммированием по всей серии спектров рассеяния с вычитанием спектров фона и был в наибольшей степени избавлен от засветок из объекта измерений.

На рис. 2 показаны спектры при переходе через область горения на удалении от начала струи на 1, 2,6 и 3,2 мм. Темно-серой вертикальной полосой выделен участок, где с помощью Notch-фильтра подавлены засветки на длине волны 532 нм, соответствующей лазерному излучению и релеевскому рассеянию. Светло-серыми полосами отмечены интервалы суммирования сигнала стоксовых полос исследуемых газов H_2O, C_3H_8, N_2, CO, O_2, CO_2 и антистоксовой полосы N_{2a}. В правой части спектров расположен пик от заведенного по световоду излучения лазера, используемый для контроля энергии.

На спектре, расположенном в верхней части рис. 2, присутствуют полосы исходных компонентов смеси, а при удалении от горелки они исчезают и в спектрах появляются полосы продуктов реакции и антистоксова полоса азота N_{2a}. На среднем спектре, полученном вблизи фронта пламени, наблюдается флуоресценция в полосе от – 1100 см$^{-1}$ до +1100 см$^{-1}$, но она не перекрывается с полосами измеряемых молекул. Небольшая доля засветки в некоторых опытах, вызванная неполным совмещением во времени

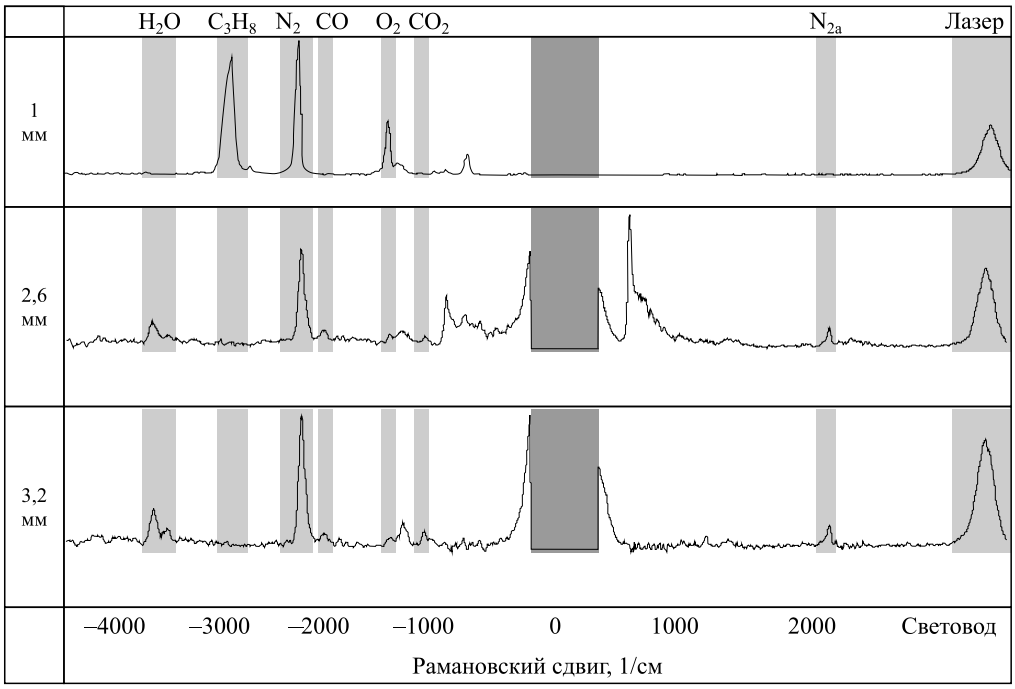

Рис. 2. Спектры КР, полученные в пламени пропана на различных расстояниях от горелки.

интервалов измерения составляющих полного сигнала, создавала пьедестал в спектрах. Его величина определялась по уровням сигнала на границах интервалов интегрирования и автоматически вычиталась. Концентрации рассчитывались по интенсивностям колебательных полос, полученных путем интегрирования сигнала в указанных на рис. 2 диапазонах. Область, отмеченная вблизи возбуждающей линии 0 см$^{-1}$, исключалась из обработки из-за остаточной лазерной засветки. При расчете учитывался профиль перекрывания приемной апертуры горелкой.

Калибровка для N_2 и O_2 проводилась по предварительным измерениям в воздухе, где концентрации этих газов были известны. Калибровка для остальных газов выполнялась по калибровке для N_2 с коэффициентом, рассчитанным через отношение сечений рассеяния. Температура T определялась с использованием уравнения состояния по суммарной плотности газа. Также в области присутствия азота рассчитывалась температура T_{vib} по отношению антистоксовой и стоксовой полос колебательного спектра N_2.

На рис. 3 показаны профили концентрации H_2O, C_3H_8, N_2, CO, O_2, CO_2 и температуры в ячеистом пламени богатой смеси пропана с воздухом, рассчитанные по спектральным данным. Здесь m — мольная фракция (б/р), y — удаление от начала струи (мм), T — температура (К). Вертикальными пунктирными линиями отмечена область, в которой проявилась флюоресценция, ордината профиля азота уменьшена в три раза. Профиль температуры по данным КР согласуется с предыдущими измерениями, проведенными методом КАРС (когерентное антистоксово рассеяние) в работе [12] (синие квадратные маркеры).

Таким образом, предложенная фокусирующая резонаторная система благодаря наиболее эффективному использованию имеющейся энергии лазера позволяет увеличить слабый сигнал комбинационного рассеяния до уровня, обеспечивающего возможность проводить локальные одновременные измерения температуры и полного состава газа при горении пропана в условиях сильной фоновой засветки из измерительного объема. Критически низкий уровень сигнала КР преодолен за счет ряда мероприятий. В их числе: применение узкополосного фильтра Notch, использование возвращающего сферического зеркала для рассеянного излучения, применение схемы синхронного детектирования, обеспечивающей совпадение времени приема и времени вспышки лазерного излучения, увеличение длины измерительного объема. Впервые использовалась схема фокусировки, которая обеспечивает полное использование энергии зондирующего лазерного излучения при его многократном прохождении через объект исследования.

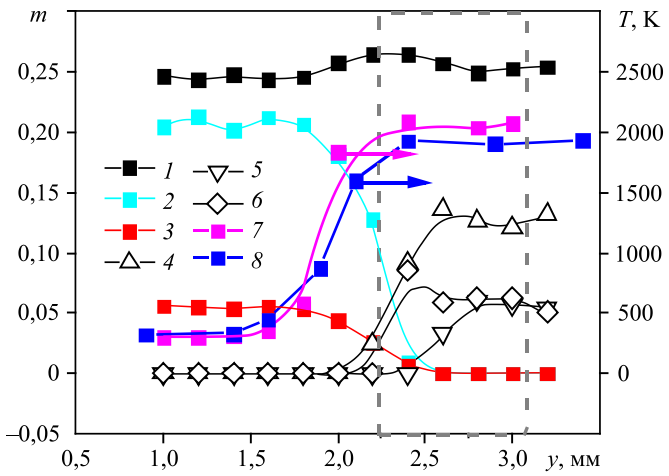

Рис. 3. Профили концентрации H_2O, C_3H_8, N_2, CO, O_2, CO_2 и температуры вблизи фронта пламени богатой смеси пропана и воздуха.
1 — $N_2/3$, *2* — O_2, *3* — C_3H_8, *4* — H_2O, *5* — CO_2, *6* — CO,
7 — *T* (по данным КР), *8* — *T* (по данным [12], полученным методом КАРС).

Список литературы

1. **Малов А.Н., Фёдоров С.Ю.** Применение эксимерных XeCl- и Kr-F-лазеров для диагностики пламени методом спонтанного комбинационного рассеяния // Физика горения и взрыва. 1988. № 4. С. 54–58.
2. **Kojima J., Nguyen Q.-V.** Measurement and simulation of spontaneous Raman scattering in high-pressure fuel-rich H_2–air flames // Meas. Sci. Technol. 2004.Vol. 15, No. 3. P. 565–580.
3. **Sepman A.V., Toro V.V., Mokhov A.V., Levinsky H.B.** Determination of temperature and concentration of main components in flames by fitting measured Raman spectra // Appl. Phys. B. 2013. Vol. 112. 35 p.
4. **Чернин С.М.** Многоходовые системы в оптике и спектроскопии. М.: Физматлит, 2010. 240 с.
5. **Пат. 2025750 РФ, МПК[71] G02B 17/06.** Многоходовая зеркальная система высокого пространственного разрешения / Михайлов С.Б., Чернин С.М. Заявитель Институт химической физики АН СССР. № 4773212/10; заявл. 08.01.1990; опубл. 30.12.1994.
6. **Пат. 2523735 РФ, МПК[51]G02B 17/08, G01J 3/44, G01N 21/65.** Многоходовая фокусирующая система и способ фокусировки лазерного излучения, обеспечивающий многократное прохождение лазерного пучка через измерительный объём / Федоров С.Ю., Бояршинов Б.Ф. Патентообладатель ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. № 2012132799/28; заявл. 31.07.2012; опубл. 20.07.2014, Бюлл. № 20.
7. **Федоров С.Ю., Бояршинов Б.Ф.** Многоходовая оптическая схема для широкополосных измерений в спектрах комбинационного рассеяния // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 2. С. 89–23.
8. **Hu S., Pitz R.W.** Structural study of non-premixed tubular hydrocarbon flames // Combustion and Flame. 2009. Vol. 156. P. 51–61.
9. **Пат. 2737345 РФ, МПК[51] G02B 27/16, СПК[52] G02B 27/16.** Фокусирующая резонаторная система / Федоров С.Ю., Бояршинов Б.Ф. Патентообладатель ФГУБН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. № 2020107500; заявл. 18.02.2020; опубл. 27.11.2020, Бюлл. № 33.
10. **Бояршинов Б.Ф., Федоров С.Ю.** Экспериментальное исследование переноса импульса в ячеистом пламени богатой и бедной смеси пропан/бутан/воздух // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 3. С. 433–441.
11. **Федоров С.Ю.** CARSspectra v.02: свидетельство № 2017616085 РФ; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 1 июня 2017 г. http://www.itp.nsc.ru/Laboratory/LAB_2_1/Methods/index.html.
12. **Abdrakhmanov R.Kh., Boyarshinov B.F., Fedorov S.Yu.** Investigation of the local parameters of a cellular propane/butane/air flame // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 109. P. 1172–1180.

Статья поступила в редакцию 9 марта 2021 г.,
после доработки — 3 июня 2021 г.,
принята к публикации 30 июля 2021 г.