

$$\begin{aligned}
& + \int_1^{(1+\delta)/2\delta} (1 + \delta - 2\delta\xi_c)^2 [2 - (1 + e^{i\Omega}) e^{-i\Omega\xi_c}] d\xi_c = \\
& = \left[\frac{1}{6} + \frac{(1-\delta)^2}{3\delta} + \frac{i(1-\delta)^2}{\Omega} + \frac{1-4\delta(1-\delta)}{\Omega^2} + \frac{2i\delta(2-5\delta)}{\Omega^3} \right] - \\
& - e^{-i\Omega} \left[\frac{1-2\delta^2}{\Omega^2} + \frac{2i\delta(2+3\delta)}{\Omega^3} \right] + \frac{16i\delta^2}{\Omega^3} e^{-i\Omega/2\delta} \cos \frac{\Omega}{2}.
\end{aligned}$$

Из интегрального выражения $F(\Omega, \delta)$ видно, что $F(0, \delta) = 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахман Н. Н. Докл. АН СССР, 1959, 129, 5.
2. Новиков С. С., Похил П. Ф., Рязанцев Ю. С. и др. ПМТФ, 1968, 3.
3. Новиков С. С., Потулов В. Ю., Чуйко С. В. — В кн.: Горение конденсированных систем. — Черноголовка, 1977.
4. Вишневецкий И. Я., Денисюк А. П., Фогельзаиг Е. А. ФГВ, 1979, 15, 1.
5. Зенин А. А. — В кн.: Физические процессы при горении и взрыве. — М.: Атомиздат, 1980.
6. Илюхин В. С., Марголин А. Д., Сверчков Ю. Е. — В кн.: Горение конденсированных систем. — Черноголовка, 1977.
7. Баэр А. Д., Райэн Н. В., Шульц Е. В. РТК, 1974, 9, 5.
8. Илюхин В. С., Марголин А. Д., Валеев И. И. и др. ФГВ, 1987, 23, 3.
9. Бахман Н. Н., Беляев А. Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. — М.: Наука, 1967.
10. Бекстед М. В., Маккарти К. П. РТК, 1982, 20, 2.
11. Kubota N., Masamoto T. 16-th Symp. (Intern.) on Combustion, 1976.
12. Beckstead M. W. 18-th Symp. (Intern.) on Combustion, 1981.
13. Gurland J. — In: Planes Proc./Ed. F. Benesovsky. — Vienna, 1962.
14. Seetharamacharyulu D., Pai Vernerder V. P., Mallya K. M. e. a. Comb. Sci. Techn., 1981, 25, 1.
15. King M. K. AIAA Paper N 78-216, 1978.
16. Боргс Т. Л., Бекстед М. В. РТК, 1970, 8, 4.
17. Cohen N. S., Strand L. D. AIAA J., 1985, 23, 5.
18. Government Reports, 1985, 85, 15, abstr. 535, 236.
19. Blum E. H., Wilhelm V. H. AICHE-Iche Symp. Series, 1965, 4.
20. Гусаченко Л. К. — В кн.: Горение и взрыв. — М.: Наука, 1972.
21. Бекстед М. В., Дерр Р. Д., Прайс К. Ф. РТК, 1970, 8, 12.
22. Новожилов В. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. — М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 28/1 1987,
после доработки — 21/V 1987

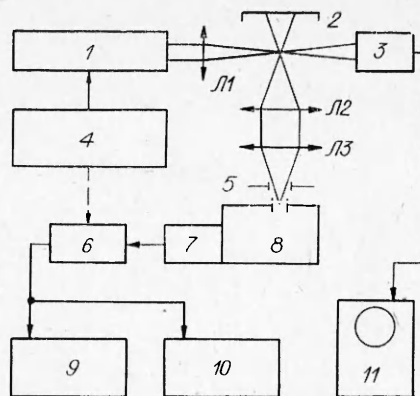
ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСИМЕРНЫХ ХеСІ- И КrF-ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАМЕНИ МЕТОДОМ СПОНТАННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

А. Н. Малов, С. Ю. Федоров
(Новосибирск)

Методы диагностики пламен, основанные на явлении комбинационного рассеяния света (КР), широко известны — это спектроскопия спонтанного комбинационного рассеяния (СКР), когерентное антистоксово рассеяние света (КАРС) и др. [1—3].

Для измерений в пламенах — объектах с многокомпонентным составом, высоким уровнем пульсаций концентраций и температур, наличием собственного свечения — методы КР являются уникальным инструментом. Здесь в полной мере могут быть использованы такие потенциальные возможности этих методов, как локальность, бесконтактность, безынерционность, возможность измерения населенностей колебательных и вращательных уровней различных молекул, возможность устранения паразитных засветок из измерительного объема. Полностью эти возможности

Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — эксимерный лазер; 2 — светопоглотитель; 3 — ФЭК; 4 — источник питания; 5 — диафрагма; 6 — схема коррелированной выборки; 7 — ФЭУ; 8 — двойной монохроматор; 9 — самописец; 10 — универсальный вольтметр; 11 — запоминающий осциллограф.



реализуются в схемах КАРС, для создания которых обычно требуется сложная экспериментальная техника. Методы СКР более доступны, но они часто не обеспечивают сигнал, достаточный для измерения параметров газобразных сред с удовлетворительной точностью.

Однако появление в последние годы новых источников монохроматического излучения в УФ-области — эксимерных лазеров — позволяет расширить возможности простых диагностических методик. Причина более высокой эффективности эксимерных лазеров в схемах СКР по сравнению с традиционными (аргоновым, рубиновым, неодимовым) заключается в сильной зависимости интенсивности сигнала рассеяния от длины волны $\sim \lambda^{-4}$, а также в большей чувствительности фотоприемников в УФ-области. Благодаря увеличению полезного сигнала оказывается возможным измерять населенности уровней молекул при концентрациях 10^{17} см^{-3} и выше за время одного импульса лазера с удовлетворительной точностью, а это позволяет проводить измерения в нестационарных потоках.

В данной статье приводятся спектры спонтанного комбинационного рассеяния, полученные в условиях пламени с использованием наиболее распространенных эксимерных ХеС1- и КгF-лазеров. Описывается наиболее простая схема импульсного СКР-спектрометра для измерения локальных концентраций основных компонентов в пламени с высоким временным разрешением. Приводятся результаты измерения концентраций основных компонентов в водородовоздушном диффузионном пламени.

Описание экспериментальной установки. Использовался разработанный в ИТПМ СО АН СССР ультрафиолетовый эксимерный лазер с двумя активными объемами [4]. Излучение лазера 1 фокусировалось линзой Л1 (рис. 1) с фокусным расстоянием 112 мм. Изображение перетяжки проектировалось собирающей системой линз Л2 и Л3 (с увеличением $\sim 4\times$) на входную щель двойного монохроматора ДМР-4. Диафрагма 5, установленная на входной щели, ограничивала высоту измерительного объема с размерами $1 \times 0,5 \times 0,5$ мм. Свет, прошедший через монохроматор 8, попадал на фотокатод ФЭУ-71 7. Сигнал с последнего поступал на вход схемы коррелированной выборки 6 и далее на самописец Н-381 9 либо на универсальный вольтметр В7-16 10. Работа схемы выборки была синхронизована с импульсом генерации лазера. Сигнал с ФЭУ интегрировался в течение 10 мкс, длительность импульса генерации составляла 30 нс. С целью устранения влияния электрических помех от лазера система регистрации сигнала рассеяния помещалась в экранирующий кожух. Излучение лазера после прохождения измерительного объема попадало на ФЭК 3, сигнал с которого регистрировался на запоминающем осциллографе 11. Этот сигнал использовался для нормировки на энергию импульса генерации. Перпендикулярно оси лазера и оси собирающей системы была установлена горелка с соплом диаметром 0,5 мм, которая могла перемещаться в двух направлениях с помощью микровинтов.

Таким образом, спектрометр мог работать в двух режимах: 1) запись спектра при включении лазера в импульсно-периодическом режиме, развертки спектра монохроматором и регистрации сигнала на самописце и 2) регистрация амплитуды сигнала с нормировкой на энергию лазер-

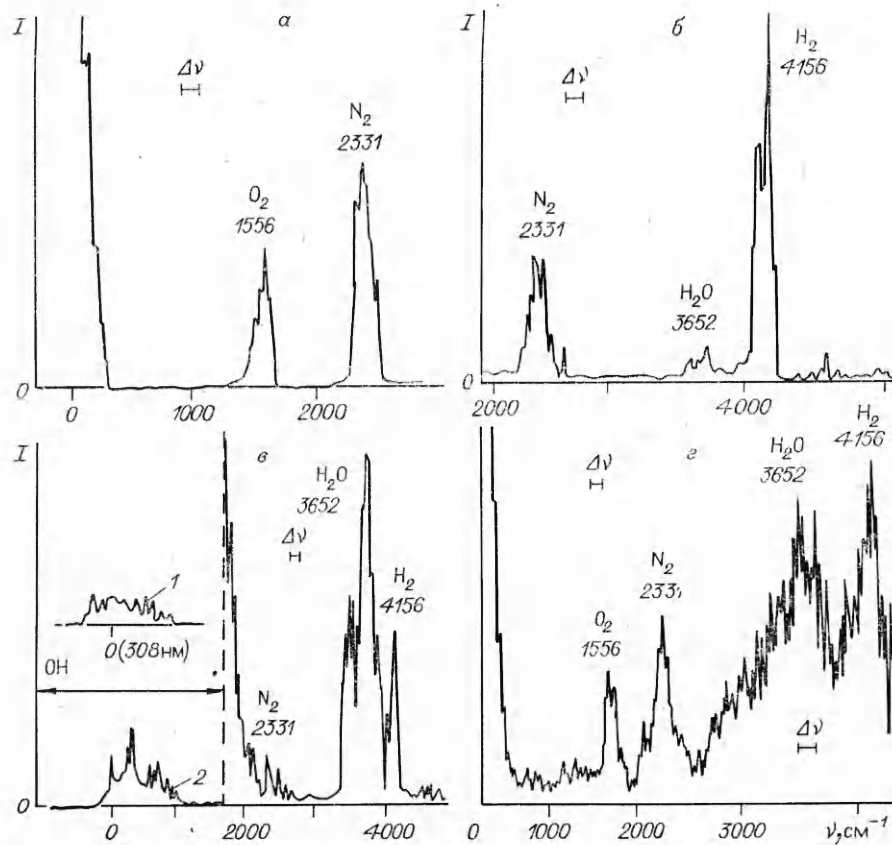


Рис. 2. Спектры КР воздуха (а), в струе водорода в воздухе (б) и в водородовоздушном диффузионном пламени (в, г). 1 — люминесценция (без ослабления); 2 — флуоресценция (ославлено $\sim 10^4$ раз). λ , нм: а — в — 308, г — 249.

ного излучения при включении лазера в моноимпульсном режиме, настройке монохроматора на интересующую длину волны и записи показаний с вольтметра и запоминающего осциллографа. Энергия излучения в импульсе составляла ~ 100 мДж для ХеСl-лазера (308 нм) и ~ 50 мДж для КгF-лазера (249 нм). Собирающая система имела эффективность около 0,02.

Результаты измерений и их обсуждение. Проводилась запись спектров спонтанного комбинационного рассеяния в воздухе при нормальных условиях, в струе водорода и в водородовоздушном диффузионном пламени.

На рис. 2, а приведен характерный спектр КР воздуха. Зарегистрированы Q-ветви колебательных полос O_2 и N_2 . Разрешение спектрометра составляло ~ 3 нм, что определялось шириной щелей монохроматора, его дисперсией и шириной спектра лазерного излучения. При таком разрешении записанные линии представляют собой аппаратную функцию спектрометра. Их интенсивности пропорциональны населенностям колебательных уровней молекул. На рис. 2, б показан фрагмент спектра в струе водорода в воздухе, снятый в 5 мм от среза сопла примерно на оси струи. Здесь и далее избыточное давление перед соплом 0,2 атм.

На рис. 2, в спектр КР снят в той же точке в водородовоздушном диффузионном пламени. Разброс величины сигнала на линиях объясняется флуктуациями мгновенных концентраций молекул в потоке и в меньшей мере — разбросом энергии импульсов лазерного излучения ($\pm 10\%$). Тем не менее по спектрам можно качественно судить об изменениях концентраций компонентов. Например, видно уменьшение кон-

центраций H_2 и N_2 и увеличение концентрации H_2O в пламени по сравнению с холодной струей.

При измерениях в пламени обнаружено, что излучение ХеСл-лазера возбуждает флуоресценцию молекул ОН, присутствующих в пламени. Флуоресценция возникает в результате совпадения длины волны генерации ХеСл-лазера (308 нм) с длиной волны полосы (0,0) перехода ${}^2\Sigma - {}^2\Pi$ молекулы ОН [5]. На спектре, полученном в пламени (см. рис. 2, *в*), видна засветка, создаваемая лазерно-индуцированной флуоресценцией (ЛИФ) ОН, с длинноволновой границей около 1800 см^{-1} от рэлеевской линии. Для сравнения на рис. 2, *в* показан спектр люминесценции ОН. Видно, что по сравнению с ним спектр ЛИФ интенсивнее примерно в 10^4 раз и центр его сдвинут в стоксову область.

Использование ЛИФ ОН от ХеСл-лазера для получения информации о состояниях ОН может составить предмет отдельного исследования. В рамках данной работы ЛИФ создает трудности в регистрации спектров комбинационного рассеяния. Ее наличие делает проблематичным регистрацию СКР-спектров молекул с колебательным квантом менее 1800 см^{-1} , к их числу относятся O_2 , CO_2 . Молекулы с квантами более 1800 см^{-1} регистрируются обычным образом (N_2 , H_2O , H_2 и др.). От указанного недостатка спектрометра легко освободиться, если использовать в качестве возбуждающего излучения КгГ-лазера. Он имеет примерно такую же энергию в импульсе и несколько большую эффективность в схеме СКР за счет более короткой длины волны. Однако при его использовании следует более тщательно подбирать материалы для элементов оптической схемы, чтобы уменьшить их флуоресценцию. На рис. 2, *г* приведен такой спектр с возбуждением от КгГ-лазера, снятый в пламени водорода на том же расстоянии от среза сопла. Время записи каждого из приведенных выше спектров составляло около 5 мин. Время регистрации сигнала в каждой точке спектра определялось длительностью импульса генерации лазера (30 нс). Этот режим спектрометра использовался для поиска линий и настройки на нужную линию.

Дальнейшие измерения проводились в моноимпульсном режиме. За один импульс генерации лазера получалась информация об интенсивности колебательно-вращательной полосы определенных молекул, по которой далее с учетом калибровки вычислялась концентрация молекул в данной точке пламени.

На рис. 3, *а* показаны распределения концентраций H_2 и N_2 в поперечном сечении пламени с нормировкой на энергию импульса лазерного излучения. Калибровка проводилась по сигналам от известных концентраций — по атмосферной концентрации для N_2 и 100%-ной для H_2 . На рис. 3, *б* приведено распределение H_2O в том же сечении. Этот профиль не калибровался. По вертикальной оси отложена амплитуда сигнала в фотоэлектронах. Временное разрешение при измерении концентрации

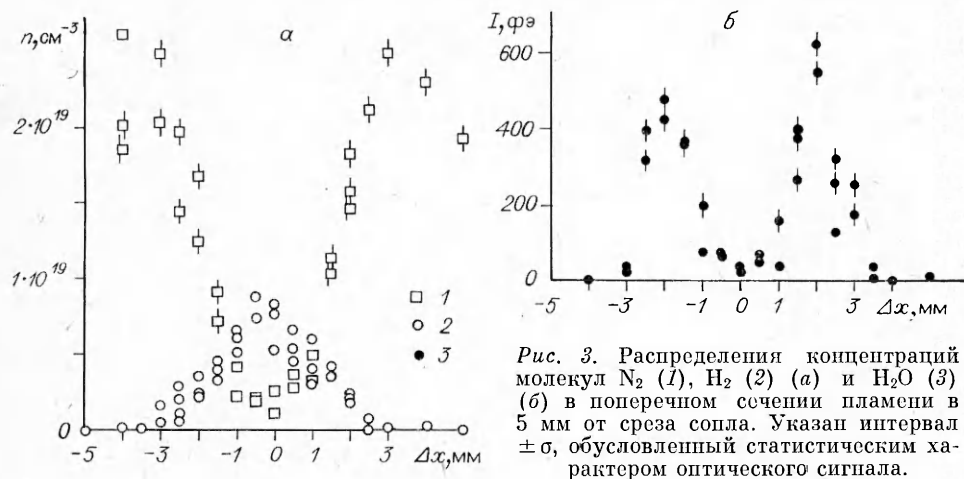


Рис. 3. Распределения концентраций молекул N_2 (1), H_2 (2) (*а*) и H_2O (3) (*б*) в поперечном сечении пламени в 5 мм от среза сопла. Указан интервал $\pm \sigma$, обусловленный статистическим характером оптического сигнала.

30 нс. В тех точках, где доверительный интервал не нанесен, он не превышает размера значка на графике. Реальный разброс заметно превышает аппаратную точность измерений (их делалось по несколько в одной точке пламени). Этот разброс объясняется флуктуациями концентраций компонентов в пламени, характерными для турбулентного течения. Он иллюстрирует возможность применения данной схемы для измерения мгновенных значений концентраций молекул и изучения параметров турбулентности. Аналогичные профили концентраций N_2 , H_2 , O_2 в том же сечении пламени, но с усреднением по времени с использованием непрерывного аргонового лазера, приведены в [6]. Наши эксперименты показывают такую же структуру пламени, но дают дополнительную информацию о локальных флуктуациях концентраций.

Проведенные измерения позволяют также оценить предельную чувствительность, достижимую для данной схемы. Сигнал, полученный в эксперименте от атмосферной концентрации молекул N_2 , например, составлял около 500 фотоэлектронов. Однако остались неиспользованными следующие возможности: 1) не использовались обратные зеркала для лазерного и рассеянного излучения, что привело бы к увеличению полезного сигнала в 4 раза и 2) не достигнута предельная для данного лазера энергия лазерного излучения в импульсе [4] (вместо 500 мДж на $HeCl$ было только 100 мДж). Это дало бы еще пятикратное увеличение сигнала. Еще некоторого увеличения сигнала можно было добиться посредством более строгого согласования толщины перетяжки лазерного пучка и ширины входной щели монохроматора. Таким образом, полученный в эксперименте сигнал от атмосферной концентрации молекул N_2 с учетом неиспользованных возможностей может быть доведен по меньшей мере до $500 \times 4 \times 5 = 10^4$ фотоэлектронов в импульсе. Ошибка измерений при таком уровне сигнала составит 1%, а с точностью 10% можно регистрировать концентрацию $\sim 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ молекул N_2 .

Авторы выражают благодарность Ю. И. Красникову за помощь в создании схемы коррелированной выборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laser Raman Gas Diagnostics/Ed. M. Lapp, C. M. Penney.— N. Y.: Plenum Press, 1974.
2. Ахманов С. А., Коротеев Н. И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света.— М.: Наука, 1981.
3. Combustion Measurements/Ed. R. Goulard.— Washington: Academic Press, 1976.
4. Малов А. Н., Ражев А. М. ЖТФ, 1985, 55, 4, 664.
5. Гейдон А. Спектроскопия пламени.— М.: ИЛ, 1959.
6. Рудницкий А. Л., Федоров С. Ю., Якоби Ю. А.— В кн.: Оптические методы исследований газовых потоков и плазмы.— Минск: ИТМО, 1982.

Поступила в редакцию 1/VII 1987

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕХОДА НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ВЕРХОВОЙ

О. П. Брабандер, О. А. Вдовина, А. М. Гришин,
А. Д. Грузин
(Кемерово, Томск)

Математическому моделированию лесных пожаров посвящены работы [1—5], основное внимание в которых уделяется вопросам корректного математического описания распространения верховых лесных пожаров, выяснению предельных условий распространения и взаимодействия с естественными и искусственными противопожарными преградами. В то же время очевидна необходимость изучения самой возможности возникновения процесса горения в пологе леса в результате воздействия низового пожара. Экспериментально этот вопрос рассматривался в [6—8].