

КАРС-ДИАГНОСТИКА ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ, РАЗРЯДОВ И ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

© 2007 К. А. Верещагин, Д. Н. Козлов, В. В. Смирнов,
О. М. Стельмах, В. И. Фабелинский

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва

Обсуждаются вопросы, связанные с применением нелинейно оптического метода спектроскопии рассеяния КАРС в исследованиях газовых потоков, пламен и разрядов. Показано, что с помощью этого метода невозмущающей локальной диагностики можно получать не только качественную, но и количественную информацию о частотах и уширениях линий в спектрах рассеяния молекулярных переходов, о функциях распределений молекул по состояниям, температурах в диапазоне 10 - 4000 К, а также о процессах распределения и передачи молекулярной энергии.

Для определения газовых параметров наряду со спектроскопическими данными молекул очень важно обладать также и информацией о сдвиге и уширении молекулярных переходов. С целью получения информации такого рода в ИОФ РАН был создан уникальный ИК-КАРС-спектрометр высокого разрешения, и впервые были одновременно записаны инфракрасные спектры поглощения и спектры когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). С этим спектрометром была получена обширная информация о структуре колебательно-вращательных уровней энергии многих молекул, обеспечив необходимую базу данных для количественно-

го анализа и газовой термометрии [1]. На рис. 1 показаны полностью разрешенный КАРС-спектр Q-ветви колебания ν_1 и ИК-спектр Q-ветви колебания ν_3 молекулы $^{74}\text{GeH}_4$.

При исследовании уширения спектральных линий молекулярных газов в диапазоне давлений от 0,01 до 100 атм была изучена столкновительная динамика различных молекул. Эти результаты также обеспечивают необходимое основание для правильных процедур измерения газовой плотности и температуры.

Развитые методы импульсного возбуждения и КАРС-зондирования (с временным

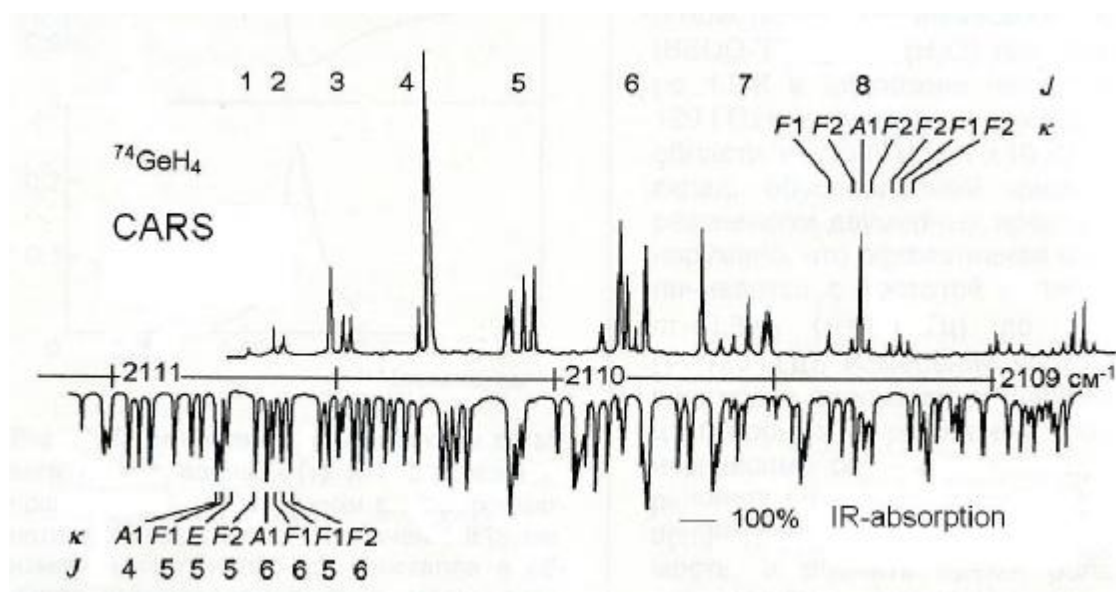


Рис. 1. Полностью разрешенный КАРС-спектр Q-ветви колебания ν_1 (верхний спектр) и ИК-спектр Q-ветви колебания ν_3 (нижний спектр) молекулы $^{74}\text{GeH}_4$

разрешением $\sim 10^{-8}$ сек) оказались очень эффективными для исследований временной эволюции распределения молекулярной энергии между внутренними (колебательной и вращательной) степенями свободы и исследований по-уровневой кинетики возбужденных молекулярных систем [2]. Так, были измерены константы скоростей столкновительного колебательно-колебательного обмена в N_2 и в SF_6 , являвшиеся (как известно из литературы), соответственно, самой низкой и самой высокой из скоростей этих процессов.

На рис. 2а,б приведены спектры колебательно-вращательных переходов молекул азота, возбужденных в разряде. Показано временное поведение функции распределения по колебательным уровням. Спектры с разрешенной вращательной структурой позволяют измерять в той же самой точке разряда вращательную функцию распределения и получить вращательную (при 100 тор равную поступательной), температуру $T = 328$ К.

Проводились совместные эксперименты с Центральным Институтом Аэрогидродинамики (ЦАГИ), в которых были выполнены диагностика сверхзвуковых газовых потоков и термометрия пламени смесей H_2 /воздух в высокотемпературной сверхзвуковой камере сгорания [3]. Изучались харак-

терные особенности сильно охлажденных (до 10 К) сверхзвуковых струй с различными значениями числа Кнудсена. При этом экспериментально наблюдалось преобразование типа потока от вращательно-неравновесного до потока с явно выраженными признаками процессов конденсации [4]. На рис. 3 показаны населенности вращательных уровней. Вращательные температуры не равны поступательной и, кроме того, различны для четных и нечетных спиновых модификаций молекул азота.

Исследовались условия смешивания газов и передача колебательного возбуждения от одного газа многокомпонентного сверхзвукового потока к другому. Для этих целей была создана полномасштабная установка, обеспечивающая смешение компонентов смеси (с предварительным возбуждением в разряде одного из газов) в дозвуковом потоке и последующее сверхзвуковое истечение. Энергия, содержащаяся во внутренних степенях свободы молекул в потоке, измерялась на основе КАРС-спектров.

На рис. 4 показана передача колебательной энергии от азота, возбужденного в разряде, к молекулам CO. В зависимости от условий смешивания газов эффективность передачи энергии была различной.

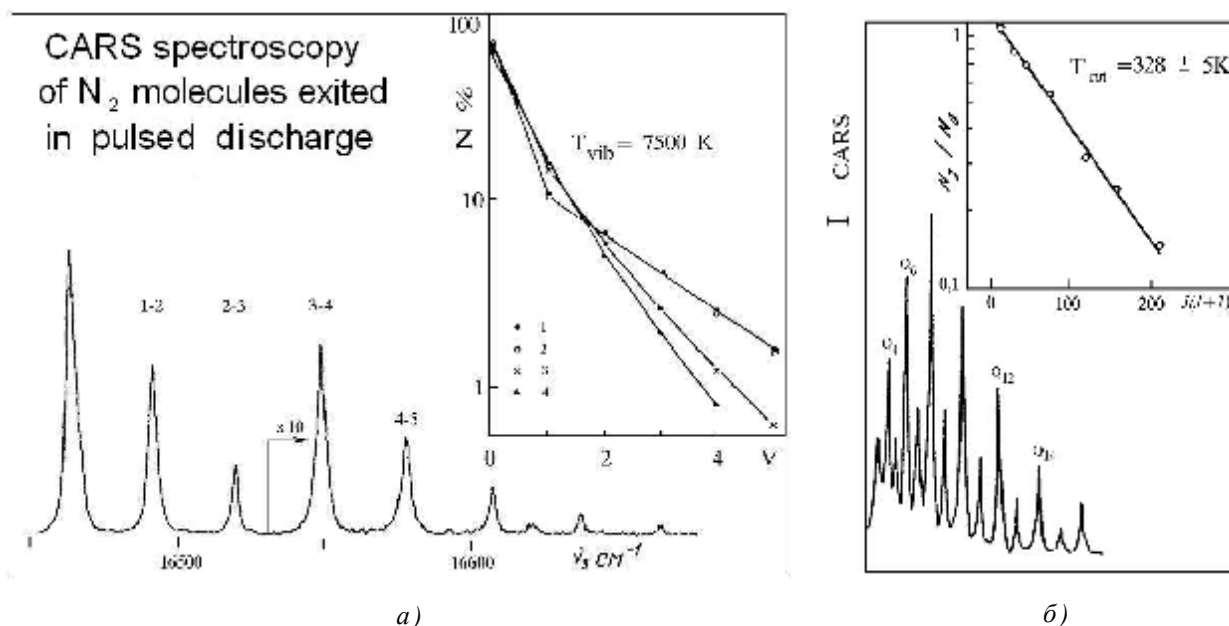


Рис. 2. Спектры колебательно-вращательных переходов молекул азота, возбужденных в разряде, и соответствующие функции распределения по колебательным (а) и вращательным (б) уровням энергии

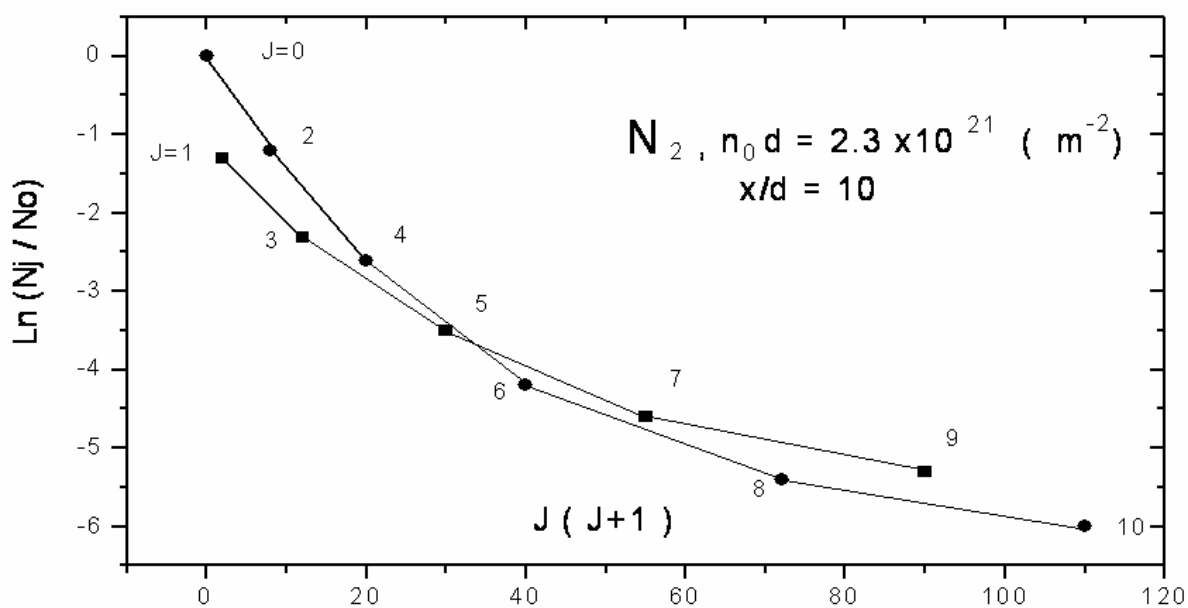


Рис. 3. Населенности вращательных уровней. Вращательные температуры не равны поступательной и, кроме того, различны для четных и нечетных спиновых модификаций молекул азота

В совместной измерительной компании ONERA (Франция), ИОФ РАН (Россия) и DLR (Германия), на стендах ONERA было промерено пространственное распределение температуры внутри камеры сгорания (жидкий O_2 /газообразный H_2) [5]. При диагностике турбулентных пламен по одной «рабочей» молекуле, в частности, по водороду, в течение теста весьма часто происходит потеря сигнала даже в одной и той же измерительной точке. Такое может случаться как за счет плохого смешения (нет водорода в точке измерения), так и за счет полного сгорания водорода (опять нет водорода в точке измерения). В первом случае в измерительном объеме не будет ни водорода, ни воды, тогда как во втором – пары воды должны присутствовать в значительном количестве. Поэтому мы применили комбинированное зондирование по двум «рабочим» молекулам сразу: горючее (водород) и продукт (вода). Одновременное КАРС-зондирование по молекулам H_2 и H_2O всегда дает информацию хотя бы по одной из молекул, и, следовательно, позволяет глубже и детальнее исследовать процессы смешения и горения. Отметим, что согласие между температурными профилями, полученными по H_2 и H_2O КАРС-спектрам (средние значения и стандартные отклонения),

было удовлетворительным, особенно в зоне, где сгорание частично закончено.

На рис. 5 представлены три КАРС-спектра молекул H_2 и H_2O , полученные последовательно в трех лазерных вспышках (10^{-8} сек) в одной и той же точке камеры сгорания, которые иллюстрируют расширенные возможности диагностики по двум «рабочим» молекулам.

На основе этих измерений были сделаны следующие заключения. Исследуемый поток был чрезвычайно турбулентным, что следует из величины флуктуаций, измеренных за одну лазерную вспышку («мгновенных») температур. Вдоль по газовому потоку стратификация значительна вблизи инжектора, но исчезает далее вниз по потоку по мере перемешивания компонентов.

Итак, представленные результаты показывают, что КАРС является мощным диагностическим инструментом. При этом успешному применению КАРС-диагностики к исследованиям технического горения должен предшествовать сбор основных молекулярных данных (как спектроскопических, так и кинетических), если для исследуемых пламен и «рабочих» молекул такие данные отсутствуют.

Исследовательская команда из ИОФ РАН обладает знаниями и опытом вкупе с

