

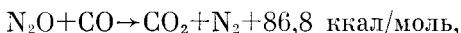
Н. Н. КУДРЯВЦЕВ, С. С. НОВИКОВ, И. Б. СВЕТИЧНЫЙ

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ
В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ ПОТОКЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ,
СОДЕРЖАЩЕЙ CO₂**

(Представлено академиком В. Н. Кондратьевым 22 IV 1974)

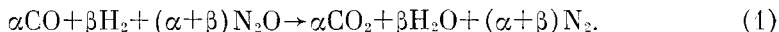
Создание лазерно-активных газовых сред и исследование их характеристик позволяет получить новые данные о кинетике неравновесных процессов. Для этого удобно использовать расширяющиеся газодинамические потоки и быстрые химические реакции.

Расширяющиеся газовые потоки применяются для создания газодинамических лазеров (1-4). Широко исследуются возможности образования лазерно-активных сред в ходе быстрых химических реакций для создания химических лазеров (5, 6). Высказываются идеи создания химико-газодинамических лазеров. Например, в работе (7) для этой цели предлагается использовать реакцию



протекающую в колебательно неравновесных условиях при адиабатическом расширении исходной смеси в сопле Лавала.

В данной работе на установке «ударная труба с соплом» исследованы условия возникновения инверсной населенности колебательных уровней молекул CO₂ в расширяющемся потоке продуктов реакции



Измерялся коэффициент усиления света зондирующего CO₂ лазера в колебательно неравновесном потоке продуктов реакции (1). В работе (8) аналогичная исходная смесь с соотношением компонент CO : N₂O : H₂ : He = 35 : 35 : 2 : 28 была использована в газодинамическом лазере на продуктах газовой детонации.

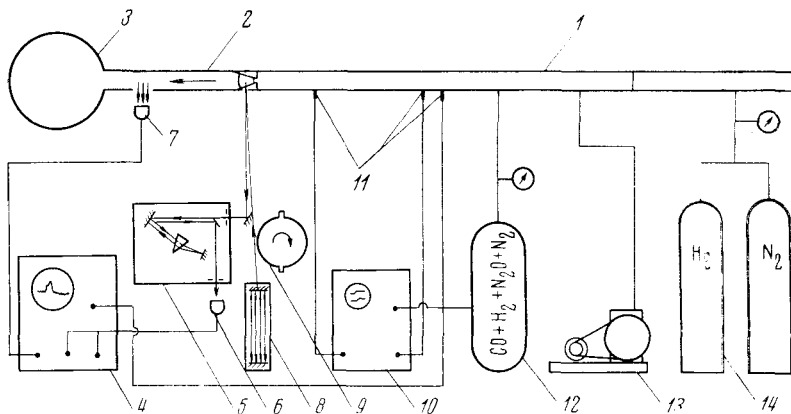


Рис. 1

Схема экспериментальной установки, использованной в данной работе, показана на рис. 1. Ударная труба (1) внутренним диаметром 80 мм и длиной 4,2 м соединялась с расширительной секцией (2). В секции расширения помещалось плоское клиновидное сопло с полууглом раскрытия 15° и регулируемым критическим сечением, высота которого могла меняться от 0 до 3 мм. Для создания необходимых начальных условий истечения между торцом ударной трубы и соплом устанавливалась диафрагма из отожженной меди толщиной 50 мкм. Измерительная аппаратура включала блок измерения скорости ударной волны (10, 11) и блок измерения параметров излучения (4–9). Измерение коэффициента усиления когерентного излучения с длиной волны $\lambda=10,6$ мкм производилось прямым методом, принципы которого описаны в (9, 10). Луч зондирующего CO_2 -лазера ЛГ-23 (8) дважды пересекал активный участок газового потока и, проходя через окно из сульфида цинка, попадал на входную щель монохроматора ИКМ-1 и регистрировался фотосопротивлением (6) на основе германия, легированного золотом. Зондирующий лазер работал в одномодовом режиме. Для получения нулевой линии луч периодически прерывался обтюратором (9) на 0,5 мсек. Второе окно из сульфида цинка, расположенное ниже по потоку, использовалось для регистрации собственного и.к. излучения с помощью второго фотосопротивления (7). Временное разрешение системы регистрации и.к. излучения составляло 0,05 мсек.

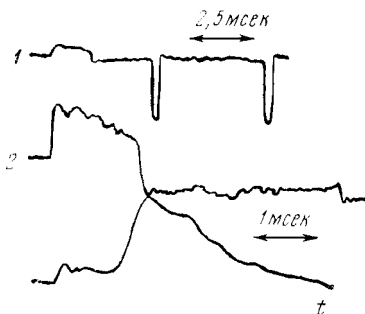


Рис. 2

Типичная осциллограмма записи усиленного излучения зондирующего лазера (лучи 1 и 2) и собственного и.к. излучения (луч 3) показана на рис. 2. Измерялось отношение $\Delta I/I_0$, где $\Delta I=I_1-I_0$; I_0 — интенсивность излучения зондирующего лазера, I_1 — интенсивность луча, прошедшего активный участок потока. Для получения большей информации о величине и форме сигнала ΔI регистрация I_1 дублировалась на втором канале пятилучевого осциллографа СИ-33 с большей скоростью развертки и большей чувствительностью.

Коэффициент усиления лазерного излучения определялся по формуле

$$G = \frac{1}{L} \ln \left(1 + \frac{\Delta I}{I_0} \right) \approx \frac{1}{L} \frac{\Delta I}{I_0}, \quad \frac{\Delta I}{I_0} \ll 1; \quad (2)$$

здесь L — длина пути лазерного луча в активной среде. Как показали контрольные опыты, влияние спонтанного излучения исследуемого газа на длине волны $\lambda \leq 6$ мкм на результаты измерения величины G было пренебрежимо мало.

Из осциллограммы, приведенной на рис. 2, видно, что интенсивность собственного и.к. излучения (луч 3) через промежуток времени $\tau \approx 2$ мсек. после начала истечения резко возрастает. Это, по-видимому, связано с возрастанием плотности газа в расширительной части установки.

По измеренной величине G рассчитывались относительная населенность лазерных уровней молекулы CO_2 и колебательная температура CO_2 в исследуемом потоке газа.

Для отработки методики проведена серия опытов по измерению коэффициента усиления когерентного излучения $\lambda=10,6$ мкм в смеси $m \text{CO}_2 + n \text{N}_2 + k \text{He}$, вытекающей из сопла ударной трубы. Температура и давление смеси перед соплом соответствовали условиям за отраженной ударной волной, рассчитанным по величине измеренной скорости ударной

5% CO ₂ + 45% N ₂ + 50% He				10% CO ₂ + 40% N ₂ + 50% He								20% CO ₂ + 30% N ₂ + 50% He							
$h^* = 0,9 \text{ мм}; A/A^* = 24$								$T_0 = 1500 \pm 100^\circ \text{ К}$								$h^* = 0,9 \text{ мм}; A/A^* = 24$			
$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$h, \text{ мм}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$h, \text{ мм}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$		
780	0,3	1740	0,5	700	0,32	1590	0,74	0,5	0,57	1,1	0,57	740	0,5	1600	0,35	1100	0,5	1740	0,64
1100	0,5	1740	0,32	980	0,44	1720	0,57	0,5	0,72	1,1	0,64	1110	0,6	1740	0,64	1200	0,74	1970	0,35
1240	0,73	1960	0,23	1230	0,41	1780	0,45	0,7	0,6	1,3	0,57	1200	0,74	1970	0,35	1400	0,39	2320	0,27
1300	0,74	1960	0,37	1300	0,53	1820	0,81	0,7	0,67	1,3	0,67	1400	0,39	2320	0,27				
1480	0,62	1960	0,5	1300	0,75	1980	0,78	0,9	0,72	1,5	0,47	1530	0,28						
1480	0,37	2000	0,27	1400	0,62	2140	0,46	0,9	0,77	1,5	0,57								
1740	0,24			1400	0,64	2420	0,39	1,0	0,61	2,0	0,31								
				1400	0,72			1,0	0,73	2,0	0,33								

Примечание. $p_0 = 6,0 \pm 1,5$ атм.; A/A^* — степень расширения потока в рабочем сечении.

волны в исходной смеси. Исследована зависимость коэффициента усиления G от соотношения компонент смеси, высоты критического сечения сопла h^* и температуры смеси перед соплом T_0 при постоянном давлении $p_0 \approx 6$ атм. Полученные экспериментальные данные (табл. 1) хорошо согласуются с результатами работ (^{3, 11-13}).

Таблица 2

10% CO + 10% N ₂ O + 80% N ₂		10% CO + 1% H ₂ + 11% N ₂ O + 78% N ₂		10% CO + 2% H ₂ + 12% N ₂ O + 76% N ₂				10% CO + 5% H ₂ + 15% N ₂ O + 70% N ₂		10% CO + 10% H ₂ + 20% N ₂ O + 60% N ₂	
$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$	$T_0, ^\circ\text{К}$	$G, \text{ м}^{-1}$
1850	0,15	2080	0,39	1880	0,35	2540	0,41	2200	0,5	2300	0,28
2000	0,15	2200	0,59	2000	0,48	2540	0,48	2350	0,32	2500	0,2
2000	0,25	2320	0,55	2050	0,32	2730	0,32	2350	0,5	2600	0,22
2150	0,1	2320	0,78	2100	0,7	2730	0,39	2450	0,68	2730	-0,1
2500	-0,15	2540	0,66	2150	0,59	2730	0,48	2450	0,73	2780	-0,15
2700	-0,19	2820	0,52	2300	0,62			1960	0,38		
		3300	0,18	2300	0,65						

Примечание. $p_0 = 10 \pm 1,5$ атм.; $h^* = 0,9$ мм; $A/A^* = 24$.

При исследовании колебательно неравновесного истечения молекул CO₂, образованных в результате реакции (1), стехиометрическая смесь CO и N₂O балластировалась химически инертным разбавителем (азотом или аргоном) до 80%. В части опытов в исходную смесь вводился молекулярный водород (до 10%) для ускорения реакции (1) (¹⁴) и для введения в продукты реакции молекулы воды, являющихся дезактиватором нижнего лазерного уровня молекул CO₂. Количество CO в исходной смеси составляло во всех опытах 10%. Исследованы смеси с начальным содержанием водорода 0; 1; 2; 5 и 10 процентов.

Температуру T_0 газа перед соплом рассчитывали, исходя из предположения о полноте химического превращения исходной смеси в области за отраженной ударной волной до начала истечения через сопло. Данные о скорости реакции (1) (¹⁴) и расчет времени существования горячей пробки оправдывают это предположение. В случае высокой температуры T_0 учитывалась также диссоциация молекул CO₂ и H₂O.

Проведены измерения коэффициента усиления когерентного излучения с $\lambda = 10,6$ мкм в расширяющихся продуктах реакции (1) в зависимости от T_0 и содержания водорода в исходной смеси при постоянном давлении $p_0 \approx 10$ атм. и высоте критического сечения сопла $h^* = 0,9$ мм. Результаты экспериментов представлены в табл. 2. В опытах наблюдалось усиление в определенном интервале температур T_0 для всех исходных смесей. Наибольшие значения коэффициента усиления G получены для исходной смеси с содержанием водорода в 1%.

Наименьшие значения G в узком интервале температур $T_0 = (2300 - 2800)^\circ\text{K}$ получены для смеси, содержащей 10% водорода, что объясняется заметной релаксацией верхнего лазерного уровня CO_2 при значительных количествах H_2O в продуктах реакции.

Из табл. 2 видно, что в случае исходной смеси без добавки водорода наблюдается усиление в интервале температур $T_0 = (1850 - 2150)^\circ\text{K}$.

Возможно, что несмотря на принятые меры по обезвреживанию ударной трубы и исходной смеси в исследуемом потоке содержались следы паров воды. В то же время нельзя исключать возможности неравновесного колебательного возбуждения CO_2 в ходе реакции.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
7 I 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. Г. Басов, В. Г. Михайлов и др., ЖТФ, т. 38, в. 12, 2031 (1968). ² В. К. Колюхов, А. М. Прохоров. Письма ЖЭТФ, т. 10, 84 (1969). ³ E. T. Gerry, Laser Focus, № 12, 27 (1970). ⁴ Г. И. Козлов, В. Н. Иванов, А. С. Кораблев, Письма ЖЭТФ, т. 17, в. 12, 651 (1973). ⁵ В. Л. Тальрозе, Кинетика и катализ, т. 5 (4), 11 (1964); О. М. Батовский, Г. К. Васильев, В. Л. Тальрозе, Тез. докл. на Международн. симпозиуме по химическим квантовым генераторам, М., 1969, стр. 4. ⁶ М. С. Джиджоев, В. Т. Платоненко, Р. В. Хохлов, УФН, т. 100, 641 (1970). ⁷ И. С. Заслонко и др., Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 2, 48 (1973). ⁸ Ю. А. Бохон, И. И. Давлетчин и др., В сборн. Краткие сообщения по физике, № 11, 1972. ⁹ Г. Хирд, Измерение лазерных параметров, М., 1970. ¹⁰ Г. В. Гембаржевский, Н. А. Генералов и др., ЖЭТФ, т. 65, 844 (1972). ¹¹ D. M. Kuehn, D. I. Monson, Appl. Phys. Lett., v. 16, 48 (1970). ¹² С. А. Лосев и др., Физика горения и взрыва, т. 9, № 4, 463 (1973). ¹³ G. Lee, F. E. Gowen, Appl. Phys. Lett., v. 18, 237 (1971). ¹⁴ L. Drummond, Austr. J. Chem., v. 21, 2631 (1968).