

Ю. И. ГРИНЬ, В. Г. ТЕСТОВ

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ РАСШИРЯЮЩЕМСЯ ПОТОКЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ, СОДЕРЖАЩЕЙ N₂O

(Представлено академиком Р. В. Хохловым 30 VII 1975)

Предложение об использовании сверхзвуковых расширяющихся потоков для создания инверсной населенности ^(1, 2) привело к созданию мощных газодинамических лазеров (ГДЛ) на СО₂. Наряду с ГДЛ в последние годы интенсивно исследуются химические лазеры ⁽³⁾ и предлагается создание их комбинации — химического ГДЛ ⁽⁴⁾.

Настоящая работа посвящена исследованию возможностей ГДЛ N₂O—N₂—He и химического ГДЛ N₂O—CO—He. Для проведения таких измерений весьма удобной является ударная труба в сочетании со сверхзвуковым плоским соплом, в которой длительность существования лазерной смеси определяется параметрами торможения и процессами взаимодействия отраженной ударной волны с контактной поверхностью. Строгое определение инверсной населенности в импульсном сверхзвуковом потоке N₂O за плоским соплом затруднительно из-за незначительных сведений о временах столкновительной релаксации, их температурных зависимостей, а также недостаточной изученности закономерностей, характеризующих импульсную струю.

Анализ результатов исследований процессов релаксации колебательной энергии рабочих уровней молекулы N₂O ⁽⁵⁻⁸⁾ показал, что экспериментальное исследование лазерных свойств целесообразно проводить на смесях N₂O—N₂(CO)—He. В этом случае для расчетов параметров торможения достаточно ограничиться известными приближенными соотношениями, выражающими температуру, плотность через число Маха М и постоянную адiabаты γ. Величину М вдоль сопла и время релаксации определяли из выражений

$$\frac{A}{A_{кр}} = \frac{1}{M} \left\{ \frac{2[1 + 1/2(\gamma - 1)M]}{\gamma + 1} \right\}^{(\gamma + 1)/2(\gamma - 1)}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1 - X_M}{\tau_{N_2O-N_2O}} + \frac{X_M}{\tau_{N_2O-M}}, \quad (2)$$

где X_M — молярная доля М-компоненты.

Для учета влияния температуры и давления на время релаксации верхнего уровня использовали соотношения

$$\tau_{N_2O-N_2O} = \frac{\exp(10,9/T^{1/2})}{25,7 \cdot p}, \quad \tau_{N_2O-N_2} = \frac{\exp(20,4/T^{1/2})}{p},$$

$$\tau_{N_2O-He} = \frac{\exp(10,74/T^{1/2})}{p}.$$

Экспериментальные данные по времени релаксации симметричного колебания в основном получены при T=293° К; нами принято τ_{10%} = 0,165 мксек. атм, которое для любого участка сверхзвуковой части сопла значительно меньше времени расширения.

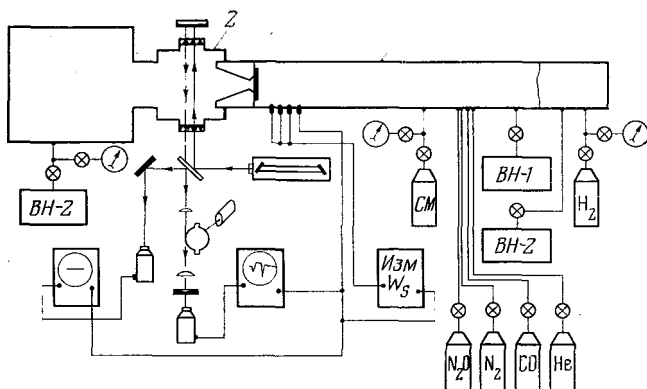


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

a

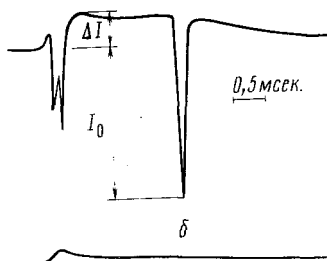


Рис. 2

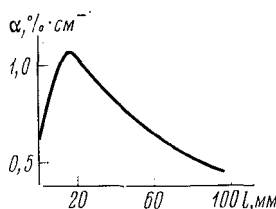


Рис. 3

Рис. 2. Осциллограммы изменения во времени интенсивности проходящего зондирующего луча 1 и сигнала спонтанного излучения 2 на расстоянии 15 мм от среза сопла

Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления α от расстояния l от среза

Для оценки верхнего предела усилительных свойств рассмотрим течение смеси 0,1 N₂O—0,2 N₂—0,7 He через клиновидное сопло (угол раскрытия 30°, высота критического сечения $h=1,3$ мм, отношение площадей $A/A_{кр}=5$).

Параметры торможения рассчитывали с учетом возбуждения вращательных и колебательных степеней свободы. Для $T=1400^\circ\text{K}$ и $p=7,8$ атм величина инверсии на срезе сопла составляет $1,2 \cdot 10^{-2}$ от концентрации молекул N_2O .

Используя выражение усиления слабого сигнала α в случае уширения за счет столкновений

$$\alpha = \frac{\lambda^2 g_{J+\Delta J}}{8\pi\tau_{\nu}O} \left(N_{00^01} e^{-\frac{F(J+\Delta J)hc}{kt}} - N_{10^00} e^{-\frac{F(J)hc}{kt}} \right) \quad (3)$$

(обозначения общепринятые), для наиболее интенсивной линии $P(20)$ получим величину α порядка $1,7\% \text{ см}^{-1}$.

Экспериментальные исследования инверсии для смесей N_2O-N_2-He , $N_2O-CO-He$ и $N_2O-N_2-CO-He$ проводили на установке, представленной на рис. 4.

Ударная труба 1 длиной 900 см соединялась с расширительной секцией — ресивером 2. На торце трубы в ресивере устанавливалось плоское клиновидное сопло с полууглом раскрытия 15° , размером критического сечения $1,3 \times 90 \text{ мм}^2$ и длиной 36 мм. На входе в сопло устанавливали диафрагму толщиной 15 мкм. Коэффициент усиления измеряли путем осциллографирования сигнала с (Ge—Au)-приемника на волне 10,9 и 10,6 мкм по изменению интенсивности при двойном прохождении области струи зондирую-

Таблица 1

Смесь $x\% \text{ N}_2\text{O} + y\% \text{ N} + z\% \text{ He}$													
$x=5$		$x=10$		$x=15$		$x=20$		$x=30$		$x=16,7$		$x=6,68$	
$y=25$		$y=20$		$y=15$		$y=10$		$y=0$		$y=33,3$		$y=13,32$	
$z=70$										$z=50$		$z=80$	
$T, ^\circ\text{K}$	$\alpha, \%$ $\cdot \text{cm}^{-1}$	$T, ^\circ\text{K}$	$\alpha, \%$ $\cdot \text{cm}^{-1}$	$T, ^\circ\text{K}$	$\alpha, \%$ $\cdot \text{cm}^{-1}$	$T, ^\circ\text{K}$	$\alpha, \%$ $\cdot \text{cm}^{-1}$	$T, ^\circ\text{K}$	$\alpha, \%$ $\cdot \text{cm}^{-1}$	$T, ^\circ\text{K}$	$\alpha, \%$ $\cdot \text{cm}^{-1}$	$T, ^\circ\text{K}$	$\alpha, \%$ $\cdot \text{cm}^{-1}$
1100	0,45	860	0,23	920	0,2	1040	0,19	1100	0,15	940	0,31	900	0,26
1240	0,58	1000	0,47	1090	0,43	1180	0,33	1180	0,19	1080	0,48	1070	0,43
1310	0,61	1270	0,91	1220	0,60	1260	0,38	1200	0,13	1230	0,62	1200	0,54
1430	0,43	1460	1,07	1340	0,71	1320	0,32			1350	0,69	1310	0,58
1470	0,34	1500	0,92	1370	0,58					1480	0,60	1450	0,40
1560	0,22	1540	0,5	1400	0,41					1540	0,48	1550	0,13

Таблица 2

10% N ₂ O+20% CO+70% He				(N ₂ O+N ₂ +He) _{опт} + +5% CO		(N ₂ O+N ₂ +He) _{опт} + +10% CO	
λ=10,9 мкм		λ=10,6 мкм		λ=10,9 мкм			
T, °K	α, %·см ⁻¹	T, °K	α, %·см ⁻¹	T, °K	α, %·см ⁻¹	T, °K	α, %·см ⁻¹
870	0,11	1060	0,094	930	0,24	930	0,19
930	0,19	1130	0,22	1060	0,41	1060	0,35
1040	0,26	1200	0,35	1200	0,58	1180	0,47
1100	0,20	1330	0,48	1300	0,65	1230	0,38
1130	0,15	1420	0,42	1440	0,53	1270	0,22
1270	0,047						

щего луча электроразрядного N_2O - или CO_2 -лазера. Для фиксирования нулевого уровня лазер модулировался с частотой 200 гц, при этом длительность калибровочного импульса составляла 0,11 мсек. Отсечку спонтанного ($\lambda \leq 7 \text{ мкм}$) излучения, интенсивность которого была достаточно велика (рис. 26), производили фильтром из InSb. Рабочую смесь приготавливали в смесительном баллоне при давлении 2 атм. Контрольный масс-спектрометрический анализ порций смеси в пяти, последовательных экспериментах показал, что состав смеси сохранялся с точностью не хуже 5%. Усиление определялось по отношению $\Delta I/I_0$, где I_0 — интенсивность зондирующего лазера, ΔI — приращение интенсивности при прохождении лучом инверсного участка струи. Как видно из рис. 2а, усиление имеет место в течение времени порядка 3,5 мсек. с резким нарастанием и длительным плавным спадом. Спад в усилении, по-видимому, обусловлен процессами диссоциации, а не изменением параметров газа при взаимодействии отраженной ударной волны с контактной поверхностью, так как в аналогичных измерениях на смеси $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—He}$ спада не наблюдалось.

Исследование зависимости коэффициента усиления от параметров торжонения и соотношения компонент смеси позволяет определить оптимальные условия получения максимальной инверсной населенности. Анализ экспериментальных результатов, представленных в табл. 1, показывает, что наибольшее усиление реализовано в смеси 0,1 N_2O —0,2 N_2 —0,7 He. Необходимо отметить, что усиление наблюдалось при отсутствии азота в исходной смеси, однако, возможно, что за счет термического разложения химически образованный азот участвовал в создании инверсной населенности. Для смеси N_2O — N_2 —He при увеличении температуры после достижения максимума, в отличие от смесей на CO_2 , происходит резкий спад в уси-

лении, что обусловлено лавинным характером процесса диссоциации молекулы N_2O . В этом случае происходит резкое уменьшение длительности импульса усиления и при скоростях ≥ 2 км/сек отсутствует даже поглощение, что указывает на полное разложение N_2O в отраженной ударной волне. По сравнению с молекулой CO_2 характеристики усиления существенно смещены в область более низких температур, что важно при практических применениях.

Для определения размеров зоны инверсии и расположения максимума в усилении были проведены измерения усиления на расстояниях 3–96 мм от среза сопла для оптимальной смеси (рис. 3). Исследование динамики истечения и геометрии потока в зависимости от γ позволило определить важнейший параметр лазерной среды — коэффициент усиления на единицу длины. Получено высокое значение коэффициента усиления $\alpha_{\max} = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ на расстоянии 1,5 см в области истечения струи в свободное пространство.

Исследование усилительных свойств смеси $N_2O-CO-He$, в которой возможно образование CO_2 за счет химических реакций, проводили на волнах 10,9 и 10,6 мкм; результаты представлены в табл. 2. Видно, что с появлением усиления на CO_2 происходит спад усиления на $\lambda = 10,9$ мкм. При температуре 900° K в смеси $0,1 N_2O-0,2 CO-0,7 He$, когда CO_2 практически отсутствовал, коэффициент усиления примерно в два раза меньше, чем в оптимальной смеси $0,1 N_2O-0,2 N_2-0,7 He$ при тех же самых параметрах торможения. Проведенные нами эксперименты по добавлению 10% CO к оптимальной смеси показали, что, в противоположность электроразрядной системе (⁹), улучшения параметров активной среды не наблюдается.

Авторы выражают благодарность С. А. Лосеву и Е. М. Кудрявцеву за обсуждение результатов исследований, а также М. М. Богородскому и И. А. Семиохину за проведение масс-спектрометрического анализа.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР
Москва

Поступило
16 VII 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. К. Конюхов, А. М. Прохоров, Письма ЖЭТФ, т. 3, 436 (1966). ² Н. Г. Басов, А. Н. Ораевский, В. А. Щеглов, ЖТФ, т. 37, 339 (1967). ³ М. С. Джиджоев, В. Т. Платоненко, Р. В. Хозлов, УФН, т. 100, 641 (1970). ⁴ И. С. Заслонко и др., Журн. прикл. мех. и тех. физики, № 2, 48 (1973). ⁵ G. J. Mullaney, H. G. Ahlstrom, W. H. Christiansen, IEEE J. Quant. Electronics, v. 7, 551 (1971). ⁶ J. T. Yardley, J. Chem. Phys., v. 49, 2816 (1968). ⁷ P. Borrell, G. E. Millward, J. Chem. Phys., v. 57, 462 (1972). ⁸ П. В. Слободская, Н. Ф. Ткаченко, Оптика и спектроскопия, т. 16, 195 (1969). ⁹ N. Djeu, T. Kan, G. Wolga, IEEE J. Quant. Electronics, v. 4, 783 (1968).