

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
УСИЛЕНИЯ СВЕТА В СМЕСЯХ $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}(\text{H}_2\text{O})$
ПРИ РАСШИРЕНИИ В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ**

Г. В. Гембаржевский, Н. А. Генералов, Г. И. Козлов

(Москва)

Сообщается о результатах экспериментального исследования коэффициента усиления света молекулами углекислого газа в различных смесях при их расширении через сверхзвуковое сопло, помещенное в торце ударной трубы. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных. Отмечено их удовлетворительное согласие.

Идея создания инверсной заселенности в газе при резком изменении температуры была высказана в статьях [1,2]. Использование для этой цели адиабатического расширения газовой смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ впервые было предложено в работах [3,4]. В дальнейшем были опубликованы численные расчеты параметров газодинамического лазера для конкретных газовых смесей. Экспериментальные данные, имеющиеся в литературе [5-10], относятся к широкому интервалу изменения концентраций CO_2 , N_2 , He , H_2O , чего нельзя сказать об интервале изменения температуры торможения ($T < 1800 \div 2000^\circ \text{K}$). Область изменения давления торможения $P = 2 \div 16 \text{ атм}$ при фиксированной температуре торможения $T = 1250^\circ \text{K}$ исследовалась в [8,10].

В настоящей работе были проведены измерения коэффициента усиления смеси $10\% \text{ CO}_2 + 40\% \text{ N}_2 + 50\% \text{ He}$ при сверхзвуковом расширении в широком интервале изменения условий эксперимента: температура торможения $T = 800 \div 3600^\circ \text{K}$, давление газа $P = 2.5 \div 40 \text{ атм}$, причем относительное сечение сопла принимало несколько фиксированных значений $S / S_* = 18.2, 36.2, 49, 59$, где S_* — критическое сечение сопла, а S — сечение в области измерений. Смесь $10\% \text{ CO}_2 + (90 - X)\% \text{ N}_2 + X\% \text{ H}_2\text{O}$ (где $X = 0 \div 5\%$) исследовалась в интервалах температуры торможения $T = 800 \div 2200^\circ \text{K}$ и давления торможения $P = 1.5 - 40 \text{ атм}$ при относительных сечениях сопла $S / S_* = 18.2, 36.2, 59$.

Полученные данные для коэффициента усиления сравниваются со значениями, которые рассчитаны по методу, предложенному ранее [11,12].

Коэффициент усиления указанных выше смесей экспериментально исследован на установке, включающей в себя ударную аэродинамическую трубу и оптическую систему. Ударная аэродинамическая труба состояла из собственно ударной трубы (длина 5 м, диаметр 80 мм), ресивера (длина 4 м, диаметр 60 см) и сверхзвукового сопла, помещенного в торце ударной трубы. Сопло осесимметричное, площадь критического сечения $S_* = 0.785 \text{ см}^2$, конфузорная часть округлена по радиусу $R = 0.5 \text{ см}$, диффузорная часть задана формулой

$$S / S_* = \begin{cases} 1 + 0.29l^2, & l < 5 \text{ см} \\ 4 + 0.7l + 0.0305l^2, & 5 \leq l \leq 32.5 \text{ см} \\ 59, & l > 32.5 \text{ см} \end{cases}$$

где l (см) — расстояние от критического сечения по оси сопла.

Перед экспериментом вход в сопло закрывался мембраной, что позволяло откачивать отдельно ударную трубу и ресивер до давлений, меньших чем $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. После откачки камера низкого давления ударной трубы наполнялась исследуемой смесью до давлений $P_1 = 15 \div 400$ мм рт. ст., измерявшихся по вакуумметру. Смесью желаемого состава приготавливалась в сосуде из нержавеющей стали; для перемешивания применялся небольшой встроенный вентилятор. Скорость натекания воздуха в сосуд менее 1.5 мм рт. ст./час.

Смесь, содержащая пары воды, составлялась следующим образом: в откачанный объем помещался сосуд с водой и термометром, по показаниям которого определялось давление насыщающих паров воды. Перемешивание CO_2 , N_2 , H_2O производилось за время более 2 час. После тщательного перемешивания газов смесь поступала в ударную трубу, где нагревалась до заданных условий в падающей и отраженной ударных волнах. После этого происходило ее расширение через сверхзвуковое сопло в ресивер. Система синхронизации позволяла запустить всю аппаратуру в нужный момент времени.

Коэффициент усиления измерялся следующим образом. Непрерывное излучение специально стабилизированного по питанию лазера ОКГ-15 проходило перпендикулярно потоку газа через смотровые окна ресивера из КСл и смотровые окна, расположенные в сопле (встроенные заподлицо с внутренней поверхностью сопла). Затем с помощью линзы излучение собиралось на приемник — фотосопротивление ($\text{Ge} - \text{Au}$, $T = 55^\circ \text{K}$).

Перед линзой помещена диафрагма, ограничивающая интенсивность спонтанного излучения исследуемой смеси. Сигнал с приемника подавался на осциллограф, который регистрировал лишь его переменную составляющую, т. е. превышение интенсивности света над уровнем постоянной мощности лазера за счет усиления в смеси. Уровень постоянной мощности лазера необходимо было измерить в момент определения коэффициента усиления с тем, чтобы учесть флуктуации мощности лазера. Для учета этой нестабильности генерации часть энергии лазера отводилась из пучка с помощью плоскопараллельной пластины, прерывалась обтюратором и регистрировалась приемником ($\text{Ge} - \text{Au}$) на осциллографе в момент истечения смеси через сопло. Такая схема позволяла регистрировать относительное усиление порядка 10^{-3} ($\Delta K \sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$).

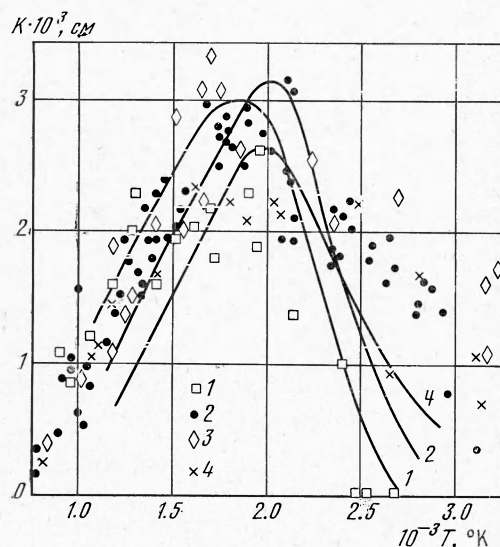
В условиях данного эксперимента в отличие от опытов, описанных в [13], спонтанное излучение не регистрировалось, так как использовался приемник с большей чувствительностью в области $\lambda = 10.6 \text{ мк}$, обусловленной более глубоким охлаждением активного элемента.

Температура и давление торможения вычислялись по измеренным начальному давлению и скорости падающей ударной волны с учетом возбуждения и диссоциации компонент. Скорость падающей ударной волны измерялась с точностью 1.5%, что соответствует $\sim 3\%$ в определении температуры торможения. Неопределенность в измерении начального давления смеси не превышала 1 мм рт. ст.

Результаты экспериментов по исследованию коэффициента усиления газовой среды K в зависимости от температуры торможения T , давления торможения P , относительного сечения сопла S / S_* для смеси 10% $\text{CO}_2 + 40\% \text{ N}_2 + 50\% \text{ He}$ представлены на фиг. 1, 2 и в таблице.

$T \cdot 10^{-3}, ^\circ \text{K}$	1.3	1.8	2.2	2.9	3.2	3.6
	1.65	2.7	2.5	1.9		0.65
$K \cdot 10^3, \text{ см}^{-1}$	1.15	2.9	2.9	1.65	1.15	0.8
		3.0	3.1			
$P, \text{ атм}$	2.9	4.8	6.9	12	15	19

На графике фиг. 1 по горизонтальной оси отложена температура торможения T , по вертикальной оси — коэффициент усиления K . Экспериментальные точки и расчетные кривые, обозначенные цифрами 1, 2, 3, 4,



Фиг. 1

относятся к сечениям сопла $S / S_* = 18.2, 36.2, 49, 59$ соответственно. Давление торможения определяется ударной адиабатой с начальным давлением смеси $P_1 = 167$ мм рт. ст.

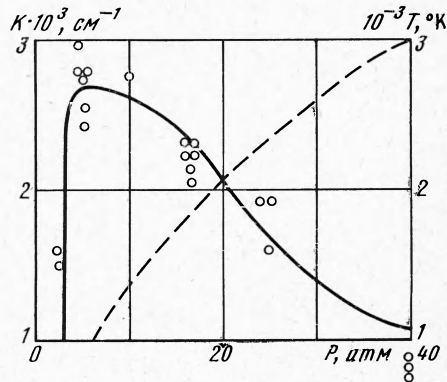
На графике фиг. 2 представлены экспериментальные (точки) и расчетные (сплошная линия) данные по зависимости коэффициента усиления K , отложенного по вертикальной оси слева, от давления торможения P , изменяющегося вдоль горизонтальной оси. При этом температура торможения фиксирована $T = 1900 \pm 100^\circ \text{K}$, а сечение сопла $S / S_* = 59$.

Кроме того, для удобства пользования данными фиг. 1 на этом графике приведена пунктирной линией зависимость температуры торможения T от давления торможения P для $P_1 = 167$ мм рт. ст. Температура торможения отложена по вертикальной оси справа.

В таблицу сведены экспериментальные данные по зависимости коэффициента усиления K от температуры торможения T для $S / S_* = 59$ при начальном давлении $P_1 = 50$ мм рт. ст. Соответствующее давление торможения P также приведено в таблице.

Коэффициент усиления K проходит через максимум $K = 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ при $T = 1800 - 2000^\circ \text{K}$. Причина такого поведения коэффициента усиления заключается в следующем. При повышении T от 800 до 1800°K увеличиваются заселенности асимметричного валентного и деформационного колебаний, и их разность растет. При дальнейшем повышении температуры скорость дезактивации асимметричного валентного колебания значительно увеличивается, в результате чего заселенность уровней этого вида колебаний растет не так быстро, как деформационного. Это приводит к падению величины K в области $T > 1800^\circ \text{K}$.

Кривая зависимости коэффициента усиления K от давления торможения P при фиксированной температуре торможения $T \approx 1900^\circ \text{K}$ также проходит через максимум $K = 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ при $P = 5$ атм. Поведение кривой объясняется тем, что с понижением давления уменьшается скорость колебательной релаксации и поэтому увеличиваются заселенности всех мод CO_2 . Инверсная заселенность и коэффициент усиления вначале также увеличиваются. Однако заселенность любой моды не может превышать

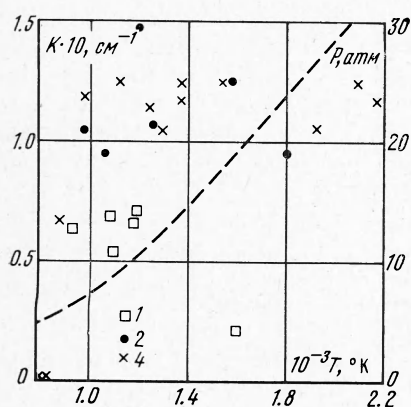


Фиг. 2

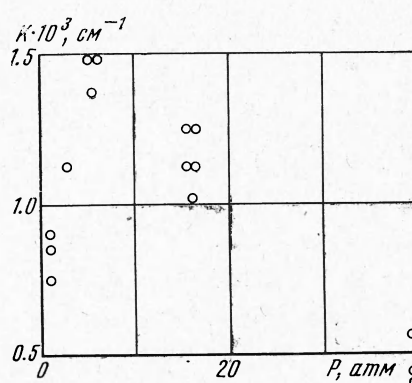
предельного значения, которое она принимает при температуре торможения. Поэтому, как только заселенность асимметричного колебания достигает этого предельного значения, дальнейшее уменьшение давления приводит к падению инверсной заселенности и коэффициента усиления (за счет увеличения заселенности деформационного типа колебаний).

Следует отметить, что в работах [8,10] обнаружено отсутствие зависимости K от P в области $P = 2-16$ атм при $T = 1250^\circ \text{K}$, причем конфигурация сопла отличалась от конфигурации, которая использовалась в данной работе.

Зависимость коэффициента усиления K от относительного сечения сопла S/S_* обнаруживает максимум при $S/S_* \sim 35$ для $T > 1800^\circ \text{K}$. При $T < 1800^\circ \text{K}$ коэффициент усиления не зависит от S/S_* в области $S/S_* = 18.2 \div 59$ в пределах точности измерений.



Фиг. 3



Фиг. 4

Результаты исследования смеси $10\% \text{CO}_2 + 90\% \text{N}_2$ приведены на фиг. 3, 4. По горизонтальной оси на фиг. 3 отложена температура торможения T , по вертикальной оси слева — коэффициент усиления K . Точки 1, 2, 4 получены в сечениях сопла $S/S_* = 18.2, 36.2, 59$ соответственно. Давление торможения P соответствует начальному давлению $P_1 = 167 \text{ мм рт. ст.}$ Для удобства величина P нанесена на график пунктирной линией, причем давление отсчитывается по вертикальной оси справа.

На фиг. 4 по горизонтальной оси отложено давление торможения P , а по вертикальной оси — коэффициент усиления K . Все точки относятся к температуре торможения $T = 1500 \pm 100^\circ \text{K}$ и к сечению сопла $S/S_* = 59$. Сравнение фиг. 1—4 показывает, что зависимость коэффициента усиления K от давления торможения P и от относительного сечения сопла S/S_* качественно повторяет зависимость $K = K(P, S/S_*)$ для смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ с той лишь разницей, что коэффициент K в этом случае значительно ниже. Экспериментальные данные по зависимости K от температуры торможения T отличаются от зависимости $K = K(T)$ для смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ кроме масштаба K тем, что зафиксировано уменьшение K при больших T лишь для малых S/S_* . Однако следует учесть, что максимальная температура в этих опытах $T = 2200^\circ \text{K}$.

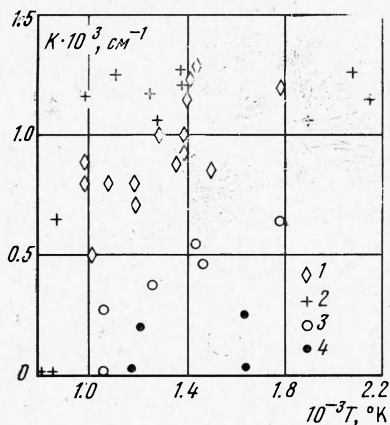
Кроме того, было проведено несколько экспериментов с использованием атмосферного воздуха вместо технического азота. В пределах ошибки эксперимента результаты опытов совпадают.

Подчеркнем, что полученные результаты для смеси $10\% \text{CO}_2 + 90\% \text{N}_2$ расходятся с имеющимися в литературе экспериментальными данными

[7,8,10]. Обнаружено усиление света в отсутствие He или H_2O , а в указанных выше работах зарегистрировано поглощение. Поэтому была принята серия контрольных экспериментов со специально очищенным газом.

Осушение технического газа (N_2 , CO_2) происходило в теплообменнике с жидким азотом. При этом углекислый газ осаждался на стенках теплообменника, так что для составления смеси использовались продукты возгонки.

Результаты контрольных экспериментов представлены на фиг. 5, где коэффициент усиления отложен на вертикальной оси, а температура торможения — по горизонтальной. Давление торможения соответствует начальному давлению $P_1 = 167$ мм рт. ст., сечение сопла $S/S_* = 59$.



Фиг. 5

при концентрации паров воды $X = 2 \div 5\%$ для $S/S_* = 59$ и $P = 167$ мм рт. ст. приведены на фиг. 5. Точки обозначены цифрами 3 ($X = 2\%$) и 4 ($X = 5\%$). Коэффициент усиления K оказался уменьшенным примерно в 3 ($X = 2\%$) и 8 ($X = 5\%$) раз по сравнению с коэффициентом K неосушенной смеси. Меньшие концентрации паров воды исследовать не удалось из-за недостатков методики приготовления рабочей смеси.

Здесь следует отметить, что результаты предварительных опытов показали отсутствие зависимости K от концентрации паров воды X в диапазоне $X = 0 \div 5\%$. Это объясняется тем, что пары воды адсорбируются поверхностью ударной трубы во время подготовки к опыту. Если перед опытом откаченную ударную трубу наполнить парами воды, а через $5 \div 10$ мин снова ее откачать до давления 0.5 мм рт. ст. и только после этого проводить эксперименты, то полученные результаты обнаруживают зависимость от концентрации паров воды в смеси. Отметим, что экспериментальные точки, относящиеся к смеси с содержанием воды 2 и 5% и частично для неосушенной смеси $10\% CO_2 + 90\% N_2$ (фиг. 5), получены с предварительным наполнением ударной трубы парами воды, как указано выше.

Представляет принципиальный интерес сравнить экспериментальные значения коэффициента усиления K с расчетными. При вычислении K применительно к условиям эксперимента со смесью $10\% CO_2 + (90 - X)\% N_2 + X\% H_2O$ была использована методика, предложенная в работах [11,12]. Для смеси $10\% CO_2 + 40\% N_2 + 50\% He$ согласно [13] было обнаружено хорошее количественное соответствие между эксперименталь-

ными с осушением смеси. Здесь же для сравнения приведены результаты экспериментов с неосушенной смесью, обозначенные цифрой 2.

Коэффициент усиления K для осушенной смеси в 1.5 раза ниже, чем коэффициент усиления для неосушенной смеси при $T = 1000 \div 1200^\circ K$ и примерно равен ему при $T > 1300^\circ K$. Этот результат позволяет сделать вывод, что в условиях данного эксперимента по исследованию смеси $10\% CO_2 + 90\% N_2$ влияние неконтролируемого количества паров воды было незначительным.

Результаты исследования смеси $10\% CO_2 + (90 - X)\% N_2 + X\% H_2O$

ным и теоретическими данными по коэффициенту усиления для расчета по указанному выше методу. Поэтому для смеси, содержащей гелий, была предпринята попытка построения приближенного аналитического расчета K [14]. При этом предполагалось, что истинные газодинамические параметры в сопле можно аппроксимировать таковыми для течения газа с постоянным показателем адиабаты. В этом случае коэффициенты кинетических уравнений становятся известными функциями, и для уравнений можно найти приближенное решение. Вероятности процессов взяты согласно работами [11,12].

Вычисление коэффициента усиления производилось по формуле [15]

$$K(\nu) = \frac{c^2 A_{\nu J}^{v'J'}}{8\pi^2 (\nu_{vJ}^{v'J'})^2} \left(\frac{n_{v'J'}}{g_{J'}} - \frac{n_{vJ}}{g_J} \right) S(\nu - \nu_0)$$

где $S(\nu - \nu_0)$ — форм-фактор линии излучения, $A_{\nu J}^{v'J'}$ — коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения, $n_{v'J'}$, n_{vJ} — заселенности колебательно-вращательных уровней, $g_{J'}$, g_J — статистические веса, $\nu_{vJ}^{v'J'}$ — частота перехода, c — скорость света.

Расчет проводился для центра линии $\nu = \nu_0$, при этом считалось, что $A = 0.2 \text{ сек}^{-1}$. Контур линии в условиях эксперимента был смешанным, вероятности столкновительного уширения взяты из работы [15].

Теоретические данные на графиках фиг. 1, 2, показанные сплошными линиями, представлены для линии $P 20$. При изменении вращательного квантового числа J на две единицы $\Delta J = \pm 2$ ($P 18, 22$) теоретические данные по коэффициенту усиления K изменяются примерно на 20%, что соответствует разбросу экспериментальных данных.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных по смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ (фиг. 1, 2) позволяет констатировать не только качественное, но и хорошее количественное соответствие.

В случае смеси 10% $\text{CO}_2 + 90\% \text{N}_2$ эксперимент обнаруживает значительное усиление, а расчет согласно работам [11,12] предсказывает поглощение $K \simeq -5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. При этом поглощение сохраняется до концентраций паров воды $X = 0.12 \div 0.3\%$ (для $S/S_* = 18 \div 59$). Это расхождение объясняется либо заниженным значением вероятности дезактивации деформационного типа колебаний молекулы CO_2 , использованным при расчете (при более высоком значении вероятности инверсия получена в работе [17]), либо примесями. Из них наиболее вероятной примесью в условиях данного эксперимента являются пары масла.

Для смеси 10% $\text{CO}_2 + (90 - X)\% \text{N}_2 + X\% \text{H}_2\text{O}$ при $X = 2 \div 5\%$ наблюдается количественное соответствие теоретических и экспериментальных данных.

Полученные результаты позволяют заключить, что схема численного [11,12] и предложенного аналитического расчета верна.

Совокупность констант скоростей реакций, предложенная в работах [11,12], для смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ (H_2O) достаточно точно описывает систему при больших концентрациях гелия ($\sim 50\%$) и при концентрациях паров воды $X \geq 2\%$.

Для описания системы $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ в области низких концентраций воды, возможно, следует исправить константу скорости дезактивации деформационного типа колебаний молекулы CO_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г., Ораевский А. Н. Получение отрицательных температур методом нагрева и охлаждения системы. ЖЭТФ, 1963, т. 44, вып. 5.
2. Hurler I. R., Hertzberg A. Electronic population inversions by fluid-mecanical techniques. Phys. Fluids, 1965, vol. 8, No. 9.
3. Конюхов В. К., Прохоров А. М. Способ получения инверсной населенности. Авторское свидетельство № 223954, заявлено 19/II 1966, заявки 113424/26-25, Б. И. 1968, № 25.
4. Конюхов В. К., Прохоров А. М. Инверсная населенность при адиабатическом расширении газовой смеси. Письма в ЖЭТФ, 1966, т. 3, вып. 11.
5. Kuehn D. M., Monson D. I. Experiments with a CO₂ gas-dynamic laser. Appl. Phys. Letter, 1970, vol. 16, No. 1.
6. Дронов А. П., Дьяков А. С., Кудрявцев Е. М., Соболев Н. Н. Газодинамический CO₂ лазер с истечением нагретой в ударной трубе рабочей смеси через щель. Письма в ЖЭТФ, 1970, т. 11, вып. 11.
7. Конюхов В. К., Матросов И. В., Прохоров А. М., Шалунов Д. Т., Широков Н. И. Колебательная релаксия молекул CO₂ и N₂ в расширяющейся сверхзвуковой струе газа. Письма в ЖЭТФ, 1969, т. 10, вып. 2.
8. Lee G., Gowen F. E. Gain of CO₂ gasdynamic lasers. Appl. Phys. Letter, 1971, vol. 8, No. 6.
9. Gerry E. T. The gas dynamic lasers. Laser Focus, 1970, vol. 6, No. 12.
10. Lee G., Gowen F. E., Hagen I. R. Wain and power of CO₂ gasdynamic laser. AIAA Journal, 1972, vol. 10, No. 1.
11. Генералов Н. А., Козлов Г. И., Селезнева И. К. Об инверсной заселенности молекул CO₂ в расширяющихся потоках газа. М., Ин-т проблем механ., 1971 (Препринт № 2).
12. Генералов Н. А., Козлов Г. И., Селезнева И. К. Об инверсной заселенности молекул CO₂ в расширяющихся потоках газа. ПМТФ, 1971, № 5.
13. Гембаржевский Г. В., Генералов Н. А., Козлов Г. И., Ройтенбург Д. И. О коэффициенте усиления света в смеси CO₂ + N₂ + Ne при ее расширении в сверхзвуковом сопле. ЖЭТФ, 1972, т. 62, вып. 3.
14. Гембаржевский Г. В. Приближенное определение инверсной заселенности и коэффициента усиления газа при адиабатическом расширении в сопле. ПМТФ, 1973, № 3.
15. Patel C. K. N. Continuous — wave laser action on vibrational rotational transitions of CO₂. Phys. Rev., 1964, vol. 136, No. 5A.
16. Gerry E. T., Leonard D. A. Measurement of 10,6μ CO₂ laser transition probability and optical broadening cross sections. Appl. Phys. Letter, 1966, vol. 8, No. 9.
17. Басов Н. Г., Михайлов В. Г., Ораевский А. Н., Щеглов В. А. Получение инверсной населенности молекул в сверхзвуковом потоке бинарного газа в сопле Лаваля. Ж. техн. физ., 1968, т. 38, вып. 12.