

Принимая во внимание полученные данные, представляется реальным достижение достаточно большого коэффициента усиления порядка 10^{-3} см^{-1} и создание лазера на колебательно-вращательных переходах молекулы HD.

Отметим, что для молекулы HD довольно велики вероятности переходов с $\Delta v=2, 3, 4$, например $A_{20} \sim A_{10}$. Следовательно, можно надеяться на получение достаточно больших коэффициентов усиления и в более коротковолновой области.

Автор благодарит А. А. Мака и С. Е. Потапова за обсуждение проведенных оценок.

Литература

- [1] Н. Г. Басов, А. Н. Ораевский, А. Ф. Сучков. Письма ЖЭТФ, 16, 301, 1972.
 [2] Н. Н. Соколов, В. В. Соколов. Усп. физ. наук, 110, 191, 1973.
 [3] A. R. W. McKellar. Canad. J. Phys., 52, 1144, 1974.
 [4] С. Е. Треанор, J. W. Rich, R. G. Rehm. J. Chem. Phys., 48, 1728, 1968.
 [5] В. М. Норкин, Н. Л. Чен. J. Chem. Phys., 57, 3164, 1972.
 [6] D. A. Jennings, W. Braun, H. P. Broida. J. Chem. Phys., 59, 4305, 1973.

Поступило в Редакцию 20 ноября 1975 г.
 В окончательной Редакции 4 января 1978 г.

УДК 535.34 : 621.373 : 535

ОСЛАБЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА НА HF В ОБЛАСТИ 2.7—3.3 мкм В АТМОСФЕРЕ

Г. Ф. Банах, О. К. Воицеховская и И. И. Ипполитов

В последние годы большое развитие получили химические лазеры на молекулах фтористого водорода. Эти лазеры обладают богатым спектром генерируемых длин волн — от 2.7 до 3.3 мкм. Спектр генерации HF-лазеров исследуется в целом ряде работ [1-6]. В работе [6] установлено, что генерация происходит на P-полосах с 1—0 по 5—4, причем самой интенсивной является полоса 2—1. Интерес к HF-лазерам обусловлен их мощностью, а также тем, что некоторые линии попадают в «окна» прозрачности атмосферы, являясь перспективными для целей атмосферной оптики. Целью настоящей работы является изучение именно таких линий.

Для оценки пропускания излучения HF-лазера в атмосфере было рассчитано поглощение водяным паром и углекислым газом как основными поглощающими компонентами атмосферы в данной области длин волн. Основной вклад в поглощение излучения водяным паром вносят линии колебательно-вращательных полос ν_1, ν_2 , а также полосы первого обертона основного колебания $2\nu_2$, «горячих» полос 030—010, 011—010, 110—010 основного изотопа. Кроме этого, здесь присутствуют линии полос $\nu_1, \nu_2, 2\nu_2$ изотопов $\text{H}_2\text{O}^{17}, \text{H}_2\text{O}^{18}$. Параметры колебательно-вращательных линий водяного пара (центры линий, полуширины и интенсивности), необходимые для расчета поглощения, брались из работы [7]. За поглощение углекислым газом в интересующей нас области ответственны следующие колебательно-вращательные полосы: $00^0 0-02^0 1$, $00^0 0-10^0 1$ и «горячая» полоса $01^0 0-03^0 1$ основного изотопа C^{12}O_2 . Поглощением полос $00^0 0-02^0 1$ и $00^0 0-10^0 1$ изотопа C^{13}O_2 можно пренебречь, так как концентрация этого изотопа в атмосфере составляет 0.00663 г/м^3 , а концентрация C^{12}O_2 равна 0.616 г/м^3 . При расчете предполагалось, что линии CO_2 имеют постоянную полуширину, равную 0.07 см^{-1} [8]. Интенсивности линий P-ветви CO_2 и центры линий рассчитывались по формулам

$$S = \frac{\alpha \nu}{Q_R \nu_0} \exp \left\{ -\frac{hcF_v(J)}{kT} \right\} S(J, l), \quad (1)$$

$$\nu = \nu_0 + \{B_v J'(J'+1) - D_v J'^2 (J'+1)^2\} - \{B_v J(J+1) - D_v J^2 (J+1)^2\}, \quad (2)$$

где α — интегральная интенсивность полосы, $F_v(J)$ — вращательная энергия, $S(J, l)$ — сила линии, B_v, D_v, B_v', D_v' — вращательные постоянные для нижнего и верхнего колебательных состояний, ν_0 — центр колебательного перехода, Q_R — вращательная статистическая сумма. Необходимые для расчетов по формулам (1) и (2) величины приведены в табл. 1 [9-14].

Кроме того, в исследуемой области была проведена оценка поглощения излучения метаном (CH_4) и закисью азота (N_2O). Параметры линий этих газов приведены в работе [14].

Т а б л и ц а 1
 Параметры полос углекислого газа в области 2.7 мкм

Переход	$\nu_0, \text{см}^{-1}$	Район	$B_p, \text{см}^{-1}$	$D_p, \text{см}^{-1}$	$B_{p'}, \text{см}^{-1}$	$D_{p'}, \text{см}^{-1}$	$\alpha, \text{см}^{-2} \cdot \text{атм}^{-1}$
00 ⁰⁰ —02 ⁰¹	3613.03	2.7	0.391125	$13.5 \cdot 10^{-6}$	0.388665	$16 \cdot 10^{-6}$	27.84
00 ⁰⁰ —10 ⁰¹	3714.56	2.7	0.391125	$13.5 \cdot 10^{-6}$	0.387475	$16 \cdot 10^{-6}$	42.3
01 ¹⁰ —03 ¹¹	3580.327	2.7	0.390935	$13.74 \cdot 10^{-6}$	0.38823	$15.3 \cdot 10^{-6}$	2.6134

При расчете коэффициента поглощения предполагалось, что контур линий дисперсионный

$$K(\nu) = \sum_i \frac{S_i}{\pi} \frac{\gamma_i}{[(\nu - \nu_{0i})^2 + \gamma_i^2]} \quad (3)$$

где ν_{0i}, S_i, γ_i — центр, интенсивность, полуширина линии соответственно.

Вычисленные по формуле (3) коэффициенты поглощения излучения лазера на HF водяным паром, углекислым газом, метаном и закисью азота помещены в табл. 2. В табл. 2 опущены все линии HF, имеющие коэффициент поглощения водяным паром больше, чем $2.305 \text{ см}^2/\text{г}$ [так как пропускание $T(\nu)$ будет меньше 0.1 при данных условиях]. Как видно из табл. 2, поглощение углекислым газом для интересующих нас линий можно не учитывать. Расчет показал, что для длин волн $> 2.8 \text{ мкм}$ коэффициент поглощения чрезвычайно мал, для длин волн $< 2.8 \text{ мкм}$ коэффициент поглощения углекислым газом значителен, но в этой области излучение полностью поглощается водяным паром. Коэффициенты поглощения метаном и закисью азота для линий излучения, близких к линиям поглощения данных газов, велики. Но так как эти газы имеют очень малую среднюю концентрацию в атмосфере (метан — 0.00108 г/м^3 , закись азота — 0.00052 г/м^3), то на пропускание данных линий излучения они оказывают незначительное влияние для расстояния 1 км в атмосфере. Несколько ослабляется только линия $P_5(4)$ за счет поглощения метаном $T_{\text{CH}_4} = 0.98$. С использованием данных в табл. 2 коэффициентов поглощения было рассчитано спектральное пропускание атмосферы.

Т а б л и ц а 2
 Коэффициенты поглощения и пропускание линий излучения HF-лазера

Идентификация	$\nu, \text{см}^{-1}$	$K_\nu, \text{см}^2/\text{г}$				T_1	T_2	T	
		H ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O				
1—0	$P(10)$	3489.67	1.292	$1.659 \cdot 10^{-5}$	—	—	0.275	0.895	0.246
	$P(11)$	3436.08	1.387	$5.918 \cdot 10^{-6}$	—	~8.2	0.249	0.861	0.214
	$P(12)$	3381.45	0.227	$3.029 \cdot 10^{-6}$	—	~8.8	0.794	0.852	0.676
	$P(14)$	3269.85	0.645	$< 10^{-6}$	—	—	0.525	0.869	0.456
	$P(15)$	3212.88	1.206	$< 10^{-6}$	—	—	0.299	0.878	0.263
2—1	$P(8)$	3435.10	0.237	$5.836 \cdot 10^{-6}$	—	~22.5	0.786	0.869	0.683
	$P(13)$	3176.62	0.751	$< 10^{-6}$	~0.5	—	0.472	0.887	0.419
3—2	$P(5)$	3417.99	1.863	$4.616 \cdot 10^{-6}$	—	~18.1	0.156	0.852	0.133
	$P(6)$	3373.32	0.132	$2.789 \cdot 10^{-6}$	—	~9.4	0.878	0.852	0.748
4—3	$P(5)$	3262.53	1.105	$< 10^{-6}$	—	—	0.331	0.869	0.288
	$P(7)$	3175.34	0.352	$< 10^{-6}$	~2.4	—	0.705	0.887	0.625
	$P(8)$	3130.09	0.297	$< 10^{-6}$	~55.3	—	0.748	0.887	0.663
5—4	$P(4)$	3150.70	0.146	$< 10^{-6}$	~224.5	—	0.869	0.887	0.771

Спектральное пропускание атмосферы в данной области практически будет зависеть только от поглощения водяным паром и рассеяния на атмосферных аэрозолях (молекулярное рассеяние много меньше и его можно не принимать в расчет). Выражение для спектрального пропускания записывается в виде

$$T(\nu) = T_1 T_2 = e^{-(\tau_{\text{погл.}} + \tau_{\text{расс.}})}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{погл.}} = k_{\text{H}_2\text{O}} u = k_{\text{H}_2\text{O}} 0.1 \rho l$, $\tau_{\text{расс.}} = k_{\text{р}} l$, u — осажденный слой в г/см^2 , $k_{\text{H}_2\text{O}}$ — коэффициент поглощения в $\text{см}^2/\text{г}$, ρ — концентрация в г/м^3 , l — длина пути в км, $k_{\text{р}}$ — коэффициент

рассеяния в км^{-1} . Значения коэффициентов рассеяния для наиболее вероятных параметров микроструктуры аэрозоля были взяты из работы [15]. Расчет $T(\nu)$ был выполнен для постоянного давления $P=1$ атм и температуры 300 К. Значение $u=1$ г/см², что соответствует расстоянию $l=1$ км в атмосфере при концентрации водяного пара $\rho=10$ г/м³. Полученные значения $T(\nu)$ приведены в трех последних столбцах табл. 2. Величина T_1 обозначает пропускание при учете только молекулярного поглощения водяным паром, T_2 — только аэрозольное рассеяние, T учитывает оба эти фактора. Для линии $P_5(4)$ величина T приведена с учетом поглощения метаном.

Как видно из табл. 2, для расстояния 1 км в атмосфере значение T_2 меняется незначительно в зависимости от длины волны, т. е. аэрозольное рассеяние является медленно меняющейся функцией длины волны. Значение T_1 , напротив, меняется очень резко в зависимости от длины волны, образуя «микроокна» прозрачности для некоторых линий излучения ИФ-лазера. Меньше всего ослабляются следующие шесть линий: $P(12)$ полоса 1—0, $P(8)$ 2—1, $P(6)$ 3—2, $P(7)$, $P(8)$ 4—3, $P(4)$ 5—4. Прием линия $P(8)$ 2—1 по классификации работы [6] очень интенсивна в излучении. Все шесть линий можно считать перспективными для распространения в атмосфере, поскольку каждая из линий может иметь значительную интенсивность (у разных авторов получены различные по структуре и интенсивности спектры генерации [1—6]). Для сравнения можно привести значение пропускания излучения мощного лазера на CO_2 в области 10.6 мкм: оно составляет 0.76 на расстоянии 1 км [16]. Следовательно, величины коэффициентов пропускания сопоставимы для этих двух лазеров. Полученные результаты находятся в качественном согласии с выводами работ [17, 18].

Литература

- [1] J. Wilson, J. Stephenson. *Appl. Phys. Lett.*, 20, 64, 1972.
- [2] О. М. Баговский, В. И. Гурьев. *Квант. электрон.*, 1, 676, 1974.
- [3] L. D. Hess, J. Chem. Phys., 55, 2466, 1971; *J. Appl. Phys.*, 43, 1157, 1972; *Appl. Phys. Lett.*, 19, 1, 1971.
- [4] Г. Г. Долгов-Савельев, А. А. Подмиогин. *Опт. и спектр.*, 32, 214, 1972.
- [5] N. R. Greeiner. *J. Quant. Electron.*, QE-8, 872, 1972.
- [6] N. G. Basov, V. T. Galochkin, V. I. Igoshin, L. V. Kulakov, E. P. Markin, A. I. Nikitin, A. N. Oraevsky. *Appl. Optics*, 10, 1814, 1971.
- [7] D. M. Gates, E. F. Calfee, D. W. Hansen, W. S. Benedict. Line positions, strengths and half-widths for water vapor bands ν_1 , $2\nu_2$ and ν_3 in interval 2857 to 4444 cm^{-1} . NBS, Monograph № 71, 1, 1963.
- [8] G. Yamamoto, M. Tanaka, T. Aoki. *JQSRT*, 9, 371, 1969.
- [9] С. С. Пеннер. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. ИЛ, М., 1963.
- [10] J. A. Howe. *J. Mol. Spectr.*, 19, 224, 1966.
- [11] W. R. Stull, P. J. Wyatt, G. H. Plass. *Appl. Optics*, 3, 243, 1964.
- [12] В. М. Осипов. Автореф. канд. дисс., Л., 1971.
- [13] H. R. Gordon, K. K. McSubbin. *J. Mol. Spectr.*, 19, 137, 1966.
- [14] R. A. McClatchey, W. S. Benedict, S. A. Clough, D. E. Burch, R. F. Calfee, K. Fox. AFCL, Atmospheric Absorption Line Parameters Compilation. Environmental research papers, № 434, 1973.
- [15] В. Е. Зуев. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. «Сов. радио», М., 1970.
- [16] A. D. Wood, H. Samas, E. T. Gerry. Effect of 10.6 μ Laser Induced Air Chemistry on Atmospheric Refractive Index. AV CO Everett Research Laboratory, Rep. 350, 1970.
- [17] R. K. Seals. *Appl. Optics*, 11, 2979, 1972.
- [18] J. Y. Wang. *Appl. Optics*, 13, 56, 1974.

Поступило в Редакцию 19 ноября 1976 г.
В окончательной редакции 7 декабря 1977 г.