

关于高压 CO 激光频率 连续调谐的可能性问题

王裕民 归振兴 张顺怡 陈宇星*

(中国科学院上海光机所)

提要: 通过增益的计算表明, 由于 R 支及 P 支的共振自吸收, CO 激光器不可能通过增高气压实现频率的连续调谐。

Possibility about the continuously tuning of CO laser at high pressure

Wang Yumin, Gui Zhenxin, Zhang Shunyi, Chen Yuxin

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: On the basis of gain coefficient calculation it is shown that the frequency of the CO laser can not be continuously tuned over $5\sim 8\mu\text{m}$ region by means of increasing its pressure because of the resonant absorption of the R and P branches.

一、引言

自 CO 激光器问世以来, 不断有人提出它的可调谐的设想, 比如 Center 提出^[1] 在 10 atm 下, $5\sim 6\text{mm}$ 范围内有连续调谐的可能性; Birbaum 预言^[2], CO 激光器的可调谐波段为 $4.8\sim 8.5\mu\text{m}$; Walther 也提出在 $5\sim 8\mu\text{m}$ 的波段内可能实现连续调谐^[3]。1982 年 Bosov^[4] 等人也计算了在 0.5 或 1atm 下, 由于谱线重迭对 CO 激光增益的影响。我们用最近发表的压力加宽实验数据^[5] 和 CO 分子 $+\Sigma_g$ 态的分子常数^[6], 考虑了所有可能的 CO 谱线重迭, 计算了 15Torr 到 10atm 下的振

转谱线增益。结果表明它是不可用压力加宽的办法使频率连续调谐的。

二、计算考虑

CO 分子只有一个振动模式, 不同振动态的 P 支或 R 支在某些波长上又互相交错, 图 1 是 CO 激光器不同振转跃迁的增益谱示意图, 从图中可以看出, 对一个 $v+1\rightarrow v$ 跃迁的 P 支混入了更高振动能级的 R 支。在低气压时, 除个别线外(如 $P_{12-11}(16)$ 与 $P_{17-16}(23)$) 各条 P 支及 R 支谱线轮廓不发生交迭, 在高

收稿日期: 1984 年 7 月 17 日。

* 哈尔滨科技大学毕业生。

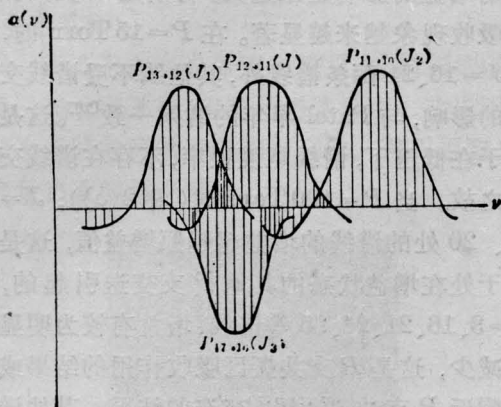


图1 CO分子不同振转跃迁光谱增益示意图

气压下,将有更多的R线与P线轮廓交迭。由于这种交迭,一般发生在谱线的“首”或“尾”(对振转动量子数一般有 $P_{v+1 \rightarrow v}(J)$ 与 $P_{v \rightarrow v-1}(J+6)$ 和 $P_{v+2 \rightarrow v+1}(J-6)$ 产生交迭)^[6],从而导致P支线的增益减少或增加。

谱线增益系数由下面的公式计算:

$$\alpha_{v+1, J' \rightarrow v, J}(\nu) = \frac{A_{10} \tilde{\nu}}{8\pi\omega_{10}^3} \cdot \frac{B_{v+1}}{T} \times \left\{ \frac{J}{J+1} \right\} (v+1) (N_v) \times e^{-\frac{B_v J(J+1)}{T}} \cdot \left[\frac{N_{v+1}}{N_v} \times e^{-\frac{(B_{v+1} J'(J'+1) - B_v J(J+1))}{T}} - 1 \right] \cdot S(\nu_{v+1, J}, \nu) \quad (1)$$

对P支取{ }上面的J值,对R支取下面的J值。式中 A_{10} 为振动能级 $1 \rightarrow 0$ 的自发辐射系数; ω_{10} 为振动能级 $1 \rightarrow 0$ 的跃迁频率; $\tilde{\nu}$ 为振动跃迁谱线的中心频率; B_{v+1} 、 B_v 分别为 $v+1$ 、 v 能级的转动常数; N_{v+1} 、 N_v 分别为 $v+1$ 、 v 能级的粒子数密度; v 为振动量子数; J 为转动量子数; $\rho(\nu_{v+1}, J, \nu)$ 为谱线的线型因子。设 $B_v = B_{v+1} = B$,以及代入有关常数后(1)式可以写成:

$$\alpha_{v+1, J' \rightarrow v, J}(\nu) = \frac{30 \cdot 3 \tilde{\nu}_{v+1, J}}{8\pi 214 I^3} \cdot \frac{2.778}{T}$$

$$\times \left\{ \frac{J}{J+1} \right\} (v+1) \cdot N_v \times e^{-\frac{2.778 J(J+1)}{T}} \cdot \left[\frac{N_{v+1}}{N_v} \times e^{\left\{ \frac{2 \times 2.778 J/T}{-2 \times 2.778 (J+1)/T} \right\}} - 1 \right] \times S(\nu_{v+1, J}, \nu) \quad (2)$$

在忽略了 $V-T$ 驰豫影响后:

$$N_v \propto \frac{1}{v+1}$$

则:
$$\frac{N_{v+1}}{N_v} \sim \frac{v+1}{v+2}$$

在低压下,跃迁谱线的轮廓是属于Doppler展宽:

$$S(\nu - \nu_0) = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\Delta \nu_D} \times \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu_D} \right)^2 \right]$$

$$\frac{\Delta \nu_D}{\nu_0} = \sqrt{8 \ln 2} \left(\frac{KT}{MC^2} \right)^{1/2} = 7.15 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}$$

当压力逐渐加大,压力加宽越来越起作用,线型因子由Voigt线型给出,它是Doppler加宽与Lorentz加宽的卷积,对于Voigt线型我们利用解析形式^[7]

$$H(\xi, \eta) = \frac{\Delta \nu_D}{\Delta \nu_V} \left[[1 - \xi] \exp(1 - \eta^2 \ln 2) + \frac{1}{\sqrt{\pi \ln 2}} \cdot \frac{\xi}{1 + \eta^2} \right]$$

$$\rho(\xi, \eta) = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\Delta \nu} H(\xi, \eta)$$

其中 $\xi = \Delta \nu_L / \Delta \nu_V$, $\eta = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu_V / 2}$; $\Delta \nu_L$ 为Lorentz增宽全宽度; $\Delta \nu_V$ 为Voigt增宽全宽度。

在较高气压下,增宽因子由Lorentz线型给出。

$$\rho(\nu_{v+1, J}, \nu) = \frac{\Delta \nu_{v+1, J} / \pi}{(\nu - \nu_{v+1, J})^2 + \Delta \nu_{v+1, J}^2}$$

对于 $v=1 \rightarrow 0$ 的P支及R支的压力加宽系数,1980年Varghese^[8]等进行了测量。

对于振动激发态($v > 1$)光谱的压力加宽系数目前尚无测量数据,一般说随着 v 的增

大,加宽系数增大,按照[9]的假设:

$$\Delta\nu_{v+1 \rightarrow v} = \Delta\nu_{1 \rightarrow 0} \left(1 + \frac{v}{6}\right)$$

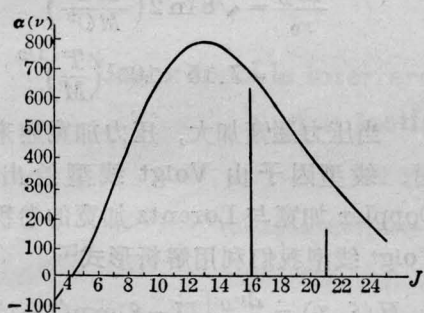
由这个假设计算的增益按振动量子数的分布是与实验结果比较一致的。本文也利用了这个关系。

三、结果分析

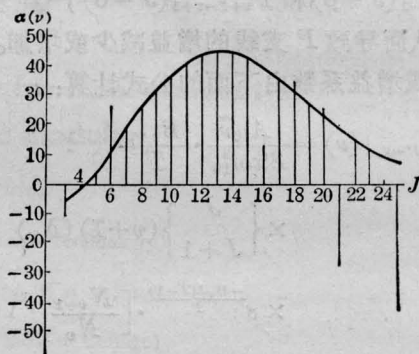
图2(a)~(d)是在 $T=300\text{ K}$, 粒子数密度比 $N_v/N_{v'} = \frac{v+1}{v+2}$, 压强分别为 15 Torr 、 100 Torr 、 1 atm 、 10 atm 时的增益分布, 连续曲线表示没有考虑谱线交迭情况的增益理论值, 垂线表示在考虑了谱线交迭以后增益的实际计算值。

从图中可以看出,随着压力增加,谱线交

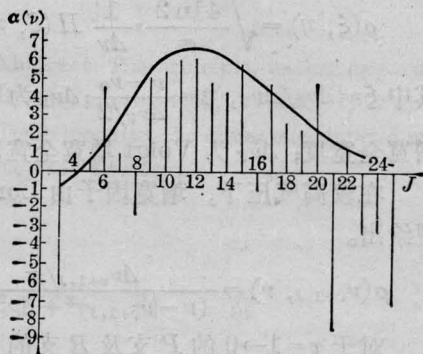
迭对增益的影响越来越大,特别是 R 支共振自吸收现象越来越显著。在 $P=15\text{ Torr}$ 时,除 $J=16$ 、 21 两条谱线外,其他线不受谱线交迭的影响,与 Patel 早年的结果一致^[10]。这是由于在低压下,谱线宽度很窄,不存在谱线交迭之故。当 $P=100\text{ Torr}$ 时(图2(b)), $J=18$ 、 20 处的谱线的增益超越原增益值,这是由于处在增益状态的其他 P 支交迭引起的, $J=3$ 、 16 、 21 、 24 、 25 等谱线,增益有较为明显的减少,这是 R 支共振区吸收作用的结果或是附近 P 支“首”“尾”交迭的结果。其他谱线与原谱线增益也稍微有所改变,可见这时候谱线已经有了一定程度的交迭,随着压力的增加,交迭程度越来越大。到 $P=1$ 、 10 atm 时(见图2(c)、(d)),谱线的交迭对增益的影响已相当显著了,几乎每一条谱线都有了



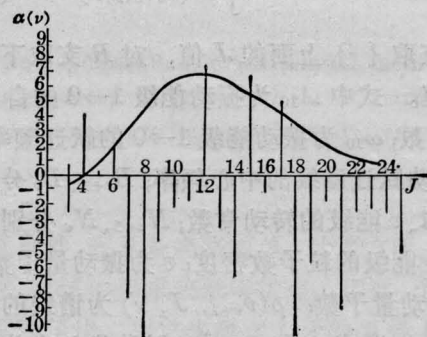
(a) $P=15\text{ Torr}$



(b) $P=100\text{ Torr}$



(c) $P=1\text{ atm}$

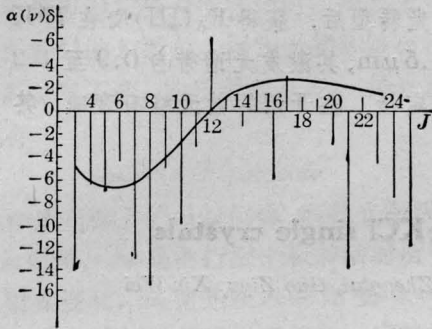


(d) $P=10\text{ atm}$

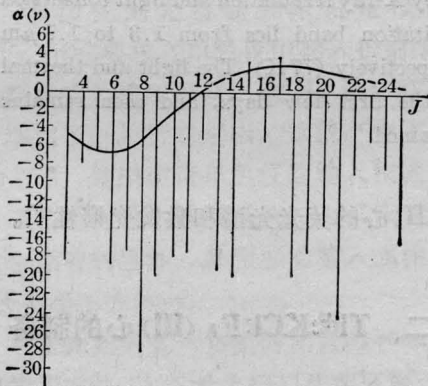
图2 CO 分子 $12 \rightarrow 11$ 振转跃迁在 $T=300\text{ K}$ 、 $N_v/N_{v'} = \frac{v+1}{v+2}$ 时的增益分布

明显的改变。且由图可以看出，共振自吸收作用随压力增加越来越显著，到 $P=10\text{ atm}$ 时，共振自吸收已占了主导地位。只有少数几条谱线仍存在增益，其他的增益值都是“负”值，只有 $J=4, 6, 12, 15, 17$ 这几条谱线有增益。

在图 3(a)、(b) 中，我们给出了 $T=300\text{ K}$ 、 $N_v/N_{v'}=0.8$ 、 $P=1\rightarrow 10\text{ atm}$ 时的增益曲线，图中显示的结论与前面是一致的，不过此时自吸收现象更明显了。 $P=10\text{ atm}$ 时仅 $J=15, 17$ 两条谱线存在增益。



(a) $P=1\text{ atm}$



(b) $P=10\text{ atm}$

图 3 CO 分子振转跃迁从 $12\rightarrow 11$ ，在 $T=300\text{ K}$ ， $N_v/N_{v'}=0.8$ 时的增益分布

我们看到，上面的结果都是对 $T=300\text{ K}$ 时讨论的，当温度改变时，只是影响最大增益

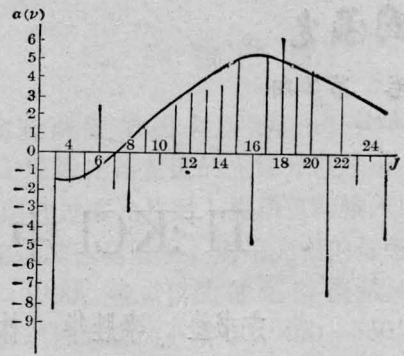


图 4 CO 分子振转跃迁从 $12\rightarrow 11$ ，在 $T=500\text{ K}$ ， $N_v/N_{v'}=\frac{v+1}{v+2}$ ， $P=1\text{ atm}$ 时的增益分布

的 J_{\max} 位置和相对增益大小(见图 4)，与图 2 比较可以看出，温度增高时 J_{\max} 增大、 α 减小，出现负增益的谱线添多了。

以上结果是在 $N_{v+1} < N_v$ 的部分反转条件下得出的，如果 R 支、 P 支皆为增益状态，则采用压力加宽实现连续调谐是完全可能的。

参 考 文 献

- [1] M. L. Stitch ed.; *Laser Handbook*, 1979, **3**, 89, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford.
- [2] Milton Birnbaum ed. by E. L. Vleehy, In *Modern Fluorescence Spectroscopy*, 1976, **1**, 152.
- [3] H. Walther ed.; *Laser Spectroscopy of Atoms and Molecules*, 2, 137~138, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1976.
- [4] N. G. Bosov et al.; *Sov J of Quant Elect.* 1982, **12**, No. 1~6, 476.
- [5] A. L. S. Smith, G. A. Murray; *Optics and Laser Technology*, 1981, **13**, No. 6, 307.
- [6] S. A. Losev; *Gasdynamic Laser*, 1981, 243.
- [7] P. L. Varghese, R. K. Hauson; *J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, 1980, **24**, 419~489.
- [8] M. L. Bhaumik; *High-Power Gas Lasers*, 1975, 243.
- [9] C. K. N. Patel; *Phys. Rev.*, 1966, **141**, No. 1~2, 71.