

CO₂ 激光器的腔长调制及动力学参数的测定*

国秀珍 高锦岳 张汉壮 金光旭 吕月兰
(吉林大学物理系, 长春 130023)

提 要

采用含有振转能级在内的多能级理论模型, 对 CO₂ 激光器动力学参量进行调制, 取得实验与理论一致的满意结果. 利用理论与实验曲线拟合的方法, 较精确地测出该激光器的动力学参数.

关键词 CO₂ 激光器, 腔长调制.

1 引 言

在稳态情况下, 调制激光器的某一个动力学参量, 研究其输出强度对调制的影响已成为研究激光动力学行为的一个重要方法. 在非线性响应方面, Arecchi 等就是采用了这种方法, 进行了最早期的关于光学混沌现象的研究^[1]. 此外, 象增益调制^[2, 3]、腔损耗调制^[4]和腔长调制^[5]也有人采用. 然而, 对于线性调制响应特性的报道比较少^[6, 7].

关于含有饱和吸收^[8~10]和带有开关参量^[11]的 CO₂ 激光器动力学行为的研究早已指出: 简单的二能级速率方程模型, 不能给出与实验一致的结果; 对 CO₂ 激光器调制效应的分析表明^[6]: 必须用含有振转能级在内的理论模型取代二能级理论模型, 才能使其实验结果与理论分析结果一致. 然而, 采用多能级模型, 将使理论处理变得更为复杂. 最近, Oppo 等人^[12]使用了 Center-manifold 技术, 简化了多能级模型, 把原来的三个方程变为两个, 同时保留了多能级在激光动力学过程中的作用. 本文采用此简化的多能级理论模型来分析 CO₂ 激光器对腔长的小讯号调制响应特性, 并报道更精确的 CO₂ 激光器动力学参数的测量结果.

2 理 论 分 析

含有振转能级的简化了的 CO₂ 激光动力学方程为^[12]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= -2KI \left[1 - \frac{AD}{1+\delta^2} + \mu^2 AJ \frac{ID}{(1+\delta^2)^2} \right], \\ \frac{dD}{dt} &= -\gamma_{11} \left(D - 1 + \frac{ID}{1+\delta^2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

收稿日期: 1991年9月19日; 收到修改稿日期: 1991年11月12日

* 国家自然科学基金委员会资助的课题.

式中 I 和 D 分别是适当归一化后的光强和粒子数差, 其衰减速率分别为 $2K$ 和 γ_{\parallel} . A 为

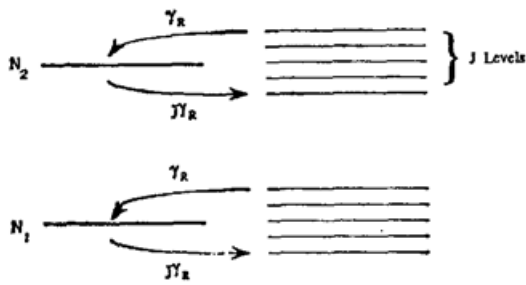


Fig. 1 Energy level structure related with laser dynamics for a CO_2 molecules. Levels 1 & 2 are the lasing levels. J denotes the number of rotational levels involved in each manifold which related with laser levels. γ_R and $J\gamma_R$ denote the relaxation rates in or out of the lasing levels

$$I_{ss} = I_{ss}^0 - JA(\tilde{A}-1)\mu^2, \quad D_{ss} = D_{ss}^0 + (JI_{ss}^0/A)\mu^2. \quad (2)$$

其中 $\tilde{A} = A/(1+\delta^2)$, $I_{ss}^0 = A-1-\delta^2$, $D_{ss}^0 = (1+\delta^2)/A$ 是从简单的二能级速率方程中得到的稳态解. 因为 $\mu^2 \ll 1$, 所以(2)式可以写成:

$$I_{ss} \approx I_{ss}^0 = A-1-\delta^2, \quad D_{ss} \approx D_{ss}^0 = (1+\delta^2)/A. \quad (3)$$

这说明对于稳态, 两种不同的模型给出完全一致的结果. 因此, 对于 CO_2 激光器的稳态研究, 可以采用简单的二能级模型.

2.2 稳定性分析

利用(2)式稳态解, 可以对系统的稳定性进行分析, 并求出其线性稳定性分析的本征值:

$$\lambda = -\beta/2 \pm i[\omega_0^2 - (\beta/2)^2]^{1/2}.$$

其中: $\omega_0 = [2K\gamma_{\parallel}(\tilde{A}-1)]^{1/2}$, $\beta = \gamma_{\parallel}\tilde{A} + \gamma_{\parallel}(\tilde{A}-1)J'$, $J' = 2KJ/[(J+1)\gamma_R]$. 由 λ 的解可以看出: 在稳态下, 当系统受到一个扰动后, 如果 $\omega_0 > \beta/2$, 激光光强将以 $\sqrt{\omega_0^2 - (\beta/2)^2}$ 为振荡频率, 以 $\beta/2$ 的衰减速率回到稳态, 如果 $\omega_0 \leq \beta/2$, 光强将无振荡回到稳态. 比较两种不同模型($J \neq 0$ 和 $J = 0$)的结果发现: 转动能级使 β 值大为增加, 因此, 它不但影响激光恢复到稳态时的弛豫速率, 而且使振荡频率也发生变化. 这说明在研究 CO_2 激光器的非稳特性时, 必须采用多能级理论模型.

2.3 小信号腔长调制效应

从关系式 $\delta = (\omega_A - \omega_C)/\omega_L$, $\omega_C = n\pi c/L$ 及 $\Delta\omega_C = -n\pi L(\Delta L)/L^2$ (其中 L 为激光器腔长, c 是光速)可看出对失谐量 δ 的调制就等效于对腔长的调制, 因此, 腔长调制可用失谐量调制表示: $\delta = \delta_0 + l \cos \Omega t$, 其中 δ_0 是稳态时的失谐量, l 是小信号调制深度, 且 $\delta_0 \gg l$, 采用如下近似:

$$1/(1+\delta^2) = 1/[1+(\delta_0 + l \cos \Omega t)^2] \approx [1/(1+\delta_0^2)] [1 - 2\delta_0 l \cos \Omega t]/(1+\delta_0^2).$$

线性化的方程解可以表示为: $I(t) = I_{ss} + a(t)$, $D(t) = D_{ss} + b(t)$. 将上式代入(1)式, 得到一个关于调制输出响应振幅的微分方程:

$$[(d^2a/dt^2) + \beta(da/dt) + \omega_0^2 a] = F \cos(\Omega t + \pi + \psi_1). \quad (4)$$

介质的增益, 是以激光谐振腔的阈值为单位的, δ 为失谐量, 它是激光跃迁中心频率与腔模频率之差, 以激光介质极化强度衰减速率 γ_{\perp} 为单位. $\mu^2 = \gamma_{\parallel}/(J+1)\gamma_R$, 这里 J 是包含在两个相关的振动能级内参与激光过程的转动能级数目. γ_R 是一个转动能级与相应的激光振动能级相互弛豫的速率, 参见图 1, 对于一个实际的 CO_2 激光器 γ_{\parallel} 约为 $10^3 \sim 10^4$ ^[13], $(J+1)\gamma_R$ 约为 $10^7 \sim 10^8$ ^[13] 且 $\mu^2 \ll 1$. 当 $J=0$ 时, (1)式简化为标准的二能级速率方程.

2.1 稳态解

令 $dI/dt = dD/dt = 0$, 由(1)式, 可以解得稳态的非零解:

其中 $F = 4K\delta_0(\tilde{A}-1)l(\gamma_l^2 + \Omega^2)^{1/2}$, $\psi_1 = \tan^{-1}(\Omega/\gamma_l)$.
 这一微分方程的形式解为:

$$a(t) = a_0 \cos(\Omega t + \pi + \psi_1 + \psi_2).$$

其中 $a_0 = F/[(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + \beta^2\Omega^2]^{1/2}$, $\psi_2 = -\tan^{-1}[\beta\Omega/(\omega_0^2 - \Omega^2)]$.

由上面的讨论可以看到: 响应振幅 a_0 与激光介质的动力学参数 A , γ_l , δ_0 , K 和 J' 相联系, 调制信号与输出响应之间的位相差 $\Delta\psi$ 与 Ω 和 γ_l 相联系, 有

$$\Delta\psi = \pi + \tan^{-1}(\Omega/\gamma_l) - \tan^{-1}[\beta\Omega/(\omega_0^2 - \Omega^2)].$$

在 $\Omega \ll \omega_0$ 的近似条件下(实验上可以控制调制深度 l 及调制频率 Ω , 使其满足上述近似条件)上式可以表示成:

$$\Delta\psi = \pi + \tan^{-1}(\Omega/\gamma_l). \tag{5}$$

下面讨论如何利用实验测得的量: 如调制响应振幅 a_0 为失谐量 δ_0 的函数和位相差 $\Delta\psi$ 为调制频率 Ω 的函数, 来得到动力学参量 A , γ_l , K 和 J' .

3 实验结果与讨论

图 2 为实验装置图, 其实验条件与文献[6]相同. 图 3 是以失谐量 δ 为变量, 以 I_{ss} 为其函数的实验曲线. 实线为按公式 $I_{ss} = A - 1 - \delta^2$ 画出的理论拟合曲线. 由此拟合曲线得到激光介质增益 $A = 2.4 \pm 0.2$, 腔的失谐量 δ 是以 γ_l 为单位来测量的. 对压力加宽的 Lorentzian 线型的线宽, 本文参考了 Judd 的经验公式^[14], 当气体的温度是 300 K 时, 其经验公式是:

$$133 \times (2.38 P_{CO_2} + 1.74 P_{N_2} + 1.43 P_{He}) \times 10^{-7} s^{-1} Pa^{-1}.$$

在本文使用的气压下, 由上面公式得出: $\gamma_l = 2.55 \times 10^8 s^{-1}$, 整个线宽为均匀加宽线型 Gaussian 型和 Doppler 加宽线型的卷积, Doppler 线宽为 $1.67 \times 10^8 s^{-1}$, 而整个线宽估计可达

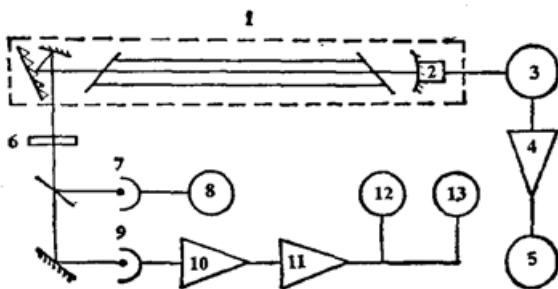


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

- 1—single-mode tunable CO₂ laser
- 2—piezoelectric ceramic (PZT) used for cavity-length modulation
- 3—dc power supply for δ_0 tuning
- 4—amplifier
- 5—signal generator
- 6—attenuator
- 7—pyroelectric detector
- 8—galvanometer
- 9—HgCdTe detector
- 10—preamplifier
- 11—frequency selective amplifier
- 12—oscilloscope
- 13—high-frequency voltmeter

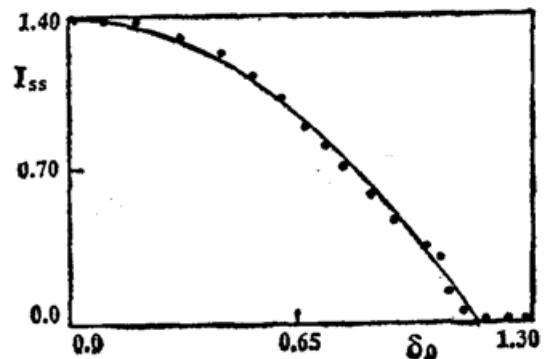


Fig. 3 Plot of I_{ss} vs cavity detuning for experimental data. Intensities are measured as arbitrary units; cavity detuning is measured in units γ_l .

$3.08 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ (注意所有衰减速率、也就是线宽是对应于光谱线型的最大值的一半处所对应的宽度。)

3.1 γ_l 的测量

固定失谐量 δ_0 为一个值, 针对 6 个不同的调制频率 Ω , 分别记录其调制信号和输出响应之间的位相差 $\Delta\psi$. 从表达式(5)中看到, 对于一个给定的调制频率 Ω , 位相差 $\Delta\psi$ 仅仅取决于粒子数差的衰减速率 γ_l , 其实验数据由图 4 给出, 实线是采用 $\gamma_l = (6.5) \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 得到的最好理论拟合曲线. 根据误差理论, 得到 γ_l 的值为 $(6.5 \pm 0.9) \times 10^4 \text{ s}^{-1}$.

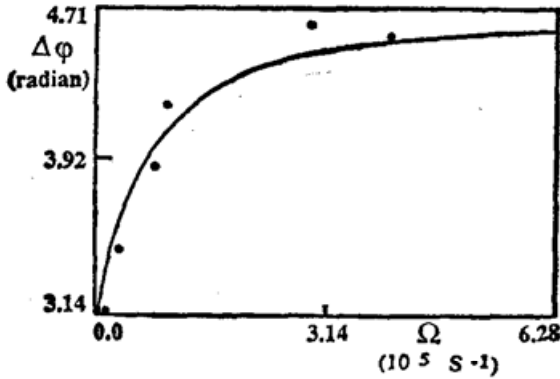


Fig. 4 Plot of phase difference $\Delta\psi$ between modulated signal and output intensity response for six different modulation frequencies. The solid curve is a best fit to eq. (5) with fitting parameter $\gamma_l = 6.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$

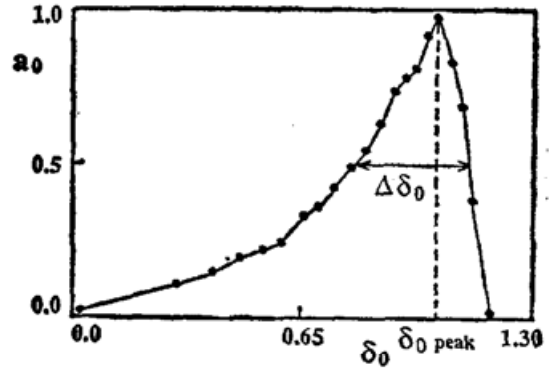


Fig. 5 Experimental data for $a_0(\delta_0)$ at the modulation frequency $\Omega = 5.02 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$. The solid curve smoothly connects the experimental data. $\delta_{0\text{peak}}$ and $\Delta\delta_0$ indicate the curve's peak position and its full-width at half-maximum, respectively

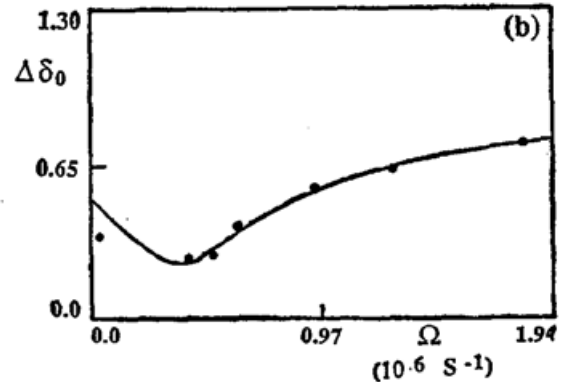
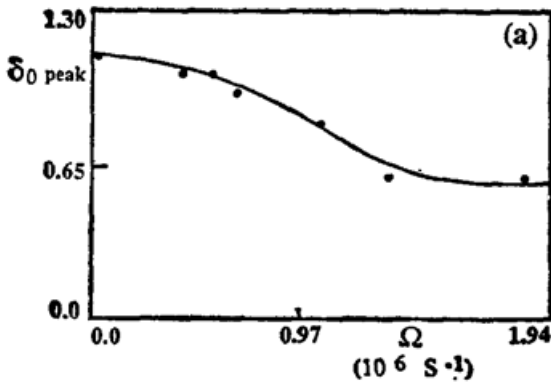


Fig. 6 Collection of experimental results for (a) value of δ_0 at the peak of $a_0(\delta_0)$ and (b) full width at half-maximum of that curve ($\Delta\delta_0$) as functions of Ω with best fitted values of corresponding curves using decay rates giving $K = (1.5 \pm 0.5) \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $J' = 18 \pm 2$, $A = 2.4$, $\gamma_l = (6.5 \pm 0.9) \times 10^4 \text{ s}^{-1}$

3.2 K , J' 和 γ_R 的测量

固定一个调制频率 Ω , 连续改变失谐量 δ_0 , 并记录相应的调制输出强度振幅 a_0 . 图 5 为在一个特定的调制频率下的实验曲线. 由曲线可以获得 a_0 的峰值 $a_{0\text{peak}}$ 所对应的失谐量 δ_0 和半宽度 $\Delta\delta_0$. 图 6 为针对 7 个不同的调制频率 Ω 所得到的实验结果, 其中实线为取

$K = (1.5 \pm 0.5) \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 和 $J' = 18 \pm 2$ 时的最佳理论拟合曲线. 在求 K 和 J' 时, 使用了上面测出的 A 和 γ_l 值. 在通常情况下, 激光动力学过程中包含的转动能级的个数多于 20, 因此可以采用近似 $J' = 2KJ / [(J+1)\gamma_R] \approx (2K/\gamma_R)$, 得到 $\gamma_R = (1.70 \pm 0.2) \times 10^7 \text{ s}^{-1}$.

3.3 按经验公式估算 K 和 γ_l 的值.

由窗口和镜子对光场的损耗, 估算其腔的衰减速率为: $K = -C \ln(1-T) / 2L = (1.7 \pm 0.3) \times 10^7 \text{ s}^{-1}$.

从经验公式^[13]:

$$133 \times [2.2 P_{\text{CO}_2} + 33 P_{\text{H}_2} + 0.026 P_{\text{N}_2} + 4.7 P_{\text{He}} + 5 P_{\text{Xe}} + 1.2 \times 10^3 P_{\text{H}_2\text{O}}] \times 10^3 \text{ s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$$

中估计 γ_l 的值在本文使用的气压下为 $6.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. 如令 $J=0$ [相当于二能级模型], 拟合曲线中得到的参数为 $\gamma_l = 1.4 \times 10^{5r61}$ 与从经验公式中得到的在数量级上是不一致的.

参 考 文 献

- [1] F. T. Arecchi, R. Meucci, G. Puccioni *et al.*, Experimental Evidence of Subharmonic Bifurcation, Multistability, and Turbulence in a Q-Switched Gas laser. *Phys. Rev. Lett.* 1982, **49** (17): 1217~1220
- [2] J. R. Tredicce, N. B. Abraham, G. P. Puccioni *et al.*, ON CHAOS IN LASERS WITH MODULATED PARAMETERS: A COMPARATIVE ANALYSIS. *Opt. Commun.*, 1985, **55** (2): 131~134
- [3] D.J. Biswas, V. Dev, U. K. Chatterjee, Experimental observation of oscillatory instabilities and chaos in a gain-modulated single-mode cw CO₂ laser. *Phys. Rev. A*, 1987, **35** (1): 456~458
- [4] O. R. Wood, S. E. Schwarz, PASSIVE Q-SWITCHING OF A CO₂ LASER. *Appl Phys. Lett.*, 1967, **11**(3): 88~89
- [5] T. Midavaine, D. Dangoisse, Pierre Glorieux, Observation of Chaos in a Frequency-Modulated CO₂ Laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55** (19): 1989~1992
- [6] J. Y. Gao, H. Z. Zhang, X. Z. Guo *et al.*, Small-signal response of a laser to cavity-length modulation: A diagnostic for dynamical models parameter values. *Phys. Rev. A*, 1989, **40** (11): 6339~6348
- [7] B. K. Goswami, D. J. Biswas, Effect of detuning on a single-mode modulated laser. *Phys. Rev. A*, 1987, **36**(2): 975~978
- [8] E. Arimondo, F. Casagrande, L. A. Lugiato *et al.*, Repetitive passive Q-Switching and Bistability in laser with Saturable Absorbers. *Appl. Phys. B*, 1983, **30**(2): 57~77
- [9] M. Tachikawa, K. Tani, Kajita, T. Shimizu, Undamped Undulation Superposed on the Passive Q-Switching Pulse of a CO₂ Laser. *Appl. Phys. B*, 1986, **39**. (2): 83~90
- [10] B. Zambon, F. De Tomasi, D. Hennequin, *et al.*, Investigation of models and experimental studies of a stationary regime for a laser with a saturable absorber. *Phys. Rev. A*, 1989, **40** (7): 3782
- [11] F.T. Arecchi, W. Gadomski, SWEPT DYNAMICS OF A CO₂ LASER NEAR THRESHOLD TWO VERSUS FOUR-LEVEL MODEL. *Opt. Commun.*, 1988, **65** (1): 47~50
- [12] G.L. Oppo, J. R. Tredicce, Lorenzo M. NARDUCCI, DYNAMICS OF VIBRO-ROTATIONAL CO₂ LASER TRANSITIONS IN A TWO-DIMENSIONAL PHASE SPACE. *Opt. Commun.*, 1989, **60** (5, 6): 393~397
- [13] P. K. Cheo, *In Laser 3*, edited by A. Levine (Dekker, New York, 1971), p. 111. (for the details of the pressure broadening rates. See P154)
- [14] J. J. Degnan, The waveguide Laser: A Review. *Appl. Phys.* 1976, **11** (1): 1~33

Investigation of cavity length modulation and dynamical parameter measurement for a CO₂ laser

GUO XIUZHEN GAO JINYUE ZHANG HANZHUANG JIN GUANGXU LU YUELAN

(Physics Department, Jilin University, Changchun 130023)

(Received 19 September 1991; revised 12 November 1991)

Abstract

In this paper, the small-signal response of a CO₂ laser to cavity length modulation has been investigated. The results show satisfactory agreement between theoretical and experimental studies on the effect of modulation of dynamical parameters. In this paper, the multi-level theoretical model is used to a typical CO₂ laser. The dynamical parameters of the laser are precisely determined by fitting this theory with the experimentally measured curves.

Key words CO₂ laser, steady state, modulation.

更正本刊 1992 年第 6 期 (Vol. 12, No. 6) p. 496 一文的作者:

Yb 原子的 6snp 各里德堡系列总角动量 J 的确定

王云仙 吴璧如 陆 杰 徐云飞 沈俊锋

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

Determination of total angular momentum J for the 6snp Rydberg series of neutral ytterbium

WANG YUNXIAN WU BIRU LU JIE XU YUNFEI SHEN JUNFENG

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)