

# 用可调 F-P 腔测量内腔式波导 CO<sub>2</sub> 激光器的增益、饱和强度及内损耗

王瑞峰 田荣生

(成都电讯工程学院)

**提要:** 本文提出一种测量内腔式波导 CO<sub>2</sub> 激光器小信号增益、饱和强度及内部损耗的新方法。分析了玻璃波导 CO<sub>2</sub> 激光器中容易发生 00<sup>0</sup>1→02<sup>0</sup>0 带跃迁的原因, 提出了一个抑制 00<sup>0</sup>1→02<sup>0</sup>0 带跃迁的简易方法。

## Determination and study of gain, saturation intensity and internal losses of intracavity-waveguide CO<sub>2</sub> lasers

Wang Rui Feng, Tian Rong Sheng

(Chengdu Institute of Radio Engineering)

**Abstract:** A novel method is devised to determine the small signal gain, saturation intensity and internal losses of intracavity-waveguide CO<sub>2</sub> lasers. Reasons for that transition in 00<sup>0</sup>1→02<sup>0</sup>0 band which occurs readily in a glass waveguide laser is analysed, and a simple method to restrain transition in 00<sup>0</sup>1→02<sup>0</sup>0 band is suggested.

### 一 引 言

为了研究和改进激光器的性能,有必要对它的内部参数(小信号增益、饱和强度及内部损耗)进行测量和分析。目前测量激光器的内部参数一般采用直接测量法、极大损耗法及腔内插入可旋转耦合板的方法<sup>[1~3]</sup>。但是以上的方法都必须采用激光放大管或外腔式激光管,这可能使耦合损耗、模体积,管内光强分布等与内腔式激光器不一致。采用可调 F-P 腔代替输出镜的方法,可以使测试条件与内腔式激光器更接近,而且可以同时测量三个内部参数。

波导 CO<sub>2</sub> 激光器的一个重要用途是在激光通讯、激光雷达中作本机振荡,工作波长为 10.6 微米。由于玻璃加工工艺成熟、成本低,所以现在一般采用玻璃制作。但是在玻璃波导激光器中容易产生的激光波长为 9.2~9.6 微米。原因之一是 9.2~9.6 微米的波长比 10.6 微米的短,损耗小。对于在波导激光器中占优势的 EH<sub>11</sub> 模,在一般情况下,9.2 微米的损耗约为 10.6 微米的 80%,所以 9.2 微米容易起振。由于竞争效应使 10.6 微米的光波不易振荡,为了测量出属于 10.6 微米的激光参数,必须设法抑制 00<sup>0</sup>1→02<sup>0</sup>0 带的跃迁。

收稿日期:1981年9月28日

## 二、原理及装置

可调 F-P 腔采用两个反射系数不等的镀膜锗片组成,如图 1 所示。锗片之间是空气隙,两块锗片都有一面镀增透膜;另一面,其中一块镀增反膜,反射率为 0.83,另一块没有镀,反射率为 0.36。增透膜的剩余反射率很低,可以忽略。

这个 F-P 腔的透过率为:

$$T = \frac{(1-r_1^2)(1-r_2^2)}{(1-r_1r_2)^2 + 4r_1r_2 \sin^2 \frac{\delta}{2}} \quad (1)$$

其中  $r_1^2$ 、 $r_2^2$  分别为大、小锗片的反射率;  $\delta = 4\pi d/\lambda$ (弧度),  $d$  为两片之间的距离,两片相互平行。由于锗片的吸收及散射损耗,实际的透过率与反射率都要乘上一个衰减系数。

由(1)式可见,改变镜片距离  $d$  即可改变透过率,其变化情况如图 2 所示。其中曲线 A 为  $r_1^2=0.83$ ,  $r_2^2=0.36$ ; B 为  $r_1^2=0.91$ ,  $r_2^2=0.36$ ; C 为  $r_1^2=r_2^2=0.73$  时的情况。

为了避免因调节 F-P 腔而引起跳支,就需要减小 F-P 腔的色散。由式(1)可得:

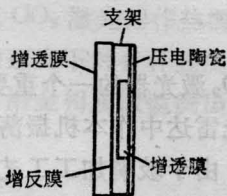


图 1 可调 F-P 腔结构示意图

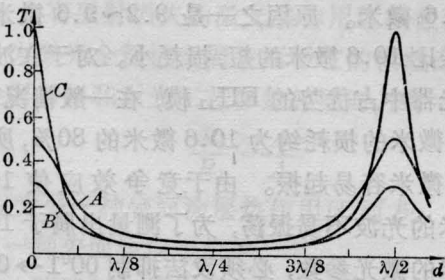


图 2 可调 F-P 腔的透过率  $T$  随镜片距离  $d$  的变化

$$\frac{dT}{d\lambda} = \frac{8\pi d(1-r_1^2)(1-r_2^2)r_1r_2 \sin \delta}{\left[ (1-r_1r_2)^2 + 4r_1r_2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \right]^2 \lambda^3}$$

(当  $r_1$ 、 $r_2$  不随  $\lambda$  变化时)

由上式及图 2 可知选用小的  $d$  及相差较大的  $r_1^2$  和  $r_2^2$  组成的 F-P 腔色散小。但是,曲线 B 的最大透过率太小,不能使激光器停振,所以我们选了曲线 A,即  $r_1^2=0.83$ ,  $r_2^2=0.36$ ,  $d \approx 5$  微米。在 F-P 腔的腔长改变时,不仅它的透过率发生变化,它的反射波与入射波之间的相位差也会变化,其大小可用下式计算:

$$\Delta\phi = \text{tg}^{-1} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} [(r_1r_2)^{n-1} \sin(n\delta)]}{\sum_{n=1}^{\infty} [(r_1r_2)^{n-1} \cos(n\delta) - r_1/r_2(1-r_1^2)]}$$

当  $r_1^2=0.83$ ,  $r_2^2=0.36$  时,其结果如图 3 所示。相位差的变化会引起激光谐振腔等效腔长发生变化,激光频率随之变化。在本装置中,频率变化小于  $\pm 21$  兆赫,由于波导激光器气压高,小信号增益带宽约为 500~700 兆赫,根据均匀加宽的公式,可得小信号增益的变化(在中心频率处)小于  $\pm 0.35 \sim \pm 0.18\%$ 。可见在调节 F-P 腔的腔长时不相应地改变激光器的腔长,对测量结果也影响甚小。当然,如果能相应地改变激光器的腔长就更好。

如果选用  $r_1^2=r_2^2$ ,则  $\Delta\phi$  的变化将增加 8 倍。

综上所述,用可调 F-P 腔代替输出镜是可行的,它和真实内腔式管子的差异很小,可以用来测量激光参数。

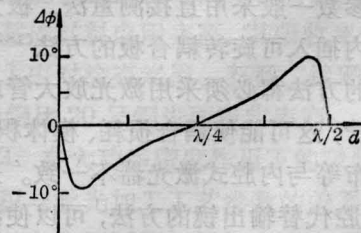


图 3 反射波与入射波间的相位差  $\Delta\phi$  与镜片距离  $d$  的关系

实验装置如图 4 所示。激光器由 GG17 玻璃制成,波导管直径为 1.5 毫米,壁厚 0.4 毫米,激活长度 180 毫米。

反射镜 A 是一块镀膜锗片,它的作用之一是抑制  $00^01 \rightarrow 02^00$  带的跃迁,它的中心波长是 12.5 微米。膜层由 Ge 与 ZnS 交替的 8 层膜构成,它的反射率的理论曲线如图 5 中虚线所示,实测结果如图中实线所示,透过率  $T = 1 - R$ 。

从图中可看出,波长为 10.6 微米时膜层的透过率远低于 9~10 微米时的透过率,所以它能有效地抑制  $00^01 \rightarrow 02^00$  带的跃迁,对于  $00^01 \rightarrow 10^00$  带的 R 支也有很强的抑制作用。但是对于  $00^01 \rightarrow 10^00$  带的 P 支中增益最高的几支,透过率几乎相等。

为了测得  $00^01 \rightarrow 10^00$  带 P(20) 支在中心频率处的增益,必须适当改变腔长。由于玻璃的热膨胀系数较大,只需均匀加热十几度就能使激光器腔长增加 5 微米,足以调整到 P(20) 支的中心频率。我们采用均匀绕在激光器管壳上的电阻丝对它进行加热。

在测试时,先调节激光器腔长使输出对应于  $00^01 \rightarrow 10^00$  带的 P(20) 支的中心频率,

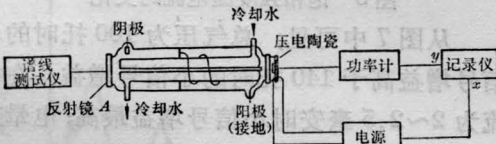
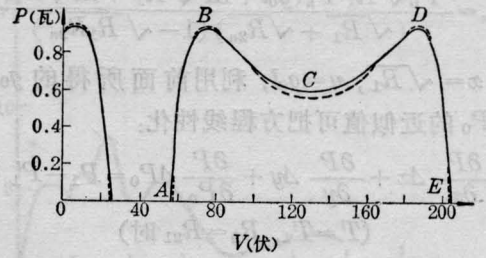
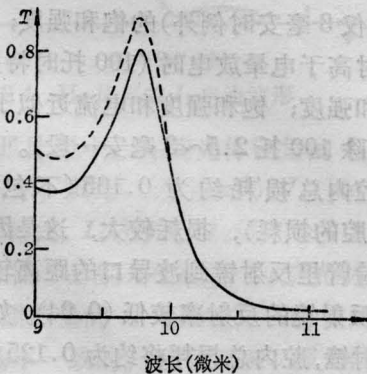


图 4 测试装置示意图



然后改变压电陶瓷上的电压,用 X-Y 记录仪(或直接从电压表和功率计上)记下压电陶瓷上的电压和输出功率的大小(如图 6 所示)。因形变较小,压电陶瓷的形变与所加电压成正比。

图 6 中 A、E 点对应于阈值点; B、D 点对应于最佳透过率; C 点对应于最小透过率。利用式(1)可算出对应于 A、E 和 B、D 点的透过率。根据阈值条件  $2g_0l = a + T$  和最佳透过率  $T_m = \sqrt{2g_0la} - a$  可得  $g_0$  和  $a$ 。式中  $g_0$  为小信号增益系数;  $a$  为腔内总损耗;  $l$  为激活长度。利用输出功率公式:

$$P = \frac{1}{2} AT I_s \left( \frac{2g_0l}{T+a} - 1 \right)$$

可得饱和强度  $I_s$ , 式中  $A$  为激光束的有效截面积。可根据  $EH_{11}$  波导模的有效半径<sup>[3]</sup> 进行计算。

为了减小误差,可以进一步用 Rigrod 的公式<sup>[5]</sup>

$$P = \frac{P_0 \sqrt{R_1} T (g_0l + \ln \sqrt{R_1} + \ln \sqrt{R_2})}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2}) (1 - \sqrt{R_1 R_2})} \quad (2)$$

和最小二乘法来处理测量数据。(2)式中  $P_0 = AI_s$ ;  $R_1 = 1 - a$ ;  $R_2$  和  $T$  分别为输出镜的反射率和透过率。

取  $n$  个透过率  $T_n$  及对应的输出功率  $P_n$  可得  $n$  个方程

$$P_1 = \frac{P_0 \sqrt{R_1} T_1 (g_0l + \ln \sqrt{R_1} + \ln \sqrt{R_{21}})}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_{21}}) (1 - \sqrt{R_1 R_{21}})}$$

$$\vdots$$

$$P_n = \frac{P_0 \sqrt{R_1} T_n (g_0 l + \ln \sqrt{R_1} + \ln \sqrt{R_{2n}})}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_{2n}}) (1 - \sqrt{R_1 R_{2n}})}$$

设  $x = \sqrt{R_1}$ ,  $y = g_0 l$ , 利用前面所得的  $g_0$ 、 $a$ 、 $P_0$  的近似值可把方程线性化:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial P_0} \Delta P_0 = P_1 - P'_1 \\ (T = T_1, R_2 = R_{21} \text{ 时}) \\ \vdots \\ \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial P_0} \Delta P_0 = P_n - P'_n \\ (T = T_n, R_2 = R_{2n} \text{ 时}) \end{cases}$$

式中  $P'_n$  为公式 (2) 中代入  $g_0$ 、 $l$ 、 $a$ 、 $P_0$ 、 $T_n$ 、 $R_{2n}$  后  $P$  的值。

设  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta P_0$  的系数矩阵为  $B$ , 方程式右边的常数矩阵为  $H$ ,  $B$  的转置矩阵为  $B'$ 、

$$\text{未知数矩阵 } W = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta P_0 \end{bmatrix}.$$

根据最小二乘法的公式:  $B'BW = B'H$  可解得  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta P_0$ 。

用  $x + \Delta x$  代替  $x$ , 用  $y + \Delta y$  代替  $y$ , 用  $P_0 + \Delta P_0$  代替  $P_0$  可得修正后的  $g_0$ 、 $a$  和  $P_0$ 。如果修正一次的精度不够, 还可以用以上方法再修正, 最后可使数据处理的精度达到需要的程度。这个过程用计算机进行是很方便的。

用这种方法测量了以下几种情况的激光参数。所充工作气体为  $\text{Xe}$ 、 $\text{CO}_2$  及  $\text{He}$ , 气压比分别为 0.1:1:5 和 0.5:1:8, 总气压分别为 100 托和 140 托, 激励电流分别为 1、1.5、2.2.5、3、3.5、4、4.5(毫安)。

### 三、结果和讨论

测得的小信号增益和饱和强度分别如图 7 和图 8 所示。

管内的气体放电类型在 2.7 毫安以下为电晕放电, 在 2.7 毫安以上为辉光放电。从 2.5 到 3 毫安由于放电类型的变化引起小信号增益和饱和强度有一个跃变。

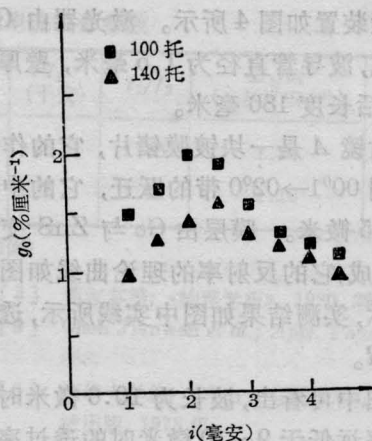


图 7 小信号增益随电流的变化

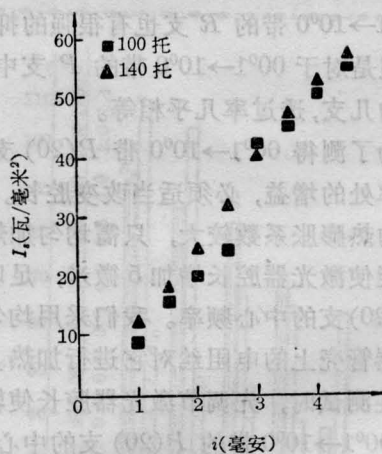


图 8 饱和强度随电流的变化

从图 7 中可见, 总气压为 100 托时的小信号增益高于 140 托时的小信号增益; 在电流为 2~2.5 毫安时小信号增益最高; 电晕放电时的增益高于辉光放电时的增益。

从图 8 可见, 140 托的饱和强度高于 100 托时(仅 3 毫安时例外)的饱和强度; 在辉光放电时高于电晕放电时(100 托时特别显著)的饱和强度; 饱和强度和电流近似于成正比关系(除 100 托 2.5~3 毫安一段)。

腔内总损耗约为 0.165(不包括可调 F-P 腔的损耗), 损耗较大, 这是因为在这个试验管里反射镜到波导口的距离较大, 且“全”反射镜的反射率较低(0.94), 如果用镀金反射镜, 腔内总损耗将约为 0.125。

用  $\text{CO}_2$  激光器谱线测试仪观察到, 在调

节可调 F-P 腔时没有发生跳支。

为了检查这个方法的测量精度,我们用 5 块透过率分别为 0.32、0.2、0.16、0.1、0.06 的镜片作输出镜,它们的中心波长为 12.5 微米左右,并采用镀金反射镜。在同一个管子上,在相同的气压和相同的气体配比、相同的电流下分别测得它们的输出功率,用最小二乘法和 Rigrod 的公式求得  $g_0$ 、 $P_0$  和  $a$ 。所得结果与前一种方法的结果接近。在图 6 中绘出了 100 托 3 毫安时(此点输出功率最大)压电陶瓷上的电压和输出功率的关系曲线,其中虚线为记录值,实线为用后一种方法测得的  $g_0$ 、 $P_0$ 、 $a$  代入可调 F-P 腔时的公式中算出的电压和输出功率的对应曲线,这两条

(上接第 514 页)

### 最佳溶剂的选择

溶剂变化,叶绿素  $d$  的吸收峰值及半宽<sup>[2]</sup>也随之移动。在作模选择  $Q$  开关时,不但要求染料有大的有效吸收截面,而且吸收带宽要窄,吸收峰值处于激光波长的中心处。满足上述某些条件的溶剂可以有多种,但如果考虑到使用染料盒玻璃基片的折射率为 1.5 的话(有多种玻璃可供选择),那么选择苯作为叶绿素  $d$  的溶剂是最合宜的。此时吸收峰值处在 692 毫微米,带宽为 21 毫微米,比之

(上接第 504 页)

如果要求在光泵持续时间为  $10^{-4}$  秒量级内棒的热传导发生很大的影响,就要求光泵不均匀的“波长”为

$$l \sim 2\pi\sqrt{\kappa \times 10^{-4}} \sim 10^{-2} \text{ 厘米。}$$

实际上,光泵的不均匀性往往表现为距离的单调函数,线度为  $10^{-2}$  厘米量级的“条纹”更是不可能发生的。因此,在目前使用的光泵结构中,单次脉冲光泵引起的棒内温度瞬时分布,完全是光泵产生的热源的形状,与棒的

曲线是一致的(除  $C$  点附近有些偏差以外)。

如果已知腔内总损耗,只测小信号增益及饱和强度时误差更小。

### 参 考 文 献

- [1] H. G. Heard; *Laser Parameter Measurements Handbook*, New York: John Wiley, Sons, Inc. 1968, 199~282.
- [2] B. S. Pater; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973, **QE-9**, 1150~1151.
- [3] J. J. Degnan, H. E. Welker; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973, **QE-9**, 489~491.
- [4] Colin S. Willett; *Introduction to Gas Lasers: Population Inversion Mechanisms*, Oxford: Pergamon Press Ltd, 1974.
- [5] Rigrod W. W; *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**, 2487.
- [6] John J. Degnan; *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, 1-33.

本文实验时用丙酮溶剂 24 毫微米窄 3 毫微米。如果不用光胶染料盒,使染料盒玻璃基片的一面镀以增透膜,不镀增透膜的面与溶剂接触,这样插入损耗可以大大降低。若在激光腔内有横模选择小孔时,还可避免因折射率的差异而发生的折射偏移,使调整方便。

叶绿素  $d$  样品分级标准及吸收光谱图是中国科学院北京植物研究所王淑芝同志提供的,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- [1] E. Gregor; *SPIE Seminar Proc.*, 1971, **25**, 93.
- [2] 路荣昭等;《植物学报》, 1977, **19**, No. 4, 283.

热传导无关。

在连续运转和重复脉冲运转的情况下,才能考虑棒的热传导问题。

### 参 考 文 献

- [1] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger; "Conduction of Heat in solids", Oxford at the Clarendon Press, 1959.
- [2] W. Koechner; *Appl. Opt.*, 1970, **9**, No. 6, 1429.
- [3] M. K. Chun et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1971, **QE-7**, No. 5, 200.