

内腔式 CO₂ 激光器输出支线的研究

王波

(太原工业大学)

提要: 根据波导激光器理论分析了 $\phi=3\sim 6\text{ mm}$, $N\sim 1$ 的一类内腔式 CO₂ 激光器输出支线的各种特点以及支线跳变现象。结果表明这是波导模的传输损耗 d_{11} 参与支线竞争的结果。

Investigation of output lines of intracavity CO₂ lasers

Wang Bo

(Taiyuan University of Polytechnology, Taiyuan)

Abstract: Based on the waveguide laser theory, output lines and line-chopping phenomenon of intracavity CO₂ lasers with $\phi=3\sim 6\text{ mm}$ and $N\sim 1$ are studied. It shows the result of the participation of waveguide mode loss d_{11} in the line competition process.

内腔式 CO₂ 激光器结构紧凑、输出激光波长位于大气的一个红外窗口、并可在 $9\sim 11\ \mu\text{m}$ 的波长范围内连续调谐,因而广泛用于激光通讯、激光测量和红外光谱分析。某些应用要求激光器在测量时间内稳定振荡在一个支线,不希望有支线跳变。支线跳变通常是由于放电过程中谐振腔反射镜失调(偏离原来位置)带来的。但是大量的谐振腔反射镜相对稳定的内腔式 CO₂ 激光器也会出现支线跳变,这种跳变与放电电流有关,有一定的规律性。最佳电流附近总是增益系数较大的强支线输出(如 $10P(20)$ 、 $10P(18)$); i 偏离最佳值较远处,则容易出现增益系数较小的弱支线输出(如 $10R(20)$ 、 $9R(20)$ 等支线)。显然谐振腔反射镜失调的说法不能解释这一现象。

开腔 CO₂ 激光器中,只有增益系数 g_0 影

响振荡支线,任一时刻总是强支线输出。各种原因带来的支线跳变也多在强支线之间进行^[1]。

——波导 CO₂ 激光器中,除了增益系数 g_0 不同外,各支线还具有不同的传输损耗 d_{nm} (也称作振幅衰减系数)。反射镜的全反射损耗及腔内其它损耗对于不同支线都是相等的,因而研究激光器的振荡支线即可只考虑 g_0 和 d_{nm} 两个因素。

——玻璃波导 CO₂ 激光器中, EH_{11} 模传输损耗最小^[2]。曲率半径较大的凹面反射镜靠近波导口放置,高阶模(EH_{12} 、 TE_{01} 等)的耦合损耗远大于 EH_{11} 模的耦合损耗^[3]。常用内腔式 CO₂ 激光器大多采用大曲率半径的凹面镜靠近波导口放置,因而可以只考虑 EH_{11} 模工作,对应的传输损耗 d_{11} 由(1)式计算^[2]:

收稿日期: 1986年9月30日。

$$d_{11} = 0.2129 \cdot \frac{\lambda^2}{a^3} \quad (1)$$

a 为波导管半径, λ 为激光波长。 d_{11} 正比于 λ^2 , 说明短波长支线损耗较小, 也可能形成振荡。 令

$$g_{eff} = g_0 - 2d_{11} \quad (2)$$

称为有效(功率)增益系数。 显然任一时刻总是 g_{eff} 取最大值的支线优先形成振荡。

考虑波长分别为 λ_1 、 λ_2 的两支线, 对应的增益系数分别为 $g_0(\lambda_1)$ 、 $g_0(\lambda_2)$, 传输损耗分别为 $d_{11}(\lambda_1)$ 、 $d_{11}(\lambda_2)$ 。 显然当

$$g_{eff1} - g_{eff2} = 0 \quad (3)$$

将会发生 λ_1 、 λ_2 之间的支线跳变。 将(2)式代入(3)式可得:

$$\begin{aligned} g_{eff1} - g_{eff2} &= [g_0(\lambda_1) - g_0(\lambda_2)] \\ &\quad - 2[d_{11}(\lambda_1) - d_{11}(\lambda_2)] \\ &= [g_0(\lambda_1) - g_0(\lambda_2)] \\ &\quad - \frac{2A}{a^3}(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \\ &= [g_0(\lambda_1) - g_0(\lambda_2)] \\ &\quad - \frac{4A\bar{\lambda}}{a^3}(\lambda_1 - \lambda_2) \end{aligned} \quad (3')$$

式中 $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$, 对于 $10.4 \mu\text{m}$ 和 $9.4 \mu\text{m}$ 两个光谱带, $\bar{\lambda} \approx 10 \mu\text{m}$ 、 $A = 0.2129$ 。 再令

$$g_0(\lambda_1) - g_0(\lambda_2) = \Delta g_0 \quad (4)$$

$$d_{11}(\lambda_1) - d_{11}(\lambda_2) = \Delta d_{11} \quad (5)$$

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta \lambda \quad (6)$$

这样支线跳变条件((3)式)就可以改写为

$$\Delta g_0 = 2 \Delta d_{11} = \frac{4A\bar{\lambda}}{a^3} \cdot \Delta \lambda \quad (7)$$

从(7)式可以看出, 支线跳变与波导管半径 a 有关, 根据 a 的大小, 可以得出下面推论:

1. a 的取值越小。 支线跳变的范围较大, 容易出现 $10.4 \mu\text{m}$ 和 $9.4 \mu\text{m}$ 两谱带之间的支线跳变, a 的取值大, 对应的支线跳变范围较小。

增益系数差 Δg_0 与放电电流 i 有关。 图

1 实线为 g_0 随 i 变化的理论曲线^[4]。 计算过程中将电流密度与各激光谱线的振动温度联系在一起, 而不考虑放电管直径的绝对大小。 图中实验点为 $\phi = 10 \text{ mm}$ 、充气压 $p = 15 \text{ Torr}$ 、 $\text{He:N}_2:\text{CO}_2 = 3:1:1$ 时的实验测试结果, 与理论值符合得很好。 可以看出, 最佳电流附近, Δg_0 较大; 偏离最佳电流, Δg_0 较小。 $10.4 \mu\text{m}$ 与 $9.4 \mu\text{m}$ 两光谱带对应的 Δg_0 的最大值约为 $5.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。

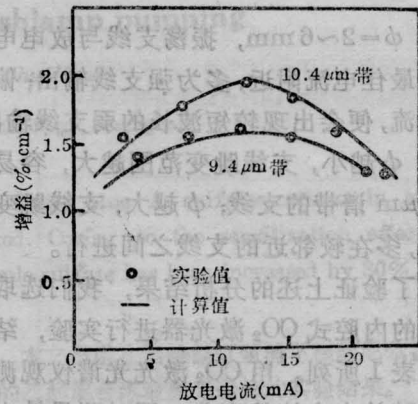


图1 增益随放电电流的变化($\phi = 10 \text{ mm}$)

此外 g_0 还与气压、气体配比、管径和管长等因素有关。不同情况下 g_0 的大小及最佳电流是不完全相同的, 但 g_0 随 i 的变化规律是类似的, Δg_0 的大小也不会出现数量级的改变。因而可以根据图1规律定性分析不同管径波导 CO_2 激光器输出支线的特点。

由计算结果可知, $\phi \leq 1.5 \text{ mm}$, 恒有 $2 \Delta d_{11} \geq \Delta g_0$, 亦即 $g_{eff1} \leq g_{eff2}$, $\lambda = 9.4 \mu\text{m}$ 的支线容易起振; $1.5 \text{ mm} \leq \phi < 2 \text{ mm}$, $2 \Delta d_{11}$ 仍然较大, 容易出现 $9.6 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 两光谱带间的支线跳变。这就是 $\phi \approx 2 \text{ mm}$ 的玻璃波导 CO_2 激光器容易出现 $9.6 \mu\text{m}$ 带支线的原由。

$\phi \geq 2 \text{ mm}$, $2 \Delta d_{11}$ 取 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 的量级, 满足(7)的 Δg_0 取同样量级的数值, 支线跳变只能在 Δg_0 取很小值的邻近支线之间进行。最佳电流附近, $\Delta g_0 > 2 \Delta d_{11}$, 总是强支线振荡。电流 i 偏离最佳值较远时, Δg_0 较

小, 邻近支线间会出现 $2\Delta d_{11} = \Delta g_0$, 从而出现支线跳变。由于 Δd_{11} 很小, 对应的支线跳变范围也很小。电流 i 很小或很大时, Δg_0 比较小, 也会出现 $9.4\mu\text{m}$ 和 $10.4\mu\text{m}$ 两光谱带之间的支线跳变。

这样, EH_{11} 模工作的波导 CO_2 激光器振荡支线的特点及其跳变方式可以归结如下:

1. $\phi \leq 2\text{mm}$, 支线竞争过程中, d_{11} 起主要作用, 一般多是 d_{11} 较小的短波长弱支线输出;

2. $\phi = 2 \sim 6\text{mm}$, 振荡支线与放电电流有关。最佳电流附近, 多为强支线输出; 偏离最佳电流, 便会出现较短波长的弱支线输出。

3. ϕ 越小, 支线跳变范围越大, 容易出现 $9.4\mu\text{m}$ 谱带的支线; ϕ 越大, 支线跳变范围越小, 多在较邻近的支线之间进行。

为了验证上述的分析结果, 我们选取腔体稳定的内腔式 CO_2 激光器进行实验, 结构参数如表 1 所列。用 CO_2 激光光谱仪观测振荡支线随放电电流的变化, 同时测量输出激光束的偏振度, 结果也列在表 1。

表 1 一些 CO_2 激光器的结构参数及测试结果

项目	编 号			
	1#	2#	3#	4#
$\phi(\text{mm})$	3	6	4.5	10
$L(\text{mm})$	300	650	300	1000
N	0.67	1.3	2.1	2.5
模	EH_{11}		多模	多模
线	图 2(a)、(b)		$10P(20)$, $10P(18)$	
偏振度	$>90\%$		非偏振	非偏振

ϕ 分别为 3、4、6 mm 的三支波导 CO_2 激光器, 输出光束的偏振度均大于 90%, 光束横截面内的光强分布呈准高斯型, 说明激光器工作在 EH_{11} 模。图 2(a)、(b) 分别为 $\phi = 3, 6\text{mm}$, $N \sim 1$ 时的典型结果。最佳电流附近均为 $10P(20)$ 、 $10P(18)$ 等强支线输出; 偏离最佳电流较远则是 $10R(20)$ 、 $10R(18)$ 等

弱支线输出; $\phi = 3\text{mm}$, $i = 2\text{mA}$ 时出现了 $9R(20)$ 支, 而 $\phi = 6\text{mm}$ 则只出现 $10R(18)$ 等波长相差较小(与 $10P(20)$ 相比较)的支线。上述特点与理论分析符合得很好。

$\phi = 10\text{mm}$ 、 $N \sim 2.5$ 为一典型的开腔激光器, 支线跳变频繁, 但总是 $10P(20)$ 、 $10P(18)$ 等几支强支线输出。 $\phi = 4.5\text{mm}$ 、 $N \sim 2.1$ 的情况比较特殊, 支线跳变不仅与电流有关, 还与横模也有关, 但没有一定规律。

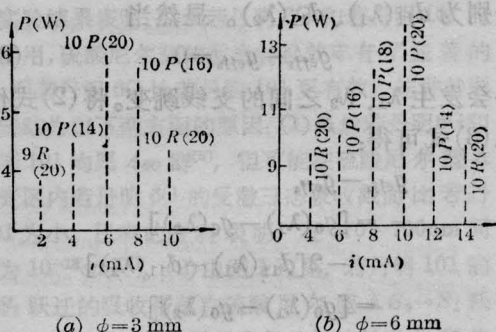


图 2 输出支线随放电电流的变化

测试中发现支线跳变与横模也有关系, 这一问题有待于进一步的研究。

从前面的分析可以看出, 对于 $\phi = 3 \sim 6\text{mm}$ 的内腔式波导 CO_2 激光器, 要得到稳定的 $10P(20)$ 支线输出, 应使激光器稳定工作在最佳电流附近。对于重复性很好的激光器, 还可以通过调节放电电流来选择输出激光的波长。

本文工作得到了成都电讯工程学院的裘明信教授和王瑞峰副教授的指导。有关实验工作得到了张世才、文晰同志的帮助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Mocker H W. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1968; **QE-4**(4): 769
- 2 Marcatili E A J, Schmeltzer R A. *Syst. Tech.*, 1964; **43**: 1783
- 3 王瑞峰. 激光杂志, 1985; **6**(6): 295
- 4 Siemsen Klaus J et al. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980; **QE-16**(6): 663