

内腔式 CO₂ 激光器工作状态的研究

王波* 王瑞峰

表明信

(成都电讯工程学院)

(桂林电讯工程学院)

提要: 讨论了 $\phi=3\sim 6\text{mm}$ 的内腔式 CO₂ 激光器的工作状态。通过损耗对比和实验分析,证明 $\phi=3\sim 6\text{mm}$ 、 $N\sim 1$ 一类内腔式 CO₂ 激光器工作在波导激光器状态,并以此解释了这类器件输出光束的大量异常现象。

Investigation of working state of intracavity CO₂ lasers

Wang Bo, Wang Ruifeng

(Chengdu Institute of Radio Engineering, Chengdu)

Qiu Mingxin

(Guilin Institute of Radio Engineering, Guilin)

Abstract. The working state of intracavity CO₂ lasers with $\phi=3\sim 6\text{mm}$ is discussed. Through loss comparison and experimental analysis, a new idea is confirmed that a laser with $\phi=3\sim 6\text{mm}$, $N\sim 1$ is a waveguide laser. A lot of abnormal phenomena are explained based on this conclusion.

一、引言

放电管内径 $\phi=3\sim 6\text{mm}$ 的内腔式 CO₂ 激光器结构紧凑,功率大小适当,被广泛用于光通信、光雷达、医疗和大气污染的监测。这类器件大都按照开腔理论进行设计,但其输出光束却具有大量开腔理论不能解释的异常现象。综合起来有以下几点。

1. 基模光束为线偏振光,偏振方向不确定^[1]; 2. 存在支线跳变现象,容易出现增益系数较小的弱支线。例如 $9.6\mu\text{m}$ 带的支线;

3. 腔外光斑半径的测量值与理论值相差较大; 4. 基模输出功率远大于开腔理论的计算值。

输出光束偏振方向的随机变化及支线跳变对于器件的推广应用是很不利的,光束参数的测量值与理论值的偏离也给器件的设计带来困难,因而有必要进行深入的研究。

上述现象开腔理论难以解释,但却与典型玻璃波导 CO₂ 激光器的结果很相似。例

收稿日期: 1986年7月14日。修改稿收到日期: 1986年11月19日。

* 现在太原工业大学基础部,激光室。

如基波导模(EH₁₁模)为一线偏振模^[2], $\phi=1\sim 2.5\text{mm}$ 的波导激光器容易出现 $9.6\mu\text{m}$ 带的支线^[3]。这样,从分析器件的工作状态入手,确定激光器的类型,前述各种异常现象可望得到合理的解释。本文就这一问题进行了一些探讨。

二、理论分析

考虑 $\phi=3\sim 6\text{mm}$ 的空心介质波导,表征导波作用强弱的参数 $\frac{\lambda}{a}$ 约为 $\frac{1}{150}\sim \frac{1}{300}$ ($a=\frac{\phi}{2}$, $\lambda\approx 10\mu\text{m}$ 为CO₂激光波长),理论分析说明此时导波作用不可忽略^[4],在这一范围工作的器件应考虑放电管的导波作用。

考察图1所示的光学谐振腔,其中 $\frac{\lambda}{a}$ 约为 $\frac{1}{150}\sim \frac{1}{300}$ 。两反射镜M₁、M₂与放电管形成一波导式谐振腔(简称“波导腔”),M₁、M₂自身又形成一开放式谐振腔(简称“开腔”)。也就是说,波导模和开腔模均为图1谐振腔中的本征模式。由激光器的振荡理论可知,任一时刻总是腔内损耗d取最小值的模式优先起振(认为不同模式增益系数基本相等),对比开腔模和波导模的腔内损耗,即可确定激光器在何种模式振荡。



图1 光学谐振腔示意图

考虑结构参数满足(1)~(3)式的一类常用内腔式CO₂激光器

$$\phi\approx 3\sim 6\text{mm} \quad (1)$$

$$N = \frac{a^2}{L\lambda} \sim 1 \quad (2)$$

$$R \gg 3L \quad (3)$$

L为谐振腔长度。

作为波导腔,考虑基波导模(EH₁₁模^[2])工作,忽略传输损耗(10^{-4}cm^{-1}),腔内损耗 α 即为从波导口辐射出的光波场经M₁、M₂反射不能全部耦合到原来模式而带来的耦合损耗 α_c 。平面反射镜靠近波导口放置,EH₁₁模的耦合损耗 α_{c1} 由(4)式计算^[4]。

$$\alpha_{c1} = 0.57 \times \left(\frac{z}{b}\right)^{3/2} \frac{z}{b} < 0.4 \quad (4)$$

$$b = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \quad (5)$$

$$\omega_0 = 0.6435a \quad (6)$$

a为波导管半径,z为反射镜到波导口的耦合距离, ω_0 、b分别为EH₁₁模所等效的高斯光束束腰半径和共焦长度。

对于图1谐振腔,M₁一端的耦合损耗 α_{c1} 可由(4)式计算。M₂一端由于R较大,接近平面镜的情况, α_{c2} 也可由(4)式近似计算,事实上 α_{c2} 要比(4)式的计算值略小一些。这样就有 $\alpha_c \leq 2\alpha_{c1}$ 。

作为开腔,由于 $N \sim 1$,只考虑TEM₀₀模工作,腔内损耗 α 即为TEM₀₀模的衍射损耗 α_{00} ,取决于费涅耳数N和结构参数R、L。对于确定的N、R和L,由图2可以查得对应的 α_{00} 的数值^[5]。

表1为一些常用内腔式CO₂激光器的结构参数和损耗的典型值。

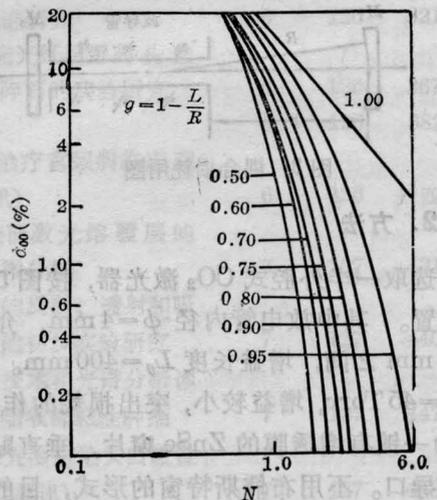


图2 损耗 α_{00} 随N的变化

表1 一些内腔式 CO₂ 激光器结构参数和损耗的典型值

| ϕ (mm) | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------|------|------|------|------|
| L (mm) | 300 | 400 | 510 | 650 |
| R (mm) | 1000 | 1500 | 1500 | 2000 |
| N | 0.7 | 0.94 | 1.10 | 1.38 |
| b (mm) | 276 | 491 | 767 | 1104 |
| z (mm) | 30 | 40 | 50 | 60 |
| α_c (%) | 4.16 | 2.54 | 2.12 | 1.28 |
| α_{00} (%) | 10.0 | 9.0 | 5.0 | 4.0 |

可以看出,对于每一结构, α_{00} 远大于 α_{c0} 说明满足(1)~(3)式的内腔式 CO₂ 激光器, EH₁₁ 模具有较小的损耗,因而将工作在波导激光器状态。

三、实验研究

1. 原理

上节分析方法和结论可用下面实验来验证。

对于图3装置,改变 M_1 的耦合距离 z , 不同 R 耦合损耗 α_{11} 按图4 规律变化^[4]。合理选择 ϕ 、 R , 改变距离 z , 检测输出功率的变化趋势, 可以确定激光器的工作状态。

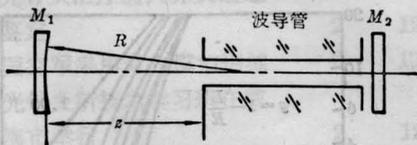


图3 耦合损耗用图

2. 方法

选取一半外腔式 CO₂ 激光器, 按图5 方式放置。其中放电管内径 $\phi=4$ mm, 介于 3~6mm 之间, 增益长度 $L_g=400$ mm。气压 $p=45$ Torr, 增益较小, 突出损耗的作用。 M 为一镀有增透膜的 ZnSe 窗片, 垂直贴在波导口。不用布儒斯特窗的形式, 目的在于避免布氏窗带来的线偏振光输出。对于曲

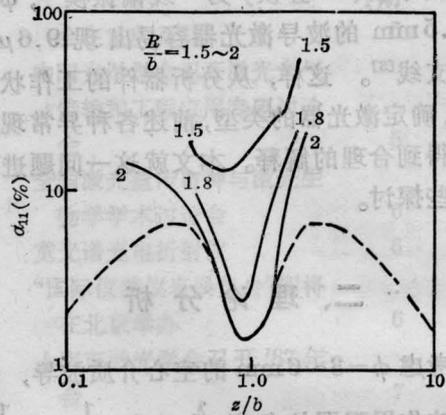


图4 耦合损耗随 z 的变化

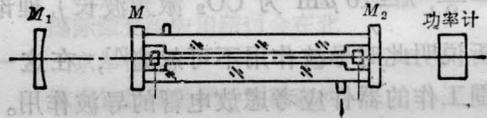


图5 实验装置示意图

率半径为 R 的全反射镜 M_1 , 改变距离 z , 检测对应的输出功率, 得到功率 P 随 z 的变化趋势。

3. 结果分析

由(5)、(6)两式可得, $\phi=4$ mm 对应的等效共焦长度 $b=491$ mm, 选取 $R=809$, 1000mm, 按照上面方法得出 P 随 z 的变化如图6 所示。

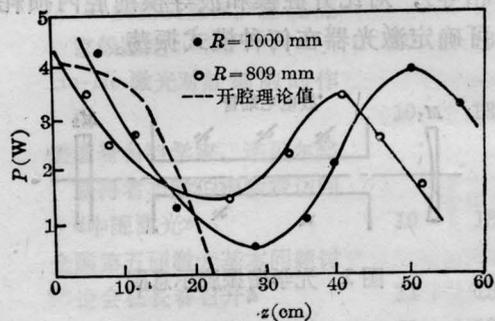


图6. 功率 P 随 z 的变化

图6 结果与图4 所示的趋势正好相反。 $R=809$ 、1000 mm, 分别对应于 $R/b=1.6$ 、2 两种情况。反射镜靠近波导口 ($z/b < 0.1$) 时, 由(4)式可知耦合损耗 α_{11} 很小 (~ 0.02), 输

输出功率 P 较大; 增大耦合距离 z , α_{11} 急剧增大, P 的取值迅速下降至一极小值; 继续增大距离 z , α_{11} 开始减小, P 的取值逐渐增大; $z=f$ 时, α_{11} 取一极小值 (~ 0.02), 输出功率 P 达到一极大值; $z>f$, α_{11} 随 z 的增加单调增大, 输出功率 P 单调下降。从而说明被测器件工作在波导激光器状态。图中虚线为 $R=1000$ mm, 作为开腔, P 随 z 发生变化的理论曲线。

检测 P 随 z 的变化的同时, 测得激光器始终为线偏振光输出, 说明是 EH_{11} 模振荡。

$\phi=3\sim 6$ mm 的单模 CO_2 激光器, 结构上都满足 (1)~(3) 式, 且与 $\phi=4$ mm 的实验管一样, 基模线偏振光输出, 易出弱支线。说明这类激光器都工作在波导激光器状态。

根据这一结论, 前面提到的各种异常现象可以给出定性的解释。例如 EH_{11} 模振荡时即为线偏振光输出, 玻璃波导激光器中, 传输损耗 α_{11} 与波长的平方成正比。因而容易出现短波长的弱支线 (如 $9.6\ \mu\text{m}$ 带的支线);

基模光束为 EH_{11} 模在自由空间的传播, 可等效为一光腰位于波导口, 大小由 (6) 式确定的高斯光束^[4], 而与开腔参数 R 、 L 无关; 波导模的光线沿“之”字形路径传播, 光波场充满放电管, 激发态粒子得到充分利用, 从而得到较大的输出功率。

我们按照波导激光器理论设计出一种单模内腔式 CO_2 激光器, 在 280 mm 的增益长度上得到了 8.5 W 的稳定单模功率。上面结论和这里的结果对于同类器件的研制是有帮助的。

感谢冯志超教授、陈侗荣教授、卢亚雄博士和贺大经博士的指导与帮助。

参 考 文 献

- [1] 王波;《激光杂志》,1986, 7, No. 2, 89.
- [2] E. A. Marctili, R. A. Schemtizer; *Bell. System. Tech. J.*, 1964, 43, 1783.
- [3] 王端峰等;《激光》,1982, 9, No. 8, 515.
- [4] R. L. Abrams; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1972, QE-8, 838.
- [5] 周炳琨;“激光原理”,国防工业出版社,1980.

(上接第 713 页)

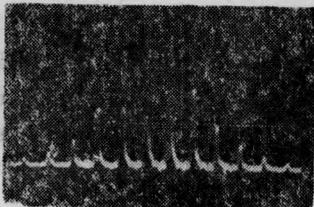


图 9 多掺 YAG 主被动锁模波形
[Nd:YAG, 10 ns/div, 0.2 V/div]

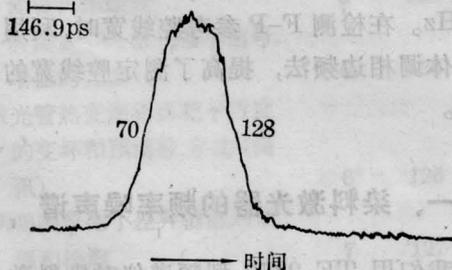


图 10 多掺 YAG 主被动锁模单脉冲波形
[Nd:YAG, 扫速 2 ns]

约 35 ns。从条纹相机多次扫描结果来看, 锁

模状态良好, 单一脉冲波形基本光滑且近于高斯形, 如图 10 所示。单一脉冲平均宽度为 272 ps, 脉宽起伏小于 $\pm 11\%$ 的占 88%, 激光输出稳定性也相当好。表 1 是以平均值 6.79 mJ 为中心, 50 次测量的统计结果。

表 1 主被动锁模能量输出统计结果

| 能量起伏 ($\leq \pm\%$) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|----|----|----|----|-----|
| 出现次数 | 21 | 35 | 45 | 48 | 50 |
| 几率 (%) | 42 | 70 | 90 | 96 | 100 |

郝英杰同学在实验中做了很多工作。

参 考 文 献

- [1] A. R. Ellobes, M. J. Brienza; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1970, QE-6, 651.
- [2] 张世文等;《激光与红外》,1983, No. 10, 31.
- [3] 华中工学院等合编,《激光技术》,湖南出版社, P104.
- [4] A. Yariv;“Quantum Electronics”, Second Edition, 279.