

# 波导CO<sub>2</sub>激光器运转状态的判定

马养武 陈钰清

(浙江大学, 杭州)

**摘要:** 研究了封离型CO<sub>2</sub>激光器运转状态与腔结构参量的依赖关系。表明,对于激光器工作状态的判别,腔菲涅耳数 $N$ 的量值比参量 $\lambda/a$ 更具有直观性和定量性,并指出, $N$ 小于或近于1的激光器都是工作于典型的波导激光器状态。实验给出的结果,对波导CO<sub>2</sub>激光器的设计具有指导意义。

## The decision of operating condition of CO<sub>2</sub> waveguide laser

Ma Yangwu, Chen Yuqing

(Zhejiang University)

**Abstract:** The relationship between operating state and cavity construct parameters of waveguide CO<sub>2</sub> laser is investigated. Compared with parameter  $\lambda/a$ , Fresnel number  $N$  is direct and quantitative in deciding the operating state of CO<sub>2</sub> waveguide laser. And researches also show that CO<sub>2</sub> laser with  $N \leq 1$  is a typical waveguide laser. The research results have distinct meanings in designing CO<sub>2</sub> waveguide laser.

### 一、理论分析

众所周知,波导激光器与普通激光器的根本区别在于:在波导激光腔内,场由波导管所导引,而不服从普通的开放式谐振腔内场的自由空间传输规律。即对波导腔模的场分布和场的传输规律的研究,通常是以波导管所形成的波导本征模为基础<sup>[1]</sup>,因此,波导激光器的工作状态和输出特性也就主要依赖于波导管材料的特性和结构特性,以及波导腔的结构特性。

无论是空心圆柱形介质波导或矩形介质波导管,边界条件下的管中的麦克斯韦方程的解的结果表明:波导管中所能存在的波导本征模的形式以及它们的传输特性都将取决于波导管的材料的折射率和波导管的尺寸大小。例如,具有最广泛应用场合的硬质玻璃波导CO<sub>2</sub>激光器,在典型的波导腔结构形式下(二块平面的腔反射镜对称地紧靠近波导管口放置),波导激光器的基波导EH<sub>11</sub>模具有场分布形式:

$$E = J_0(u_{11} \frac{\gamma}{a}), \quad (\gamma \leq a) \quad (1)$$

式中, $\gamma$ 是传播常数, $u_{11}$ 是零阶贝塞尔函数的第一个根, $a$ 是波导管半径。EH<sub>11</sub>模在波导管中的传输损耗 $\alpha_{11}$ 具有形式:

$$\alpha_{11} = \left( \frac{u_{11}}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{a^3} \operatorname{Re}(\eta_0) \quad (2)$$

式中,  $\eta_0$  为波导管材料的折合折射率, 而波导管平面镜对EH<sub>11</sub>模的耦合损耗具有形式:

$$C_{11} = 0.57 \times (z/f)^{3/2}, \quad (z/f < 0.4) \quad (3)$$

式中,  $z$  是腔镜到波导管口的间距,  $f$  是共焦参量,  $f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ , 其中,  $\omega_0$  是基模束腰半径, 位于波导管口处, 并与管径有关系:  $\omega_0 = 0.6345a$ 。(1)~(3)式描述了波导管模的场分布和完成自洽振荡所具有的各种损耗, 同时也表明, 在选定了波导管材料后, 波导管的尺寸选取以及波导腔的构型的选取对波导激光器的输出和工作特性起着决定的作用。

波导谐振腔理论分析表明<sup>[2]</sup>, 能以低损耗在波导管中传输的较低阶的波导本征模, 例如, EH<sub>11</sub>, EH<sub>12</sub>等的场分布的纵向分量一般具有 $\lambda/a$ 量级。因此, 参量 $\lambda/a$ 通常被用作为表征波导作用大小的一个度量<sup>[3]</sup>。对于某一取值范围内的 $\lambda/a$ 值的大小, 对应着激光腔中的场分布的纵向分量的大小, 即表征着激光器的波导工作状态。随着管径 $a$ 的增大,  $\lambda/a$ 值减小, 场的纵向分量也将减小, 直至完全消失波导作用, 而使器件的工作状态由波导过渡为开腔的运转状态。这种分析方法, 在原理上是正确的, 但它却只能定性地给出由波导腔到自由开腔的一段 $\lambda/a$ 取值的过渡范围, 而不是确切的某一个值, 并且, 也未涉及到腔的另一些重要参量, 如波导管长和腔长等, 而使得设计者往往难以着手对波导激光器腔结构参量的确定和对激光器工作状态的判定。

本文在总结我们关于CO<sub>2</sub>波导激光器结构参量与输出工作特性之间关系的实验研究基础上, 讨论和给出能更为直观和定量地判定激光器工作状态的一个参量, 即腔的非涅耳数 $N$ :

$$N = \frac{a^2}{L\lambda} = \left( \frac{a}{L} \right) \cdot \left( \frac{a}{\lambda} \right) \leq 1 \quad (4)$$

式中,  $L$  是激光器的腔长。(4)式给出了判定激光器是否处于波导工作状态的确定的量, 其中不仅含有表征波导作用大小的参量 $\lambda/a$ , 而且也包含了腔长(对应着波导管长)。

## 二、实验研究

表征一个内腔式CO<sub>2</sub>激光器是否处于波导工作状态的最主要的特征标志是其输出光束的偏振状态。研究表明<sup>[4]</sup>, 硬质玻璃空心圆柱波导管中的最低损耗EH<sub>11</sub>模是具有圆对称性的线偏振模。在完全对称的腔结构条件下, 其线偏振方向是任意的, 因而偏振面是不固定的。曾有人采用过一些特殊的波导构型, 例如, 玻璃-金属复合材料的波导管<sup>[5]</sup>, 以固定输出光束的偏振方向。而在我们的研究中发现, 事实上有更为简便的方法, 像我们实验研究中所采用的傍轴式电极构型, 亦能非常有效地限制圆波导模EH<sub>11</sub>的圆对称性, 而达到具有所需的固定偏振方向的线偏振光方能输出的目的。这是我们实验研究的基础, 即判别激光器的运转状态最有效的方法是测量输出激光束的偏振度。

### 1. 实验装置与过程

(1) 傍轴式CO<sub>2</sub>波导激光器 图1是傍轴式CO<sub>2</sub>波导激光器的构型图。二个电极置于激光管同一侧的平面内, 实验表明, 其输出光的偏振方向完全固定在平行于二电极所组成的平面的方向上。激光器的放电管和外套管均为玻璃材料。实验选用了不同长度和管径的放电管, 以观察所组成的激光器的工作状态。实验中, 所采用的腔反射镜的曲率半径和尺寸, 对

所有的激光器都是一样的, 以利于作比较, 即输出镜 $M_2$ 为ZnSe材料的平面输出镜, 透过率是10%。对实验所用的各个激光器, 镜 $M_2$ 到波导管口的间距 $Z_2$ 都取成相同值:  $Z_2 = 15\text{mm}$ , 全反射镜 $M_1$ 是大曲率半径的球面镜,  $R_{M_1} = 3\text{m}$ , 曲率半径 $R_{M_1}$ 的取值是考虑到波导腔镜对波导模的耦合损耗的影响, 在大曲率半径反射镜紧靠近波导管口放置的条件下( $Z/f < 0.4$ ),  $\text{EH}_{11}$ 模具有极小的耦合损耗<sup>[4]</sup>, 同时, 大曲率半径反射镜对于开放式谐振腔, 也满足稳定工作区条件。反射镜 $M_1$ 到波导管口的间距 $Z_1$ 是实验中可变参量。激光腔内工作气体的混合比为:  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 1:1:4:0.1$ 。总气压随放电管管径的增加而降低, 变化范围是, 对应于管径 $2a$ 由 $3\text{mm} \sim 6\text{mm}$ , 总气压 $P$ 由 $70\text{Torr} \sim 40\text{Torr}$ 。

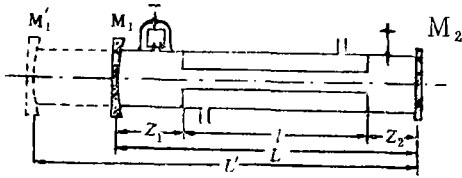


图1 傍轴式波导 $\text{CO}_2$ 激光器结构图

$M_1$ —大曲率全反射镜  $l$ —放电管长

$M_2$ —ZnSe输出平面镜  $L$ —腔长

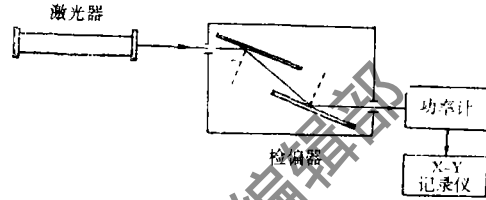


图2 激光束偏振度测量装置

(2) 偏振度测量 图2是输出光束偏振度测量装置。检偏器由二块相对平行配置的ZnSe光学平面镜所构成。被测激光束以布儒斯特角入射到检偏器中, 绕入射光轴旋转检偏器, 即可由功率计和记录仪测出和记录下入射激光束的最小垂直分量 $I_{\perp \min}$ 和最大水平分量 $I_{\parallel \max}$ , 然后由偏振度定义式

$$P = \frac{I_{\parallel \max} - I_{\perp \min}}{I_{\parallel \max} + I_{\perp \min}} \quad (5)$$

算出入射光的偏振度。

## 2. 实验结果与分析

由实验研究了二组不同放电管管长(以及腔长)和管径的 $\text{CO}_2$ 激光器的工作状态与腔结构参量菲涅耳数 $N$ 之间的关系。

如图1所示的激光器构型, 在第一组实验中, 取放电管长 $l = 380\text{mm}$ , 管径 $2a$ 分别取成 $2\text{mm}$ ,  $3\text{mm}$ ,  $4\text{mm}$ ,  $5\text{mm}$ ,  $6\text{mm}$ 五种不同尺寸。镜 $M_1$ 有 $R_{M_1} = 3\text{m}$ , 镜 $M_2$ 为平面镜,  $Z_1$ 取成:  $Z_1 = Z_2 = 15\text{mm}$ ; 即有: 腔长 $L = l + Z_1 + Z_2 = 410\text{mm}$ 。据此, 可由(4)式求出每个激光器的参量 $N$ 和 $\lambda/a$ 的值。

表1是一组由图2装置测出的5个激光器的输出光束偏振度的测量结果。

表1表明, 在 $L = 410\text{mm}$ (对应 $l = 380\text{mm}$ )固定腔长情况下, 对于放电管管径 $2a$ 取值 $2\text{mm} \sim 4\text{mm}$ 区域的 $\text{CO}_2$ 激光器, 其输出光束是线偏振光, 即表明它们是处于波导激光器工作状态<sup>[6]</sup>。表1表明, 此时它们对应的参量 $\lambda/a$ 分别是 $1/100 \sim 1/200$ , 腔菲涅耳数 $N$ 分别是 $0.23 \sim 1$ 。而对于曾经为 $5\text{mm}$ 和 $6\text{mm}$ 的二支激光器, 偏振度为0, 表明它们已处于普通的开腔工作状态, 此时, 它们所对应的参量 $\lambda/a$ 是 $1/250$ 和 $1/300$ , 参量 $N$ 是 $1.5$ 和 $2.0$ 。

实验中, 对上述二支管径为 $5\text{mm}$ 和 $6\text{mm}$ 的激光器, 在保持其他条件不变的情况下, 改

表1 第一组激光器输出光束的偏振度

$l = 380\text{mm}$ ,	$Z_1 = Z_2 = 15\text{mm}$ ,		$L = 410\text{mm}$		
$R_1 = 3000\text{mm}$ ,	$R_2 = \infty$ ,		$\lambda = 10.6\mu\text{m}$		
管径 $2a(\text{mm})$	2	3	4	5	6
参量 $\lambda/a$	1/100	1/150	1/200	1/250	1/300
菲涅耳数 $N$	0.23	0.52	0.92	1.44	2.07
偏振度 $P$	96	96	96	0	0

表2 偏振度测量结果

管径 $2a(\text{mm})$	间距 $Z_1(\text{mm})$	共焦参量 $f$	参量 $Z/f$	腔长 $L(\text{mm})$	参量 $\lambda/a$	参量 $N$	偏振度 $P$
5	200	767	$<0.4$	595	1/250	1.01	95
6	380	1105	$<0.4$	775	1/300	1.10	95

注:  $l = 380\text{mm}$ ,  $Z_2 = 15\text{mm}$ ,  $R_1 = 3000\text{mm}$ ,  $R_2 = \infty$ ,  $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ 。

变了参量 $Z_1$ ,表2是得到的测量结果。

表2所列的结果表明,在满足使波导模仍具有低耦合损耗条件下: $Z/f < 0.4$ ,通过改变透镜 $M_1$ 到波导管口的间距 $Z_1$ ,增加了整个激光器的腔长 $L$ ,即使参量 $N$ 具有近于1的量级,测量表明,激光器已由开腔过渡到了波导腔工作状态,而实验中,用于表征波导作用的参量 $\lambda/a$ 并未变化。这也就说明,包含有 $L$ 和 $a$ 两个因素的参量 $N$ 比单个 $\lambda/a$ 参量更有利于定激光器运转状态的直观性和定量性。

第二组实验,选取 $l = 480\text{mm}$ 的固定放电管长,管径分别选用 $2a = 3\text{mm}, 4\text{mm}, 4.5\text{mm}, 5.5\text{mm}, 6\text{mm}$ 五种尺寸,并仍保持图1所示的激光器构型,以及相同的其它腔构型参量和放电条件。表3是这五支激光器输出光束偏振度测量结果。

表3 第二组激光器输出光束的偏振度

$l = 480\text{mm}$	$Z_1 = Z_2 = 15\text{mm}$		$L = 510\text{mm}$		
$R_1 = 3000\text{mm}$	$R_2 = \infty$		$\lambda = 10.6\mu\text{m}$		
管径 $2a(\text{mm})$	3	4	4.5	5.5	6
参量 $\lambda/a$	1/150	1/200	1/225	1/275	1/300
菲涅耳数 $N$	0.4	0.74	0.94	1.42	1.66
偏振度 $P$	96	96	96	0	0

在第二组实验中,也对其中二支管径分别为 $5.5\text{mm}$ 和 $6\text{mm}$ 的已处于开腔运转状态的激光器,在 $Z/f < 0.4$ 的低耦合损耗范围内,通过改变间距 $Z_1$ ,增加了腔长,而使腔菲涅耳数达到近于1的量级,表4所示的测量结果表明,上述二支激光器的运转状态已处于波导激光器状态。而上述二支激光器的参量 $\lambda/a$ 仍是 $1/275$ 和 $1/300$ 。第二组实验结果也同样

证实了由第一组实验所得出的结果分析。

表4 偏振度测量结果

管径 $2a(\text{mm})$	间距 $Z_1(\text{mm})$	共焦参量 $f$	参量 $Z/f$	腔长 $L(\text{mm})$	参量 $\lambda/\alpha$	参量 $N$	偏振度 $P$
5.5	280	928	$<0.4$	775	1/275	0.95	96
6	330	1104	$<0.4$	795	1/300	1.02	96

注:  $l=480\text{mm}$ ,  $Z_2=15\text{mm}$ ,  $R_1=3000\text{mm}$ ,  $R_2=\dots$ ,  $\lambda=10.6\mu\text{m}$

### 三、结 论

理论分析与实验研究结果表明,以判据 $N \leq 1$ 来作为波导激光器工作状态的标志,比用参量 $\lambda/a$ 来判别激光器的工作状态,显得更为直观和更为确切。事实上,在参量 $N$ 中,包含着 $a/L$ 和 $a/\lambda$ 两部分,因此,在考虑 $\lambda/a$ 量级的数值的同时,也涉及到 $L/a$ 量级的数值,当两者取成同样量级的数值时,就意味着有 $N \leq 1$ 的关系。

波导激光器的主要特色在于结构紧凑,因此,实际的波导激光器的放电管长与腔长总有非常接近的数值。这样,在选定波导激光器的管径和管长(腔长)的设计过程中<sup>[7]</sup>,或者使用者在由腔结构来判别激光器的工作状态的过程中,应用判据 $N \leq 1$ ,显然是十分方便的。

论文作者在新近提出了一种波导/自由空间组合腔新构型<sup>[8]</sup>,组合腔中波导管尺寸的选取和总腔长的确定,亦据于判据 $N \leq 1$ ,组合腔的波导状态运转结果,进一步证实了本论文的研究结论。

### 参 考 文 献

- [1] Marcatili E A J, Schmeltzer R A. Bell Syst Tech J, 1964, 43:1783
- [2] Steffen H, Bhaumik M L. Phys Lett(A), 1968, 27:612
- [3] Chester A N. Appl Opt, 1974, 13:2117
- [4] Abrams R L. IEEE J Q E, 1972, QE-8:838
- [5] 王瑞峰, 李洪波, 李少蔡. 中国激光, 1987, 14(4):210
- [6] Degnan G G. J A P, 1974, 45:257
- [7] Gerlach R. IEEE J Q E, 1984, QE-20:948
- [8] 马养武, 黄霖. 中国激光, 1991, 18(10):726

收稿日期:1992年1月7日。

·产品简讯·

### 激光-纤维耦合器

Oz Optics公司通过L.O.T.-Oriol公司提供一整套为低、中和高功率应用的激光-纤维耦合器。低成本、低功率型的耦合器可用于最高400mW的CW激光功率,可提供90%以上的耦合效率。可买到有连接器和引出线的型号。采用有引出线的型号可以得到低至30dB的背反射。

译自Electro Opt, 1992, 22(99): UK23 张贤义 译 刘建卿 校