

# 内腔式 CO<sub>2</sub> 波导激光器的研究

王明常 王梧成 陈杏凤 卢纯英

(中国科学院上海光机所)

## 提 要

我们分析和计算了 TE<sub>11</sub> 波导模的传输和耦合损耗,并且考虑了波导轴线弯曲对激光振荡的影响。在此基础上研制出内腔封离型 CO<sub>2</sub> 波导激光器。本文描述了器件结构和实验结果。对波导管管径、放电参量和冷却等因素进行了讨论。

## Investigation on intra-cavity CO<sub>2</sub> wave guide laser

Wang Mingchang Wang Wucheng Cheng Xinfen Lu Chunying

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

## Abstract

Transmission and coupling losses for EH<sub>11</sub> wave guide mode were analyzed and calculated, and the effects of the bending wave guide axis on laser oscillation were considered. A sealed-off intra-cavity wave guide CO<sub>2</sub> laser have been developed on this basis. This paper describes the configuration of the device and the experimental results. The diameter of the wave guide tube, discharge parameters and cooling etc are discussed.

## 一、引 言

波导激光器具有总体尺寸小,小信号增益、饱和强度高、频率可调谐以及单位激活体积输出功率大等优异性能,适合于现阶段激光器件小型化、实用化的要求,因此,引起了人们的极大重视,发展极为迅速。

根据气体放电的相似定律<sup>[1]</sup>,波导毛细管直径减少,气压可以增加。毛细管直径 1 毫米时,气压可达 300 托以上。气压每增加 1 托,由于压力加宽使增益线宽增大 5 兆赫。这意味着总的增益线宽超过 1500 兆赫,从而可进行大范围内的频率调谐,适用作红外光谱学中的可调谐光源。在光雷达和光通讯的

多普勒外差接收机中,用作宽频带频率跟踪的本振机最为理想。在探测污染、主动夜视、激光制导、医学以及微型加工等方面,都有广泛的应用前景。

我们分析和计算了 EH<sub>11</sub> 波导模的传输和耦合损耗,并且考虑了波导轴线弯曲对激光振荡的影响。在此基础上研制出流动 CO<sub>2</sub> 气体波导激光器<sup>[2]</sup>(1978年)和封离型 CO<sub>2</sub> 波导激光器(1979年)。描述了内腔封离型 CO<sub>2</sub> 波导激光器的结构和实验结果。讨论了波导管管径、放电参量及冷却等因素的影响。测量了 EH<sub>11</sub> 波导模的方向性。器件输出功率为 2 瓦,最高为 2.2 瓦。单位激活长度的输出为 0.15 瓦/厘米,单位激活体积的输出

收稿日期:1980年1月16日。

为 9.2 瓦/厘米<sup>3</sup>。采用派热克斯玻璃管，国际上最新报导的结果分别为 0.15 瓦/厘米和 9.5 瓦/厘米<sup>[3]</sup>。

## 二、EH<sub>11</sub> 波导模的传输损耗

中空电介质波导内部气体的折射率小于管壁材料的折射率，因此不满足全内反射条件，属于泄漏型波导。E. A. J. Marcatili 从理论上推导了中空波导内部电磁场分布和波导模的传输公式，他指出存在着特殊的低损耗的传输模。他的基本假设是圆波导的内径远大于波长，并且只考虑较低阶次模式的情况。

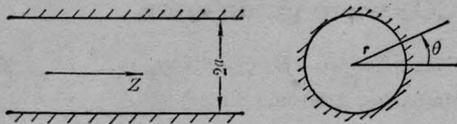


图 1 中空圆柱形介质波导

在中空圆柱形电介质波导中，可以有三种模式：圆电模 TE<sub>0m</sub> (m ≥ 1)，圆磁模 TM<sub>0m</sub> (m ≥ 1) 和复合模 EH<sub>nm</sub> (n ≠ 0, m ≥ 1)。其中，传输损耗最低，也是我们最感兴趣的是 EH<sub>11</sub> 波导模。在 [2] 中我们已作了分析。

波导模损耗与波导管壁材料的复折射率  $\nu$  是二次曲线的关系。对  $\nu$  求极值可得  $\nu = \sqrt{3}$ ，这时传输损耗最小。根据这一条件可供选择的管壁材料有氧化铍、氧化铝、熔石英和派热克斯玻璃等。

派热克斯玻璃在 10.6 微米处的  $Re(\nu_n) = 1.453$ ，氧化铍的  $Re(\nu_n) = 0.033$ <sup>[4]</sup>。当管半径  $a$  取不同数值时，由 [2] 的式 (2) 求得相应的传输损耗如下：

$a$ (毫米)	0.5	0.6	0.65	0.7	0.73	0.8	1.0
Pyrex 损耗 ( $\times 10^{-1}$ /米)	1.91	1.10	0.87	0.70	0.61	0.47	0.24
(分贝/米)	1.66	0.96	0.76	0.61	0.53	0.41	0.21
BeO 损耗 ( $\times 10^{-3}$ /米)	4.35	2.52	1.98	1.58	1.40	1.06	0.05
(分贝 $\times 10^{-2}$ /米)	3.78	2.19	1.72	1.37	1.22	0.92	0.05

和派热克斯玻璃相比，氧化铍陶瓷的传输损耗约小二个数量级，再考虑到氧化铍优良的导热特性，所以是理想的波导材料。但在实际上，多晶陶瓷的晶粒间界或研磨过程中出现的局部粗糙表面，都会引起额外的损耗。

我们根据国内的实际情况，选用派热克斯玻璃。由上表可以看出，管径越大，传输损耗越小；但从增益与管径成反比这一点来考虑，希望管径越小越好。因此对于一定实验条件，存在最佳管径。我们最后选定  $a = 0.73$  毫米，传输损耗为 0.53 分贝/米。

对于直电介质波导，EH<sub>11</sub> 模的传输损耗十分低，可是实际测量结果却比计算值大三倍<sup>[5]</sup>。这是由于波导轴线的弯曲、波导内壁的光滑度和污染粒子的散射引起波导模的附加传输损耗。设波导轴线弯曲的曲率半径为  $R$ ，则对于所选定的情况，波导弯曲引起最大的附加传输损耗由下式决定：

$$\alpha_b \approx 19.3 \left( \frac{a^3}{R^2 \lambda^2} \right) \quad (4)$$

根据目前的技术条件，波导弯曲的横向偏离量  $x$  可以限定在 10~50 微米之间，相应的弯曲半径  $R$  为 210~42 米。它们之间具有如下关系：

$$R \approx \frac{l^2}{8x}$$

其中， $l$  为毛细管长度。对于不同  $x$  值，求得附加传输损耗如下：

$x$ (微米)	10	20	50	100	200	500
$R$ (米)	211	106	42	21	11	4
$\alpha_b$ (分贝/米)	0.013	0.052	0.33	1.32	4.80	36.28

对应于上述的  $R$  值，附加传输损耗约为 (0.013~0.33) 分贝/米。弯曲的曲率半径再大， $\alpha_b$  也进一步增大，严重到不能振荡，由此可以确定出极限弯曲的数值。

器件长度为 13 厘米，则单程总传输损耗为 0.11 分贝。

### 三、波导模的耦合损耗

一般激光谐振腔主要由两端面反射镜组成，而波导毛细管，除了起放电管的作用外，还参与对腔内辐射场的限制作用，构成谐振腔的一部分。因此，中空波导谐振腔内的辐射场由三部分组成：一是波导内的场分布，二是在波导口向反射镜方向辐射的场，三是经反射镜反射后返回到波导中的辐射场。

其中第一部分辐射场已在前面讨论过，第二、第三部分场涉及到波导模和自由空间模的耦合问题，在[2]中也已经作了讨论。设平面镜离开波导的距离为  $d$ ，则耦合损耗近似等于

$$\alpha_c \approx 6.05 \left( \frac{d}{ka^2} \right)^{3/2} \quad (5)$$

取  $a=0.73$  毫米，对于不同  $d$  值，由式(5)计算出的耦合损耗如下：

距离 $d$ (毫米)	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
耦合损耗 (%)	0.30	0.43	0.56	0.86	1.20	1.58	2.00
(分贝)	0.013	0.019	0.024	0.038	0.052	0.069	0.088

设距离  $d \leq 3$  毫米，则两端的耦合损耗为 0.05 分贝。这样设计的谐振腔，保证了输出耦合损耗占优势。输出端透过率取 10%，即有用的耦合损耗为 0.4 分贝。

波导模总的单程损耗  $= \alpha + \alpha_b + \alpha_c +$  输出耦合损耗  $= 0.11 + 0.05 + 0.4 \approx 0.6$  (分贝)。

激光器的增益必须大于损耗，才能产生振荡。典型情况下波导激光器增益的测量数值约为 (8.6~10) 分贝/米<sup>[6]</sup>，则单程增益在 1.12~1.3 分贝之间，满足振荡要求。根据这种计算结果，还可以将输出耦合加大到 0.7 分贝，即允许总损耗为 0.9 分贝。已由实验获得证实。

### 四、器件结构及实验结果

我们采用派热克斯玻璃毛细管作为波导管，内径为 1.46 毫米，长度为 130 毫米。器件用放电、水冷、贮气三套管结构。整个烧制过程进行严格控制和检验，以减少弯曲损耗。对不同气压和混合气比进行了实验，最后得出最佳气压为 90 托，气体组分为

$$\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:4。$$

波导激光器结构如图 2 所示。

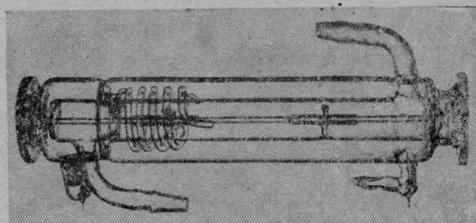


图 2 CO<sub>2</sub> 波导激光器结构

在不同实验条件下测量了激光输出功率随放电电流的变化，实验曲线见图 3、4。激光功率并不随激励电流单调增加，电流超过一定数值时，功率反而下降。这是因为 CO<sub>2</sub> 波导激光器的激励电流密度为 150 毫安/厘米<sup>2</sup> 以上，比普通 CO<sub>2</sub> 激光器高得多。管内气体温度随电流密度增加而增大，太高的温升使功率降低。

波导激光器冷却管内气体的温度，对提

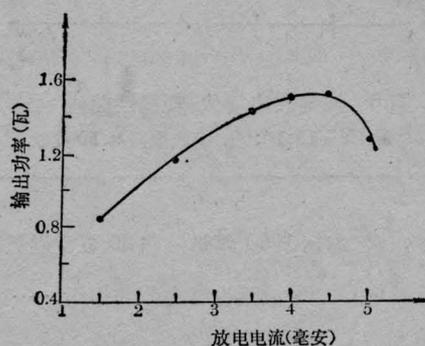


图 3 输出功率与放电电流的关系  
CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:Xe:He=1:1:0.2:4, 总气压 90 托

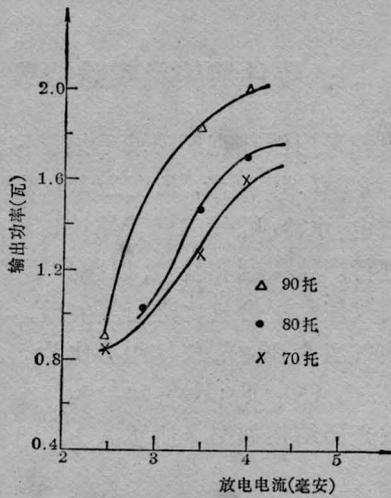


图4 不同气压下输出功率与放电电流的关系  
 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:4$ , 镇流电阻 2.50 兆欧

高激光功率是十分必要的。为了有效地降低  $\text{CO}_2$  气体的温度, 一是要增加 He 的含量, 提

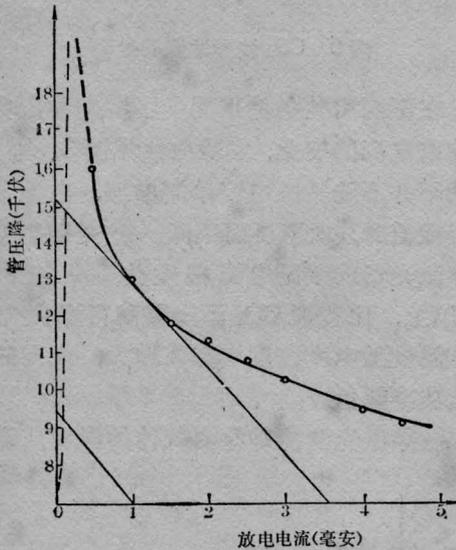


图5 波导放电管伏-安特性曲线  
 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=15:10:65$ , 镇流电阻 2.50 兆欧

高气体的热导率; 二是由于玻璃材料的热导率低, 管壁要尽量薄。但管壁太薄, 玻璃的热加工容易变形。

器件采用高压直流电源通过镇流电阻与电极相连, 进行放电激励。气体放电的负阻特性要求匹配适当数量的镇流电阻。通过实验测定最佳镇流电阻值为 2.50 兆欧, 实验测得的波导管伏-安特性曲线如图 5 所示。由负载线的位置可以看出, 最小稳定电流为 1.5 毫安。再减少放电电流, 则微分电阻剧增, 放电趋向不稳定。

在管压降为 8.7 千伏, 放电电流为 4 毫安时, 获得 2 瓦稳定的激光输出, 最高达 2.2 瓦。器件效率为 5.7%。用光阑法测定了波导激光器的方向性, 半极大值处的全宽度为 7.5 毫弧度。

我们研制成功的  $\text{CO}_2$  波导激光器, 单位激活长度达到的输出功率为 0.15 瓦/厘米, 单位激活体积的输出功率为 9.2 瓦/厘米<sup>3</sup>。采用派热克斯玻璃管, 国际上最新报导的数值分别为 0.15 瓦/厘米和 9.5 瓦/厘米<sup>3</sup>

### 参 考 文 献

- [1] V. K. Konyukhov; *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1971, **15**, 1283~1287.
- [2] 王明常等; 《激光》, 1979, **6**, No. 6, 55~56.
- [3] A. Papayoanou; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1977, **QE-13**, No. 1, 27~29.
- [4] R. L. Abrams; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973, **QE-9**, 940~946.
- [5] D. R. Hall *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**, No. 3, 1212~1216.
- [6] M. B. Klein *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, **QE-11**, 609~615.

更  
正

本刊 1980 年第一期 29 页左栏最后一行和右栏第一行应为: “具有这种作用的气体有  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_2$  虽然也有类似的作用, ……”。另外, 32 页图 6 中的“Ne”均为“ $\text{N}_2$ ”, 特此更正。

编 者