

# 射频激励板条波导 CO<sub>2</sub> 激光器 远场空间压缩单峰输出模式的研究

焦文涛, 辛建国

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

**摘要:** 从研究射频激励板条波导 CO<sub>2</sub> 激光器远场压窄单峰的理论成因出发, 根据实验现象, 通过理论分析和数值计算得出宽波导平平腔自再现模, 这种自再现模式与无波导壁时不同, 其近场具有复杂分布, 理论分析表明求出这种模式的远场是压窄单峰强度分布, 实验结果证实了这种模式的存在。

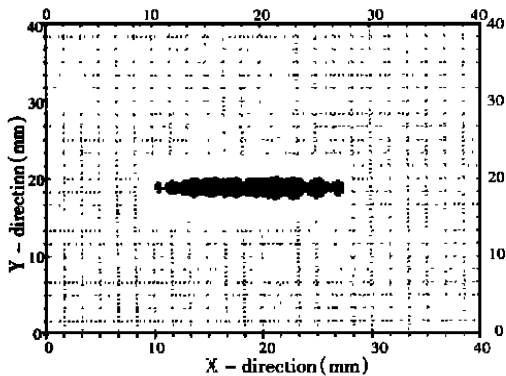
**关键词:** 射频激励; 板条波导; CO<sub>2</sub> 激光器; 远场压窄单峰

中图分类号: TN248.22 文献标识码: A

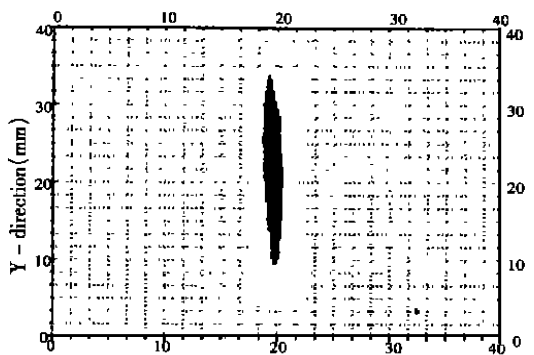
## 1 引言

板条波导激光器输出模式的研究是近年来射频激励波导 CO<sub>2</sub> 激光器研究的热点, 其目的是为了改善板条波导激光器的光束质量。关于空腔波导的波导模及波导激光器中波导模的研究在早期的许多报道中<sup>[1-3]</sup> 已经研究的较为详细, 在典型的板条波导激光器中, 激光输出模式为多模高阶模, 远场光强分布为多光点, 光束无法聚焦为一

点, 影响了板条波导平平腔 CO<sub>2</sub> 激光器的使用。尽管, 近几年来许多研究者提出了一些改善激光光束质量、获得远场单峰输出的方法。其中大多数都是利用波导阵列技术, 使波导多光束在远场相干叠加形成单峰的激光器。典型的结果如: 1984年 Youmans<sup>[4]</sup> 等人实现 1×2 波导阵列结构的激光器, 1987年 Newman 等人研制的 SHB 阵列结构等<sup>[5-6]</sup> 和 1992年英国 Heriot-Watt 大学的 Hall 教授等人报道的一种利用 Talbot 效应实现耦合锁定输出的阵列结构<sup>[7]</sup>。



Burned Pattern of Nearfield



Burned Pattern of Farfield

Fig. 1 Experimental results of limited size array waveguide laser

1991年 Xin 等人在实验中发现远场压窄单峰分布、近场多点分布的实验现象<sup>[8]</sup>,即在采用 CASE-I 波导谐振腔的情况下,获得板条波导激光器输出近场分布呈类似单一波导高阶模的形状、远场呈单峰分布(如图 1 所示),其光束传播特性具有广义的波导阵列特征。这一实验现象的发现为改善板条波导激光器的光束质量提供了一个新的可能方向。但根据目前的波导谐振腔理论,无法对所得到的实验结果进行满意的理论解释。本文就是通过理论分析和数值计算来研究这一实验现象,力求在其中能得到一些有益于改善光束质量、提高激光器效率的方法,并能完善现有的波导理论。

## 2 平行平面腔波导壁存在时横向自再现模

对于板条波导平平腔 CO<sub>2</sub> 激光器的远场压窄单峰分布、近场多点分布的实验现象,在传统的波导模式理论的基础上,尽管作了大量的工作,但很难得出满意的结果,尤其是在分析腔镜形变后引起不均匀相移时,传统的波导理论就显得更加力不从心了。于是,为全面考虑影响谐振腔模式的因素,能更好的解释波导激光器远场单峰的成因及完善波导谐振腔理论,我们通过衍射理论来研究远场压窄单峰的现象,即通过求解波导壁条件下的平平腔自再现模的方法解释远场压窄单峰、近场光斑起伏的现象。

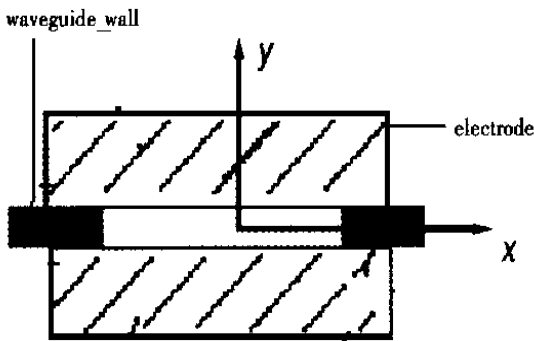


Fig. 2 Cross-section of slab waveguide laser

宽波导中横向尺寸非常大,波导壁对光波的限制作用相对于窄波导要小,同时又使用平平腔,可以形成两腔镜间的自再现模。谐振腔中的自再现模不同于一般开腔中的自再现模,除了考虑光束在两腔镜间传播外,还得考虑由波导壁反射回谐振腔的光束,由于这部分光束重新返回谐振腔,参与模式自洽,因此,波导谐振腔的单程损耗要比一般的开腔小,在数值计算中也容易收敛。在计算

中由费涅尔衍射原理得出波导壁条件下的积分方程,应用通常的数值叠代方法获得积分方程的稳定解。在得出有波导壁时自再现模的本征方程前,为计算方便,我们先作假设:

(1) 激光光场为平行于陶瓷波导壁的偏振光。

(2) 光波在两个腔镜中传播时,当形成稳定振荡时,一个腔镜一定是另一个腔镜的场源。即无论该束光在波导壁上反射多少次,在一块腔镜上的光波的最终来源应是另外一块腔镜,根据以上假设,得  $x$  方向积分方程:

$$u(x) = \frac{ik}{4\pi l} \left( \int_{-a}^a u(\xi) \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{0(x,\xi)}) d\xi + \int_{-a}^a u(\xi) r_{i(x,\xi)} \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{i(x,\xi)}) d\xi + \int_{-a}^a u(\xi) r_{i(x,a-\xi)} \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{i(x,a-\xi)}) d\xi \right) \quad (1)$$

式中  $i$  为光波在波导壁上的反射次数  $\rho$  为可在两波导壁反射  $i$  次的光由一个腔镜到达另外一个腔镜的总光程。

$$r_i = 1 - L^i(x, \xi) \quad (2)$$

式中  $r_i$  为在波导壁上反射  $i$  次的反射系数,  $L$  为在波导壁上反射一次的损耗,

$$L(x, \xi) = \left| \frac{\varphi_{x,\xi} \epsilon}{(\epsilon - 1)^{1/2}} \right| = \left| \frac{\varphi_{x,\xi} n^2}{(n^2 - 1)^{1/2}} \right| \quad (3)$$

$\epsilon$  为陶瓷壁的介电常数,  $n$  为陶瓷壁的复折射率。

当费涅尔数特别大时,对于(1)式当  $i > 2$  时,由于光束在波导壁上的入射角接近或大于 Brewster 角,所引起的损耗特别大,所以在计算中我们只考虑  $i = 1$  的情况。于是(1)变为:

$$u(x) = \frac{ik}{4\pi l} \left( \int_{-a}^a u(\xi) \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{0(x,\xi)}) d\xi + \int_{-a}^a u(\xi) r_{l(x,\xi)} \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{l(x,\xi)}) d\xi + \int_{-a}^a u(\xi) r_{l(x,a-\xi)} \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{l(x,a-\xi)}) d\xi \right) \quad (4)$$

上式即为有波导壁条件下的衍射方程。上式中右边的第一项为两腔镜直接传播项,由(4)式得数值计算中的叠代方程:

$$u_{j+l(x)} = \frac{ik}{4\pi l} \left[ \int_{-a}^a u_j(\xi) \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{0(x,\xi)}) d\xi + \int_{-a}^a u_j(\xi) r_{l(x,\xi)} \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{l(x,\xi)}) d\xi + \int_{-a}^a u_j(\xi) r_{l(x,a-\xi)} \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{l(x,a-\xi)}) d\xi \right] \quad (5)$$

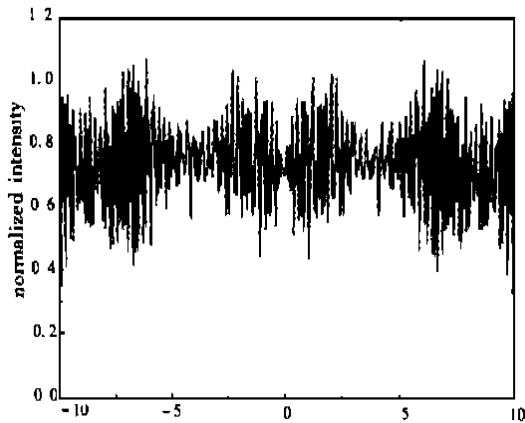
由简单的几何关系得:

$$\rho_{l(x,\xi)} = \sqrt{l^2 + (|x| + |\xi|)^2} \quad (6)$$

$$\Phi_{x,\xi} = \left( \frac{l}{\rho(x,\xi)} \right) \quad (7)$$

将(2), (3), (6), (7) 两式代入(5)可进行数值计算。

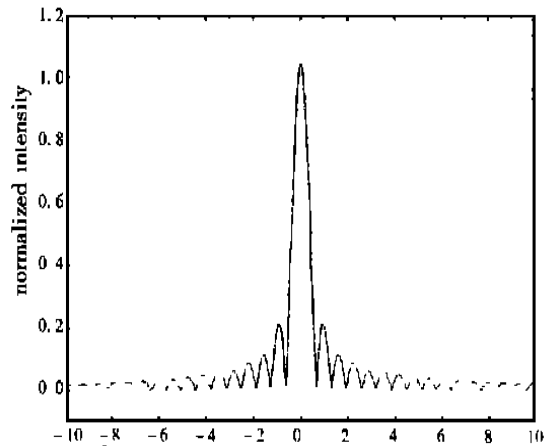
当  $a = 10\text{mm}$ ,  $b = 1\text{mm}$ ,  $l = 200\text{mm}$ , 前后腔镜都为平面镜时, 当  $\lambda = 10.597722$ , 对于陶瓷波导壁  $n = 0.65 + 0.038i$ <sup>[9]</sup> 时由方程(5)得到的近场、远场分布。如图 2, 由计算结果来看由于波导壁的反射作用, 在自再现模的结果中出现了干涉



waveguide width (mm)

Fig. 3(a) Near-field distribution

条纹, 和不规则的光强起伏, 而且由该近场分布下通过计算获得的远场分布是一个非常好的压窄单峰, 由此可见在宽波导激光器中这种特殊的自再现模式的存在是造成近场多点分布, 远场单峰分布的一个重要原因。当考虑谐振腔腔镜上存在极微小的面型变化时, 利用上面的方法进行数值模拟时, 积分方程出现严重的发散, 难以获得稳定解, 或相对稳定的解。由此可以看出保证相对严格的平-平腔是形成波导自再现模的重要条件。



1200mm positive lens focal plane far-field width(mm)

Fig. 3(b) Far-field distribution

### 3 结 论

以上分析来看, 在 CASE-I 板条波导激光器中使用平平腔时, 横向模式有可能出现上面提到的自再现模式, 这种模式的近场光场分布有复杂的起伏, 远场却是压窄单峰分布。这种分布形态不

同于开腔自再现模, 也不同于波导模式时, 实际上是这两种模式的杂合形式的模式。其频率特性保持良好的单模频振荡。同时, 在波导壁存在的条件下, 远场分布对面型更加敏感, 这种敏感性导致板条波导激光器在谐振腔腔镜存在的加工误差很大时, 很难获得这种模式。这些特性使之在激光加工和探测上都有实际意义。

### 参考文献:

- [1] Marcatili E A J, Schmeltzer R A. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and laser[J]. Bell Syst Tech J, 1964, 43: 1783 ~1805.
- [2] Degnan John J. Waveguide laser mode patterns in the near and far field[J]. Appl Opt, 1973, 12(5): 1026 ~1030.
- [3] Shackleton C J, Abramshi K M, Baker H J, Hall D R. Lateral and transverse mode properties of CO<sub>2</sub> slab waveguide lasers[J]. Opt Commun, 1992, 89: 423 ~428.
- [4] Youmans D G. Phase locking of adjacent channel leaky waveguide CO<sub>2</sub> lasers[J]. Appl Phys Lett, 1984, 44: 365 ~367.
- [5] Newman L A, Hart R A, Kennedy T, Cantor A J, Demaria A J. Appl Phys Lett, 1986, 48: 1701.
- [6] Hart R A, Newman L A, Cantor A J, Kenned J T. Appl Phys Lett, 1987, 51: 1057.
- [7] Abramshi K M, Baker H J, Colley A D, Hall D R. Opt Commun, 1992, 90: 61.
- [8] Xin J G, Zhang R J. Limited size waveguide array laser[J]. Optical Engineering, 1994, 33(4): 1142.
- [9] Schroder Bernd. Active resonant mode[J]. IEEE J Quantum Electron, 1991, 27(1): 158.

## RF-excited slab waveguide CO<sub>2</sub> laser with the far field intensity distribution of a single suppressed peak

JIAO Wen-tao, XIN Jian-guo

(*Department of Engineering Optics,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

**Abstract:** This paper theoretically studied the properties of the mode structure and modes evolution of a slab waveguide CO<sub>2</sub> laser with a far field intensity distribution of a single spatially suppressed peak. To well explain the experimental result, physical model based on the Diffractive Optics was proposed in this paper. A self-consistent mode equation under condition of waveguide wall was set up. By the use of the numerical method, the self-consistent mode was solved under the condition of waveguide wall. The theoretical results show that the farfield of the mode is single peak while its nearfield is a multiple spots. These theoretical results well agree with the obtained experimental result.

**Key words:** slab waveguide; RF excited; CO<sub>2</sub> laser; single peak farfield

作者简介: 焦文涛, 男, 1991年毕业于长春光学精密机械学院光学物理系, 1996年于长春光机学院获得硕士学位。现于北京理工大学攻读博士学位。

辛建国, 男, 教授, 博士生导师。1987年于英国 Heriot-Watt 大学获得博士学位, 国家百千万工程资助者。1995年完成射频激励千瓦级 CO<sub>2</sub> 激光器原理样机, 1995年完成射频激励千瓦级 CO<sub>2</sub> 激光器工程样机的研制, 现致力于射频激励板条波导 CO<sub>2</sub> 激光器及高功率激光器工程化的研究。