

# 射频激励大面积放电CO<sub>2</sub>激光器的进展

董明 吕百达

(四川大学光电科学系, 成都, 610064)

屈乾华 兰戈

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

**摘要:** 本文评述了扩散冷却式射频 (RF) 激励大面积放电CO<sub>2</sub>激光技术的进展, 讨论了这一技术与非稳-波导混合腔结合的优越性, 展望了这种激光器的发展前景。

## Progress in RF excited large-area discharge CO<sub>2</sub> Maser

Dong Ming, Lu Baida, Qu Qianhua\*, Lan Ge\*

(Department Of Opto-Electronic Science & Technology, Sichuan University)

**Abstract:** In this paper, we review the progress of the technology of the diffusion-cooled RF excited large-area discharge CO<sub>2</sub> lasers, reveal the advantages in combination of the technique with the unstable waveguide hybrid resonator, and show the future of the lasers.

### 一、引言

70年代, 横向RF激励技术<sup>[1]</sup>在CO<sub>2</sub>波导激光器中的应用, 是中小功率CO<sub>2</sub>激光器发展的一个重要突破; 随后, 这种技术扩展到工业用大功率CO<sub>2</sub>激光器中, 并且正在朝向商品化发展。

在RF激励技术的推动下, 许多新型CO<sub>2</sub>激光器不断涌现, 其中, 近几年才出现的一种“面积放大”概念激光器<sup>[2]</sup>显示出具有很大的发展潜力。这种器件采用增宽放电宽度取代增加放电长度的办法, 在较短的长度上获得高输出, 由于波导方向(电极间隙)很窄, 因而可以采用上下金属电极扩散冷却增益气体, 而相应的横向射频激励技术巧妙地使大面积均匀放电成为现实。

### 二、射频激励技术在大面积放电中的实现

三种大面积放电方案被采用, 阵列波导型、平板型和环型, 如图1所示。

这三种器件均需在两个水冷电极间实现高度均匀的横向RF放电。这一技术的关键可分为三点: (1) 实现面积上的均匀放电, 以建立整个区域上的均匀增益, 最重要的是避免放

\*Southwest Institute of Technical Physics.

电吸收区域的存在。(2)RF功率的有效馈入。(3)减小 $\alpha$ 放电引起的两电极层附近的横向不均匀性的影响。前(1),(2)点可通过沿电极纵向等间距放置分布电感并配以匹配网络而实现,如图2所示。(3)点可通过选择最佳RF频率以及输入功率而实现,最佳频率对于电极隙在1~3mm值,约在160~100MHz之间,这一最佳频率与电极隙有近似反比关系<sup>[3]</sup>。

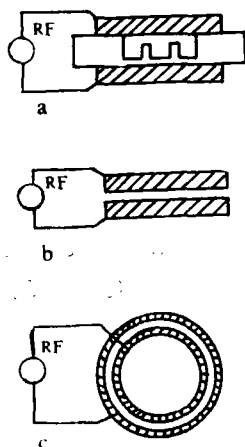


Fig.1 Three schemes of RF-excited large-area discharge  
 a—ridge coupled array of waveguide lasers  
 b—planar large area discharge  
 c—annular large area discharge

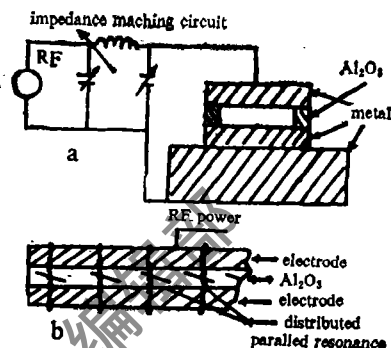


Fig.2 CO<sub>2</sub> waveguide laser  
 a—cross-section b—side-section

阵列波导CO<sub>2</sub>激光器可以说是最早的一种大面积放电类型,它是将m个单波导平行排列成一维(或二维)组合,并采用专门技术,使各波导元之间实现相位锁定,达到单模高功率输出,使远场光强分布极大提高。阵列波导结构形式很多,各种形式,各具所长,但最终目的都是在保证器件的功率提取能力基础上,实现单元间稳定锁相,如果能从根本上解决锁相问题,这种器件可获得百瓦量级以上的单频输出。

事实上,真正“面积放大”概念的提出是对平板型和环型而言。这两种结构是英国Heriot-Watt大学的K.M.Abramski等人<sup>[4]</sup>和J.G.Xin等人<sup>[5]</sup>提出的。目前平板型发展很快,因为结构简单,技术上容易实现,而环型结构则较为紧凑。

### 三、平板型大面积放电激光技术进展

K.M.Abramski等人首先对平板型结构进行了初步研究<sup>[4]</sup>,获得了大量资料,为这一技术铺平了道路。他们在对实验的分析基础上,得出了面积比输出功率的概念,取代了常规波导激光器的长度比输出概念。器件总输出功率 $P_0 = f(w/d)LP_L$ ,面积输出功率为 $P_A = (f/d)P_L$ 。式中, $P_L$ 是单位长度方形截面常规扩散冷却CO<sub>2</sub>激光器的输出功率,因子 $f$ 是考虑到常规波导CO<sub>2</sub>激光器的二维热流和平板型放电器件一维热流之间的差别,目前取1/2。其余参数见图3所示。实验研究表明,随着波导宽度增加,逐渐由二维冷却过渡到一维冷却。当 $W = 4d$ 时,激光特性已达一维冷却条件。

图4中示出 $P_A-d$ 的依赖关系,三条线分别对应静止气体(不加Xe和加Xe)和慢流气体。德国R.Nowack等人<sup>[6]</sup>进一步研究证明,当 $d > 1\text{mm}$ 时,图4的 $P_A-d$ 的反比关系近似成立,而当 $d < 1\text{mm}$ 时,波导损耗太大,放电均匀性也难以保证,因此不宜采用。他们还给

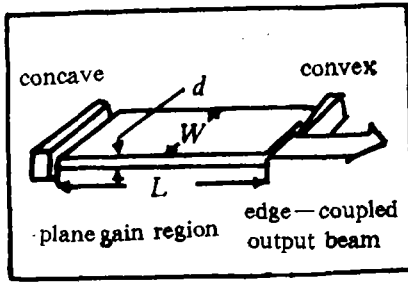


Fig. 3 An unstable-waveguide hybrid resonator

出仅考虑热扩散效应时,  $P_A$ 的经验公式: $P_A =$

$$q\eta/(\eta - 1) = 12\eta\bar{\lambda}[\bar{T}(d) - T_w]/[d(1 - \eta)](W/$$

$\text{cm}^2)$ , 式中,  $q$ 为单位面积热量输运速率,  $\eta$ 为激光器效率,  $\bar{\lambda}$ 为单位长度热传导速率, 单位( $\text{W}/\text{M}\cdot\text{k}$ ),  $\bar{T}(d)$ 和 $T_w$ 分别为放电气体平均温度和室温。当 $\eta = 10\%$ 时,  $P_A \approx 3/d(\text{mm})$ , 与图4相比, 较接近。

普通 $10.6\mu\text{m}$ 的 $\text{CO}_2$ 激光器, 其自由空间基模光束直径典型值大于 $5\text{mm}$ 。实际上有两种选择方案, 一是电极隙 $>6\text{mm}$ , 实现自由空间传播模式, 但比功率强度受到限制, 其主要原因是热输运速率下降, 这时静态比功率密度最大只有 $7\text{kW}/\text{m}^2$ 。二是当电极隙 $<3\text{mm}$ 时, 光束以自由空间——波导混合模式传播, 这时, 静态气体提取比功率可高达 $20\text{kW}/\text{m}^2$ 以上, 效率最高可达 $20\%$ 。图4给出 $d$ 分别为 $2.25\text{mm}$ 和 $7.5\text{mm}$ 的实验数据点, 分别对应两种传播模式<sup>[3]</sup>。

D.R.Hall等人在一个放电区大小为 $2.25\text{mm} \times 18\text{mm} \times 376\text{mm}$ 的平板型器件上, 采用平-平腔, 获得 $135\text{W}$ 输出, 效率 $15\%$ , 模式初步判断是 $\text{EH}_{0,1}$ 模, 而在器件总长 $1\text{m}$ 的平板型激光器上, 运用简单的多模腔得到了 $430\text{W}$ 输出。

北京理工大学辛建国等人在一个放电面积 $20\text{mm} \times 200\text{mm}$ , 隙高 $1 \sim 1.5\text{mm}$ 的平板器件上, 采用平-平腔, 构成所谓极限结构空心脊波导阵列(HBR)射频激励 $\text{CO}_2$ 激光器, 获得稳定相干锁定输出, 最大输出 $44\text{W}$ , 效率 $11\%$ 。但在更高功率情况下, 这一结构能否达到稳定锁相输出, 还有待进一步研究。顺带提一下, 辛建国等人还曾在Hall实验室利用多折叠谐振腔(即Herriott cell resonator)在环型大面积RF激励 $\text{CO}_2$ 激光器中获得 $65\text{W}$   $\text{TEM}_{0,0}$ 模的输出, 效率为 $7\%$ <sup>[5]</sup>。

为了得到工业加工用的功率与光束质量, P.E.Jackson等人<sup>[7]</sup>利用非稳-波导混合腔在平板型大面积RF放电激励 $\text{CO}_2$ 激光器中获得 $240\text{W}$ , 接近衍射极限的激光输出, 效率为 $12\%$ , 相当于 $14\text{kW}/\text{m}^2$ 的比输出功率密度。整个器件可装于 $4\text{L}$ 箱体中。随后, 德国R.Nowack等人在这项技术进一步做了工作, 先后研制出在 $5\text{cm} \times 35\text{cm}$ 的放电面积上获得 $350\text{W}$  ( $20\text{kW}/\text{m}^2$ )的输出, 效率 $11.2\%$ ; 在放电面积为 $10\text{cm} \times 60\text{cm}$ , 隙高 $1.5\text{mm}$ 的激光器上, 获得 $1040\text{W}$  ( $16.6\text{kW}/\text{m}^2$ )的输出, 效率 $11\%$ 。

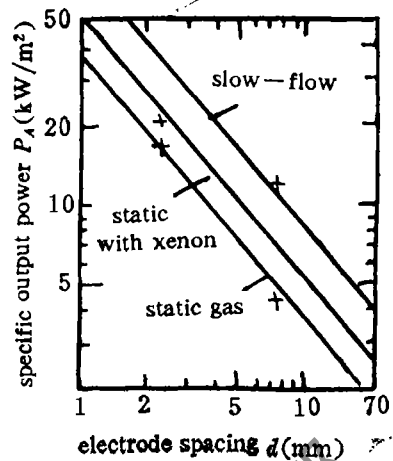


Fig. 4 Scaling of power output per unit area of large area discharges with electrode gap

#### 四、非稳-波导混合腔型的特点

这种非稳-波导混合腔,在窄向发射单波导模,而在宽向采取单侧边输出的虚共焦非稳腔结构,发射准直光束,我们认为是开腔模式,因此就整体而言是混合模式,如图3所示。这一非稳腔的相应几何放大率由于电极表面的限制而成为一维形式,而因在保证最佳输出耦合率的情况下,允许较高的放大率,从而提高了横模的选择能力。这种腔型的腔镜均为全反射镜,侧边直接输出,提高了抗光损伤以及热损伤的能力,并允许很宽的放电宽度。

由于这种腔型具有一矩形截面的耦合输出窗口,输出为象散光束,在稳与非稳方向分别具有不同的发散角,并且远场不是圆对称性的。为了工业加工的便利,需要一个圆对称焦斑,这可通过利用一个光束变形望远镜装置,即用柱面镜扩展波导方向的激光束,以实现两个方向的匹配。

另外,数值计算表明,输出光场分布为准基模,即两个方向都近似为高斯分布。同时,光场为平行于电极表面的偏振光,偏振优于99%。

研究表明,非稳-波导混合腔型相对于平-平腔来说,一方面改善了激光束质量,另一方面,降低了激活介质振荡模的跳动,降低了光流强度的非均匀性和增益饱和。

#### 五、结论与展望

综上所述,这种平板型大面积RF激励CO<sub>2</sub>激光器的设计,需要下面诸要素之间协调配合,才能达到最佳的效果,即:(1)气体的良好冷却,需要小的电极间隙,目前一般采用1.5mm左右;(2)低波导损耗,要求电极间隙不小于1mm,波导加工平直,表面抛光等;(3)最佳激励频率;(4)最佳充气压和配气比,目前这种器件配气比均采用3He:1N<sub>2</sub>:1CO<sub>2</sub>+5%Xe,总气压在75~150Torr范围;(5)激励的均匀性以及振荡腔型的选择。

实验结果显示,这种与非稳-波导腔结合的扩散冷却式RF激励大面积放电CO<sub>2</sub>激光器,是一种工业用功率型激光器的有前途的选择方案,如果采用折叠的谐振腔,可以达到更高的功率。

优良的技术将使这种小型化、紧凑的、封离式或慢流激光器成为现实,它使用安全、易于在工业材料加工中使用。不难想象,也可将其安装于机械臂上,从而满足苛刻的工作环境条件的要求。

#### 参 考 文 献

- [1] 林良华,时顺森,罗永新. 激光技术, 1990; 14(3): 29
- [2] Hall D R, Baker H J. L F World, 1989; 25(10): 77
- [3] He D, Hall D R. IEEE J Q E, 1984; QE-20(5): 509
- [4] Abramski K M, Colley A D, Baker H J *et al.* A P L, 1989; 54(19): 1833
- [5] Xin J G, Hall D R. A P L, 1987; 51(7): 469
- [6] Nowack R, Opower H, Wessel K *et al.* L & O, 1991; 23(3): 68
- [7] Jackson P E, Baker H J, Hall D R. A P L, 1989; 54(20): 1950