

# 工业多用途工具

## ——微波激励 kW 级 CO<sub>2</sub> 激光器

张泽渤

孙淑琴

(中国科学院物理研究所)

(中国科学院感光化学研究所)

提高气体放电的功率注入密度,是进一步发展工业用高功率 CO<sub>2</sub> 激光器的关键。为此,我们采用自制的变形 Magic T 型微波放电腔,克服了由于高频趋肤效应引起的放电不均匀,实现了大体积的均匀的微波辉光放电。在用于激励高功率 CO<sub>2</sub> 激光的原理性实验中,获得大于 1kW 的激光输出功率,光电效率优于 25%,首次达到商用水平。

### 一、工业用高功率 CO<sub>2</sub> 激光器现状

高功率 CO<sub>2</sub> 激光器不单是基础研究的重要工具<sup>[1]</sup>,而且已越来越广泛地应用于现代工业生产中。比如材料的切割、焊接和表面处理,采用高功率 CO<sub>2</sub> 激光后,加工的效率和质量都有显著的提高<sup>[2,3]</sup>。目前,在若干生产流程中,如汽车底盘的焊接、变速齿轮的焊接,高功率 CO<sub>2</sub> 激光已必不可少。铜、铝合金的切割焊接,厚钢板及硬质金属的切割焊接,要求 CO<sub>2</sub> 激光的单模或低阶模的输出功率为几千瓦至几万瓦,激光光束可调制并具有巨脉冲功能。作为生产线上的工具,还应体积小,使用方便,安全可靠。实现上述要求的关键是气体放电的性能,即在高的能量注入密度条件下,能否保持大体积的均匀的辉光放电。这是因为随注入功率密度的提高,激光的小信号增益及饱和强度亦增高,这时才能实现高的激光功率输出。另外,在 CO<sub>2</sub> 激光气体放电过程中,有一个最佳电场强度与气压比  $E/p$ ,因此随注入功率密度提高,最佳工作气压随之提高,<sup>①</sup>这样就可同样的放电体积下不但可以得到更高的激光输出功率,而且还可减小气体循环泵的容量,从而进一步缩小体积,降低成本。不断地提高注入功率密度和工作气压,至今仍是人们极感兴趣的研究方向。

目前常用的放电方式为直流和射频激励两种。直流放电,无论是纵向还是横向,在气压增高时,都难于保持稳定的辉光放电,尽管采用快速流动使气体处于湍流状态<sup>[4,5]</sup>,放电性能有极大改善,但当功率注入密度超过  $1.1 \times 10^7 \text{W/m}^3$  时,放电不稳定,开始出现类似弧光的丝状放电。因此,目前商用直流激励的高功率 CO<sub>2</sub> 激光器多半工作在低功率注入密度、低的工作气压下,体积一般都较庞大。近年来,为提高功率注入密度,人们研究并完善了射频放电技术,射频激励的高功率 CO<sub>2</sub> 激光器有了很大的进展<sup>[6]</sup>。由于放电频率增高,功率注入密度已远远高于直流激励,已达到  $3 \times 10^7 \text{W/m}^3$ 。常用的射频放电多采用电容耦合,电压幅度低,便于调制和实现巨脉冲。目前,商用射频激励的 CO<sub>2</sub> 激光功率已达到 8kW,调制频率高至 100kHz,巨脉冲幅度是平均功率的四倍。但是,射频激励也有不足之处,高效率、高功率的固体射频电源还十分昂贵,而且只有少数几家大公司能做。耦合结构较复杂,仍存在电极压降效应,在放电的径向,仍存在一定的不均匀性,它还不能完全取代现有的直流激励的 CO<sub>2</sub> 激光器。

最近,微波炉的大量生产,微波源的质量有明显提高,效率大于 70%,成本极低,微波放电再度引起人们的关注。微波激励除具有全部射频激励的优点外,还由于它的工作频率比射频

高二个数量级以上,允许注入功率密度增高,已无电极压降,也不需限流电阻,放电效率高。另外,常用的磁控管的工作电压范围小,更便于调制和实现巨脉冲功能。因此,自激光问世以来,人们就开始研究微波激励各类气体激光器。从 He-Ne 至准分子激光<sup>[7,8,9]</sup>,都看到了激光输出,但都因高频趋肤引起的放电趋于放电体的外表面,激光的效率极低,所以终止了研究。最好的结果是联邦德国宇航研究所采用气体喷咀技术得到的<sup>[9]</sup>。他们的微波放电在气体喷咀后面产生,放电已不趋于外表面,在激励 CO<sub>2</sub> 激光的实验中,获得 360W 的输出功率,但放电在气体流动方向仍不均匀,效率只有 7%,远低于直流和射频激励的结果。

最近,我们通过理论和实验研究,认识到微波激励的气体放电的趋肤现象是一个动态过程,其趋肤速度与微波注入功率密度、电磁场分布、气体流动速度和气体的电离状态等有关<sup>[1]</sup>,在一定的条件下,是可以控制的。在大量的理论和实验研究的基础上,我们采用特殊尺寸的变形 Magic T 型放电腔,在快速流动条件下,获得了大体积的均匀辉光放电。在用于激励 CO<sub>2</sub> 激光的原理性实验中,激光输出功率超过 1kW,电光转换效率大于 25%,优于同类型的直流和射频激励的结果,首次达到商用水平。

## 二、实验装置

原理性实验装置如图 1 所示,它由三个互相独立的放电单元组成。每个单元包括:一支 NEC 公司的磁控管 2M196,一个二螺钉阻抗匹配器和一个由优质玻璃 (Duran)、铝质 Magic T 型结构组成的放电腔。磁控管工作频率为 2145GHz,效率为 70%。三单元共用一个气体循环系统,其中的气体循环泵为罗茨泵,体抽速为 2000m<sup>3</sup>/h。在循环泵的前后各有一个水冷的热交换器,在循环泵后面还装有气体还原催化剂。整个系统可以封闭运行,也可以有一定数量的气体交换。每个单元的放电长度为 0.28m,放电管直径为 0.024m。光学谐振腔总长

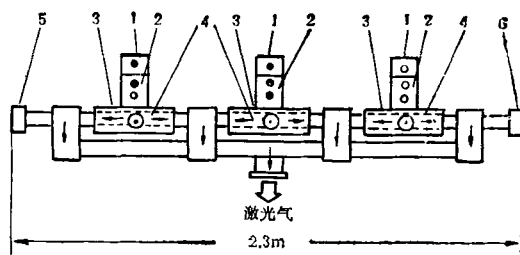


图 1 微波激励 kW 级 CO<sub>2</sub> 激光器原理  
1.磁控管 2M196; 2.阻抗匹配器; 3. Magic T 放电腔; 4.玻璃放电管; 5.全反射镜; 6.输出镜

2.3m。钼全反射镜的曲率为 20m, ZeSe 输出镜的透过率为 0.2, 0.3 和 0.5。全部光学元件固定在一个花岗石平台上,主要的光学元件和管道等都加有水冷。

电源的特点是简单、成本低和稳定可靠。如图 2 所示,它由三支家用微波炉电源组成。还有三支二极管作隔离用。由于采用了磁饱和及具有一定容量电容的二倍压整流电路,既保证了磁控管额定功率的稳定,又满足了磁控管工作要求的稳定条件。三个电源各占三相电中的一相,联合供三支磁控管用。在额定功率输出时,输出微波的纹波很小,从而保证了激光输出的长期和短期稳定性。不再需要外加的保护措施,工作稳定,寿命长。

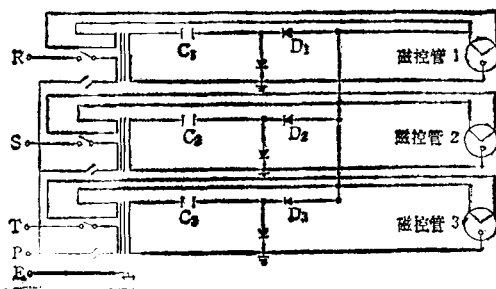


图 2 电源原理图

## 三、实验结果

根据 CO<sub>2</sub> 激光气体的微波放电参数的计算

1) Zebo Zhang, Disseration, Uni. Duesseldorf, (1988)

和实验的测量结果,我们设计并制作了具有一定尺寸的变形 Magic T 型放电腔,同时也采用了一定形状的气体流动结构,在湍流上叠加一个沿轴向的螺旋流动,微波激励的气体放电均匀地充满放电管,不再趋于管壁。同时,有径向流动,更有利于激光的耦合输出,因为一般来讲,激光的模体积总小于放电体积。三支微波管总输出功率为 4050W,通过调节二个阻抗匹配螺钉,可以将 95% 的微波功率耦合到放电等离子体中。在最佳工作气压附近,有一个较大的气压范围,阻抗匹配器不需调整,这与计算得出的这一区域内等离子体阻抗基本不变的结果相一致。这给使用带来极大的方便。在实验中,采用的是标准激光气体,它的成分比是:  $\text{CO}_2|\text{N}_2|\text{He}:4.5|3.5|82$ 。图 3 给出了在额定微波功率(4045W)时,激光输出功率同工作气压之间的关系。放电管直径为 0.024m 时,激光束呈低阶模。三条曲线是在输出镜透过率分别为 0.2,0.3 和 0.5 时测得的。在透过率  $T$  为 0.2 时,激光的最大输出功率为 1050W,这时的气压为 5kPa。电光转换效率大于 25%。若对输出镜的透过率进一步优化,可望得到更高的功率输出。

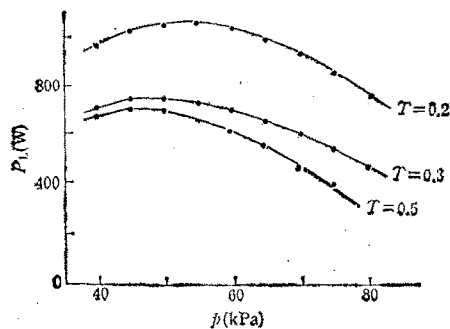


图 3 激光输出功率同气压的依赖关系

在实验过程中,采用四极质谱仪对气体成分进行了实时测量,测量结果表明,在微波放电过程中,  $\text{CO}_2$  分子离解的数量远小于直流激励时的数量,激光输出功率的稳定值也高于直流激励。为便于同直流激励比较<sup>[10]</sup>,放电时,只采用一个单元,这同文献[11]中的条件相一致。在封闭循环、微波放电几分钟后,离解的  $\text{CO}_2$  分

子的浓度稳定在 30%,激光输出功率稳定在初始峰值的 75%,如图 4 所示。在相同条件下,直流激励时<sup>[10]</sup>,约 70%的  $\text{CO}_2$  分子被离解,激光输出功率稳定在初始值的 30%。另外,质谱测量还发现,如果在放电的激光气体中加微量的水蒸气,则在微波放电过程中,  $\text{CO}_2$  分子离解的数目将会进一步减少,稳定的激光输出功率可以达到初始值的 80%。

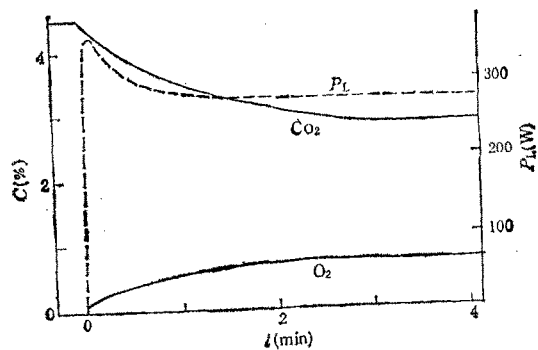


图 4  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  的浓度及激光输出功率随时间的变化

当加有室温催化剂时,经过几分钟的运行后,二种放电方式都可恢复到初始时的  $\text{CO}_2$  分子浓度和初始时的输出功率。该催化剂是 Pt-Rh  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pellets(721P, Fa, Degussa)。图 5 为在微波激励时的结果,直流激励的结果在文献[10]中给出。二种放电采用的是同一个催化器。

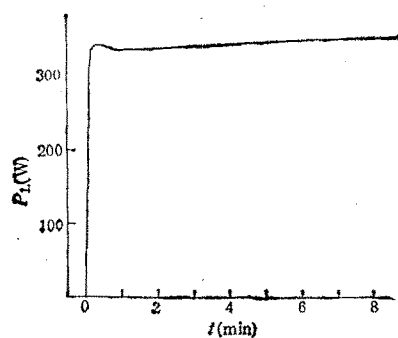


图 5 有催化时激光输出功率随时间的变化

为适应工业流水线上的需要,在相对湿度大于 90% 条件下,进行了连续 10 小时的运行观测,尽管温度高,在有冷却的元器件上积满了

冷凝水,整个器件运行正常,在观测期间,激光输出功率的最大不稳定度为1.6%。在这样高的湿度下,直流和射频激励的高功率CO<sub>2</sub>激光器都很难正常运行。

在这个原理性实验中,三个放电单元放电是互相独立的,原则上可以用更多的单元相串联,组成各种功率级别的CO<sub>2</sub>激光器,实现从几千瓦至几万瓦的激光输出。另外,因放电长度放电管径的变化,可采用相应的光学非稳腔或稳定腔来达到所需的激光光束模式。几kW至10kW微波激励的CO<sub>2</sub>激光器正在研制中。

在这次实验中,整个微波放电过程都是在金属波导或金属放电腔中进行的,这些波导和放电腔,包括磁控管的内外壳都是接地的,无高压危险,安全可靠,无环境污染。同微波炉一样,使用方便,寿命长,非常适于在生产流水线上使用。

作者感谢 Duesseldorf 大学 J. Uhlenbusch 对本工作的支持,感谢 J. H. Schaefer 在实验过程中的多方面的帮助。

- [1] J. Uhlenbusch, Proc. XVI International Conference of Phenomena in Ionized Gas, Uni. Duesseldorf, (1983), 330.
- [2] E. Beyer et al., *Laser Optoelectr.*, 5(1986),35.
- [3] G. Herziger, Proc. Industrial Application of High Power Laser SPIE, 455(1984), 65.
- [4] S. Mueller and J. Uhlenbusch, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 20(1987), 697.
- [5] 张泽渤,应用激光, No. 5(1984),6.
- [6] W. Schock and H. Huegel, *VDI-Berichte*. 25 (1986), 535.
- [7] S. A. Ahmed and R. Kocher, *Proc. IEE E*, 52 (1964), 1737.
- [8] J. F. Young, et al., *Laser Focus*, 4(1982), 63.
- [9] W. Schall, et al., Proc. Gas Flow and Chemical Laser, Bristol, England: Adam Hilger, (1985), 301.
- [10] S. Mueller, et al., Proc. Gas Flow and Chemical Laser, Bristol, England: Adam Hilger,(1985), 11.

## 亚微观团粒的半导体材料

亚微观团粒的半导体,是一种引人注目的材料,因其尺寸小而引起量子效应,表现出非同一般的特性。两个研究小组发表了生成特定大小的硫化镉(CdS)团粒的特殊方法。

截径为1—100nm胶状半导体微粒是一类介于孤立分子和固体之间的新材料,可用来研究由分子态向大块状态的转变。研究表明,胶体半导体的光学性质与宏观晶体截然不同,它依赖于微粒的大小——即所谓量子尺寸效应。微粒减小时,电子-空穴对受到局域限制,价带和导带中会产生分立的电子态,有效带隙增大,使材料光谱的吸收边发生向短波移动的“蓝移”,光跃迁的振荡强度减弱,还会出现分立的吸收带;同样地,在发光光谱中也可观测到宽发射谱随微粒半径的减小而引起的“蓝移”。

Herron 等人利用离子交换法将 Cd<sup>2+</sup> 加到沸石中,然后暴露在 H<sub>2</sub>S 气体中形成 CdS 微晶。从 X 光分析发现,低浓度时, Cd<sup>2+</sup> 优先吸附在 Y 沸石的 I' 位,即团粒只处在较小的方钠石格子而不在大格子上。这样,整个结构变成一个含有四重 CdS(O) 的畸变了立方晶格。 Cd<sup>2+</sup> 和沸石晶格中的氧相配位的结果,使微小的团粒具有不同寻常的稳定性。这些被分隔开的 CdS 团粒中,光吸收边为 350nm,而大块 CdS 的吸收边为 540nm。即使把温度降到 4K,在

CdS 团粒中始终不出现任何发光谱,然而相同条件下大块 CdS 的光发射谱却很强。当相邻的方钠石格子都被团粒 CdS 所填充时,光学性质也会急剧变化,吸收边移到 420nm,同时在 350nm 处存在类似激子谱的特征。另外,还出现由载流子与空位和晶格缺陷复合而引起的发射光谱。这些现象都是因为通过渗透作用形成了 CdS 超级团粒的结果。超级团粒的新特点是,团粒中的每一个 CdS 分子都处在表面,而且 Cd 和母体晶格网络中的氧有很强的耦合作用。CdS 在光催化作用下有选择性的插入,使这种 CdS 团粒与普通的胶体不同。

Domeron 等人用两种酵母菌合成了 CdS 微晶。在细胞内部生成的 CdS 结晶,成 NaCl 结构而不是通常在热力学上较为稳定的六方结构,肽在合成中起着保护剂的作用,微生物控制着成核和长大,使 CdS 生成直径约 20Å、大小均匀并具有量子尺寸效应的微晶。这样,采用一种独特的代谢过程,使受 Cd<sup>2+</sup> 侵袭了的活性菌得到“解毒”。因此,Domeron 的这一发现为用生物合成的方法获得量子尺寸半导体微晶提供了第一个例证。

(章 蓓根据 Nature 1989 年第 338 卷  
第 540 页编译)