

万瓦 CO₂ 激光器流场整定装置的研究

程祖海

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

提要 本文讨论了横流 CO₂ 激光器增益空间分布的形成过程及影响因素, 报道了采用微孔丝网流场整定装置的万瓦 CO₂ 激光器的放电特性和输出光束质量。

关键词 CO₂ 激光, 风速分布, 流场整定, 光束质量

1 引 言

改善高功率 CO₂ 激光器的输出光束质量已成为激光工业应用的迫切要求。目前国外主要在预电离、高频激励和微波激励等新技术上下功夫, 以图通过改善放电均匀性达到提高输出光束质量的目的^[1,2]。虽然这些措施对改善光束质量有较明显的作用, 但使电源系统结构复杂, 激光器的成本变高, 电源的可靠性也有待进一步提高。本文通过对横流 CO₂ 激光器放电区增益的空间分布形成过程及影响因素的分析, 提出并研制成功了一种微孔丝网流场整定装置, 在不改变原针板放电结构的前提下, 通过改善放电区风速分布和气体流动状态, 使万瓦横流 CO₂ 激光器非稳腔环形光束的近场强度分布得到了显著改善, 达到了采用预电离措施殊途同归的效果。

2 横流 CO₂ 激光器增益空间分布形成过程及影响因素

对于阴极是由很多针状电极组成的针板放电结构而言, 其放电空间实质上是很多柱状放电小体积元的包络空间。在每根针状阴极对应的柱状放电小体积元内, 电子的密度较大, 而在柱状放电小体积元外, 电子密度较小。当放电区存在气体流动时, 电子在极间的运动比通常密闭容积中辉光放电的电子运动状态要复杂得多: 电子一方面在极间电场作用下产生沿电场力的迁移运动, 另一方面又在电子浓度差的作用下产生横向扩散运动, 同时还要产生沿气流方向的牵连运动。具有一定能量的电子在进行上述复杂运动的过程中不断碰撞基态 CO₂ 分子, 使其激发到激光上能态而成为增益媒质。由于电子浓度和运动方向与电极结构、风速分布、气流状态和放电电流等因素有关, 导致激活媒质空间增益分布及其决定的输出光束横向强度分布也必然与上述因素有关。

2.1 风速分布的影响

收稿日期: 1992 年 3 月 10 日, 收到修改稿日期: 1993 年 7 月 5 日

气体在放电区喉道的流动特点,是中心气流风速必定大于管壁附近的流速。随着气流的雷诺数不同,气流速度分布的线型也不同。 CO_2 激光器中, CO_2 分子的激光上能级(00^0_1)的能级寿命约为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}$,在此期间,受激 CO_2 分子将受气流风速的整体牵连向放电区下游移动。当放电区风速为 $50 \sim 100 \text{ m/s}$ 时,计算出受激 CO_2 分子将向下游移动 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 距离。在放电区内形成了由图1(a)所示的沿放电方向的截面形状和图1(b)所示沿光轴方向截面形状包络而成的激活媒质增益空间分布区域。当谐振腔光轴处于图1所示的位置时,腔内振荡模上、下两部分始终处于激活媒质增益区内,而振荡模两侧则由于受气流速度呈抛物线型分布的影响,总有部分区段并不处在激活媒质增益区内,如图1(b)中斜线部分所示。当采用非稳腔选模时,环形光斑近场强度分布总是沿放电方向的环带光强较强,沿风速方向的环带光强较弱。当风速较高时,下游对应的光强较强,反之则上游对应的光强较强。消除或减弱沿光轴方向气流速度分布的不均匀性,是改善横流 CO_2 激光器输出光束质量的根本途径,也是我们研制微孔丝网流场整定装置的基本出发点。

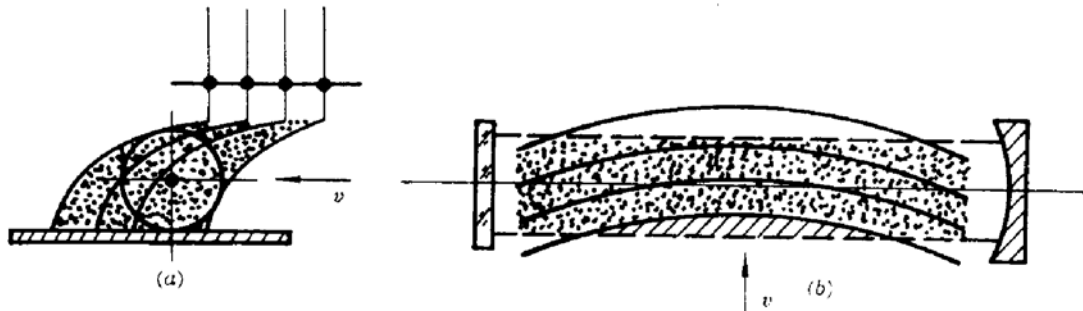


Fig. 1 Schematic of the gain spatial profile and the optimal beam state along the axis of a transverse flowing CO_2 laser
(a) discharging direction; (b) beam along the axis

3.2 流动状态的影响

放电区气体流动速度源于高速轴流压气机。根据压气机速度三角形准则,压气机出口的气体流动方向,实际上是沿轴向运动方向和沿圆周转动方向的合成运动方向。因此,放电区的气体流动状态,除了直线运动外还存在着转动。气流的转动将导致严重的涡流。压气机的转速越高,涡流也越严重。除此之外,气体在放电区的流动状态,还与气流的雷诺数 Re 有关。当气流的雷诺数大于2200时,还将处于湍流状态,上述二者共同作用的结果,使放电区气体分子的微观运动呈现十分复杂的运动状态。总的说来,当气流处于旋流和湍流状态时,气流内部将形成一个个微小的涡流气团。在这些微小气团的内部和外部,气流的压力、密度和流动方向各不相同,因而导致放电区各点的气体折射率也不相同。当振荡光波通过一压力、密度和流动方向、折射率不均匀的媒质时,必将产生不规则的光学畸变。降低或消除放电区气流的涡流和湍流尺度,也是改善输出光束近场强度分布均匀性的重要因素。

3 微孔丝网流场整定装置的实验研究

3.1 流场整定装置的构成

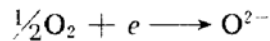
如图2所示,本装置主要由安装框架1,支承筛网2,微孔丝网叠层3和加强杆4四部分组成^[3]。在本实验装置中,安装框架由黑化角铁构成长 1.2 m ,宽 0.2 m 的矩形。支承筛网选用 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 网孔, $\phi 1 \text{ mm}$ 直径的铜筛网,并在图示部位支承三根直径为 $\phi 10 \text{ mm}$ 的铜加强杆,以

保证其在 100 m/s 的风速下有足够的强度。微孔丝网叠层的构造是本装置的关键。实验表明,该丝网的网孔目数、丝网线径、层叠方式和安装位置等对放电区风速分布具有明显的影响。通过优选,我们采用了过氧化处理的 100 目和 400 目两种微孔铜网,按流场中心 1/3 长度区域敷设一层 100 目和两层 400 目丝网,中心 2/3 区域敷设一层 100 目和一层 400 目丝网和接近两边壁 1/3 处只敷设一层 100 目丝网的层叠方式构成。铜质丝网过氧化处理的目的是在其表面生成一层 CuO 薄层。该薄层属 *n* 型半导体,在受热状态下容易释出氧而变成金属组分过量的非计量氧化物。CO₂ 激光器在放电过程中,CO₂ 不断被离解成 CO,使激活物质浓度减少,输出功率

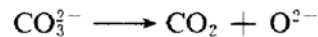
下降。CO 可以与 O₂ 反应生成 CO₂,但必须有一种反应物吸附在催化剂表面才能进行。CO 属还原性气体,其吸附过程是吸附物质将电子给予氧化物,因而在 *n* 型半导体 CuO 上将优先吸附^[4]



放出的两个电子使气相中的 O₂ 吸附生成 O²⁻ 来代替晶格中释出的一个 O²⁻:



另一个在晶格中释出的 O²⁻ 则通过 CO₃²⁻ 转化为 CO₂:



实验结果证明,采用本微孔丝网流场整定装置,不但可使沿光轴方向的风速分布基本拉平,而且还可使万瓦 CO₂ 激光器稳定工作时间由原来的 2 h 延长到 5 h 以上。

2.2 流场整定装置的实验特性

将上述微孔丝网流场整定装置安装在万瓦 CO₂ 激光器放电区上游距第一排阴极针约 350 mm 处,进行了下述实验研究:

3.2.1 放电区沿光轴方向风速分布的测量

采用皮托管和 GY-10 型光标微压差计,在安装和不安装流场整定装置条件下,分别测量了万瓦 CO₂ 激光器放电区沿光轴方向的冷态风速分布如图 3 所示。在未加流场整定装置之前,放电区喉道中心的风速为 85 m/s,而靠近激光器两侧壁附近的风速仅为 70 m/s,二者相对误差达 20%。安装该装置后,由于微孔丝网各部分对气流的阻力不同,使喉道中心的风速稍有降低(约 80 m/s),但激光器两侧壁附近的风速提高到 79 m/s,使整个放电区沿光轴方向的风速分布基本相等,消除了原气流抛物线型分布对非稳腔振荡模体内增益分布不均匀的影响,对改善环形光斑近场强度分布均匀性有利。

3.2.2 放电特性的研究

在不改变放电结构和电源系统的条件下,对流场整定装置的放电特性进行了对比实验研究,实验结果如图

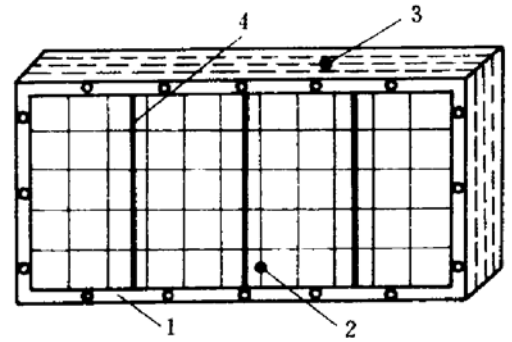


Fig. 2 Schematic of the flowing velocity regulator in the 10 kW CO₂ laser
1—setting frame; 2—wire cage; 3—stratified gauzes; 4—strengthen bar

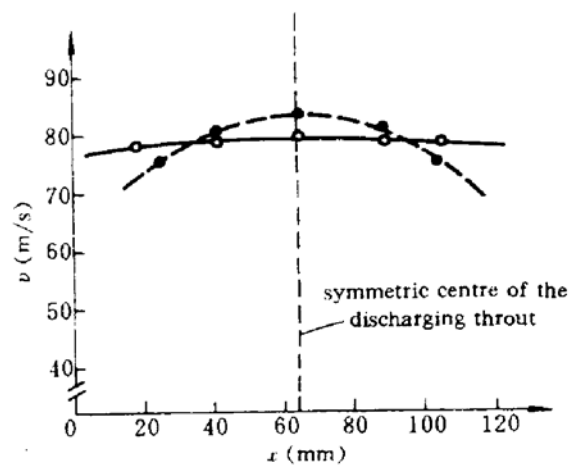


Fig. 3 Effect of the flowing velocity regulator on the velocity profile along axis
—•— without regulator;
—o— used regulator

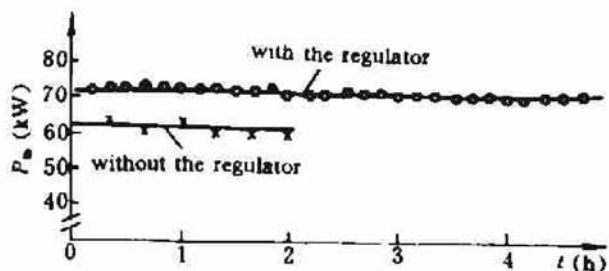


Fig. 1 Input power versus operation time for with and without the flowing velocity regulator

4 所示。

在未加流场整定装置之前,由于受放电区两侧壁风速较低的限制,稳定放电的最大注入电功率约为 63 kW,对应的非稳腔输出功率为 6.1 kW,连续工作时间约为 2 h。采用该装置后,激光器的连续工作时间可达 5 h 以上,稳定放电的最大注入功率提高到近 72 kW,对应的非稳腔输出功率超过 7.5 kW。实验中还观测到,在未加流场整定装置之前,由于喉道中心风速较高,直到放电

电流加到 5.5 A 时,放电区所有阴极(约 400 根)才能全部起辉放电;而在安装流场整定装置之后,当放电电流仅为 3.2 A 时,所有阴极针便能起辉放电,且放电区辉光等离子体稳定均匀,无任何抖动或抽丝现象。

3.3 环形光斑近场及远场光束质量的研究

在放电条件和输出功率相同的情况下,采用有机玻璃烧斑法对安装流场整定装置前后非稳腔环形光斑近场强度分布进行了比较,烧斑取样图样如图 5 所示。从图 5 中可以清楚看出,由于流场整定装置对放电区风速分布和气流状态进行了有效的改善,使得激活媒质体积沿光轴方向的分布由弧形趋于平直,谐振腔振荡模体积两侧处于激活媒质区域的有效长度基本相等,因而环形光斑近场强度分布均匀性和几何形状对称性均较未加流场整定装置之前有了显著的改善。

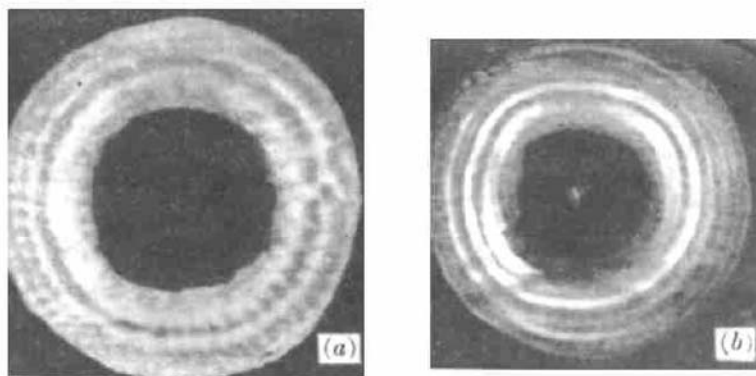


Fig. 5 Effect of the flowing velocity regulator on near-field intensity profile of an annual beam of the 10 kW CO₂ laser
(a) with regulator; (b) without regulator

环形光斑远场能量分布与非稳腔的几何放大率 M ,近场强度分布和晶体窗口的热透镜效应等有关。当 M 数相同时,环形光斑近场强度分布均匀性和几何对称性的改善,使晶体窗口各点的热吸收和热畸变趋于一致,避免了晶体窗口的热透镜效应和散斑现象,使实际环形光斑远场能量分布与理论值十分接近。采用套孔法测试结果,使用流场整定装置后, $M = 1.85$ 正支虚共焦非稳腔主瓣远场发散全角为 0.7 mrad,包含 86.5% 总能量的远场发散全角为 2 mrad。图 6 描述了采用微孔丝网流场整定装置后, $M = 1.85$ 非稳腔输出的 $\phi 40$ mm 外径环形光斑在大气中直接传输 110 m 后的远场能量分布图样。而不采用该装置时,直接传输 50 m 后远场光斑能量分布已弥散在一个较大的区域内,且没有确定的分布规律。

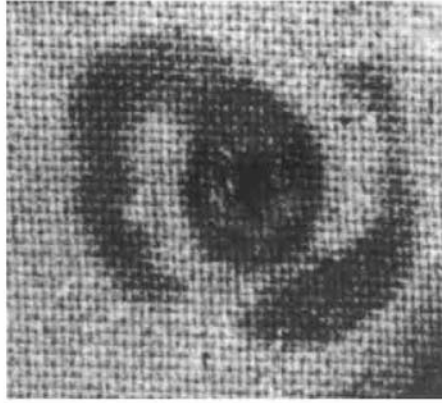


Fig. 6 Burning pattern of far field intensity profile of $M = 1.85$ annual beam at a distance of 110 m (output diameter of annual beam $D = 40$ mm)

参 考 文 献

- 1 N. Tabata, N. Nagai *et al.*, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, 1985, 72 : 1
- 2 B. Freisinger, J. H. Schafer *et al.*, *SPIE*, 1980, 1132 : 22
- 3 程祖海, 陈 涛 等. 一种常温复合催化剂及其催化装置. 中国专利 91104197.4
- 4 (日) 清山哲郎 著, 黄敏明 译. 金属氧化物及其催化作用. 第 1 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1991 年 3 月

Investigation of the Flowing Velocity Regulator in a 10 kW CO₂ Laser

Cheng Zuhai

(National Lab. for Laser Tech., Huazhong University of Scie. & Tech., Wuhan 430074)

Abstract In this paper the forming process and the influence factors of the gain profile in a 10 kW CO₂ laser are discussed, and the discharging characteristics and the output beam quality of the 10 kW CO₂ laser using the flowing velocity regulator with gauzes are studied.

Key words gain profile, velocity regulator, beam quality