

长寿命密封运转工业用 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器

程兆谷 王润文 查鸿逵 毛英立 江淼 邓志

陆宾 赵国征 江有禄 古桂祥

(中国科学院上海光机所, 201800)

**摘要:** 一台具有良好光学质量的工业用 5kW 级横流 CO<sub>2</sub> 激光器研制成功。该激光器具有独特的预电离电极结构和光腔选模技术, 一次充气连续密封运转大于 10h, 功率不稳定性为  $\pm 1.0\%$ , 存放工作寿命大于 1 个月。利用该激光器进行汽车齿轮焊接试验, 熔深可达 3~4mm, 焊接速度为 2m/min, 深、宽比可达 2.5:1。

**关键词:** 横流 CO<sub>2</sub> 激光器, 长寿命密封运转

A long lifetime sealed-off operation industrial CW 5kW level transverse-flow CO<sub>2</sub> laser

Cheng Zhaogu, Wang Runwen, Zha Hongkui, Mao Yingli, Jiang Miao, Deng Zhi,

Lu Bing, Zhao Guozheng, Jiang Youlu, Gu Guixiang

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

**Abstract:** An industrial 5 kW level transverse-flow CO<sub>2</sub> laser has been developed with good beam quality. The laser features a unique preionization electrode structure and mode-selecting technique. Sealed-off CW operation for more than 10hrs can be obtained for each gas refilling with a power unstability of  $\pm 1.0\%$  and a shelf life of one month. A welding depth of 3~4 mm at 2 meters per minute can be achieved for the automobile gears with a depth to width ratio of 2.5:1.

**Key words:** transverse-flow CO<sub>2</sub> laser, long lifetime sealed-off operation

目前, 国内、外对于具有良好光学质量的 3~5kW 高功率 CO<sub>2</sub> 激光器的需求量与日俱增, 诸如汽车变速箱齿轮的激光焊接, 汽车底盘的激光切割, 以及激光涂敷、合金化等众多领域。国际上比较成熟的名牌产品, 如西德 Rofin-Sinar 公司的 5kW 快速轴流射频激励 CO<sub>2</sub> 激光器 (RS5000 型), 美国光谱物理公司的 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器 (975 型), 美国相干通用公司的 2550W 快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器 (Everlase M53 型) 都已进入大工业生产线上使用。如意大利 FIAT 集团 IVECO 公司的汽车变速箱齿轮激光焊接生产线, 操作自动化, 性能稳定可靠, 生产效率高, 废品率低, 成为汽车行业技术改造不可缺少的重要设备。美中不足的是上述国外高功率 CO<sub>2</sub> 激光器都采用慢流动气体更新的方法来达到长时间稳定运转, 其昂贵的氦气耗量约为 100~200 L/h。

我们研制成功的 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器符合中国的国情, 实现了多模 5kW 和具有良好光学质量的 TEM<sub>01</sub>, 低阶模 3kW 大于 10h 的连续密封运转, 功率不稳定性仅为  $\pm 1.0\%$ 。其

He 气耗量仅为国外同类器件的 5% 左右。同样在生产线上使用, 每年每台器件可为国家节省 He 气费用 20 多万元人民币。

## 一、激光器的整机结构

该 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器呈立式, 图 1 右图为内部结构示意图。两台两级 8000 转/min 的高速风机并联运行, 驱动风机的中频电源为 400 Hz。双放电通道, 放电区的气体流速为 80 m/s 左右, 流速随混合气体压力增加略有增加, 总气体流量约 8 m<sup>3</sup>/s。热交换器为板翅式, 具有体积小、热交换面积大、效率高等优点。II 型折迭腔安装在 4 根拉杆固定的光桥上。

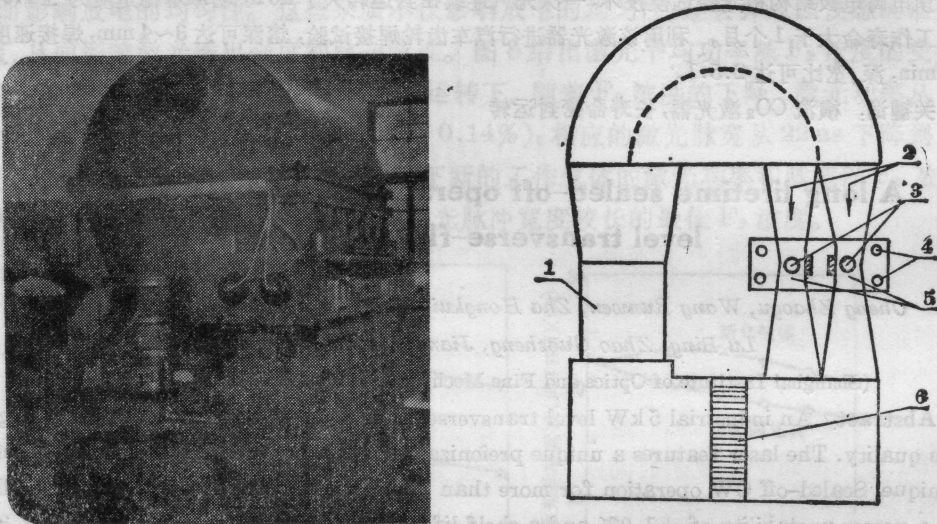


图 1 长寿命密封运转工业用 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器

左图: 外观照片; 右图: 内部主要单元分布示意图  
(1—风机; 2—气流方向; 3—光腔; 4—光桥; 5—放电区; 6—热交换器)

该 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器结构紧凑、占地面积小, 仅为 1.35m × 1.2m × 2.5m(高)。美国光谱物理公司的 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器, 其主机占地面积为 3.1m × 2.2m × 1.6m(高); 西德 Rofin-Sinar 公司的 5kW 射频激励快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器占地面积为 3.25m × 1.1m × 2.8m(高)。相比之下, 我们的 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器的占地面积仅为国外同类型器件的 1/2 左右。

该 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器的壳体全部由不锈钢组成, 采用“O”型硅橡胶条密封, 具有极好的密封性能, 工作和存放一个月, 混合气体压强无明显变化。

## 二、放电特性

众所周知, 对一台高功率横流 CO<sub>2</sub> 激光器而言, 在建立了一个有一定气体流量的均匀流场的风洞系统之后, 如何实现大激活体积、高工作气压条件下稳定而均匀的辉光放电, 以便使更多的电功率注入放电区从而获得更高的激光功率输出, 一直是该领域的科学家们不断追求

和探索的问题。我们认为,放电电极结构的合理性和放电技术的改进是影响电功率注入的首要因素。

该 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器具有独特的预电离电极结构,最初的实验方案和结果发表在 1989 年美国召开的“激光和电光会议”(CLEO/1989)上<sup>[2]</sup>,该方案采用脉冲预电离针-条电极结构,与自持放电电极结构<sup>[2]</sup>情况相比较,大体积稳定均匀放电的混合气体压力增加了 1 倍,可达 14kPa,阴、阳极间工作电压可达 4kV,注入放电区的最大电功率达 86kW,比自持放电情况增大 1 倍(图 2)。

图 2 中,下曲线为自持放电伏-安特性曲线,其阴、阳极间距为 4cm,大体积稳定放电的混合气体压力  $p$  为 5.6kPa,阴、阳极间工作电压  $V$  小于 2kV,其伏-安特性曲线近似直线,随放电工作电流  $I$  增加稍有下降趋势,呈现正常辉光放电特性。上曲线为带有脉冲预电离放电的伏-安特性曲线,其大体积稳定放电的混合气体压力  $p$  和阴、阳极电压  $V$  都成倍增加,而且  $V$  随放电电流  $I$  增加有明显上升趋势,呈现反常辉光放电特性。

采用预电离放电技术后的最大输出激光功率比自持放电情况几乎增加了 1 倍,超过 9kW,已接近万瓦水平。美中不足的是该电极结构制作复杂,气密性较差。

现在实际采用的预电离电极结构是在上述预电离电极结构基础上的改进,其发明专利申请已被中国专利局受理。本发明专利除了具有上述电极结构的优点外,还具有结构简单,易于制作,经济,气密性好,耐用可靠,以及放电稳定度高等优点。实验表明,采用该电极结构,在双放电通道获得了高压大体积均匀的辉光放电和增益分布,有利于获得均匀的低阶模和多模激光功率输出。

### 三、谐振腔及其输出特性

该 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器具有双放电通道,采用  $\square$  型折迭腔。两块 45° 平面转折反射镜和带有曲率半径的球面反射镜为铜基底镀金膜反射镜;输出耦合窗口为国产镀膜 GaAs 或美国进口镀膜 ZnSe 腔片。四块腔镜都采用良好的水冷措施。整个谐振腔固定在由 4 根热膨胀系数较小的玻璃钢棒支撑的光桥上,通过 4 只波纹管与激光器壳体放电盒相连密封。

该激光器光桥具有较高的稳定性,在 5kW 多模和 3kW 低阶模长达 10h 的连续密封运转过程中,功率不稳定度仅为  $\pm 1.0\%$ ,而且低阶模和多模的输出花样长时间保持不变。

谐振腔之总长度  $L=3.2\text{m}$ ,多模谐振腔的球面反射镜之曲率半径  $R=8\text{m}$ ,输出耦合窗口的透过率  $T=40\%$ 。当混合气体压力  $p=9.3\text{kPa}$  时,阴、阳极间工作电压  $V=2.7\text{kV}$ 。在放电电流  $I=12.5\text{A}$  时,多模输出功率为 5.2kW,电光转换效率  $\rho$  等于 15.4%;当放电电流增加到  $I=18\text{A}$  时,多模输出功率为 8.0kW,电光转换效率  $\rho$  为 16.5%。

低阶模选模腔具有独特的选模结构,已经取得中国专利局的发明专利权<sup>[3]</sup>。我们首次<sup>[4]</sup>

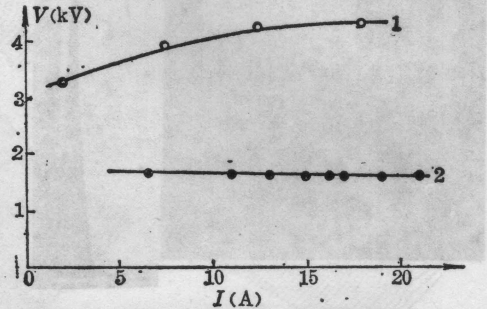


图 2 预电离放电伏-安特性与自持放电伏-安特性比较

曲线 1—预电离放电 ( $p=11.2\text{kPa}$ ,  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:7:13$ ); 曲线 2—自持放电 ( $p=5.6\text{kPa}$ ,  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:8:11$ )

在数千瓦级高功率横流  $\text{CO}_2$  激光器中采用了一种两镜腔选模体制, 它具有良好的选模特性, 易于获得高功率输出; 其近场输出花样为全斑, 避免了非稳腔近场环状输出。该发明专利的选模腔型具有独特的优点: 结构简便; 电光转换效率高; 输出耦合率不受增益系数和增益长度限制, 可采用镀膜来选择最佳透过率, 避免了非稳腔由于耦合系数较小导致远场聚焦特性变坏的缺点; 调整容限较宽, 理论计算和实验测量表明, 该种腔型的调整容限为  $10^{-4}$  rad 量级, 比通常的非稳腔高一个数量级。

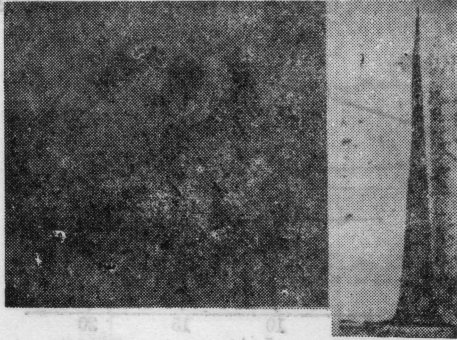


图3 4 kW  $\text{TEM}_{10}$  模激光输出近场(左图)和远场(右图)烧蚀有机玻璃花样照片

我们对稳腔选模和非稳腔选模这两种选模体制的远场聚焦特性建立了统一的理论判据<sup>[5]</sup>, 理论和实验表明, 对于增益系数或增益长度较小或二者乘积较小的高功率横流  $\text{CO}_2$  激光器, 采用本发明专利的稳腔选模方法可获得接近甚至超过非稳腔选模的良好光束质量, 而输出功率的长期(大于 8 h)不稳定度显著变小, 比非稳腔对谐振腔结构稳定性的苛刻要求要低得多。

我们采用本发明专利的两镜腔选模腔获得了 4 kW  $\text{TEM}_{10}$  模激光输出, 其远场发散角(全角)  $\theta$

仅为 2.5 mrad。4 kW 功率输出的近场和远场(焦平面附近, 聚焦镜焦距  $f=1500$  mm) 烧蚀有机玻璃花样照片如图 3 所示<sup>[6]</sup>。

#### 四、长寿命密封运转

该 5 kW 横流  $\text{CO}_2$  激光器的最大特点是实现了具有良好光学质量的 3 kW 低阶模和 5 kW 多模长达 10 h 的稳定密封运转, 优于国内外同类型高功率  $\text{CO}_2$  器件。

对高功率(数千瓦级或以上)横流或轴流  $\text{CO}_2$  激光器来说, 在长时间运转过程中, 由于大放电电流 ( $>10$  A) 和强场 (1 kV/cm 左右) 的长期作用,  $\text{CO}_2$  分解为 CO 和  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  分解为  $\text{NO}_\alpha$  ( $\alpha=1, 2, \dots$ ); 以及激光器真空室内各种杂质气体的释放; 激光器件具有的接近真空的负压(一般小于 13 kPa)特性, 造成大气和冷却水的渗透漏泄等诸多因素都使放电气体中的带电粒子种类、数量随工作时间而变化, 直至恶化。国外如美国、西德等工业发达国家的数千瓦乃至万瓦级高功率横流和轴流  $\text{CO}_2$  激光器都采用气体更新(慢换气)的办法来保持激光器的混合气体成分相对稳定, 从而达到长时间稳定运转。

为了节省昂贵的 He 气费用, 降低器件的运行耗费, 我们致力于研制长寿命密封运转并满足生产线需要的 5 kW 级横流  $\text{CO}_2$  激光器, 取得了成功。该 5 kW 横流  $\text{CO}_2$  激光器无论是在长达 10 h 的连续密封运转过程中, 还是在长达一个月的一次充气存放工作过程中, 运转特性相当稳定。激光器的四大主要物理参量, 即激光输出功率  $P$ 、阴阳极间电压  $V$ 、放电电流  $I$  和电光转换效率  $\rho$  长期运转中保持稳定, 起伏极小。

由图 4、图 5 可以看出, 3 kW 低阶模 8.5 h 连续密封运转和 5 kW 多模一次充气长达 22 h 累计工作过程中, 其输出功率  $P$  的长时间不稳定度(带有功率反馈装置)仅为  $\pm 1.0\%$  左右。阴、阳极间电压  $V$  随时间的变化是衡量混合气体组分是否稳定的标志。由图 4、图 5 可知, 在

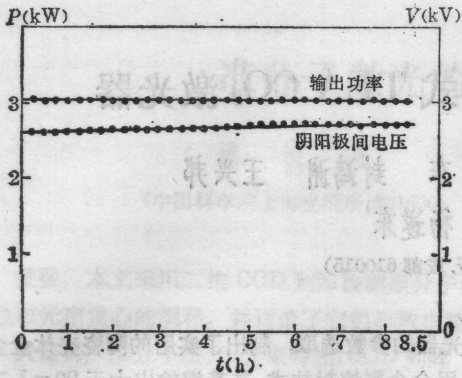


图 4 3 kW 低阶模(TEM<sub>01\*</sub>)连续密封运转 8.5h 过程中, 输出功率  $P$  和阴阳极间电压  $V$  随时间  $t$  变化曲线

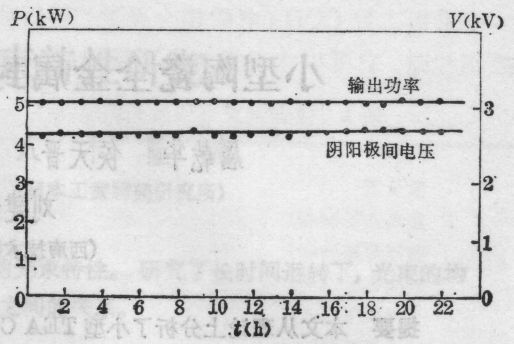


图 5 5 kW 多模一次充气累计工作 22h 过程中, 输出功率  $P$  和阴阳极间电压  $V$  随时间  $t$  变化曲线

长时间的密封运转和存放过程中, 气体组分无明显变化。这是高功率 CO<sub>2</sub> 激光器长时间稳定密封运转的保证。

除了气体成分和放电的长期稳定性之外, 该 5 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器的  $\Gamma$  型折迭腔之光桥同样具有长时间稳定性, 加之铜反射镜和输出耦合镜的冷却方式的合理性等诸多因素, 使得该激光器的电光转换效率达到长时间密封运转过程中稳定, 其放电电流也基本保持不变。

### 五、汽车变速箱齿轮激光焊接试验

我国在“七·五”期间引进意大利 IVECO 轻型汽车制造技术中, 变速箱齿轮的激光焊接是急待解决的关键技术。利用该 5 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器进行汽车变速箱齿轮激光焊接试验, 取得了满意的结果。焊接样品材料为 20Cr 钢, 采用 3~4 kW 低阶模输出作为激光源, 其熔深可达 3~4 mm, 焊接速度可达 2 m/min, 深、宽比可达 2.5:1, 焊缝可承受 600 kg·m 扭矩而不滑移。采用 5 kW 多模作为激光源, 其熔深可达 6 mm, 焊接速度为 2 m/min。深、宽比略大于 1。

上述焊接结果表明, 利用该 5 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器进行汽车变速箱齿轮激光焊接试验, 已经达到国外同类型器件的焊接水平<sup>[7,8]</sup>。

本文的焊接实验结果是与苏宝熔、陈兰英、钱红斌、柴洪钧、刘玉泉等同志合作取得的, 在此, 向他们表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 程兆谷 *et al.*, Advance Program OLEO/89, paper WF25, p. 60
- 2 王哲恩 *et al.*, 激光, 7(7), 1(1980)
- 3 程兆谷, 王润文, 中国专利, CN 85104370.4
- 4 程兆谷, 中国激光, 12(3), 144(1985)
- 5 程兆谷 *et al.*, 中国激光, 13(6), 321(1986)
- 6 程兆谷 *et al.*, Advance Program OLEO/90, paper CTuB2, p. 42
- 7 D. Guastaferrri, SPIE, 662, 223(1986)
- 8 A. Gukelberger, SPIE, 650, 254(1986)