

# 轴快流 CO<sub>2</sub>激光器预电离设计

王红宣

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 为了解决轴快流(FAF)CO<sub>2</sub>激光器的大体积和高气压所产生的等离子体放电不稳定问题,设计了相应的预电离装置。预电离装置安装在激光器放电管外,预电离电极由激光器放电管阳极和与其相距35 mm的铜环组成。预电离电路由多谐振荡器、RC充放电电路和可控硅构成,放电频率范围为10~20 kHz,其目的是产生固定频率下尽可能高的初始电子密度,以降低激光器着火电压。实验结果表明:该预电离装置使激光器最大点火电压降低1.69 kV,小功率输出电压波动降低2.6 kV,能够满足轴快流CO<sub>2</sub>激光器的预电离要求,是提高激光器放电稳定性的一种有效方法。

**关键词** 激光器; 预电离; 电子密度; 放电稳定性

**中图分类号** TN248.2    **文献标志码** A    **doi**: 10.3788/LOP51.121405

## Design of Preionization in Fast Axial Flow CO<sub>2</sub> Lasers

Wang Hongxuan

*Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** In order to solve the discharge instability problem caused by bulk mass and high gas pressure in a fast axial flow (FAF) CO<sub>2</sub> laser, a preionization device is presented. The device is installed outside the laser discharge tube and the preionization electrode includes an anode of laser discharge tube and a 35 mm far copper collar. A multivibrator, a RC charge-discharge circuit, and an SCR are combined together to make up the preionization circuit with the discharge frequency of 10 ~ 20 kHz for the purpose of strengthening the initial electron density and reducing the laser firing voltage. The experimental result indicates that the preionization device decreases the laser working voltage by 1.69 kV and voltage varicance by 2.6 kV. Such a preionization device can meet the preionization requirement of an FAF CO<sub>2</sub> laser and is an effective tool for improving laser's discharge stability.

**Key word** lasers; preionization; electron density; discharge stability

**OCIS codes** 140.3460; 140.3470; 140.3425

## 1 引言

高功率气体激光器在现代工业中的应用越来越广,如制造业的切割、打孔、焊接、表面处理等材料加工方面。轴快流CO<sub>2</sub>激光器由于具有光束质量好,单位长度内输出功率大,调制性能佳,并可实现连续、脉冲和超脉冲激光输出的特点,成为大功率激光切割应用市场的主流产品<sup>[1-2]</sup>。作为大功率工业激光器,需要大体积的气体放电。而提高大体积放电的稳定性是激光器稳定工作的关键。CO<sub>2</sub>激光器的工作材质为N<sub>2</sub>、He、CO<sub>2</sub>,通常情况下每立方厘米大气中约有几个到几百个带电的离子和电子<sup>[3]</sup>。在激光器的放电管两端施加一定的直流高压时,管内便产生很微弱的放电电流。但随着电压的不断增加,到达某一定值时,导电电流会突然增大,同时伴随放电管两端的管压降突然下降<sup>[4]</sup>。气体从绝缘状态突变成导体,放电管中因而出现明亮的辉光放电。放电管的着火电压很高,难以形成正常稳定的气体放电,所以小电流放电极不稳定,有时甚至出现几段停止放电现象,最终造成激光器的输出功率下降,从而影响使用<sup>[5-6]</sup>。

理论研究证实,对于击穿场强较大的气体,其高场强下的放电为流注放电,均匀辉光放电只在低场强下

收稿日期: 2014-07-22; 收到修改稿日期: 2014-09-17; 网络出版日期: 2014-11-12

基金项目: 国家重点实验室基金(SKLLIM1112)

作者简介: 王红宣(1968—),女,硕士,副研究员,从事激光器电源方面研究。E-mail: Whxly@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网www.opticsjournal.net

进行,而要实现低场强下的辉光放电必须借助空间电荷的作用,即通过预电离手段在空气间隙中制造一定数量均匀分布的初始电子,达到在低电场强度下“点燃”辉光放电的目的<sup>[7]</sup>。CO<sub>2</sub>激光器的预电离就是在激光器阴极和阳极间主放电之前,先使气体产生弱电离,然后再进行主放电。预电离放电是由很小的能源提供的,采用高频交流电将能量从放电管外耦合进放电管,产生大量的自由电子,实现E/P为最佳值 $[7.5 \times 10^{-2} \sim 11.3 \times 10^{-2} \text{ V}/(\text{cm}^2 \cdot \text{Pa})]$ 的放电条件。预电离技术在激光器中被广泛应用,方法有紫外线、电子束、双放电、中子束、射频放电等,每类又有各种设计方案<sup>[8-9]</sup>。本文介绍的预电离装置属于紫外预电离的一种,其机理是利用火花放电产生的紫外光照射电极间区域,气体粒子吸收了紫外光辐射而产生气体体积光电离,通过光电离而产生足够的电子数密度<sup>[10]</sup>,实现激光器稳定放电的目的。

## 2 预电离装置

500 W轴快流CO<sub>2</sub>激光器由四部分组成,即激光放电管及光学谐振腔,气体循环冷却系统,充气排气系统,电源系统。激光谐振腔采用一次折叠结构,放电区共4段,每段长度260 mm。主放电高压电源为激光器本身所配置直流高压电源。主放电电极一端接高压,另一端接地。在放电管外阳极附近套一铜环与阳极组成预电离的放电电极。预电离两电极之间的距离为35 mm,放电频率范围为10~20 kHz。单个放电管预电离连接如图1所示。由于预电离电极间距小于主放电电极间距,因此预电离电极间的放电管内首先发生横向容性耦合脉冲放电,同时产生一些带电粒子。这些带电粒子可以降低气体的阻抗、着火电压,进而改善放电的均匀性和稳定性,并消除激光器相邻阴极间的“拉弧”现象<sup>[11]</sup>。

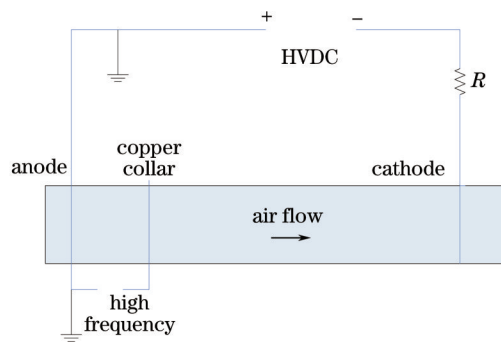


图1 预电离装置连接图

Fig.1 Connection diagram for preionization setup

## 3 预电离电路

预电离电路由555定时器构成的多谐振荡器、RC充放电电路和可控硅构成。电路原理如图2所示。多谐振荡器产生固定频率方波,控制可控硅导通。可控硅SCR被尖脉冲触发导通,其内阻很小,而一旦被关断则内阻无穷大,是一个理想的开关器件。可控硅导通后,预电离电路放电,电容C<sub>1</sub>两端电压为零,可控硅截止,RC充放电电路开始充电,等待下一轮放电。

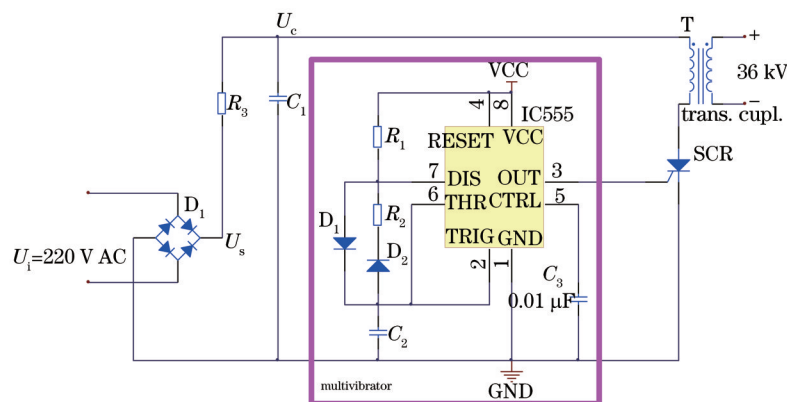


图2 预电离电路原理图

Fig.2 Elementary diagram for preionization

### 3.1 多谐振荡器

多谐振荡器由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  及 IC555 组成。对于多谐振荡器, 电容  $C_2$  充电时间  $T_1$  和放电时间  $T_2$  各为

$$T_1 = R_1 C_2 \ln 2, \quad (1)$$

$$T_2 = R_2 C_2 \ln 2, \quad (2)$$

因此电路的振荡周期为

$$T = (R_1 + R_2) C_2 \ln 2. \quad (3)$$

当电容  $C_2$  充电时, 多谐振荡器输出高电平; 当电容  $C_2$  放电时, 多谐振荡器输出低电平。多谐振荡器输出周期为  $T$ 、占空比为  $R_1/(R_1+R_2)$  的方波, 如取  $R_1=R_2$ , 则输出方波占空比为 50%。

### 3.2 RC 充放电电路

$R_3$ 、 $C_1$  组成充放电电路, 原理如图 3 所示。

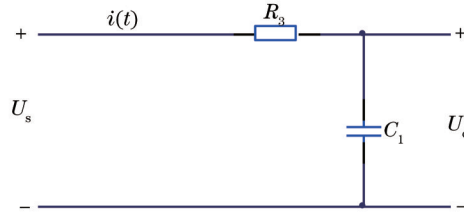


图3 RC 充放电电路

Fig.3 Elementary diagram for RC charge-discharge

RC 充放电电路是典型的一阶系统, 时间常数  $\tau = RC$ 。当充电时间等于  $4\tau$  时,  $U_c = 0.982 U_s$ , 可以认为充电基本完成。所以要求充电时间大于等于  $4\tau$ , 即

$$T \geq 8R_3C_1. \quad (4)$$

在激光器所用的气体中, 只有产生足够的初始电子密度 ( $10^8/\text{cm}^3$ ), 才能形成稳定的辉光放电。所以在假设放电频率不变时,  $C_1$  越大, 电容放电产生的带电粒子越多。

## 4 实验及分析

以上述 500 W 轴快流  $\text{CO}_2$  激光器为例, 观察预电离对气体主放电的影响, 分别测量有无预电离时激光器工作电流  $I$  及放电管两端电压  $V$ 。激光器放电管实物如图 4 所示,  $V-I$  特性如图 5 所示。

由图 5 可见, 增加预电离后, 气体最高着火电压由 12.48 kV 下降到 10.79 kV, 降低了 1.69 kV; 在  $I$  为 5~20 mA 时, 电压波动由 5.59 kV 下降到 2.99 kV, 降低了 2.6 kV; 在  $I$  为 20~80 mA 时, 电压波动由 1.43 kV 下降到 1.04 kV, 降低了 0.39 kV;  $V-I$  曲线明显改善。因此, 对轴快流  $\text{CO}_2$  激光器而言, 本文设计的预电离能降低气体着火电压, 使激光器更容易放电; 在小功率输出时调节更精确, 扩大了激光器的功率调节范围, 提高了激光器的工作稳定性。



图4 激光器放电管

Fig.4 Laser discharge tube

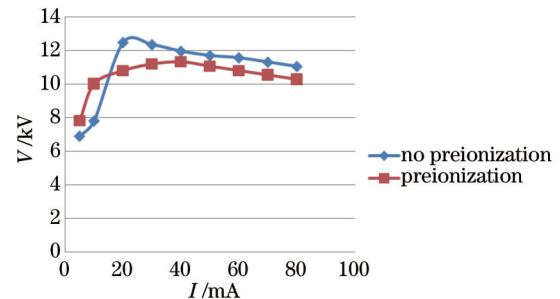


图5 放电管  $V-I$  曲线

Fig.5  $V-I$  curve for discharge tube

## 5 结论

为了解决轴快流  $\text{CO}_2$  激光器的大体积、高压放电产生的等离子体放电不稳定现象, 设计了预电离装

置。论文介绍了预电离装置的安装方式及预电离电路的原理。实验证明:激光器增加预电离后,最大着火电压降低 1.69 kV,小功率输出时电压波动降低 2.6 kV,电流调节更精确。因此,本文设计的预电离装置,能够满足轴快流 CO<sub>2</sub>激光器的预电离要求,是提高激光器放电稳定性的一种有效方法。

### 参考文献

- 1 Si Lizhong. Research on abnormal discharge of DC excitation fast-flow axis CO<sub>2</sub> laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 021403.  
司立众. 直流激励轴快流 CO<sub>2</sub>激光器非正常放电研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 021403.
- 2 Deng Honglin. The technology market and industry of the high power CO<sub>2</sub> laser cutting machine of China[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(7): 66-71.  
邓鸿林. 我国大功率 CO<sub>2</sub>激光数控切割机技术、市场及产业[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(7): 66-71.
- 3 Guo Jin, Li Dianjun, Wang Tingfeng, *et al.*. High Power CO<sub>2</sub> Laser and Applied Technology[M]. Beijing: Science Press, 2013. 1-24.  
郭 劲, 李殿军, 王挺峰, 等. 高功率 CO<sub>2</sub>激光器及其应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 1-24.
- 4 Shi Zhifeng, Lin Xirong, Hong Zhiwei, *et al.*. Research of discharge tube diameter and discharge pressure on fast-axial-flow CO<sub>2</sub> lasers[J]. *Optoelectronic Technology*, 2013, 33(2): 103-106.  
石知峰, 林喜荣, 洪志伟, 等. 放电管径和放电气压对 CO<sub>2</sub>激光器功率的影响[J]. *光电子技术*, 2013, 33(2): 103-106.
- 5 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. Principles of Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. 1-10.  
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. 1-10.
- 6 Li Bo. Study on Stable High-Effective Discharge of High Power Past Axial Flow CO<sub>2</sub> Laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.  
李 波. 高功率轴快流 CO<sub>2</sub>激光器高效稳定放电方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- 7 Zhan Huamao, Li Ming, Li Chengrong. Ultraviolet preionization in dielectric barrier discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(2): 62-63.  
詹花茂, 李 明, 李成榕. 介质阻挡放电中的紫外线预电离[J]. *高电压技术*, 2005, 31(2): 62-63.
- 8 Liu Cuiqing, Cheng Zhaogu. Various kinds of preionization technology for high-power CO<sub>2</sub> lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, 39(6): 29-36.  
刘翠青, 程兆谷. 实现高功率 CO<sub>2</sub>激光输出的各种预电离技术[J]. *激光与光子学进展*, 2001, 39(6): 29-36.
- 9 Wang Xunzhong. High Repetition Rate Long-Pulsed UV-Preionized TE CO<sub>2</sub> Laser[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2007. 6.  
汪训忠. 高重复频率长脉冲紫外预电离 TE CO<sub>2</sub>激光器[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2007. 6.
- 10 Chen Han, Yang Hanwu, Zhang Zicheng, *et al.*. Transverse capacitance coupling UV pre-ionization switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 8(25): 2035-2039.  
陈 瀚, 杨汉武, 张自成, 等. 横向电容耦耦式紫外预电离子开关[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 8(25): 2035-2039.
- 11 Shi Lishen, Zhu Youxin, Liu Jiayan, *et al.*. The compact 500 W fast-axial-flow CO<sub>2</sub> lasers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(4): 1-3.  
石立深, 祝有信, 刘家燕, 等. 紧凑型 500 W 快速轴流二氧化碳激光器[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(4): 1-3.