

预电离脉冲群开关技术高功率脉冲 CO₂ 激光器*

程兆谷 李现勤 柴雄良 高海军 刘翠青

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2003 年 4 月 17 日收到 2003 年 9 月 1 日收到修改稿)

采用独特的电极结构和预电离脉冲群开关放电技术, 实现了 5kW 量级平均功率横流 CO₂ 激光器脉冲激光输出.

关键词: CO₂ 脉冲激光, 预电离, 脉冲群开关

PACC: 4255D, 2960G

1. 引 言

高平均功率重复脉冲 CO₂ 激光有十分广泛的用途. 诸如激光雷达、激光同位素分离、海洋测深、激光诱导化学反应、飞机外壳去漆、以及空间光飞行器等. 在激光加工领域, 具有相同平均功率的脉冲 CO₂ 激光器比连续 CO₂ 激光器具有更强的加工能力, 因为脉冲激光峰值脉冲更容易造成加工材料表面的破坏, 尤其是高反材料表面的破坏, 使加工件的吸收率增大, 利于激光加工, 如在高反材料铝合金的焊接中, 可以很容易形成“匙孔”实现深透焊. 因此, 脉冲激光对焊接、切割、打孔等效果显著.

实现 CO₂ 脉冲激光输出有许多方法. 美国 ARL 在原有的 HPPL-100 和 HPPL-200 连续 CO₂ 激光器的基础上发展了新的 HPPL-300 脉冲激光器^[1], 该激光器为电子束控制激光器, 采用两套电源: 一套为产生电子束的预电离电源, 另一套为主电源, 主电源为脉冲输出, 单脉冲输出 51kW, 瞬时电流 3200A. 日本三菱公司利用直接调制无声放电技术^[2], 实现脉冲激光输出. 三菱公司还通过磁控管电源产生脉冲微波放电^[3], 实现了微波激励波导脉冲 CO₂ 激光器. 德国 Rofin-Sinar 公司采用调制射频电源实现脉冲激光输出^[4]. 除以上直接调制电源的方法以外, 还有用调节可控输出耦合镜^[5], 调 Q^[6,7] 等损耗调制技术来实现脉冲激光输出. CO₂ 激光器尽管作为高效率激光器件, 但光电转换效率仅为

15%左右, 简言之, 数千瓦平均功率输出的脉冲 CO₂ 激光器, 需要数十千瓦甚至更高功率的脉冲输出的主放电供电, 其技术相当复杂, 价格昂贵, 体积也很大. 而损耗调制方法则有时要损耗一部分功率, 总体功率偏低.

采用预电离脉冲群开关技术实现高平均功率的脉冲 CO₂ 激光器, 其电极结构为独特的脉冲预电离管条电极, 结构简单, 密封性好, 注入功率大且造价低廉. 该激光器有两套电源, 一为脉冲预电离电源, 一为直流主放电电源. 为实现脉冲激光输出, 不直接调制直流主放电电源, 而是调制能产生 5—10kHz 高频脉冲的预电离电源, 通过预电离电源的特殊开关装置, 使预电离高频脉冲成为可调制的脉冲群, 每个脉冲群内包含若干个单个高频脉冲, 脉冲群之间的高频脉冲被关掉. 通过这种脉冲群开关技术^[8], 并利用直流主放电的非自持放电特性, 实现仅用几百瓦平均功率的脉冲电源来控制几十千瓦乃至更大的直流注入功率, 最终获得脉冲激光的输出.

2. 激光器整体结构

图 1 为该高平均功率重复脉冲 CO₂ 激光器内部结构示意图. 两台中频电源为 400Hz、转速为 8000r/min 的高速轴流风机并联运行, 为气体激光工作物质的快速流动提供驱动力. 光学谐振腔为 π 形折叠腔, 总腔长为 3.2m, 腔一端为镀金铜全反射镜, 另

* 国家自然科学基金(批准号 60078017)资助的课题.

一端为 ZnSe 输出耦合镜,透过率为 40%。本激光器有两个放电区,每个放电区内有嵌在耐高温绝缘阳极镶板上的 57 条阳极铜条,与之一一对应的 57 根预电离针,φ10mm 水冷阴极铜管。两侧放电区总有效放电长度为 2.2m。热交换器为板翅状热交换器,这种热交换器具有体积小,热交换面积大,效率高等优点。该激光器呈立式,结构紧凑,占地面积小,仅为 1.35m×1.2m×2.5m(高)。激光器的壳体由不锈钢组成,采用 O 形硅橡胶条密封,具有极好的密封性能。

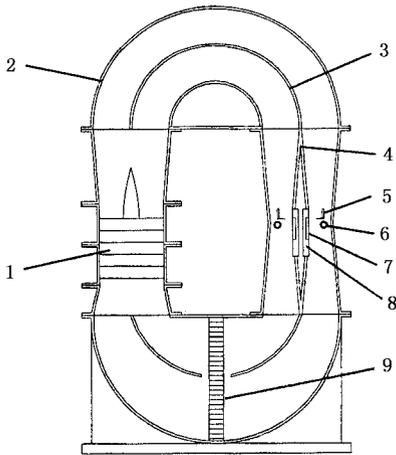


图1 激光器内部结构示意图 1. 高速轴流风机 2. 激光器壳体 3. 分流板 4. 导流板 5. 预电离针 6. 阴极铜管 7. 阳极条 8. 阳极镶板, 9. 热交换器

3. 电极结构

图2为脉冲预电离管条电极结构剖面图。阳极沿气流方向的长度为70mm,宽15mm,厚16mm。57块阳极条置于耐高温、绝缘的水磨石之中,排成整齐的一排。阴极为直径为10mm的水冷铜管,57根脉冲预电离针处于水冷阴极的上游(相对于气流方向而言),排成整齐的一排,与阳极条一一对应,每根预电离针尖分别对应条状铜阳极上游边沿中心。阴极铜管、条状铜阳极和预电离针的位置关系对于放电特性十分重要。实验中,预电离针与铜管阴极边沿的距离为10mm,预电离针尖到条状铜阳极的距离为35mm,铜管阴极从轴心线到条状铜阳极的垂直距离为40mm。

与自持放电情况相比,该脉冲预电离管条电极有十分显著的优点:激光器的大体积均匀辉光放电

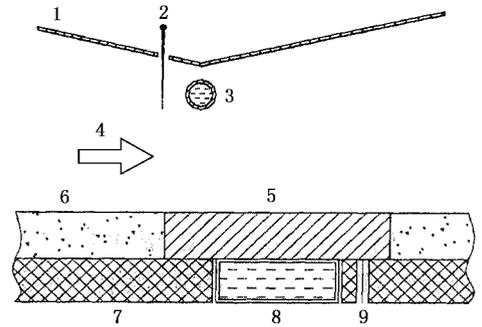


图2 电极结构示意图 1. 玻璃导流板 2. 预电离针, 3. 水冷阴极铜管 4. 气流方向 5. 条状铜阳极 6. 水磨石阳极镶板 7. 绝缘支撑板 8. 阳极水冷方铜管 9. 阳极引线

的 $p \cdot d$ 值(p 为辉光放电混合气体压力, d 为阴阳极间距)成倍增大,即可实现高压大体积均匀辉光放电,从而使得注入放电区的最大电功率成倍增加,在采用合适的光腔耦合技术后,激光输出也成倍增大。大体积均匀辉光放电条件下的实际混合气压增大,在额定激光输出功率条件下,相应的工作电流减少,激光器长时间密封运转寿命延长,加之限流电阻消耗功率降低,总的光电转换效率显著提高。另一方面,该脉冲预电离管条电极还具有密封性好,结构简单,造价低廉等优点。

4. 脉冲群开关放电技术

脉冲群开关放电的核心思想是:在非自持辉光放电条件下,利用气体辉光放电的着火电压与维持电压之间的差异,采用预电离脉冲群序列作为开关来控制主放电,实现高重复脉冲主放电功率注入,从而获得高平均功率重复脉冲 CO₂ 激光输出。

脉冲群序列是一组组重复出现的预电离脉冲,由预电离电源经开关调制而成。预电离脉冲在阴阳极间产生预电离,形成放电区初始等离子体电子密度,使气体辉光放电的着火电压显著降低,优化了放电区的 E/N 比率(电场强度与分子数密度之比),使激光工作物质更有效地被激发。在一个脉冲群中,后继预电离脉冲进一步增强主放电,形成峰值光功率输出。一个脉冲群过后,由于无预电离脉冲,在阴阳极间不产生预电离,气体辉光放电的着火电压升高,大大高于阴阳极间的维持电压,因此主放电暂时终止。由此,可以用仅仅几百瓦平均功率的脉冲电源来控制几十千瓦乃至更大的直流注入

功率,达到高功率重复脉冲 CO_2 激光输出.通过调节脉冲群的重复频率和所包含的高频脉冲数,可调节输出脉冲 CO_2 激光的波形和重复频率.

图 3 为预电离脉冲群开关控制主放电电路简图.图中 L_s 为饱和电感, D 为耐反向高电压的二极管, C_s 为储能电容, C_b 为脉冲预电离针限流电容, C_1 和 C_2 为隔直电容, L_b 为旁路电感, L_f 为直流电源滤波电感,同时对脉冲信号起隔离作用, R 为阳极条限流电阻, HT 为闸流管,提供平均功率几百瓦、重复频率 5kHz 的脉冲输出.

图 3 中,由脉冲群开关信号触发闸流管 HT,使

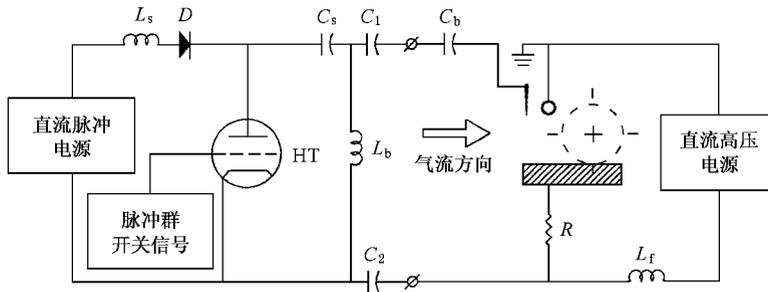


图 3 脉冲群开关控制主放电电路简图

5. 实验结果

实验中所用激光器为中国科学院上海光学精密机械研究所研制的 5kW 连续横流 CO_2 激光器.对其预电离电源进行调制,形成开 6 个关 6 个的脉冲群序列.采用 CO_2 , N_2 , He 的混合气体, $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 8 : 11$,总充气压强为 11kPa.混合气体被轴流风机加速达 80m/s.实验中,平均主放电电压为 2.3kV,平均主放电电流为 15A,激光平均输出功率为 5kW.实验中用 Tektronix P6015A 高压探头测量电压,用 Model 110 Rogowski 线圈测量电流,输出的激光功率经衰减,用 GAT300 快速热释电探测器测量.

图 4 为脉冲群预电离电压波形,图 5 为脉冲群预电离电流波形.图中脉冲群序列的重复频率为 417Hz,每个脉冲群中包含 6 个高频(5kHz)脉冲.单个高频脉冲的脉宽为 200ns,而高频脉冲周期为 200 μs ,这样在一个高频脉冲内放电时,电子密度将由大到小变化,单个脉冲电流也由大变小,如图 5

闸流管产生高电压的脉冲群,脉冲群中的每个高频高压脉冲,将在脉冲预电离针与水冷铜管及条状铜阳极之间产生一定的初始电子密度,在阴阳极间直流主电源电场的作用下,初始电子向阳极漂移,与分子发生碰撞,并雪崩式增长,很快形成较大的电子密度,在直流主放电电源驱动下,主放电过程便得以进行.单个高频脉冲结束后,主放电以复合为主进行,电子密度下降,电压升高,电流减小.在脉冲群之间,由于高频高压脉冲被关掉,预电离“熄灭”,致使非自持放大特性的主放电暂时终止.

脉冲群内电流变化.由于阳极条限流电阻 R 上有分压,脉冲电压变化与电流相反,由小变大,如图 4 脉冲群内电压变化.脉冲群之间,由于无预电离作用,电流渐变至零,电压升高.图 4、图 5 清楚地表示了这一点.

图 6 为阴阳极间主放电电压电流波形,上面的波形为电压波形,下面的波形为电流波形,从图中可以看出,在脉冲群预电离时,由于有主放电电流,阳极条限流电阻 R 上存在电压消耗,所以阴阳极间电压值较低,而在预电离关掉后,因主放电熄灭,阳极条限流电阻 R 上无压降,主放电直流电源电压直接加在阴阳极间,所以测得的电压较高.从以上电压电流整体波形来看,主放电已被脉冲群序列开关调制.

图 7 为主放电电流与激光输出波形,上波形为激光输出波形,下波形为电流波形.从图中可以看出,随着主放电电流被调制,激光输出也明显被调制,形成脉冲激光输出.典型的激光脉冲脉宽约为 1ms,峰值功率为 10kW,是平均功率的 2 倍,每个光脉冲的能量可达 5J.

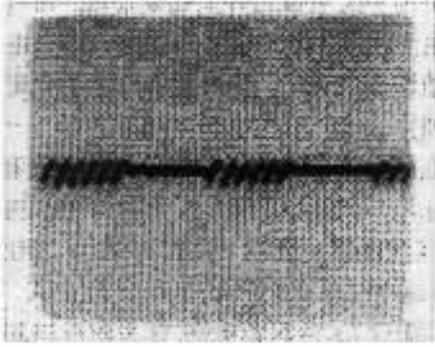


图 4 预电离脉冲群电压波形,扫描速度 = 0.5ms/div



图 5 预电离脉冲群电流波形,扫描速度 = 1ms/div

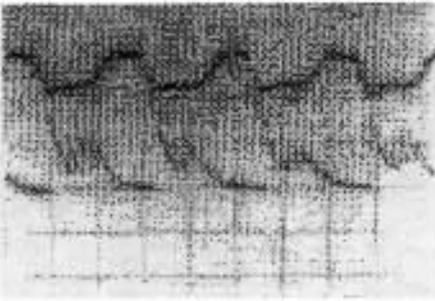


图 6 阴阳极间主放电电压电流波形,上波形为电压波形,下波形为电流波形,扫描速度 = 1ms/div

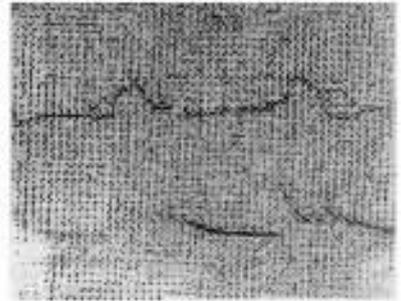


图 7 主放电电流与激光输出波形,上波形为光波形,下波形为电流波形,扫描速度 = 0.5ms/div

6. 结 论

在非自持辉光放电条件下,采用仅仅几百瓦平均功率输出的脉冲群预电离开关技术,实现了控制几十千瓦乃至更高功率的脉冲电功率注入,从而达

到数千瓦量级的高平均功率重复脉冲 CO₂ 激光输出的目的,大大降低了该类型激光器件的造价.通过调制脉冲群开关序列,可以达到改变高平均功率脉冲输出 CO₂ 激光器输出波形和重复频率,进一步实验正在进之中.

[1] Zappa O L 1989 *SPIE* **1042** 17

[2] Yasu K, et al 1989 *IEEE J. Quantum. Electronics* **25** 836

[3] Nishimae J and Yoshizawa K 1990 *SPIE* **1225** 340

[4] Baker H J and Laidler I 1990 *SPIE* **1225** 349

[5] Gnedoy S A, et al 1993 *SPIE* **2257** 144

[6] Grachev G N et al 1993 *SPIE* **2257** 106

[7] Tian Z S et al 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2369 (in Chinese) [田兆硕等 2001 物理学报 **50** 2369]

[8] Nikumb S K, et al 1989 *Applied Optics* **29** 1624

High power pulse CO₂ laser with preionization burst-mode switch technology^{*}

Cheng Zhao-Gu Li Xian-Qin Chai Xiong-Liang Gao Hai-Jun Liu Cui-Qing
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

(Received 17 April 2003; revised manuscript received 1 September 2003)

Abstract

By means of a unique electrode construction and preionization burst-mode switch technology, 5kW pulse average output is obtained in a transverse flow CO₂ laser.

Keywords : pulse CO₂ laser, preionization, burst-mode switch

PACC : 4255D, 2960G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60078017).