

文章编号: 1001-3806(2013)05-0660-04

## MOPA 结构准分子激光电源的高精度电压控制研究

李友布, 梁 勳, 赵家敏, 鲍 健\*

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 为了减小激光器双腔放电时间的相对抖动、稳定激光器输出能量, 采用闭环控制回路电压泄放方法, 设计了一套主振荡功率放大结构准分子激光谐振充电高精度电压控制方案。通过对电容电压取样处理, 动态监测储能电容电压, 当电容电压大于目标电压时, 由泄放电路泄放电压至目标值, 得到高精度的充电电压, 使用此电压控制方案后, 充电电压的波动由  $\pm 1.67\%$  减小到  $\pm 0.83\%$ 。结果表明, 该方案很好地提高了谐振电源储能电容上的电压精度, 减小了激光器双腔放电时间的相对抖动, 并为后期的激光器能量输出稳定控制打下良好基础。

**关键词:** 激光技术; 谐振充电; 高精度; 电压控制

**中图分类号:** TN248.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.021

## High precision voltage control for MOPA excimer laser

LI You-bu, LIANG Xu, ZHAO Jia-min, BAO Jian

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** To reduce fluctuation of discharging time of both the cavity in a master oscillator power amplifier (MOPA) excimer laser and obtain stable laser output energy, a high precision voltage control scheme was designed based on a closed loop controlling circuit. i. e., monitoring the voltage across the energy storage capacitor, when the capacitor voltage is larger than the objective voltage, the voltage discharging circuit discharges capacitance voltage to the objective voltage for getting a precision charging voltage. The results show that the fluctuation of charging voltage was reduced from  $\pm 1.67\%$  to  $\pm 0.83\%$  by using the voltage control scheme. The precision of the voltage across the energy-storage capacitor in a resonance power supply can be improved; the relative jitter of the discharge time for both the laser cavities can be reduced by means of this method. It lays a good foundation for stable laser energy output.

**Key words:** laser technique; resonance charging; high precision; voltage control

### 引 言

目前, 在半导体集成电路光刻<sup>[1-3]</sup>领域, 主振荡功率放大 (master oscillator power amplifier, MOPA) 结构的 ArF (193nm) 准分子激光器<sup>[2,4]</sup> 占据主导地位。在这类结构中, 主振荡腔产生线宽窄<sup>[5]</sup>、光束质量好的优质种子光并传输至功率放大腔, 此时, 功率放大腔通过放电激励对种子光进行能量放大, 由此获得能量大、光束质量好的准分子激光输出。

MOPA 结构的准分子激光器电源系统工作原理是: 直流电源经充电模块对储能电容进行充电, 充电达到需要的电压后, 升压模块被触发, 脉冲变压器对

充电电压进行升压, 然后再经过两至三级的磁开关进行脉冲压缩<sup>[6]</sup>, 最后实现对放电腔的放电激励。

以上过程中, 对充电模块进行电压控制有着重要的意义: 首先, 由于磁开关的延时和抖动特性与其承受的电压直接相关, 电压的波动影响到同步控制系统的性能和 MOPA 系统的光放大性能; 其次, 充电模块的输出电压的变化直接影响到输出激光的脉冲能量, 由于脉冲升压模块和磁开关模块均难以实现输出电压的控制, 所以对储能电容上的电压进行控制就尤为重要。

作者针对谐振充电<sup>[7-9]</sup>设计了一套高精度的电压控制<sup>[10-11]</sup>方案。通过对储能电容进行电压过充, 并由可控泄放回精密泄放电压, 得到高精度的谐振电压输出。同时, 由于输出电压较高 (1kV ~ 1.5kV), 目前市场上没有合适的检测手段进行高精度检测, 本文中提出了一种针对磁开关结构准分子

作者简介: 李友布 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为准分子激光器双腔同步放电。

\* 通讯联系人。E-mail: baojian@sohu.com

收稿日期: 2012-12-24; 收到修改稿日期: 2013-01-12

激光器的电压精度检测方法,利用高性能磁开关的延时特性,可以有效地检测电压的最大波动情况。

### 1 高精度电压控制的设计

图 1 和图 2 分别是高精度电压控制的原理图和时序图。

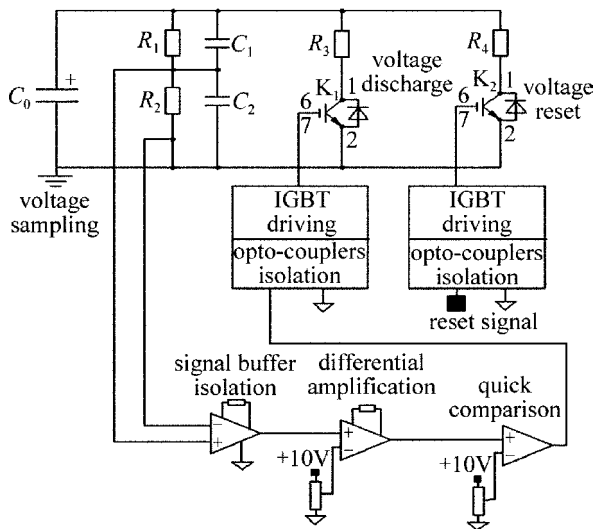


Fig. 1 High precision voltage control schematic diagram

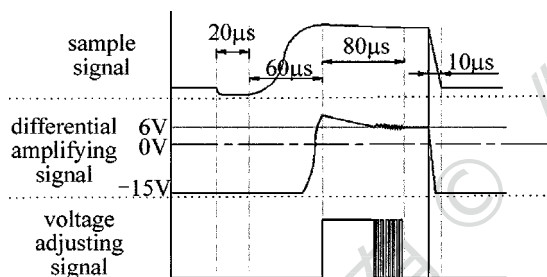


Fig. 2 High precision voltage control sequence diagram

该设计采用电压过充-放电方法,为谐振充电设计了一套高精度的电压控制方案。首先,谐振充电确保储能电容电压每次都过充,即充电电压大于目标电压;然后,通过动态监测谐振充电中储能电容上的电压,由可控泄放回路精密泄放电压,得到高精度的谐振充电电压。

首先,用无感电阻  $R_1, R_2$  对储能电容  $C_0$  上的电压分压取样。假设  $C_0$  上放电前的电压为  $U_0$ , 取样电压为  $U_1$ , 则电压与电阻之间的关系为:

$$U_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_0 \quad (1)$$

分压电阻  $R_1, R_2$  分别并联合适的电容  $C_1, C_2$ , 抵消电路中分布电容  $C_p$  对取样信号的影响。电容的容抗为:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

式中,  $\omega$  为电路工作角频率, 电容  $C_1, C_2$  与电阻  $R_1, R_2$  的关系式本应该为:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{X_{C_1}}{X_{C_2}} = \frac{\frac{1}{\omega C_1}}{\frac{1}{\omega C_2}} = \frac{C_2}{C_1} \quad (3)$$

由于分布电容的存在,  $C_1, C_2$  与  $R_1, R_2$  的关系变为:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{C_2}{C_1 + C_p} \quad (4)$$

由于电容  $C_1$  比较小, 只有几个皮法, 并难以确定具体阻值, 实验中采用 PCB 板正反面铜皮实现; 为提高电容的稳定性, 电容  $C_2$  采用校正电容。

电压取样后, 送给电压调控电路。取样信号首先由信号缓冲隔离级送给差分放大电路, 差分放大电路把目标电压附近的电压放大, 用来提高电压调控的精度; 差分放大后的信号送给快速比较器, 通过调节比较器反相输入端电压, 得到合适的电压调节信号; 电压调节信号送给绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 驱动电路, 驱动泄放电路中的 IGBT 泄放掉多余的电压, 从而得到高精度的目标电压。其中, 信号缓冲隔离级由仪表运放 AD620 同比例放大, 实现取样信号的缓冲隔离; 差分放大与快速比较的反相输入端电压都是由 10V 精准参考电压源 AD588 芯片提供, 并用电压跟随器前后信号隔离; IGBT 驱动光耦隔离电压调节信号后, 送给泄放电路。

泄放电路功率计算公式为:

$$W = \frac{1}{2} C_0 (U_s^2 - U_t^2) f \quad (5)$$

式中,  $C_0$  为储能电容容量,  $U_s$  为储能电容放电前电压,  $U_t$  为储能电容放电后电压,  $f$  为泄放电路工作频率。

电容放电公式为:

$$U_t = U_0 \exp\left(\frac{-t}{R_3 C_0}\right) \quad (6)$$

式中,  $U_0$  为电容放电前电压, 根据泄放电路功率, 选择适合电阻  $R_3$  的功率值; 根据电容放电时间, 电阻  $R_3$  选择合适的阻值。

每次谐振充电前, 先将储能电容上电压清零, 以减小谐振充电后电容上电压的波动, 并提高谐振充电倍压效率。电阻  $R_4$  的选择与电阻  $R_3$  类似。

由于本设计通过电压过充-放电的方法实现高精度电压控制, 将损耗掉一些电压。电压损耗为:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (7)$$

式中,  $U_1$  为泄放前电压值,  $U_2$  为泄放后电压值。电压损耗  $\Delta U \approx 10V$ 。

图 3 为高精度电压控制流程图, 详细描述了高精度电压控制流程。配合高精度电压控制原理图和时序图可以很好地理解高精度电压控制原理。通过实时监测谐振充电中储能电容上的电压, 并在电压过充后泄放多余电压, 来得到高精度的充电电压。

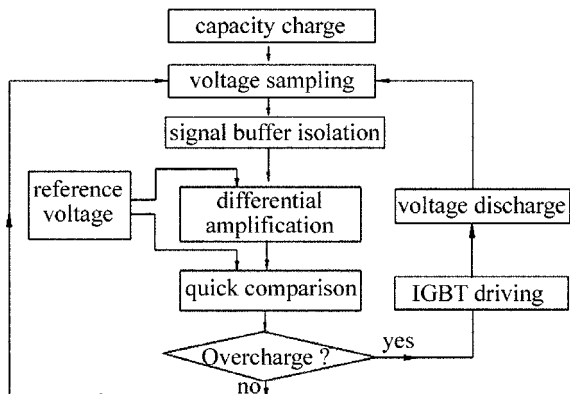


Fig. 3 High precision voltage control flow diagram

## 2 电压检测方法

精确测量上述谐振电源的输出电压是另外一个难点, 其原因在于: 首先, 由于谐振电源的输出电压为  $1000V \sim 1500V$ , 常见的高精度万用表均无法直接测量; 其次, 采用示波器加差分探头测量的方案中, 示波器通常为 8 位, 动态有效位通常 6 位左右, 即约有 2% 的不确定度; 探头通常有 1% ~ 2% 的不确定度, 所以组成的检测系统通常会具有 4% 的不确定性, 而电源的控制方案希望达到的控制精度在 1% 以内, 所以也无法通过示波器加探头的方式直接测量。

由于磁开关的耐压时间与磁开关的参量关系可表示为:

$$\int_0^{T_{sat}} V_i dt = N\Delta BA \quad (8)$$

(8) 式也被称为伏秒积分, 表征磁开关的耐压特性。式中,  $T_{sat}$  为磁开关耐压时间;  $V_i$  为磁开关承受电压;  $\Delta B$  为磁芯材料磁通密度摆幅<sup>[12]</sup>;  $A$  为磁芯有效横截面积。由伏秒积分公式得出: 磁开关模块产生的延时随充电电压的变化而变化。经实验验证: 实验中所采用的脉冲升压和磁开关系统在高精度电源中测试, 其延时特性为直流电源变化 1V, 则延时变化 5ns。

本文中利用脉冲升压和磁开关模块产生的延时

随电压变化而变化的特性搭建如图 4 所示的电压精度检测系统, 通过示波器检测主开关 IGBT 的触发信号和放电激光头的放电信号之间的延时, 确定前端谐振电源输出电压的精度范围。

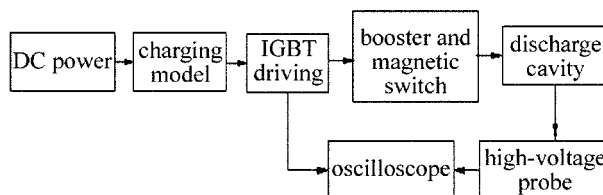


Fig. 4 Voltage accuracy detection system

实验条件如下: 示波器采用电路中的主开关 IGBT 触发信号作为触发电源, 其它的幅度和时间基准等均保持一致; 激光器 10Hz 运行; 所采用的脉冲升压和磁开关系统首先在高精度电源中进行了测试和标定, 其延时特性为直流电源变化 1V, 则延时变化 5ns。

图 5 和图 6 为采用上面所述的检测方案测得的激光头放电波形。图 5 为不进行电压控制时的激光头放电抖动情况, 其抖动分布约 20ns, 对应前端直流电压波动约 4V, 前端直流电压 1200V, 即波动约  $\pm 1.67\%$ ; 图 6 为进行电压控制时的激光头放电抖动情况, 相比于图 5, 首先, 放电时间滞后, 这是由于所采用的电压泄放控制模式, 导致电压降低, 磁开关延时加长; 其次放电抖动情况明显改善, 抖动约 10ns, 对应前端电压波动约 2V, 即波动约  $\pm 0.83\%$ 。

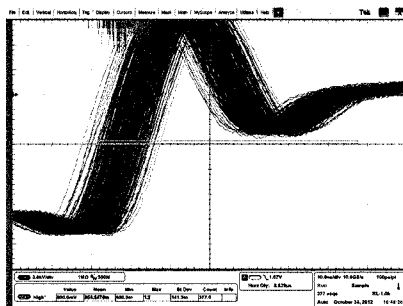


Fig. 5 Laser discharge waveform before voltage control

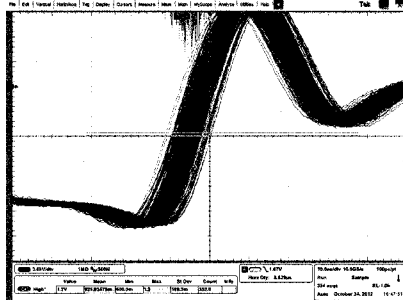


Fig. 6 Laser discharge waveform after voltage control

### 3 结 论

所设计的 MOPA 结构准分子激光电源的高精度电压控制方案,采用了闭环控制回路电容电压过充-放电的方法,很好地提高了谐振电源储能电容上的电压精度,减小了激光器双腔放电时间的相对抖动,并为后期的激光器能量输出稳定控制打下良好基础。

#### 参 考 文 献

- [1] GONG Y, ZHANG W. Present status and progress in 193nm exposure system in lithography[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2008, 1(1): 25-35 (in Chinese).
- [2] YU Y Sh, YOU L B, LIANG X, *et al.* Progress of excimer lasers technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270 (in Chinese).
- [3] YOU L B, ZHOU Y, LIANG X, *et al.* Recent development of ArF excimer laser technology for lithography[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(5): 522-527 (in Chinese).
- [4] ZSCHOCKE W, ALBRECHT H S, SCHRODER T, *et al.* High repetition rate excimer lasers for 193nm lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4691: 1722-1733.
- [5] ZHANG H B, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* ArF excimer laser line narrowing technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009(1): 46-51 (in Chinese).
- [6] YANG P, WEN Y F, HU X W, *et al.* Design of high voltage and high frequency pulse sharpening circuit based on magnetic switch [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 45-47 (in Chinese).
- [7] ZHAO J M, GAO J, LIANG X, *et al.* Study on pulse charge power for on dual-chamber excimer laser[J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 97-100 (in Chinese).
- [8] HUANG D W, YOU L B, LIANG X, *et al.* Research on pulse charging excimer laser power supply[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2009, 26(1): 39-43 (in Chinese).
- [9] QIAO E M, ZHANG K. Study on the characteristics of series-resonant capacitor charging power supply[J]. Telecom Power Technology, 2010, 27(1): 11-14 (in Chinese).
- [10] LIU F C, JIN Sh H, ZHAO XI J. Closed-loop control of high voltage pulse capacitor charging power supply based on series-parallel resonant[J]. Power Electronics, 2012, 46(6): 69-72 (in Chinese).
- [11] LUO T F, MENG Zh Q. Design of the high voltage pulse power supply based on the LCC series-parallel resonant converter[J]. Power Supply Technology and its Application, 2010, 36(9): 80-85 (in Chinese).
- [12] YOU L B, LIANG X, YU Y Sh, *et al.* Design and experimental study of all solid state pulse power module for excimer lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(11): 1750-1754 (in Chinese).