

文章编号: 1001-3806(2013)01-0097-04

双腔准分子激光器脉冲充电电源的研究

赵家敏¹ 高 健² 梁 勳¹ 王效顺¹ 游利兵¹ 王庆胜¹ 余吟山¹ 方晓东^{1*}

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 合肥 230009)

摘要: 为了满足工业用振荡-放大双腔结构的准分子激光器放电激励技术的要求, 设计了高重频高精度的脉冲充电电源。该电源采用 LC 谐振倍压的方式, 同时为双腔准分子激光器的充电电容器进行充电, 倍压比为 1.87。通过对电源工作时序的调节, 实现千赫兹高重频放电激励。在电源输出电压约为 1300V 时, 充电电压精度为 $\pm 0.18\%$ 。结果表明, 通过充电电压精度控制单元, 对充电电压反馈调节, 可以实现充电电压的高精度。

关键词: 激光技术; 充电电源; 谐振; 高重频; 高精度; 准分子激光

中图分类号: TN248.2; TN245 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.024

Study on pulse charge power for a dual-chamber excimer laser

ZHAO Jia-min¹, GAO Jian², LIANG Xu¹, WANG Xiao-shun¹, YOU Li-bing¹, WANG Qing-sheng¹,
YU Yin-shan¹, FANG Xiao-dong¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to satisfy the exciting technique of a master oscillator power amplifier (MOPA) excimer laser for industrial use, a high-repetition and high-accuracy pulse charge power was designed. The power can simultaneously charge the charging capacitors for the dual chamber excimer laser with a LC resonant circuit with a voltage ratio of 1.87. By regulating the work schedule, the power can discharge at kHz level frequency. When the output voltage was about 1300V, the voltage precision was $\pm 0.18\%$. The charging voltage can be controlled at high accuracy by the voltage feedback regulation.

Key words: laser technique; charge power; resonance; high-repetition frequency; high-accuracy; excimer laser

引 言

准分子激光器具有波长短、光子能量大、并且可重复频率运行等优点, 广泛应用于工业、医疗和科研等领域^[1-3]。目前, ArF(193nm) 准分子激光器在半导体集成电路光刻领域有着无可取代的地位。由于光刻技术的发展, 要求 ArF 准分子激光器做到更大的输出功率和更窄的光谱脉宽, 对激光脉冲能量稳定性的要求越来越高, 单腔结构的准分子激光器在高功率和窄脉宽上不能兼顾^[4], 很难满足输出功率大的要求。

目前国外的主流做法是采用主振荡功率放大 (master oscillator power amplifier, MOPA) 结构的双腔准分子激光器^[5], 这类结构中, 第 1 个放电腔是主振荡腔 (master oscillator, MO), 产生光束脉宽较窄, 但激光能量较低的优质种子光, 种子光传输到第 2 个放电腔即功率放大腔 (power amplifier, PA) 时, 该放电腔通过

放电激励对种子光进行能量放大, 由此获得能量较大、脉宽较窄的准分子激光输出。这种 MOPA 结构系统对双腔准分子激光器在放电激励上的主要要求为高重频和放电适时同步^[6]。影响放电同步的主要因素为充电电容器充电电压的变化, 因为双腔的激励系统中的磁脉冲压缩时间主要取决于充电电容器的充电水平^[7]。激光脉冲能量的稳定性对充电电压的精度提出了很高的要求^[8]。

本文中针对激光器系统应用需求, 设计了 1 种双路高重频高精度脉冲充电电源, 该电源首先通过 LC 谐振充电的方式同时为 MO 腔和 PA 腔的充电电容器进行充电, 其次电源中设计了 1 个充电电压调节回路, 通过精度控制单元对充电电压反馈调节, 以实现充电电压的高精度。

1 脉冲充电电源的设计

MOPA 系统主要包括双腔脉冲充电电源、脉冲升压和磁开关模块, 以及 MO 腔和 PA 腔, 如图 1 所示, 双腔充电电容器的能量分别通过升压变压器和磁开关模块对两个激光谐振腔进行放电激励^[9-10], MOPA 系统

作者简介: 赵家敏 (1985-) 男, 博士研究生, 主要从事准分子激光技术及激励电源的研究。

* 通讯联系人。E-mail: Xdfang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2012-04-09; 收到修改稿日期: 2012-05-10

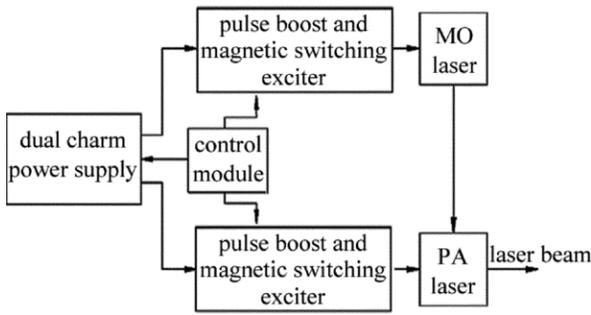


Fig.1 Structure chart of MOPA system

的各部分由控制单元控制。

1.1 充电电源

图2为充电电源的原理结构图。图3为充电电源的工作时序图。

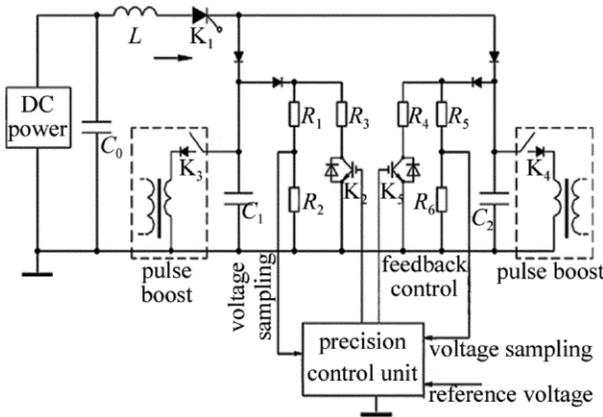


Fig.2 Schematic diagram of pulse charging power supply

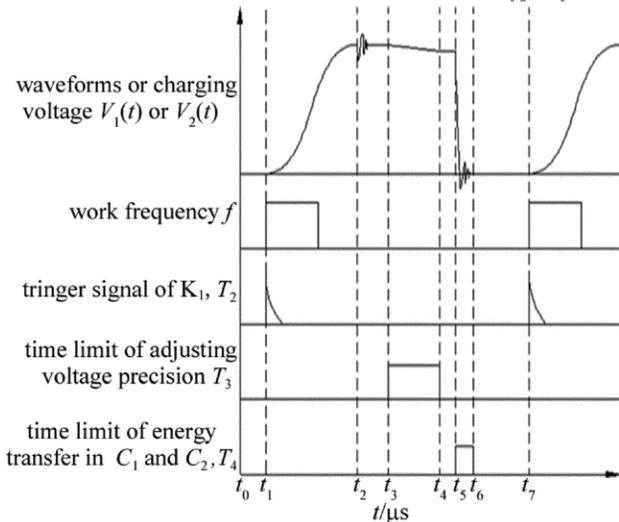


Fig.3 Work schedule chart

工作过程简述如下。

(1) 直流电源为开关电源 t_1 时刻 K_1 导通, C_0 经过电感 L 同时向 MO 腔的充电电容器 C_1 和 PA 腔的充电电容器 C_2 充电, 以使两个充电电容器 C_1 和 C_2 达到相同的充电水平。

(2) 高精度、低温漂电阻 R_1 和 R_2 , R_3 和 R_6 分别组成 C_1 和 C_2 充电电压取样网络, 在精度调节时限 T_3 内,

精度控制单元输出反馈信号, 通过 R_3 和 R_4 分别将 C_1 和 C_2 上的电压泄放到控制单元(图1中)提供的参考电压, 实现充电电压高精度和 C_1 、 C_2 充电电压的相同。

(3) $t_5 \sim t_6$ 时间段内, 控制单元(图1中)提供两路触发信号分别触发 K_3 和 K_4 , 将充电电容器的电压转移到脉冲升压单元中。在电源的实验过程中, 采用 27Ω 电阻作为电容器 C_1 和 C_2 的放电负载来代替脉冲升压单元。

(4) t_7 时刻, 进行 MOPA 系统工作的下一次充电过程。

(5) 图3中, 充电电源工作频率 f 即为双腔激光器的工作频率, K_1 的触发信号 T_2 , 电压精确调节的工作时限 T_3 , 充电器向脉冲升压模块的转移时间 T_4 由控制单元(图1中)提供。

1.2 谐振充电特性分析

图2中 C_0 、 L 、 K_1 、 C_1 、 C_2 构成谐振充电回路, 其等效电路如图4所示, 其原理如下。

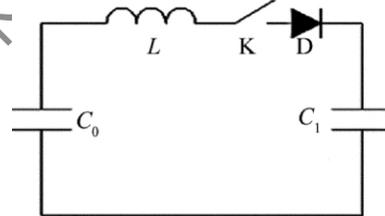


Fig.4 Equivalent of the charging power

C_0 上初始电压 V_0 , t_0 时刻 K 闭合, C_0 向 C_1 上电荷转移。在某时刻 C_0 上电压 $V_0(t)$, C_1 上电压 $V_1(t)$, 两者对应的关系为:

$$LC_1 \frac{d^2 V_1(t)}{dt^2} + V_1(t) = V_0(t) \quad (1)$$

$$LC_0 \frac{d^2 V_0(t)}{dt^2} + V_0(t) = V_1(t) \quad (2)$$

(1) 式与(2) 式联合求解得:

$$V_0(t) = \frac{V_0}{1 + \beta} (\cos \omega t + \beta) \quad (3)$$

$$V_1(t) = \frac{\beta V_0}{1 + \beta} (1 - \cos \omega t) \quad (4)$$

式中 $\beta = \frac{C_0}{C_1}$, $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\mathcal{L} = \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1}$ 。

t 时刻回路中的电流为:

$$I = C_1 \frac{dV_1(t)}{dt} = \frac{\omega V_0 C_1 \beta}{1 + \beta} \sin \omega t \quad (5)$$

在图2中, $C_1 = C_2$, 且 $C_0 \gg (C_1 + C_2)$, 则 $\frac{\beta}{1 + \beta} =$

$\frac{C_0}{C_1 + C_0} \rightarrow 1$, 即每一次谐振充电过程中, C_0 上的电压基

本不变, C_1 和 C_2 可以充到 2 倍的直流电源电压。

取合适的电感 L , 使谐振充电时间为 $50\mu\text{s} \sim 60\mu\text{s}$, 实现 C_0 对 C_1 和 C_2 的快充电, 调节图 3 中各工作时序的时间, 使 $t_1 \sim t_7 = 250\mu\text{s}$, 则电源的充电频率为 4000Hz , 实现对 MO 腔和 PA 腔的高重频充电。

在 $V_0 = 750\text{V}$ 时, 回路中峰值电流较大, 约 200A , 故选择可控硅 (K_1) 作为主回路的开关管。

2 实验结果

2.1 谐振充电回路实验结果

用 Iecroy 示波器观察 C_1 或 C_2 上充电过程, 直流电源分别从 200V 到 750V 给充电电源供电, 测试充电电源的倍压水平及充电时间。表 1 中为测试结果, 倍压比为 1.87 左右。在 750V 时, 充电时间为 $50\mu\text{s}$, 在 $50\mu\text{s}$ 内可以实现对储能电容 C_1, C_2 完成一次快充电。图 5 为直流电源电压为 750V 时, 一次谐振充电的波形。

Table 1 Ratio of the resonant charging voltage and the DC power voltage

the DC power voltage/V	200	400	500	600	700	750
the resonant charging voltage/V	374.6	750.5	936.7	1125	1311.4	1415.7
the voltage ratio	1.873	1.876	1.873	1.875	1.873	1.887
the resonant charging time/ μs	60	60	60	60	58	50

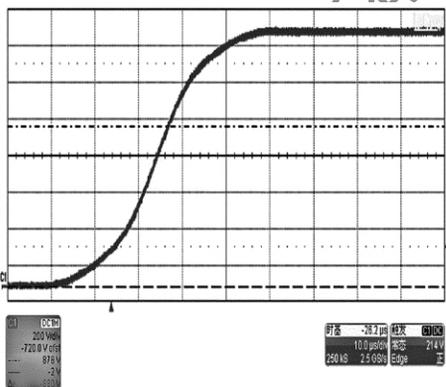


Fig. 5 Resonant charging waveforms when DC power output 750V

2.2 充电电压的精确调节实验

谐振充电过程中, 直流电源输出电压的不稳定性, 高重频工作时电感的温升造成的电感性能的变化, 会造成充电电容器上充电电压的波动, 这对激光束能量稳定性影响很大。因此, 电源中设计了一条用于调节电压精度的泄放回路, 通过电阻 R_3 和 R_4 的泄放, 将 C_1, C_2 上的充电电压调节为相同的参考电压值。

直流电源电压为 700V 时, 通过测量 6000 个 ~ 7000 个充电脉冲取得充电电压值的最小值、最大值及平均值, 电压的精确度为 $\delta = \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{V_{\text{mean}}}$ 。如表 2 所示, 是测量的未作调节和经过调节的充电电压值。未经反馈调节的充电电压值的精度 $\pm 0.42\%$, 而经过反馈调节的充电电压值的精度为 $\pm 0.18\%$ 。

Table 2 Voltage precision across the charging capacitor when DC power supply output 700V

	counts	min/V	max/V	mean/V	precision
not adjust charging voltage	7100	1324.8	1330.4	1327.7	$\pm 0.42\%$
adjustable charging voltage(1)	6200	1305.6	1308.0	1306.2	$\pm 0.18\%$
adjustable charging voltage(2)	6500	1300.8	1303.2	1301.3	$\pm 0.18\%$

表 2 中设定了两个参考电压值, 调节后的充电电压精度均为 $\pm 0.18\%$ 。通过精度控制单元对充电电压的反馈调节不仅实现了充电电压的高精度, 而且可以实现充电电压的微量可控, 有利于对激光束脉能量的精确控制。

图 6 中的 ch1 为充电电源工作时电容器 C_1 和 C_2 的电压波形图, ch2 为 ch1 的取样信号, 取样信号可以很好地跟踪 C_1 和 C_2 上的电压。从图 6 中可以看到, 倍压充电结束后, 电压略有下降, 这是因为充电电压精度调节的结果。

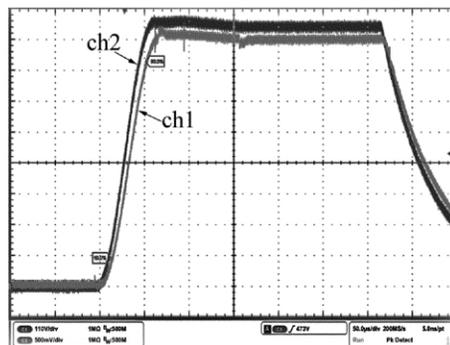


Fig. 6 ch1—the waveforms of C_1, C_2 ; ch2—the voltage sampling waveforms of ch1

3 结论

本充电电源成功地运用 LC 谐振倍压的方式对双腔准分子激光器的充电电容器同时充电, 倍压比为 1.87, 影响倍压比的主要原因在于谐振电感的性能。对充电电压的反馈调节, 在电源输出电压约 1300V 时, 精度为 $\pm 0.18\%$, 取样信号的失真及精度控制单元中元器件的响应速度影响着充电电压精度的调节。

本电源每一个脉冲可以为每一腔传输 2.7J 的能量, 与 MOPA 系统其它模块联机实验, 已经实现了 1000Hz 高重频放电激励。

参 考 文 献

- [1] LIANG X , YOU L B , HUANG D W. Excimer gas charging system based on microprocessor[J]. *Laser Journal* ,2010 ,31(1) : 32-33(in Chinese) .
- [2] TANG J , LIAO J H , MENG H Y , *et al.* Ultraviolet laser and its application in laser processing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress* , 2007(8) :52-56(in Chinese) .
- [3] GAO H L , YANG Y X. Status and key technology of excimer laser research for industrial application[J]. *Laser Journal* ,2004 25(4) :1-3 (in Chinese) .
- [4] 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) : 522-526(in Chinese) .
- [5] FLEUROV V B , COLON III D J , BROWN D J W , *et al.* Dual-chamber ultra line-narrowed excimer light source for 193nm lithography [J]. *Proceedings of SPIE* ,2003 ,5040: 1694-1703.
- [6] NESS R M , MELCHER P C , SAETHRE R B. Timing and synchronization of solid state pulse power modules(SSPPM) for excimer laser application[C]//Power Modulator Symposium ,2002 and 2002 High-Voltage Workshop Conference Record of the Twenty-Fifth International. Hollywood ,California ,USA: IEEE 2002: 525-528.
- [7] YOU L B , YU Y Sh , LIANG X , *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) : 1750-1751(in Chinese) .
- [8] GILLESPIE W D , ISHIHARA T , PARTLO W N , *et al.* 6kHz MOPA light source for 193nm immersion lithography [J]. *Proceedings of SPIE* ,2005 5754: 1293-1303.
- [9] 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 ,1(1) : 39-43(in Chinese) .
- [10] NESS R , MELCHER P , FERGUSON G , *et al.* A decade of solid state pulsed power development at cymer INC[C]//Conference Record of the Twenty-Sixth International: Power Modulator Symposium , 2004 and 2004 High-Voltage Workshop. San Francisco ,CA , USA: IEEE 2004: 228-233.

版权所有 © 《激光技术》编辑部