

文章编号: 1001-3806(2015)02-0233-04

## MOPA 结构准分子激光系统的同步控制

钱小东, 李哲茹, 梁 勳, 鲍 健\*, 张 铄

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 为了使主振荡功率放大结构的 ArF 准分子激光器实现双腔同步放电, 采用同步逻辑快速响应双腔放电时序, 根据同步控制逻辑自动对双腔延时进行精密调节, 使用四位二进制计数器实现粗调搜索, 快速缩小双腔延时差, 而使用通用数字可编程延时芯片来实现小精度延时调节。结果表明, 双腔放电同步调节之后, 放电时差稳定在 23ns 左右, 同步抖动小于  $\pm 3$ ns, 满足 4kHz 高重复频率下主振荡功率放大结构准分子激光器同步控制的要求。

**关键词:** 激光器; 同步控制; 同步逻辑; 粗调延时; 细调延时

**中图分类号:** TN248.2 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.019

## Synchronous control for MOPA excimer laser systems

QIAN Xiaodong, LI Xiru, LIANG Xu, BAO Jian, ZHANG Shuo

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

**Abstract:** In order to achieve synchronous discharge of dual-chambers of an ArF excimer laser based on master oscillation power amplifier(MOPA) structure, synchronization logic was used to respond to dual-chamber discharge timing sequence quickly. According to synchronization control logic, an automatic precision adjustment to dual-chamber delay was made. Coarse search was implemented by using a high-speed synchronous modulo-16 binary counter and dual-chamber delay difference was narrowed quickly. Small precision delay adjustment was achieved by using universal digital programmable delay chip. The results show that discharge time differences steadies at about 23ns less than  $\pm 3$ ns synchronization jitter after dual-chamber discharge synchronous adjustment. It can meet MOPA structure excimer laser synchronous control requirements under high repetition frequency of 4kHz.

**Key words:** lasers; synchronous control; synchronous logic; coarse delay; fine delay

### 引 言

应用于半导体集成电路制造的光刻用准分子激光器对于光源的脉冲功率和光谱带宽有着严格的要求, 高吞吐量要求高脉冲功率, 而高数值孔径要求稳定的较窄的光谱带宽<sup>[1]</sup>。单腔结构难以实现窄谱线和高稳定能量脉冲的输出<sup>[2-3]</sup>, 双腔结构的主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)技术解决了光刻生产对于光源输出功率和线宽的矛盾, 主振荡器(master oscillator, MO)产生窄线宽但低能量的种子脉冲光源, 功率放大器(power amplifier,

PA)实现对种子光源的功率放大, 从而得到窄线宽、大功率的优质激光束<sup>[4-6]</sup>。在 MOPA 结构运行过程中, 激光输出能量和光谱宽度(E95, 又称光谱纯度)对于两腔体放电时间的间隔极其敏感<sup>[7-10]</sup>。因此 MOPA 结构准分子激光器系统需要严格控制双腔放电时间并同步放电<sup>[11]</sup>。

在 MOPA 结构中, MO 腔和 PA 腔分别由两个独立的固态脉冲功率模块(solid-state pulsed power module, SSPPM)驱动, 由于磁性材料的性能不可能完全相同, 两脉冲功率模块的延时将会产生差异, 并且随着工作温度、工作电压以及工作频率的变化而变化。影响双腔放电时序抖动的其它因素还有: 主回路开关的抖动、磁开关复位电流、谐振充电电压的波动等<sup>[12]</sup>。

商用激光器生产商 Cymer 公司提供了一种动态的闭环控制系统, 其通过监视系统时间, 调节 SSPPM 系统的触发时间, 来解决慢速时间漂移问题。为了

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2013ZX02202004)

作者简介: 钱小东(1987-), 男, 硕士研究生, 现从事嵌入式与电子学的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: baojian\_@sohu.com

收稿日期: 2014-02-26; 收到修改稿日期: 2014-03-18

处理异常情况,例如激光器关闭以更换晶片之后的第 1 个脉冲或激光器关闭较长时间(例如 5min)之后的第 1 个脉冲,时序精度可能不佳。而且在某些情况下,猝发的前几个脉冲的时序不精确可能造成问题。一种较好的方式是将激光器预程序化,使 MO 腔和 PA 腔的放电脱序一两个脉冲,从而来自 MO 腔的种子束不能被放大<sup>[13]</sup>。

本文中设计了一种闭环放电时序实时自动调节控制系统,能够对 MOPA 同步放电时序做出快速响应,通过系统自动动态调节,有效降低了放电的相对抖动,满足 4kHz 高重复频率下 MOPA 结构准分子激光器同步能量输出。

### 1 同步控制系统架构

MOPA 结构准分子激光器电源系统结构如图 1 所示,其基本工作原理为:直流电源(direct current power, DCP)模块通过充电模块(charging model, CM)对储能电容进行充电,当达到目标电压后,两路升压模块(booster model, BM)被触发,脉冲变压器对充电电压进行升压,然后经过 3 级磁开关(magnetic switch, MS)进行脉冲压缩<sup>[14]</sup>,最后实现对放电腔(discharge cavity, DC)的放电激励。同步控制(synchronous control, SC)通过双腔反馈信号动态调节升压模块被触发的时间先后使得激光器双腔放电同步。

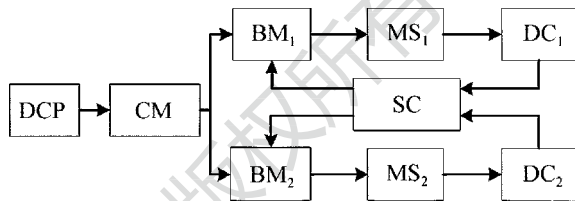


Fig. 1 Diagram of power supply of MOPA excimer lasers

图 2 为同步控制模块结构框图。整个同步控制系统的时钟由统一的频率发生器提供,该频率发生器产生 1kHz ~ 4kHz 可调频率信号,该信号经过快速光耦隔离后送给同步控制模块。在 MO 腔前面添加门控电路主要是为了避免因激光器强放电引入的误触发。MOPA 结构双腔从放电激励到出光大约经过 10 $\mu$ s 时间,所以双腔反馈信号之后添加 10 $\mu$ s 固定延时;并且研究表明,MOPA 结构准分子激光器的 MO 腔较 PA 腔提前 25ns 放电可得到最佳的光放大效率,因此在 MO 腔后附加 0ns ~ 50ns 可调延时。

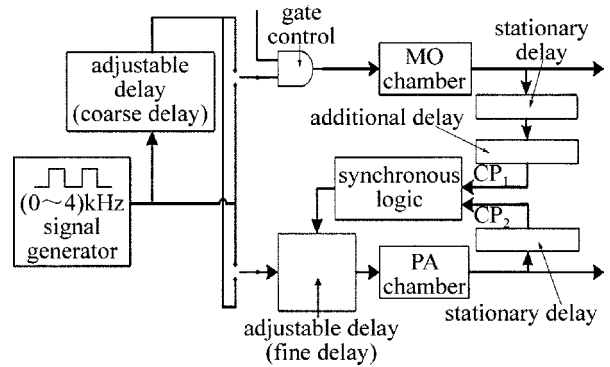


Fig. 2 Structure diagram of synchronous control logic

#### 1.1 同步控制模块

1.1.1 同步逻辑 同步逻辑模块位于双腔放电后端,用于获取双腔放电先后逻辑。因为无法判断下一脉冲双腔放电的先后逻辑,所以是根据当前双腔放电先后逻辑来调节下一脉冲的延时。又由于双腔放电反馈信号过快,在几十纳秒级别,单片机无法在这么短的时间内直接捕获,所以需要同步逻辑电路确定双腔放电先后逻辑。所设计的同步逻辑电路由两个 D 触发器和两个与门构成,在取样预处理后的信号到来之前,单片机复位两个 D 触发器,然后等待取样信号到来并锁存先到的信号,单片机通过同步逻辑电路输出的两路逻辑信号确定哪路信号先到。

1.1.2 粗调延时 为了加快同步调节,并增大延时调节范围和精度,延时电路分为粗调延时和细调延时。粗调延时使用同步四位二进制计数器 SN74F161A 芯片,可调节范围为 50ns ~ 800ns。

如图 3 所示,外部触发信号 trig 1 经过 D 触发器与时钟信号同步,同步之后的触发信号 trig 2 输出给激光器和 SN74F161A 的 load 端,当 load 端为低电平时,芯片通过 A, B, C, D 预置初始计数值,load 端为高时开始计数。当时钟为 20MHz 时,单步计数周期为 50ns,当计数值达到 1111 时,进位 CAR 输出 1,并送给 D 触发器, D 触发器的反向输出端接计数器的 EP, 当 EP 端为 0 时,禁止计数,计数器的进位输出 CAR 将保持高电平,直到外部触发信号置低。

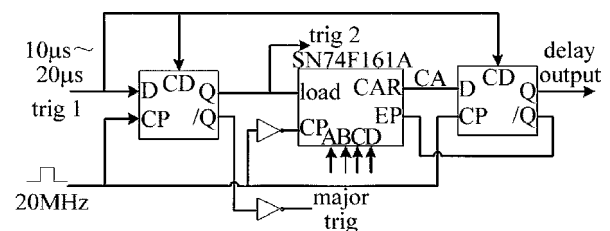


Fig. 3 Circuit schematics of coarse delay

1.1.3 细调延时 细调延时模块使用通用可编程数字延时发生器实现,该延时发生器最小可以达到 10ps 的延时分辨率,其最大延时范围由外部电阻器和外部电容器确定,延时范围在 2.5ns 到 10μs 内可选,通过设置 8 位数字信号确定具体的延时时间。当外部上升沿信号触发后,将产生等量的选择延时和内部固定延时之和。这样的精度和可编程性非常适合脉冲延时,同样适用于时钟的时间校正。该延时发生器输出抖动随着最大延时范围增大而增大,由于本文中设计的同步控制电路对延时电路的抖动要求很高,所以使用数字可编程延时发生器的细调范围为 50ns ~ 350ns。

### 1.2 同步控制逻辑

实现 MOPA 结构同步的关键在于软件系统的设计,旨在快速动态调节双腔放电延时。根据系统同步与否,系统分为搜索态和锁定态,处于搜索态时,确定粗调延时器放在哪一端之后,选择粗调实现快速大范围调节时间差;然后进入细调环节小精度延时调节,实现预期时间差后进入锁定态,并随时动态调节。

由于开机时系统的不稳定性及不确定性,并且为避免添加过多延时而引入抖动,粗调放置在 MO 腔一端,细调延时固定放置在 PA 腔端,两者最小延时都是 50ns,可以相互抵消,能够准确判断双腔放电时序。接下来经过图 4 所示的流程图确定粗调延

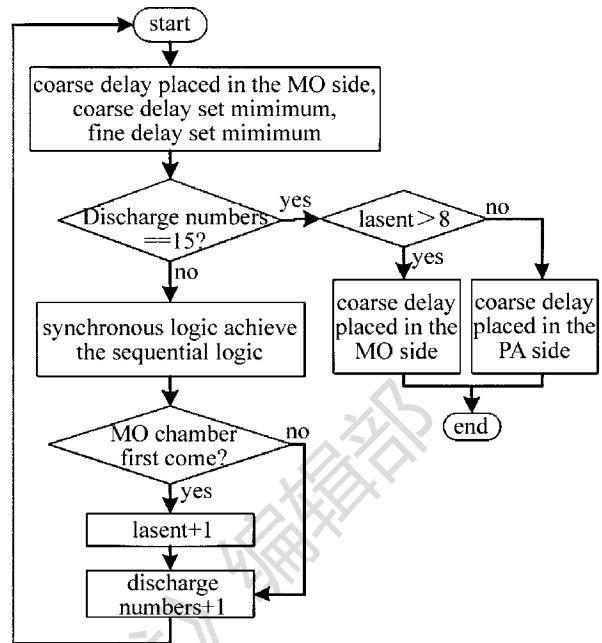


Fig. 4 Flowchart of coarse delay

时器放在哪一端。图 4 中的  $lasent$  表示程序中的一个变量,用于计数 MO 腔先放电次数。

粗调延时器放置位置确定之后进入搜索态,搜索态算法流程图如图 5 所示,包括粗调和细调延时搜索。粗调使用四位计数器 74F161A 实现单步 50ns 的延时,最多 16 步,实现 50ns ~ 800ns 的延时范围调节。细调延时使用通用数字可编程延时发生器,单步 1ns 延时,最大延时 255ns。

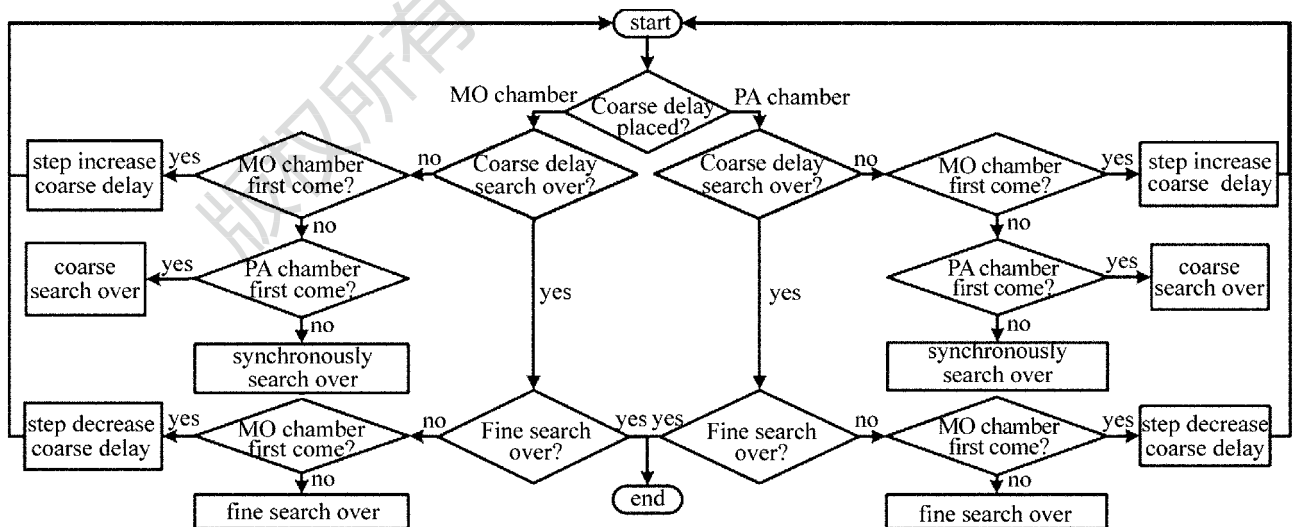


Fig. 5 Flowchart of searching state

由于抖动的存在不可避免,双腔放电时差不确定,表现为交替出现 MO 腔超前或者 PA 腔超前,同步抖动要求控制在 5ns 以内。通过统计各放电腔超前次数判断是否同步,当双腔超前次数都较小时认

为双腔同步放电,否则进行微调。细调延时器单步调节 1ns,通过判断同步逻辑自增或者自减一步,当细调延时值过小或者过大时,程序自动调整粗调延时器,使得调节范围回到中间位置。

## 2 实验验证

图6是双腔放电同步调节波形图,示波器 $C_1$ 通道波形为MO腔放电波形, $C_2$ 通道波形为PA腔放电波形。以MO腔为基准,通过余辉观测到双腔放电调节过程,初始时PA腔放电时间落后MO腔约60ns,经过不断调节最后稳定在23ns左右。

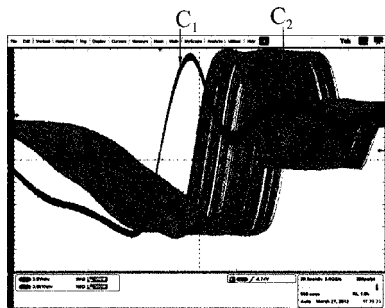


Fig. 6 Waveform of dual-chamber synchronous discharge adjustment

图7为双腔同步放电波形,双腔放电同步调节之后, $C_1$ 通道波形为MO腔放电波形, $C_2$ 通道为PA腔放电波形,双腔放电时差稳定在23ns左右,同步抖动小于 $\pm 3$ ns。

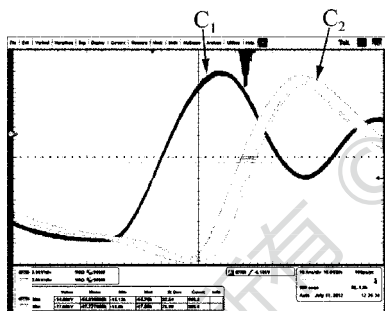


Fig. 7 Waveform of dual-chamber synchronous discharge

实验验证了激光器双腔放电同步控制系统的有效性,实现了双腔放电时差的动态自动调节,并满足放电时差小于 $\pm 5$ ns的要求。

## 3 小结

设计实现了MOPA结构准分子激光器同步控制系统,该系统使用同步逻辑快速锁定双腔放电时序,通过粗调实现大范围快速延时调节,再结合细调延时达到精密调节。考虑到细调延时所采用芯片自身的抖动问题,压缩芯片调节范围以减少延时芯片自身抖动时间。实验表明,该系统可以实现自动快速调节,实现放电时差稳定在23ns左右,同步抖动

小于 $\pm 3$ ns,可在4kHz高重频下MOPA结构准分子激光器上稳定运行。

## 参考文献

- [1] ZHANG H B, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* ArF excimer laser line narrowing technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009 (12):46-51 (in Chinese).
- [2] DUFFEY T P, BLUMENSTOCK G M, FLEUROV V B, *et al.* Next-generation 193nm laser for sub-100nm lithography[C]//26th Annual International Symposium on Microlithography. Santa Clara, California, USA: International Society for Optics and Photonics, 2001: 1202-1209.
- [3] PAETZEL R, ALBRECHT H S, LOKAI P, *et al.* Excimer lasers for superhigh NA 193nm lithography[C]//Microlithography 2003. Santa Clara, California, USA: International Society for Optics and Photonics, 2003: 1665-1671.
- [4] ISHIHARA T, BESAUCELE H, MALEY C A, *et al.* Long-term reliable operation of a MOPA-based ArF light source for microlithography[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5377:1858-1865.
- [5] 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).
- [6] WANG X J, MA W Y, TANG X Zh, *et al.* Synchronization control of electron beam pumped KrF laser MOPA system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(6):663-667 (in Chinese).
- [7] ERSHOV A I, NESS R M. Timing control for two-chamber gas discharge laser system; USA, 6865210[P]. 2005-03-08.
- [8] FLEUROV V, ROKITSKI S, BERGSTEDT R, *et al.* XLR 600i: recirculating ring ArF light source for double patterning immersion lithography[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2008, 6924:69241.
- [9] 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 the SPIE*, 2003, 5040:1694-1703.
- [10] NESS R M, MELCHER P C, SAETHRE R B. Timing and synchronization of solid state pulsed power modules (SSPPM) for excimer laser applications[C]//Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. New York, USA: IEEE, 2002: 525-528.
- [11] GOVORKOV S V, KNYSH A N, WIESSNER A O. MOPA excimer or molecular fluorine laser system with improved synchronization; USA, 7366213[P]. 2008-04-29.
- [12] CYMER INC. Timing control of dual-chambers gas discharge laser system; CN, 100350686C[P]. 2007-11-21 (in Chinese).
- [13] 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).
- [14] BARRETT D M. Magnetic pulse compression techniques for non-thermal plasma discharge applications[C]//Industry Applications Conference, 1996, Thirty-first IAS annual Meeting. New York, USA: IEEE, 1996:2065-2070.