

文章编号: 0258-7025(2008)03-0391-05

抽运染料激光主振荡-功率放大链的 固体激光脉冲时序控制

谈小虎^{1,2} 张贵忠¹ 张云兴² 张晓卫² 张志忠² 但勇军² 陈志理²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; ² 核工业理化工程研究院, 天津 300180)

摘要 对于多台固体激光器抽运的脉冲染料激光主振荡-功率放大(MOPA)链,在放大器中,抽运激光与染料种子激光不仅在空间上要求匹配,而且激光脉冲在时间上也要求匹配。为此,提出了进行激光脉冲时序的控制方法。该方法采用光纤、光开关和随机重复采样等技术实现快速激光脉冲的计算机数据采集。根据实验,抽运和染料激光脉冲的时间匹配最好时,它们的峰值几乎是重合的,由此提出以脉冲峰值处作为延迟时间的测量点来排除脉宽变化的影响,以及采用二次多项式曲线拟合的数据处理技术来排除峰值处延迟时间的测量干扰,实现抽运激光脉冲时序纳秒级的测量和闭环控制。控制系统的手动单步控制误差和延迟时间测量误差小于 ± 0.2 ns,闭环控制精度可达 ± 1 ns。

关键词 激光技术;时序控制;曲线拟合;激光脉冲;激光二极管抽运固体激光器;染料激光

中图分类号 TN 248.3 **文献标识码** A

Laser Pulse Timing Control of Multi Diode-Pumped-Solid-State Laser in Pumping Pulsed Dye Laser Master-Oscillator Power-Amplifier Chain

Tan Xiaohu^{1,2} Zhang Guizhong¹ Zhang Yunxing² Zhang Xiaowei²
Zhang Zhizhong² Dan Yongjun² Chen Zhili²

(¹College of Percision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)
²The Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)

Abstract It not only needs space match but also needs timing match of pumping laser and dye laser seed in pulsed dye laser master-oscillator power-amplifier (MOPA) chain which employs more than one diode-pumped-solid-state lasers (DPSSL). So a laser pulse timing control method is reported to realize the timing match of pumping laser pulse and the seed laser pulse. The computer data acquisition of fast laser pulses is realized through fiber, fiber switch and random repetitive sampling technologies. When the pumping pulse and seed pulse are timing match, their peaks are almost superposition. So the laser pulse delay time is measured at its peak point to eliminate the influence of pulse-width change. The noise at laser pulse peak point is eliminated using binominal curve fitting in data process. This control system realizes the laser pulse timing measurement and close-loop control in nanosecond rank. The single step control error and measurement error are less than ± 0.2 ns. The close loop control precision is ± 1 ns.

Key words laser technique; timing control; curve fitting; laser pulse; diode-pumped solid-state laser; dye laser

1 引 言

在医疗、光谱研究和工业等领域,可调谐染料激光器有着广泛的应用。多种光源可作为脉冲染料激

光器的抽运源,如闪光灯、氮激光^[1]、准分子激光^[2]及铜蒸气激光^[3,4]等,目前固体激光器技术发展迅速^[5~7],激光二极管(LD)抽运的倍频输出固体激光

收稿日期:2007-06-13; 收到修改稿日期:2007-09-29

作者简介:谈小虎(1969—),男,江苏人,高级工程师,硕士研究生,目前主要从事激光技术研究。

E-mail:tan_xiaohu@yahoo.com.cn

导师简介:张贵忠(1963—),男,山西人,教授,博士生导师,目前主要从事光电子技术及其应用方面的研究。

E-mail:gui242201@yahoo.com

器(DPSSL)具有效率高、体积小和重复频率高等特点,已成为可见光输出的染料激光器的重要抽运源^[8,9]。采用主振荡-功率放大(MOPA)的形式是获得高功率染料激光输出的有效方式,通常包含一个振荡器和几个放大器。对于脉冲激光,为了有效进行放大,要求染料激光脉冲和抽运激光脉冲在染料放大池处,在空间和时间上都需要精确匹配^[10],对于窄脉冲的场合,时间匹配要求更加严格。对于单台抽运激光,可以通过调节光程的方法实现。但是一些应用,尤其是高功率应用中,需要多台固体激光器来抽运染料主振荡-功率放大系统。根据激光二极管抽运固体激光器的特性,随着环境温度和工件条件(激光二极管工作电流)的改变,在运行中其输出激光脉冲的触发延迟(从输入触发到输出激光脉冲的时间延迟)也会改变,同时激光脉宽也会发生变化,造成染料激光脉冲与抽运激光脉冲在时间上失配,降低放大效率。因此需要对激光脉冲的时序状态实现闭环控制,尤其在连续长期运行中更为重要。

为此,利用光纤、光开关和随机重复采样等技术实现快速激光脉冲采集,提出了采用脉冲峰值处作为延迟测量点,排除了脉宽变化的影响、曲线拟合的数据处理技术和峰值处的测量干扰,实现了激光脉冲时序的纳秒级测量和闭环控制,并可应用于数百台激光器的大型工程化高功率激光系统等领域。

2 激光脉冲时序控制原理及算法

2.1 控制原理

如图 1 所示,三台固体激光器分别为抽运染料振荡器、染料放大器 1(Amp1)和染料放大器 2(Amp2)。设延迟信号发生器输出的触发脉冲相对基准具有可设定延迟 S ,触发信号经同轴电缆传输至各激光二极管抽运固体激光器电源具有传输延迟 ν ,触发延迟 δ ,各激光二极管抽运固体激光器输出激光脉冲传输至染料池有 T 的传输延迟,染料激光的传输延迟为 D 。为了满足第一级放大器的放大要求,

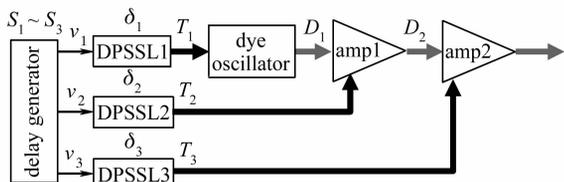


图 1 三台激光二极管抽运固体激光器抽运的染料激光主振荡-功率放大链

Fig. 1 Three DPSSL pumped dye laser MOPA system

抽运光脉冲和染料振荡级输出脉冲必须在染料放大器 1 处重合,即要满足

$$S_1 + \nu_1 + \delta_1 + T_1 + D_1 = S_2 + \nu_2 + \delta_2 + T_2, \tag{1}$$

同样,对于第二级放大器要满足

$$S_1 + \nu_1 + \delta_1 + T_1 + D_1 + D_2 = S_3 + \nu_3 + \delta_3 + T_3, \tag{2}$$

当还有后续放大级时,依次类推。一旦系统建立后,(1),(2)式中,除了 S 和 δ 外,其他都为固定延迟, δ 是由激光二极管抽运固体激光器的特性及工件条件决定的,腔型结构、激光二极管抽运功率、器件老化及环境温度等都会引起它的变化。 S 是可以控制的延迟量,激光脉冲时序控制就是通过调节 S 来补偿由激光二极管抽运固体激光器本身引起的漂移 δ 。

2.2 光脉冲信号采样和数据采集

利用光纤进行信号采样可以简化激光系统布局,光开关的采用使控制系统可以扩展应用于数百台激光器的大型工程化高功率激光系统。如图 2 所示,从激光二极管抽运固体激光器主光束经分束器(BS)分出部分激光(约 1 W),经过衰减器和耦合透镜,注入到石英芯径为 0.6 mm 的多模光纤中,大芯径采样光纤能很容易进行耦合调节,并且能够采集整个光束能量,采样光纤长度约为 10 m 左右,两端采用了标准的 FC 连接器。衰减器包括一个镀有介质膜的角度可调反射镜和一个吸收型滤光片,滤光片部分透过绿光而对 1.06 μm 的红外激光强烈吸收。主要的衰减由滤光片完成,反射镜只作微调。激光在采样光纤内长距离传输过程中,模式充分混合,其输出端的光强将均匀分布,因此采样光纤还起到光束均匀器的作用。采样光纤输出端在光开关上与光开关内部的芯径为 50 μm 的标准通信光纤对接,由于采样光纤输出端面光强分布均匀,注入到芯径为 50 μm 的光纤中的光强将按面积比衰减,这样可以同时实现激光功率监测。计算机通过 RS485 控制光开关切换到指定的通道,快速光电管对相应通道的固体激光进行光电(O/E)转换,光电脉冲

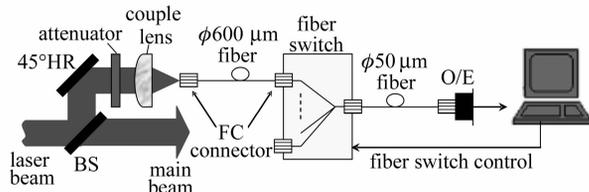


图 2 光信号采样示意图

Fig. 2 Structural diagram of laser signal sampling

入到数据采集卡,在基准触发下进行数据采集。

数据采集中采用随机重复采样技术,利用较小的采样速率就可以实现宽带周期波形的采样。一次触发获取多个采样点(设 m 个点),将多次触发的采样点放置在波形的精确位置,完成一个波形的获取。如果一个波形需要采样 n 个点,则只需要 n/m 次触发就能完成整个波形的采集,因此提高了波形获取的速度。本系统中采用了 200 MHz 实时数据采集速率进行波形的获取,并且将多个波形平均,提高了波形的稳定性。

2.3 激光脉冲延迟的测量

在控制中关键技术之一是激光脉冲延迟的测量,通过信号采样和数据采集,激光二极管抽运固体激光器输出激光脉冲波形被数值化,由图 3 可见该脉冲波型有较长的上升、下降时间,并且有很长的拖尾。通常以脉冲的上升或下降沿的半高位置作为测量点,因为该位置信号变化相对较快,噪声干扰小。然而,对于连续抽运、调 Q 运转的激光二极管抽运固体激光器,输出激光脉宽受很多因素的影响,工作电流的调整、抽运激光二极管的老化使激光二极管抽运功率发生变化;腔内倍频晶体 KTP 的老化、腔内元件的老化引起谐振腔损耗的增加,都会引起固

体激光器输出脉宽的变化。实验中发现以脉冲边沿为测量点,即使时序控制稳定,由于脉宽的变化,染料放大器的时序也会失配,然而,如图 3 所示,无论在较窄或较宽脉冲抽运下,当染料放大器输出激光功率最高时,抽运光与染料光的峰值位置都是重合的。

因此,可以确定利用固体激光脉冲的峰值点作为延迟测量的测量点可以消除脉宽变化的影响。但是由于在脉冲的峰值附近波形变化缓慢,任何信号噪声的叠加肯定会引起峰值位置测量的不稳定。分析图 3 中激光二极管抽运固体激光器输出激光脉冲发现,尽管该波形的总体形状左右不对称,但截取顶部的波形,就具有很好的左右对称性。这样就可以利用二次多项式来拟合该部分的波形,再求取该多项式的极值位置就能获得一个稳定的延迟测量值。

设当前采集波形的数据点为 (y_i, ih) , 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 为数据点序号; h 为数据采集间距。设 y_p 为当前采集波形的最大值, (y_j, jh) 为波形中 $y_j \geq Cy_p$ 的部分, 其中 $j = m, m + 1, \dots, m + k, m + k < n, \in i$; 系数 C 为 $0.8 \sim 0.9$, 可根据实际波形的情况设定。利用二次多项式

$$P(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2, \tag{3}$$

拟合该部分波形。(3) 式中 t 为时间, 系数 a_0, a_1, a_2 利用最小二乘法求得, 即(3) 式满足^[11]

$$\sum_{i=m}^{m+k} [P(ih) - y_i]^2 = \min, \tag{4}$$

在 $P(t)$ 的峰值处有

$$\frac{dP(t)}{dt} = 2a_2t + a_1 = 0, \tag{5}$$

则延迟测量值为

$$t = -\frac{a_1}{2a_2}. \tag{6}$$

2.4 激光脉冲时序控制流程

时序控制系统如图 4 所示, 光信号经过采样, A/D 转换和数据采集, 获得数值化的脉冲波形, 再经过二次多项式拟合和求极值, 获得光脉冲的延迟时间, 与参考值比较获得延迟偏移量, 设延迟漂移允

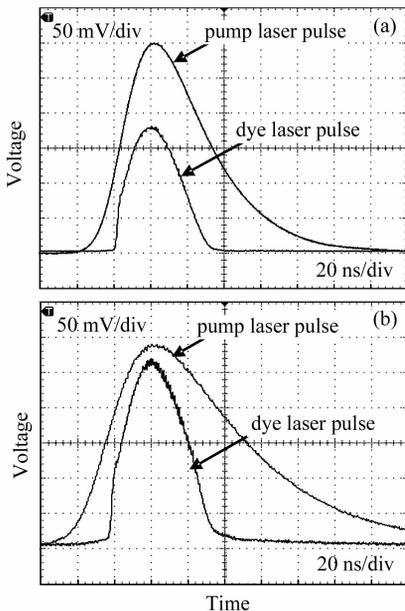


图 3 染料激光放大器输出功率最大时抽运激光脉冲与染料激光脉冲的相对位置。(a) 较窄的抽运脉冲; (b) 较宽的抽运脉冲

Fig. 3 Relative position of pump laser pulse and dye laser pulse when the dye laser amplifier is optimized. (a) under narrower pump laser pulse; (b) under wider pump laser pulse

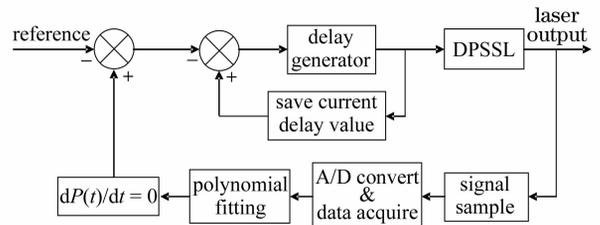


图 4 激光脉冲时序控制流程图

Fig. 4 Laser pulse timing control flow sheet

许范围为 $\pm \Delta t$, 参考延迟为 t_r , 则当 $|t - t_r| > \Delta t$ 时, 将延迟发生器的延迟设定为 $S_{new} = S_{current} - (t - t_r)$ 。这样, 激光脉冲回到了参考延迟位置, 保持染料激光放大器输出功率始终处于最高状态, 实现了闭环控制。为了获得参考延迟, 首先手动调节固体激光器的触发信号的延迟, 使染料激光放大器输出功率最大, 记录下此时激光脉冲的测量延迟作为参考。

3 结果及分析

图 5(a)所示为利用光纤及随机重复采样技术, 在计算机中获得的光脉冲波形, 实时采样速率为 200 MHz, 等效采样速率为 4 GHz, 波形平均 10 次。图 5(b)为实时采样速率为 1 GHz 的 TDS5104 示波器的测量波形, 可见利用光纤及随机重复采样技术可很好地再现快速光脉冲波形。在分析系统控制和测量误差中, 控制程序每调节 1 ns, 使用示波器 (TDS5052B) 和光电探头 (818-BB-21) 测量激光二极管抽运固体激光器输出激光脉冲的相对延迟, 同时控制系统也对相对延迟进行测量, 测量数据如表 1 所示。以示波器的测量数据为参考, 计算 $\Delta I = I_{osc} - I_{ad}$ 的标准偏差, 可得控制系统时序控制误差为 ± 0.12 ns, 计算 $\Delta I = I_{osc} - I_{sys}$ 的标准偏差, 可得控制系统的测量误差为 ± 0.18 ns。因此采用本方法可

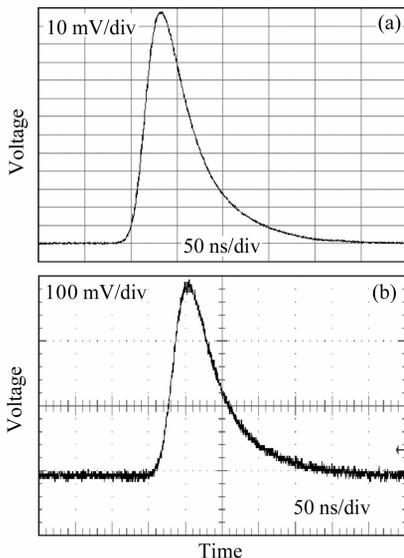


图 5 激光脉冲测量波形比较。(a) 利用光纤及随机重复采样技术, 在计算机中获取的波形; (b) TDS5104 示波器的测量波形

Fig. 5 Comparison of measured laser pulse shape. (a) acquired in computer with fiber and random repetitive sampling techniques; (b) measured with TDS5104

以对脉宽窄至纳秒量级的染料激光主振荡-功率放大系统进行时序控制。

表 1 延迟时间的控制和测量误差

Table 1 Control and measure error of delay

Number of measurement n	Delay interval of adjustment I_{ad} /ns	Measured delay interval with oscilloscope I_{osc} /ns	Measured delay interval with control system I_{sys} /ns
1	1	1.1	1.2
2	1	1.1	1.1
3	1	0.9	1.2
4	1	1.2	0.9
5	1	0.9	1.0
6	1	0.9	1.0
7	1	1.0	1.1
8	1	1.1	0.9
9	1	1.1	1.1

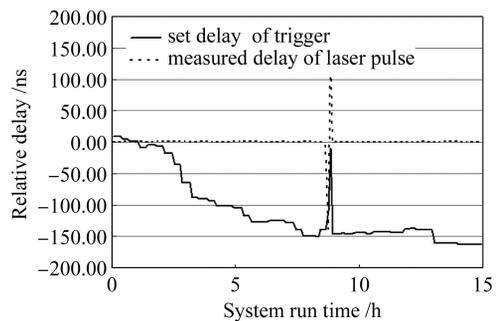


图 6 激光二极管抽运固体激光器触发信号的设置延迟和激光脉冲测量延迟

Fig. 6 Set delay of trigger and measured delay of laser pulse of DPSSL

图 6 是一台激光二极管抽运固体激光器连续运行中, 触发信号的设置延迟 (S) 曲线和控制后该激光器输出激光脉冲延迟的测量曲线, 在闭环控制中光脉冲允许漂移量 $\Delta t = \pm 1$ ns, 控制系统不断调节 S, 使波动限制在允许漂移范围内。因此 S 的变化代表该激光器的触发延迟 δ 的变化。系统控制精度要求为 1 ns, 在测量和单步控制上具有约 5 倍的冗余, 能可靠保证总体控制精度。可见该激光器在运行中, 触发延迟不断漂移, 总漂移量超过了 150 ns, 然而在控制下, 其输出激光脉冲的时序波动 (± 0.99 ns) 始终处于要求的范围内 ($\Delta t = \pm 1$ ns)。图 6 中的一个跳跃点是实验暂停引起的, 可见当恢复实验后, 时序又能准确恢复。

4 结 论

利用光纤、光开关和随机重复采样等技术, 实现

了多路快速激光脉冲的计算机数据采集。在延迟时间的测量中,采用激光脉冲峰值处作为测量点能有效排除激光二极管抽运固体激光器输出激光脉宽变化的影响。曲线拟合的数据处理技术能有效排除峰值处的测量干扰,实现了激光脉冲延迟时间纳秒级的测量。通过闭环控制,控制系统能使激光脉冲时序稳定在小于±1 ns的范围内,满足多台固体激光器抽运的染料激光主振荡-功率放大系统稳定运行的需要。

参 考 文 献

- 1 F. B. Dunning, R. F. Stebbings. The efficient generation of tunable near UV radiation using a N₂ pumped dye laser [J]. *Opt. Commun.*, 1974, **11**(2):112~114
- 2 H. Telle, W. Huffer, D. Basting. The XeCl excimer laser: a powerful and efficient UV pumping source for tunable dye laser [J]. *Opt. Commun.*, 1981, **38**(5,6):402~406
- 3 J. L. Emmett, William F. Krupke, J. I. Davis. Laser R&D at the Lawrence Livermore National Laboratory for fusion and isotope separation applications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(6):591~602
- 4 Louis-André Lompre. High power laser chains used for laser isotope separation [C]. *SPIE*, 2000, **3886**:232~236
- 5 Xuesheng Liu, Zhiyong Wang, Qiang Wu *et al.*. 500-W high

average power, high beam quality Nd:YAG solid-state laser with one focusing reflector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 409~411

- 6 Bi Jinzi, Xia Wenbing, Yu Ting *et al.*. Study of linear laser diodes side-pumped Nd:YAG laser with diffusive cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):6~8
- 毕进子,夏文兵,余 婷 等. 大功率线阵激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器特性研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):6~8
- 7 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):461~465
- 冯立春,霍玉晶,何淑芳 等. 激光二极管抽运声光调 Q 高重复频率 532 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):461~465
- 8 S. Lavi, L. A. Levin, J. Liran *et al.*. Efficient oscillator-amplifier dye laser pumped by a frequency-doubled Nd:YAG laser [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(4):525~527
- 9 Chen Risheng, Guo Jinbo, Yang Jichun *et al.*. Experimental study on double-stage dye laser amplifying system pumped by Nd:YAG laser [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(9):650~652
- 陈日升,郭津博,杨基春 等. 倍频固体激光抽运双级染料激光放大系统的实验[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(9):650~652
- 10 F. J. Duarte, Lloyd W. Hillman. *Dye Laser Principles with Applications* [M]. San Diego: Academic Press, Inc., 1990. 273
- 11 Chao Lifan, Shi Wanming. *Numerical Analysis* [M]. Beijing: Beijing Industry Academic Press, 1987. 391
- 曹立凡,史万明. *数值分析*[M]. 北京:北京工业学院出版社, 1987. 391



• 广告 •



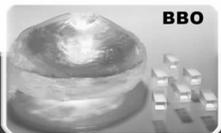
CASTECH[®]

福建福晶科技股份有限公司
FUJIAN CASTECH CRYSTALS, INC.

福建福晶科技股份有限公司 (CASTECH) 简称: 福晶公司。主要从事晶体材料及器件的研发、生产和销售,其产品广泛应用于激光及光通讯领域。公司总部位于福州市区,拥有一幢现代化的8层办公和生产大楼,总面积超过10,000平方米,员工近500人。

经过近二十年的不懈努力,福晶公司成为目前世界上领先的LBO、BBO、Nd:YVO₄以及Nd:YVO₄+KTP胶合晶体的生产商。公司的检测技术和设备也处于业界领先地位,拥有Zygo, Nikon, Prism Master等多台检测仪器,与世界上主要的激光公司建立了良好的检测信息交流平台。公司2001年通过ISO9001质量体系的认证。同时公司多年来致力于品牌的建设,在世界上主要工业国家和地区都设有代理或分支机构。公司产品90%以上出口美、日、德等国家和其他美洲、欧洲、亚洲地区,被国际业界誉为中国牌晶体。其中LBO晶体在中国,美国和日本拥有晶体生长和器件应用专利。

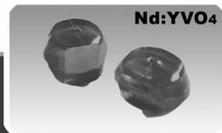
福晶公司将本着“团结,奋进,求实,创新”的企业文化精神,朝着“成为非线性光学晶体和激光晶体的最佳全球供应商”的公司目标而努力。



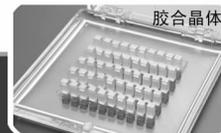
BBO



KTP



Nd:YVO₄



胶合晶体



LiB₃O₅

地址:福建省福州市杨桥西路155号 邮编:350002 电话:86-591-83710533 传真:86-591-83711593 [Http://www.castech.com](http://www.castech.com) E-mail: sales@castech.com