

# 基于大能量拍瓦系统的高精度同步触发技术

张妍妍<sup>1,2</sup> 李国扬<sup>2\*</sup> 范薇<sup>2</sup> 汪小超<sup>2</sup> 姜有恩<sup>2</sup> 石志东<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘要** 提出应用于神光Ⅱ装置中的拍瓦短脉冲与主压缩脉冲高精度同步方案。在该方案中,通过与门技术实现了锁模激光器输出的短脉冲序列与主激光总控触发信号时间的初步锁定,该技术是实现惯性约束核聚变高功率激光装置中长短脉冲精确同步的关键。由总控系统的触发信号作为与门中可编程现场门阵列(FPGA)电路的触发信号,锁模激光器输出的百皮秒激光脉冲通过光电转换放大,并由同步展宽装置进行处理之后,作为FPGA电路的时钟信号,能够实现系统主激光门脉冲触发信号与短脉冲激光之间均方根值为26.3 ps的同步精度,这一技术可有效提升装置中同步系统的稳定性。

**关键词** 激光器; 高功率激光装置; 拍瓦系统; 同步展宽; 与门

**中图分类号** TN248; TN79 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.081405

## High Precision Synchronous Trigger Technology Based On High Power Energy Petawatt System

Zhang Yanyan<sup>1,2</sup> Li Guoyang<sup>2</sup> Fan Wei<sup>2</sup> Wang Xiaochao<sup>2</sup> Jiang Youen<sup>2</sup> Shi Zhidong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** A high precision synchronization method is proposed to realize the application in Shenguang II between petawatt short pulse and main compression pulse. The short pulse from mode-locked laser and main trigger signal is locked by the and gate, which is the key to achieve synchronization between long pulse and short pulse in high-power petawatt system of inertial confinement fusion. In the and gate, the main laser control signal from the front-end system works as the trigger signal of the field programmable gate array (FPGA) circuit. The output picosecond pulse from mode-locked laser is transformed into electrical pulse as well as synchronized and widened, then sent into FPGA as a clock signal. The root mean square of 26.3 ps is obtained between the trigger signal of main laser gate pulses and the short pulse, and the proposed technology can effectively improve the stability of the synchronization system in the device.

**Key words** lasers; high power laser device; petawatt system; synchronization stretching; and gate

**OCIS codes** 140.3425; 140.3295; 250.3140

## 1 引言

惯性约束聚变(ICF)是指依赖物质惯性压缩、加热热核材料使之发生热核反应释放能量的过程<sup>[1]</sup>,其研究的长期目标是实现可控核聚变,为人类提供理想的清洁能源<sup>[2-4]</sup>。我国研制的神光Ⅱ装置,规模上处于目前世界正在运行的ICF装置中第四位,其光束质量及运行输出的指标要求已经和当今国际高水平的大型激光驱动器的光束输出质量水平接近<sup>[5]</sup>。

**收稿日期:** 2016-03-10; **收到修改稿日期:** 2016-04-13; **网络出版日期:** 2016-07-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(61205103)、上海市特种光纤与光接入网重点实验室开放课题(SKLSFO2014-02)

**作者简介:** 张妍妍(1991—),女,硕士研究生,主要从事激光系统中电路方面的研究。E-mail: 312332027@qq.com

**导师简介:** 石志东(1964—),男,博士,研究员,主要从事特种光纤偏振特性方面的研究。E-mail: zdshi@shu.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: ligy@siom.ac.cn

高功率激光技术的发展为 ICF 的研究奠定了基础<sup>[6-8]</sup>,而快点火方案有望大幅降低驱动激光的能量,实现激光聚变,受到了广泛关注。快点火方案中,通过激光-等离子体相互作用,将一束皮秒级的超强拍瓦激光转化成兆电子伏特的电子束,电子束在等离子体中传输百微米后,到达预压缩聚变靶丸的中心区域,加热此区域从而实现点火。成功实现点火要求用于点火的拍瓦短脉冲与用于压缩聚变靶丸的纳秒整形长脉冲具有精确的同步能力<sup>[9]</sup>,而实现纳秒整形压缩长脉冲和点火拍瓦短脉冲精确同步的一个关键环节是对短脉冲序列和主激光总控触发信号时间的初步锁定,并输出一个电信号,作为短脉冲选单的触发信号以及纳秒整形脉冲发生系统门脉冲的触发信号,以此实现长短脉冲的粗同步。选单之后的短脉冲经过光电转换后作为整形脉冲发生器件的触发信号,以实现长短脉冲的精同步。神光 II 运行装置的先进射线光源和主激光的同步采用的原技术方案是直接将锁模激光器的输出进行光电转换以及放大,接入现场可编程门阵列(FPGA)数字电路,同系统总控触发信号做与运算,产生短脉冲选单门脉冲和纳秒整形系统门脉冲的触发信号,但是该技术途径对光信号幅度和宽度比较敏感,系统稳健性差,会出现信号丢失现象,造成短脉冲选单系统和纳秒整形系统门脉冲信号无触发,影响了系统运行成功率。

为了解决上述问题,设计了与门器件中的同步展宽电路,对由锁模激光器输出脉冲序列转换而得到的百皮秒宽度的电脉冲在保证其上升沿同步的情况下对脉冲进行了展宽以及同步处理,实现了具有高稳健性、高精度的短脉冲选单门脉冲和纳秒整形系统门脉冲的触发信号,该信号与锁模激光器输出的脉冲序列之间达到均方值(RMS)为 23 ps 的同步精度,该时序关系的建立为纳秒整形脉冲与皮秒短脉冲的精同步奠定了基础。该技术方案已经应用于神光 II 系列装置和数拍瓦装置当中,通过光触发途径最终实现了长短脉冲之间达到峰谷值(PV)为 20 ps,均方值为 3 ps 的同步精度,并长期可靠运行。

## 2 高功率激光装置前端系统同步技术方案

高功率激光装置的同步精度取决于前端系统各档脉冲之间的精确同步,前端系统结构如图 1 所示,锁模

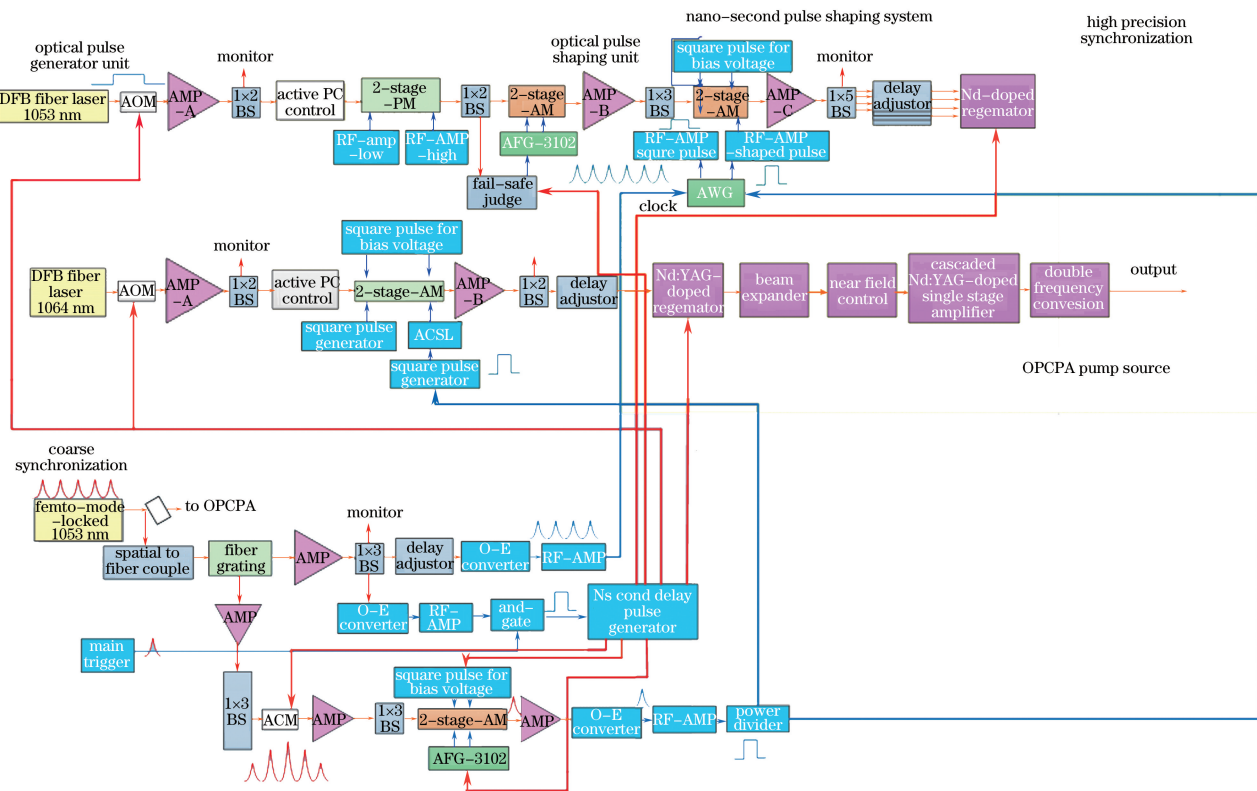


图 1 高功率激光装置前端系统框图

Fig. 1 Block diagram for front-end system of high power laser equipment

激光器输出的激光脉冲序列经由光纤耦合系统和光纤光栅之后分为两路。透射端经由光纤放大器至光纤分束器,其中一部分由光电转换并且电放大之后输入与门作为其时钟信号。与门在时钟上升沿,总控制系统的触发信号为高电平时,同步输出高电平信号,作为锁模激光器短脉冲序列的选单触发信号与纳秒整形脉冲门信号的触发信号,从而实现了纳秒整形脉冲信号与锁模激光器输出的短脉冲信号之间的初步同步。而上述锁模激光器输出的百飞秒级短脉冲信号经过光纤光栅滤波后展宽为百皮秒级,其反射端经光纤放大器、光纤分束器、声光斩波器,输入到强度调制器进行选单,其选单的门脉冲则由与门输出的电脉冲进行控制,选单后的短脉冲信号经由光电转换通过功分器分别作为拍瓦短脉冲前端系统光参量啁啾放大(OPCPA)抽运源(激光波长为 1064 nm)的时间整形单元和主压缩脉冲(激光波长为 1053 nm)的时间整形单元的外触发,从而实现整个高功率激光装置中拍瓦短脉冲与主压缩脉冲之间的精确同步,本文论证的技术方案主要解决了图 1 所示的长短脉冲粗同步这一环节的问题。

该系统原先采用的技术方案是直接将锁模激光器输出的光脉冲序列进行光电转换,然后采用纳秒级运算放大器对信号进行放大,得到一个宽度约为 4 ns,上升沿约为 2 ns 的信号,该信号作为 FPGA 的时钟。此电路有两个缺点:1) 时钟信号的上升沿变缓,较缓的上升沿会带来较大的同步抖动;2) 由于采用了低速放大器对高速信号进行放大,输出信号对注入的信号幅度敏感;如果放大倍数过低,如图 2 所示,图中 a 为百皮秒脉冲序列,b 为经过放大器放大之后得到的脉冲序列,虽然能够保持脉冲的波形,但是达不到后续电路需要的信号幅度。

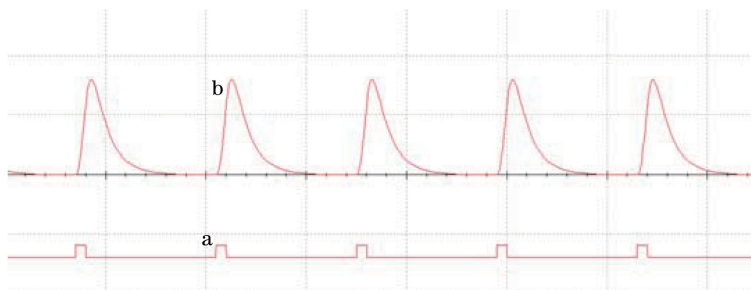


图 2 放大倍数为 20 时放大器输出波形

Fig. 2 Output waveform of amplifier when the amplification factor is 20

如果放大倍数过大,如图 3 所示,图中 a 为百皮秒脉冲序列,c 为经过放大器放大之后得到的脉冲序列,由图 3 可以得出,当放大倍数逐渐变大时信号饱和,导致 FPGA 电路无法正确识别时钟信号的高低电平。

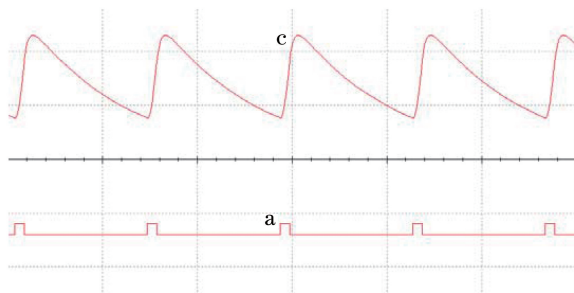


图 3 放大倍数为 100 倍时放大器输出波形

Fig. 3 Output waveform of amplifier when the amplification factor is 100

只有注入信号合适时才能得到稳定的时钟信号。而 FPGA 电路作为实现锁模激光脉冲序列与主控信号时间锁定的关键,在设计时需严格遵守数字电路的时序限制<sup>[10-13]</sup>,当注入 FPGA 电路的电信号不是稳定的满足要求的信号时,电路便会发生没有输出的情况,使整个系统无法正常运行,影响整个高功率激光装置运行的可靠性和运行效率。为了满足 FPGA 电路的时序限制,保障系统正常运行,提出对 FPGA 电路输入的百皮秒宽度的电信号在确保百皮秒脉冲上升沿的基础上进行展宽的技术方案,以此降低对注入电信号的脉宽稳定性要求,提升系统的稳健性。

设计了具有同步展宽装置的与门技术,如图4所示,与门有两路输入信号,一路是来自高功率激光装置总控制系统的触发信号,一路为锁模激光器输出的光信号转换之后的电信号。

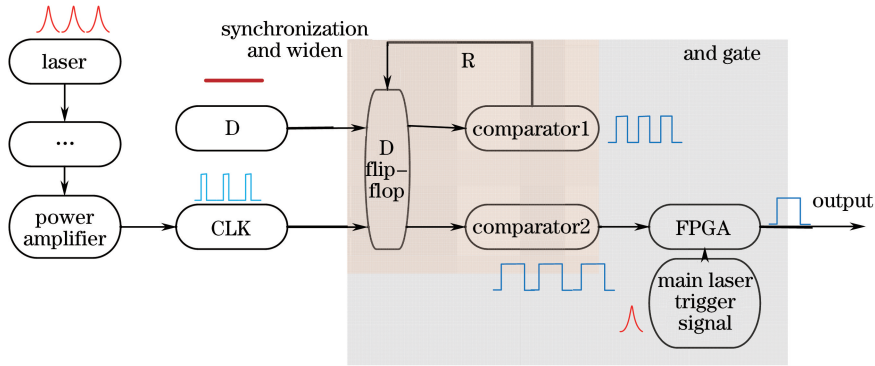


图4 与门结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the and gate

锁模激光器输出的光信号经光电转换之后变为电信号,输出脉冲宽度为百皮秒,输入同步展宽电路展宽至 2.5 ns,并将脉冲上升沿同步精度提高到 0.7 ns,展宽后的电信号输出作为与门中 FPGA 电路的时钟信号;而高功率激光装置总控系统发出的触发信号则作为 FPGA 电路的触发信号。在与门中,FPGA 在时钟上升沿的作用下,总控制系统的触发信号为高电平时便同步输出高电平,从而实现了锁模激光器输出的光序列脉冲和总控触发信号的同步,与门输出的信号便可作为短脉冲选单的触发信号以及主压缩整形纳秒脉冲发生系统和 OPCPA 抽运源系统门脉冲的触发信号,从而实现了长短脉冲的粗同步;长短脉冲的精确同步则是通过选单之后的短脉冲激光经过光电转换之后触发纳秒脉冲的时间整形器件来实现,如图1所示。

### 3 同步展宽电路

为了实现对注入 FPGA 的短脉冲进行展宽,设计了同步展宽电路。其核心思想是对高速百皮秒脉冲信号进行展宽,并且提高百皮秒脉冲上升沿的同步精度,关键器件涉及到高速 D 触发器和慢速比较器,其电路图如图5所示。

#### 1) 触发器的选择

在与门方案中,D 触发器主要解决了在展宽过程中对百皮秒脉冲上升沿的同步。由于注入与门的百皮秒脉冲是频率为 70 MHz 的高速信号,为了保障脉冲信号上升沿的同步精度,需要选用一款对上升沿敏感且高速的 D 触发器进行处理。

经过比较之后选用 ONSEMI 公司的型号为 NBSG53A 的 D 触发器,其具有以下特性:① 工作在触发器模式(DFF)下的典型最大输入时钟频率为 8 GHz,覆盖了系统中所有频率范围,能够满足高速信号(激光脉冲序列频率为 70 MHz)传输的需求;② 支持正射极耦合逻辑电平(PECL)输出,能够直接输出后续的 FPGA 电路所需要的 ECL 电平信号;③ 210 ps 的典型延迟时间远低于片内设计 D 触发器产生的传输延迟时间,在信号输出频率较高时依然可以快速输出脉冲波形。

#### 2) 比较器的选择

同步展宽部分的主要目的是实现对于短脉冲信号的展宽,而比较器可以实现对输入信号的延时,从而可以实现对于触发器输出信号的展宽。为了保障 FPGA 有效工作,其时钟信号宽度应当为 1~2 ns,因此在选择比较器的时候需要选用延时为纳秒级别的慢速比较器。

ANALOG DEVICES 公司型号为 ADCMP600 的比较器,其典型延迟时间为 2~3 ns,能够满足设计需求。输入比较器的电压幅度在 1.6~2.5 V,为了确保比较器正常工作且不易被干扰,将比较器的正向参考电压设计为 2 V。

ADCMP600 有五个引脚,分别为  $V_{EE}$ 、 $V_{CC1}/V_{CC0}$ 、 $V_P$ 、 $V_N$ 、 $Q_{com}$ 。分别对各引脚进行分析:①  $V_{CC1}/V_{CC0}$  和  $V_{EE}$  为电源引脚, $V_{CC1}/V_{CC0} = 3.3$  V、 $V_{EE} = 0$ 。

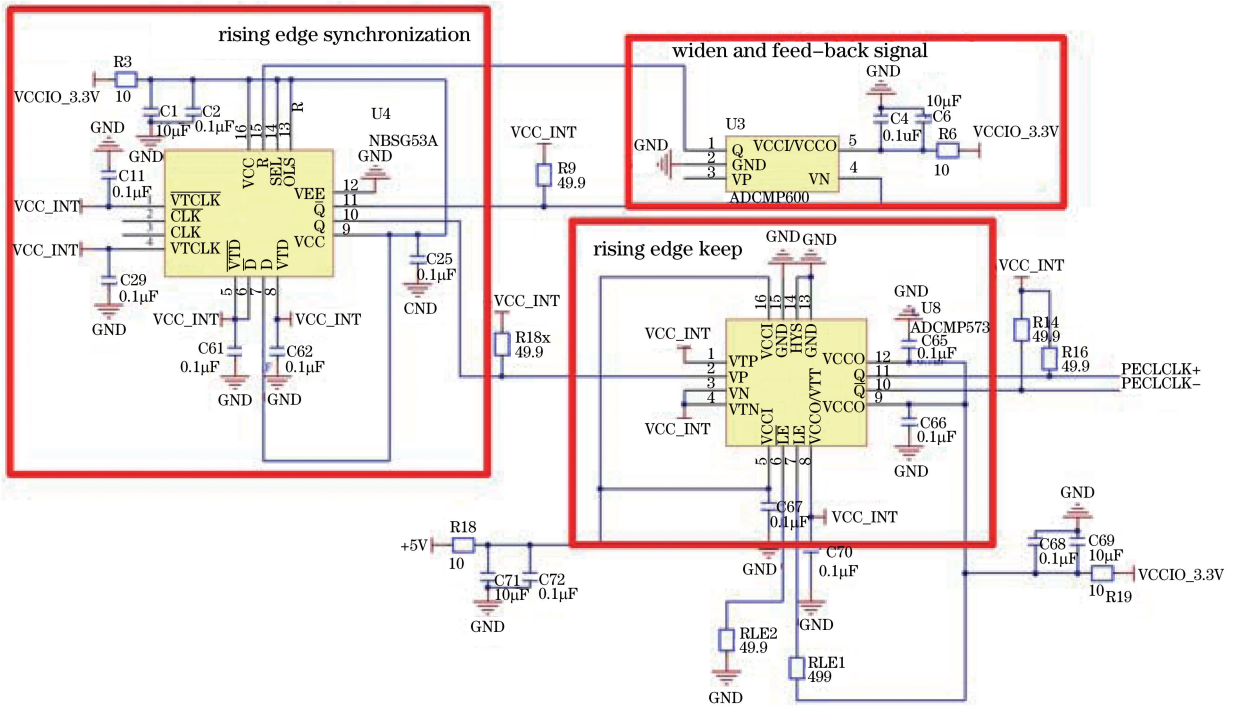


图 5 同步展宽装置电路示意图

Fig. 5 Schematic of synchronization stretching device

②  $V_P$  为同相输入端,如图 6 所示采用稳压芯片 ADR03 先输出 2.5 V 的电压,并由串联电阻分压得到  $V_P$  电压:

$$V_P = \frac{R_8}{R_8 + R_{10}} \cdot V_{OUT}, \tag{1}$$

式中  $V_{OUT}$  为稳压芯片的输出,经计算可得  $V_P = 2\text{ V}$ 。

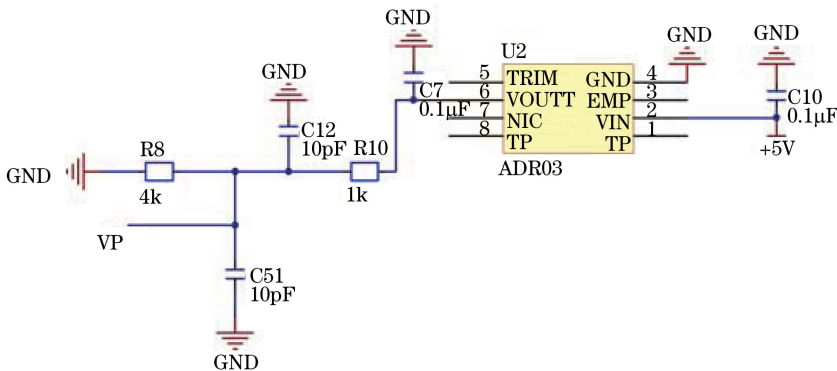


图 6 比较器反相输入端信号

Fig. 6 Signal of inverting input for comparator

③  $V_N$  为反相输入端,接 D 触发器的反相输出端。

④  $Q_{com}$  为比较器输出端,当 D 触发器的输出  $Q = 1$  时,比较器的反相输入端为低电平,此时对于比较器而言有  $V_P > V_N$ ,故  $Q_{com} = 1$ ,由于比较器本身固有的延迟时间(2~3 ns),因此  $Q_{com}$  将滞后于  $Q$ 。

### 3) 反馈清零处理

反馈清零处理主要是为了实现 D 触发器的脉冲输出,将高电平输出按照所需的时间宽度进行清零,获得展宽的脉冲。

锁模激光器输出的短脉冲序列经由光电转换变为电信号,作为 D 触发器的时钟(CLK)。设置 D 触发器的输入为 1 时,在 CLK 的每个上升沿检测输入信号,由于没有清零信号,其输出一直为高电平,这样无法获

得所需的脉冲信号。而选用的比较器输出端为晶体管-晶体管逻辑电平(TTL),能够匹配 D 触发器的清零端的输入电平,将比较器的输出  $Q_{com}$  作为 D 触发器的反馈清零信号接回其清零端 R,便可实现了对触发器的清零,触发器数据被清零后继续等待下一个时钟上升沿的到来进而输出高电平,这样便可以获得脉冲信号。由于清零信号 R 较 CLK 有着 2~3 ns 的延迟,所以 D 触发器将输出脉宽为 2~3 ns 的脉冲信号,其真值表如表 1 所示,R 与时钟信号的时序波形如图 7 所示( $Q_1 = \bar{Q}$ )。

表 1 同步展宽装置的真值表

Table 1 True chart of synchronization stretching device

	D	$f_{CLK}$	R	Q		$Q_{next}$
	1	↑	0	X	X	1
	0	↑	0	X	X	0
	1	X	1	X	X	0
	0	X	1	X	X	0
(illegal)	X	X	0	1	0	1
	X	X	0	0	1	0

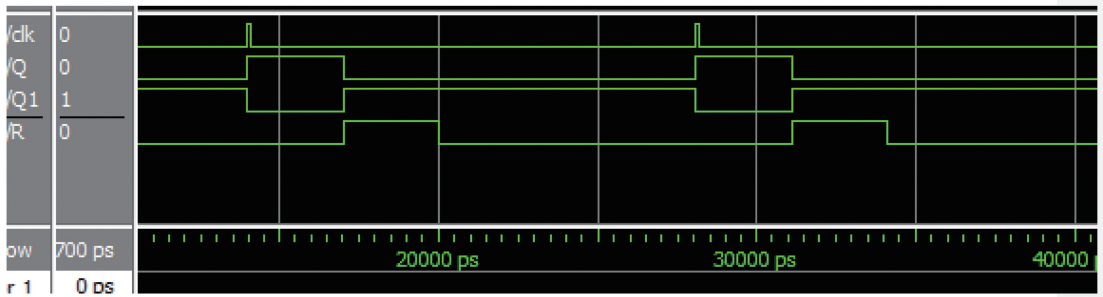


图 7 R 与时钟信号的时序波形

Fig. 7 Time sequential waveform of R and clock signal

其中 Q 作为触发器的输出,电平模式为 PECL 电平, Q 接入一高速比较器可转换为 PECLCLK+ 和 PECLCLK- 并接入 FPGA 电路,在 FPGA 电路中实现与主激光触发脉冲的初步同步。

### 4 实验结果

为了进行技术方案验证,对神光 II 装置中激光短脉冲的输出信号和与门的输出脉冲进行了同步精度测量。选用的示波器型号为 KEYSIGHT 公司 DSO-S 204A 示波器,其采样带宽为 2 GHz,采样率为 20 GS/s。图 8 为百皮秒脉宽的激光进行光电转换之后得到的波形图,脉冲幅值为 400 mV。

将锁模激光器输出的另一部分光经过光电转换,其电脉冲经过展宽后,测试展宽的电脉冲信号与锁模激光器输出光信号的同步精度,输出脉冲如图 9 所示,短脉冲序列经同步展宽后脉冲宽度达到 2.5 ns,上升沿

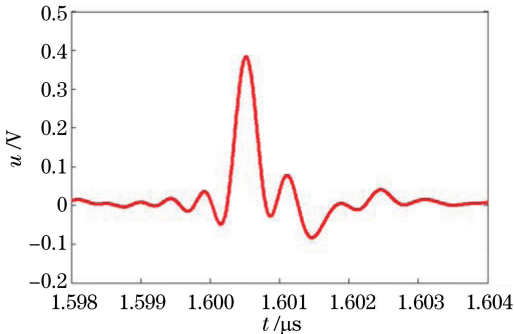


图 8 锁模激光器配套设备输出波形

Fig. 8 Output waveform from support equipment of mode-locked laser

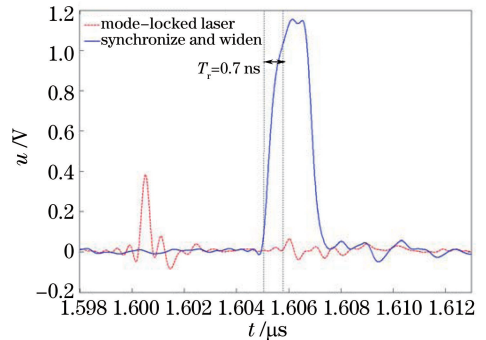


图 9 同步展宽部分信号输出波形

Fig. 9 Output waveform of synchronization stretching part signal

为 0.7 ns, 此时与门能够长期稳定输出, 说明这一电脉冲宽度能够满足 FPGA 数字电路对于维持电路稳定的时序要求。

接着用同样的方法对与门的输出进行测量, 得到如图 10 所示信号波形, 其中黄色的线为与门输出波形, 绿色的线为锁模激光器经光电转换之后的输出波形。测量过程中, 测量两个脉冲峰顶之间的时间间隔变化, 并统计 1 h 的输出结果, 测得与门输出脉冲与锁模激光器脉冲之间抖动的均方值为 26.3 ps。与门输出的脉冲可以作为高功率激光装置短脉冲选单系统门脉冲和纳秒整形系统门脉冲的触发信号。该器件已经应用于神光 II 系列装置中, 有效提升了系统的运行可靠性, 已经运行 6 个月, 未出现无触发故障。同时该同步精度有望继续减小纳秒整形系统门信号的宽度, 从而减小系统中背景光背底, 进一步提升系统光信号信噪比。利用选单之后的短脉冲信号去触发纳秒系统整形单元, 获得了长短脉冲之间达到峰谷值 20 ps, 均方值 3 ps 的同步精度。



图 10 与门输出波形

Fig. 10 Output waveform of the and gate

## 5 结 论

分析了高功率激光装置中影响长短脉冲精确同步和长期运行可靠性的因素, 针对影响系统触发可靠性问题, 在与门中增加了同步展宽功能, 并严格以短脉冲序列的时钟信号为时间基准, 实现了与门输出和短脉冲激光的时序锁定, 拓宽了与门对注入时钟信号的冗余度, 提升了系统的稳健性, 有效地保证了与门的可靠稳定输出。同时实现了系统主触发脉冲信号与锁模激光器输出短脉冲序列之间小于 200 ps 的抖动(1 h 实测峰谷值为 156 ps, 均方值为 26.3 ps)。该器件已经应用于神光 II 系列装置及数拍瓦装置中, 运行近六个月时间, 未出现触发故障。与此同时, 利用选单后的短脉冲触发纳秒系统整形器件, 实现了长短脉冲之间峰谷值为 20 ps, 均方值为 3 ps 的高精度同步。

## 参 考 文 献

- 1 Nuckolls J H, Wood L, Thiessen A, *et al.* Laser compression mater to super-hihj densities: Thermonuclear (CTR) application[J]. *Nature*, 1972, 239(15): 129-142.
- 2 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progresses and development of fiber laser combining technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 163-166.  
程 勇, 刘 洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 163-166.
- 3 Peng Hansheng. High power ultrashort pulse laser and novel physical phenomena[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(4): 386-391.  
彭翰生. 高功率超短脉冲激光与新奇物理现象[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(4): 386-391.
- 4 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(7): 865-872.  
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. *中国激光*, 2006, 33(7): 865-872.
- 5 Zhu Jianqiang. SG-II high power laser equipment for experiment[J]. *Chinese Academy of Science*, 2005, 1(1): 42-45.

- 朱健强. 神光高功率激光实验装置研制[J]. 中国科学院院刊, 2005, 1(1): 42-45.
- 6 Mu Jie, Wang Xiao, Jing Feng, *et al.* Effect of wavefront distortion on coherent beam combination in high-power laser facilities[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602010.  
母杰, 王道, 景峰, 等. 高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602010.
- 7 Li Yangshuai, Zhu Jianqiang, Pang Xiangyang, *et al.* Numerical simulation of debris removal trajectories on transport mirrors in high power laser system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102010.  
李养帅, 朱健强, 庞向阳, 等. 高功率激光装置中传输镜表面颗粒物去除轨迹的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102010.
- 8 Wang Hui, Li Qin, Xiong Zhao, *et al.* Assembly error analysis for large aperture transport mirror in high power solid-state laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922004.  
王辉, 黎沁, 熊召, 等. 高功率固体激光器的大口径反射镜装配误差分析[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922004.
- 9 Miyanaka M, Azechi H, Tanaka K A, *et al.* Firex petewatt laser development for fast ignition research at Ile, Osaka[C]. Proc of IFSA, 2003: 507-511.
- 10 Song Hongdong, Hu Chen, Yang Jun. Design of D-type flip flop for keeping away metastability[J]. Chines Journal of Electron Devices, 2003, 26(1): 99-103.  
宋红东, 胡晨, 杨军. 一种用于高可靠性同步器电路的D触发器设计[J]. 电子器件, 2003, 26(1): 99-103.
- 11 Liu Peizhi. Digital circuit design and digital systems[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Publishing House, 2005.  
刘培植. 数字电路设计与数字系统[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- 12 Yin Guoli, Lin Zhenghui, Liu Yansong. The establishment and verification algorithm of timing constraints in timing analysis of integrated circuits[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(6): 809-811.  
尹国丽, 林争辉, 刘彦松. 时序分析中时序约束条件的确立和检验算法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(6): 809-811.
- 13 Zhou Pizhang, Guo Liangfu, Chen Dehuai, *et al.* Overview of main amplifier power conditioning for the laser fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(4): 346-351.  
周丕璋, 郭良福, 陈德怀, 等. 激光聚变主放大器能源系统述评[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(4): 346-351.