

# 基于时间数字转换的高精度激光脉冲同步测量技术

张吉生<sup>1,2</sup>, 汪小超<sup>2\*</sup>, 李国扬<sup>2</sup>, 范薇<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 200072;

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

**摘要** 提出应用于激光脉冲高精度时间同步测量的技术方案。利用时间数字转换技术,精确测量激光脉冲相对延时,测量精度可小于10 ps(峰谷值)。为满足测量电路对脉冲宽度的要求,设计针对短脉冲激光的电脉冲展宽模块,可以将百皮秒量级的电脉冲展宽至纳秒量级,引入时间抖动的均方根值小于2 ps。该测量方案实现了实时高精度时间同步测量,可以作为时间同步反馈补偿的实时监测使用。

**关键词** 激光器; 高功率激光驱动器; 光参量啁啾脉冲放大; 时间同步; 同步测量

**中图分类号** TN248; TN79 **文献标识码** A

**doi**: 10.3788/LOP54.081401

## High Precision Laser Pulse Synchronous Measurement Technology Based on Time to Digital Conversion

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

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

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

**Abstract** A scheme for high precision time synchronization measurement of laser pulses is presented. The time to digital conversion technology is used to measure the relative time delay of laser pulses accurately, and the measurement accuracy is less than 10 ps (the peak-valley value). In order to meet the requirements of the input pulse width of the measuring circuit, an electric pulse broadening module is designed for short laser pulse. An electric pulse signal can be broaden from hundred picoseconds to nanoseconds, with the root mean square of the additional jitter less than 2 ps. This scheme can realize the real-time high precision time synchronization measurement, and can be used for real-time monitoring of a time synchronization feedback compensation system.

**Key words** lasers; high power laser driver; optical parametric chirped pulse amplification; time synchronization; synchronous measurement

**OCIS codes** 140.3425; 140.3295; 250.3140

## 1 引言

在光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)过程中,需要信号光和抽运光具有高精度同步<sup>[1-3]</sup>;在高功率激光装置中,也要求长短脉冲具有精确同步功能<sup>[4]</sup>。锁模激光器输出的超短脉冲与时间整形系统输出的纳秒激光脉冲之间的相对时间稳定性对激光系统的输出特性有重要的影响<sup>[5-7]</sup>。超短脉冲堆积<sup>[8]</sup>、硅光电导开关光电转换<sup>[1]</sup>、高精度时间同步触发<sup>[9-10]</sup>等多种技术方案用于提升长短脉冲的同步精度,长短脉冲同步精度的均方根(RMS)值可以小于4 ps<sup>[11]</sup>。但是当锁模激光器未加腔长控制时,温度变化导致的锁模激光器重复频率慢漂

收稿日期: 2017-02-14; 收到修改稿日期: 2017-03-20

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: 张吉生(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光系统中电路方面的研究。E-mail: 931930596@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: smilexc@siom.ac.cn

及电子元器件的热效应引起的时间慢漂限制了同步精度的长期稳定性,激光脉冲的相对时间稳定性的进一步提升依赖于高速的时间波形测量设备。

皮秒量级的时间测量可以由高速示波器或时间数字转换芯片(TDC)实现。高速示波器的成本昂贵、数据读取不便、响应慢,不利于实时反馈控制;基于 TDC 的时间测量技术广泛应用于物理实验、传感器等系统中<sup>[12-16]</sup>,测量方法有模拟和数字两大类,随着半导体技术和电子自动化技术(EDA)不断发展,数字测量方法在测量精度和范围上有了很大提高。其中,最具有代表性的 ACAM 公司 TDC 芯片,采用延时线内插技术,广泛应用于激光测距、流量计等传感器中。根据手册,该芯片的 M 模式测量延时统计数据得到的峰峰值小于 70 ps,时间分辨率达到 0.885 ps。基于此,设计高精度测量系统,用于精确测量长短激光脉冲相对延时变化。该测量芯片对脉宽有一定要求,故需要对短脉冲进行展宽。目前大多数展宽电路都是基于高速 Q 触发器,引入时间抖动较大<sup>[17]</sup>,本文基于高速比较器设计了一种新的低抖动展宽方案。实现了高精度激光脉冲同步测量,数据处理后峰谷(PV)值精度达到 10 ps,解决了 OPCPA 系统以及高功率激光装置中高稳定高精度同步控制技术中的关键环节,为下一步高精度同步闭环控制技术奠定了技术基础。

## 2 基本原理

以高功率激光驱动器前端系统为例,图 1 为一种常见的 OPCPA 长短激光脉冲同步系统结构<sup>[17]</sup>,作为 OPCPA 信号光种子源的飞秒激光器分束取样后由选单模块选出一个脉冲产生触发信号,触发纳秒整形系统的信号发生器产生 OPCPA 的抽运光脉冲。抽运光种子源经固体放大和倍频后作为 OPCPA 的抽运光脉冲,抽运光脉冲与信号光脉冲在参量放大晶体处重合实现参量放大。在 OPCPA 系统中,为了实现信号光的稳定放大,需要保持信号光与抽运光相对时间稳定——同步精度要求为小于 10 ps (RMS)<sup>[8]</sup>。

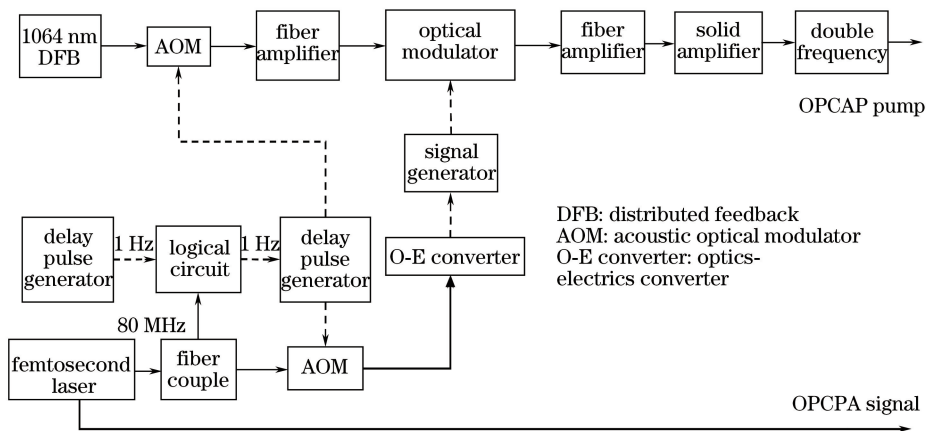


图 1 前端同步系统图

Fig. 1 Diagram of front-end synchronization system

未附带腔长稳定功能的锁模激光器,其腔长受温度影响,从而导致输出序列周期发生变化<sup>[18-19]</sup>。

$$T_{\text{rep}} = \frac{2L}{c}, \quad (1)$$

$$\Delta L = \alpha L \Delta T_{\text{temp}}. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可推出:

$$\Delta T_{\text{rep}} = \frac{2}{c} \alpha L \Delta T_{\text{temp}}, \quad (3)$$

式中  $T_{\text{rep}}$  为锁模激光器输出序列周期,  $c$  是光速,  $L$  是有效腔长,  $\Delta L$  是腔长变化量,  $\alpha$  是膨胀系数,  $\Delta T_{\text{temp}}$  是温度变化量。由(3)式可知,激光器输出序列周期变化量与温度变化量成正比。

根据图 1,在锁模激光器不能接受外时钟实现腔长锁定的情况下,为了使抽运光和信号光同步,触发信号是由锁模激光器输出序列选出。自触发信号的选出时刻至 OPCPA 抽运光的产生时刻的时间在微秒至几百微秒量级不等,这主要由纳秒整形信号的产生方式决定。要使信号光和抽运光在时间和空间上重合,系统

必须在信号光到来之前触发产生抽运光。因此,信号光与触发信号之间相隔多个序列周期,两者相对延时变化量为

$$\Delta D = N \Delta T_{\text{rep}}, \quad (4)$$

式中  $N$  是信号光与抽运光相隔序列周期个数。根据(3)式和(4)式可知,相对延时与温度变化量成正比,且扩大  $N$  倍,变化增大。在实验过程中测量发现,几个小时内,信号光与抽运光相对漂移可达 200 ps,这超出了 OPCPA 系统的要求。因此,必须检测相对慢漂,再进行光延时调节,使其保持同步。其中,精确检测两个脉冲相对延时是确保信号光和抽运光实时精确同步的关键。所提出的延时测量方案结构如图 2 所示。

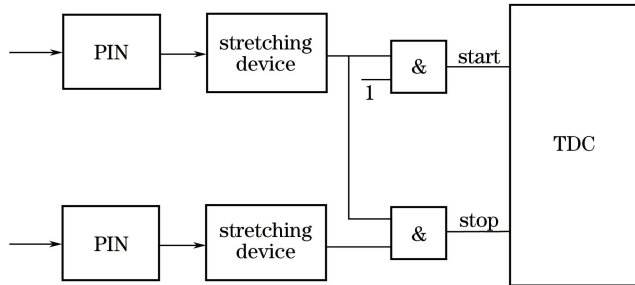


图 2 延时测量系统原理框图

Fig. 2 Diagram of time delay measurement system

由图 2 可知,测量系统主要由两大模块构成,短脉冲展宽模块和延时测量模块。经 PIN 二极管转换,激光脉冲转换成短电脉冲。为满足后续电路对输入脉宽的要求,设计了基于 ADI 公司的高速比较器 (ADCMP572) 的短脉冲展宽装置由图 1 可知,输入为同步的 1 Hz 和 80 MHz 信号,进入图 2 的 ADI 公司的高速与门 (NBSG86A) 变成 1 Hz,两个同步的 1 Hz 信号构成延时测量模块起始和结束标志。延时测量模块采用 ACAM 公司的时间数字转换芯片 (TDC-GPX),标称测量精度优于 70 ps(峰峰值)。

### 3 延时测量设计

#### 3.1 低抖动展宽

如图 2 所示,要进行延时测量,需要对短脉冲进行展宽。传统展宽是通过光脉冲堆积,需要使用大量分束器,同时系统中存在非线性等因素的影响,对测量光的功率有限制<sup>[5]</sup>。电学展宽大都基于高速 Q 触发器,引入时间抖动较大<sup>[17]</sup>。本文设计了一种新的低抖动展宽电路,该低抖动脉冲展宽是基于高速比较器输出保持功能实现的,如图 3 所示。该比较器输出保持控制端口为高电平时,输出随输入的变化而变化;为低电平时,保持输出,不随输入而变化。电路展宽器主要由三个部分组成:高速比较器、高速与门、延时器。如图 3(a)所示,通过高速与门和延时器构成的反馈电路实现脉冲展宽。最小输入脉宽和展宽输出脉宽分别为

$$t_{\text{inwidth}} = t_{\text{and}} + t_{\text{length}} + t_{\text{adcmp}}, \quad (5)$$

$$t_{\text{outwidth}} = t_{\text{delay}} + t_{\text{and}} + t_{\text{length}} + t_{\text{adcmp}}, \quad (6)$$

式中  $t_{\text{and}}$  为与门固有延时,  $t_{\text{length}}$  为走线延时,  $t_{\text{adcmp}}$  为比较器响应时间,  $t_{\text{delay}}$  为延时器延时量。最小输入脉宽主要受制于  $t_{\text{and}}$ ,展宽输出脉宽主要由  $t_{\text{delay}}$  决定。为了满足短脉冲输入,选择低延时高速与门芯片。

展宽输出信号上升沿与窄脉宽输入信号上升沿同步,且抖动低。脉冲展宽过程如图 3(b)所示,在短脉

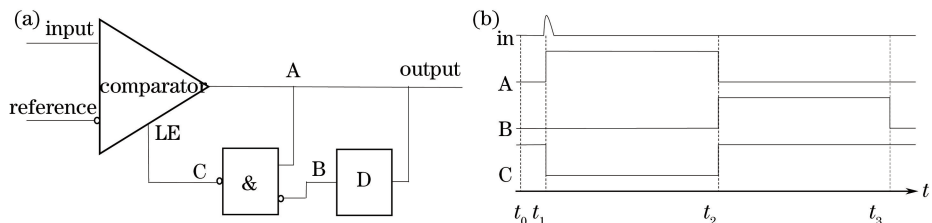


图 3 脉冲展宽。(a)原理图;(b)时序图

Fig. 3 Pulse broadening. (a) Schematic; (b) sequence chart

冲 in 到来之前,输出 A 为低电平,保持端口 C 为高,输出 A 随输入变化。当短脉冲 in 上升沿到来,输出 A 为高电平,由于延时器延时,此时延时器输出 B 为低电平。经过与门,控制端口 C 为低,保持输出。当输出 A 延时一段时间,延时器输出 B 为高,与门输出 C 为低,输出 A 随输入变化,则输出 A 变为低。由此可知,主要是延时器延时量决定展宽输出脉宽,但输出占空比不能超过 50%。这里,选择安森美半导体的硅延时器(MCP100EP195B),延时范围 2.4~12.4 ns,10 ps 步进可调,完全能够满足后续电路要求。

### 3.2 延时测量

图 4 为图 2 的测量延时模块。A 为 1Hz 抽运光信号光电转换且展宽后的信号,B 为锁模激光器输出序列光电转换且展宽后的信号。TDC-GPX 有两个输入端口,start 信号启动测量,stop 信号结束测量,结果为 start 信号与 stop 信号之间的延时。前端电路性能直接决定测量精度,为了减小 start 信号与 stop 信号之间抖动,需要简化电路,提高输入信号上升沿。

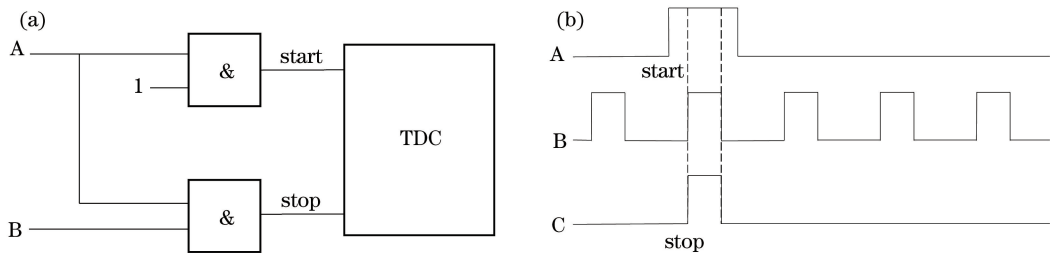


图 4 延时测量开始结束信号。(a)原理图;(b)时序图

Fig. 4 Start and stop signals of time delay measurement. (a) Schematic; (b) sequence chart

选择高速与门芯片,不仅可以当作高速与门使用,还可以构成高速选择器。起到三个作用:1) 从锁模序列中选出一个信号作为 stop 信号;2) 电平转换;3) 提高输入信号上升沿。这样,前端电信号均是差分信号,快上升沿,较低抖动。为了保证 stop 信号宽度能够满足测量所需的最小脉宽 1.5 ns,start 信号应尽量宽。

## 4 实验结果

根据(6)式,最小输入脉宽主要取决于高速与门固有延时。选用与门芯片,测量发现,最小输入脉宽约为 220 ps。在实际应用中可以通过选择光电转换器件的带宽,使其能够将更短的光脉冲经光电转换得到较宽的电脉冲。基于高速比较器的脉冲展宽电路输出结果如图 5(a)所示,比较器输出的电流型逻辑(CML)电平经隔直进行测量。输入脉冲为超短脉冲,经光电转换获得的脉冲宽度为 220 ps 的电脉冲信号,经展宽后脉宽为 14.49 ns。脉冲宽度由百皮秒量级展宽到纳秒量级,满足了后续测量电路对脉冲宽度的影响。

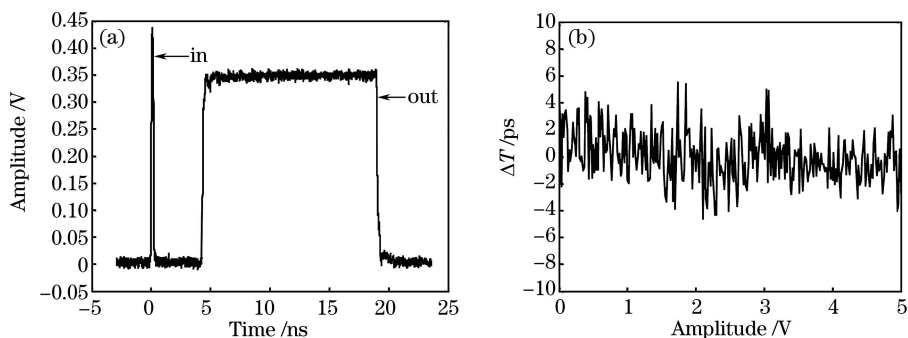


图 5 脉冲展宽。(a)脉冲展宽结果;(b)延时测量

Fig. 5 Pulse broadening. (a) Result of pulse broadening; (b) time delay measurement

采用高速示波器(带宽为 30 GHz,DSO93004L,安捷伦公司,美国),测量展宽前与展宽后之间延时归一化结果如图 5(b)所示。测量时间为 5 h,计算脉冲展宽电路输入信号与输出信号之间的时间抖动为 10 ps (PV),2 ps(RMS)。对示波器双通道相对时间测量精度进行测试,发现其固有抖动为 5 ps(PV)。说明时间展宽电路引入的时间抖动已经接近示波器测量的极限值,实际上时间抖动要低于测量值。

图 6 是延时模块测得延时归一化数据。图 6(a) 是每隔 5 min 测得的多组数据, 每组 25 个数据。图 6(b) 是每一组数据进行取平均得到的结果。

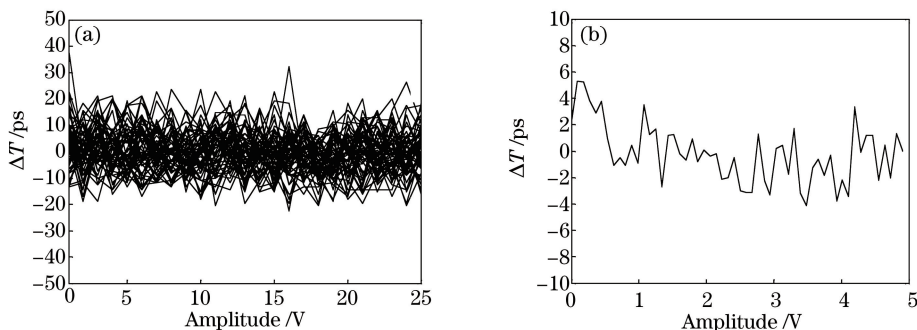


图 6 延时测量。(a) 每一组测量 25 个数据; (b) 5 h 测量结果

Fig. 6 Time delay measurement. (a) 25 data are measured in each group; (b) measured results of 5 h

由图 6(a) 可知, 测量信号延时峰峰值小于 70 ps, 实现了分辨率 0.885 ps。在某些点上数据波动较大, 主要是因为 TDC 对温度敏感, 为改善温度变化带来的测量误差, 对内部电路供电电压进行实时调节。为了减小误差, 每一组数据取平均, 长时间测量结果如图 6(b) 所示。由于电路上电初始, 温度、电压不稳定, 导致数据波动大, 几分钟后相对稳定, 输出波动得到改善。对比图 6(a) 与图 6(b) 可以看出, 波动明显减少, 稳定后峰峰值控制在 10 ps 内, 能够满足要求。为了进一步改善测量结果, 可以采用增加散热系统, 使用纹波系数更小电源, 优化电路板布局, 减小温度变化、电压不稳定、电磁干扰带来误差等。

## 5 结 论

以高功率激光驱动器前端中 OPCPA 同步系统为例, 分析出信号光与抽运光相对慢漂产生的原因是锁模激光器腔长受温度影响, 导致输出序列周期产生慢漂。通过实验测得相对漂移达到 200 ps, 针对该温漂, 提出时间同步测量技术。为了满足测量电路的要求, 设计了一种低抖动脉冲展宽电路, 输出脉宽 2.4~14.49 ns 可调, 引入时间抖动小于 2 ps (RMS)。设计了基于时间数字转换芯片延时测量电路, 通过长时间测量, 得到峰峰值小于 10 ps (PV), 满足系统要求, 相比示波器更合适。该同步测量方案成本低、时间精度高、反馈速度快, 可以为电控延时器件提供实时延时变化反馈信号, 为下一步开展激光脉冲相对延时变化的实时反馈补偿技术研究奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] Zeng Xiaoming, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua, *et al.* Effects of synchronization time jitter in optical parametric chirped pulse amplification on gain stability[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(4): 529-532.  
曾小名, 魏晓峰, 朱启华, 等. 光参量啁啾脉冲放大中时间同步抖动对增益稳定性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(4): 529-532.
- [2] Wang Xiangfeng, Dai Yaping, Wang Tao, *et al.* Optimization design of 1 J level optical parametric chirped-pulse amplification system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0702009.  
王翔峰, 戴亚平, 王 韬, 等. 焦耳级光参量啁啾脉冲放大系统的优化设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0702009.
- [3] Qu Yexi, Pan Xue, Huang Wenfa, *et al.* 1030 nm picosecond level optical parametric chirped pulse amplification pump [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0802003.  
瞿叶玺, 潘 雪, 黄文发, 等. 1030 nm 皮秒级光参量啁啾脉冲放大抽运源[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802003.
- [4] Wang Jiangfeng, Zhu Haidong, Li Xuechun, *et al.* Time-synchronization technique between shaped optical pulse and probe optical pulse[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(1): 31-34.  
王江峰, 朱海东, 李学春, 等. 整形激光脉冲与激光探针同步技术[J]. *中国激光*, 2008, 35(1): 31-34.
- [5] Ma Zairu, Feng Guoying, Chen Jianguo, *et al.* Influences of synchronization time jitter in OPCPA system on contrast ratio of femto-second pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(1): 34-38.  
马再如, 冯国英, 陈建国, 等. 光学参量啁啾脉冲放大中时间抖动对飞秒脉冲对比度的影响[J]. *强激光与粒子束*,

- 2009, 21(1): 34-38.
- [6] Li Xianhua, Zeng Shuguang, Zhang Bin, *et al.* Influence of chirp match and synchronization jitter on optical parametric chirped pulse amplification[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(12): 2824-2828.  
李现华, 曾曙光, 张彬, 等. 啁啾匹配和同步抖动对光参量啁啾脉冲放大的影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2824-2828.
- [7] Deng Qinghua, Peng Hansheng, Li Mingzhong, *et al.* Chirped pulse spectrum shaping using the over saturating course in optical parametric chirped pulse amplification[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(11): 1527-1531.  
邓青华, 彭翰生, 李明中, 等. 光参量啁啾脉冲过饱和放大实现超短脉冲的频谱整形[J]. 中国激光, 2006, 33(11): 1527-1531.
- [8] Marcinte J R, Bittle W A, Zuegel J D. Subpicosecond jitter from a precision optical triggering and timing system without active stabilization[C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2006: JWB28.
- [9] Gao Yanxia, Zhao Gaiqing, Xu Shixiang. A novel all-optical accurate synchronization for broadband optical parametric chirped pulse amplification[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1481-1484.  
高艳霞, 赵改清, 徐世祥. 用于宽带啁啾脉冲光参量放大系统精确同步的新方法[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1481-1484.
- [10] Zhai Hui, Xu Shixiang, Xu Zhixiong, *et al.* Generation of background-free pulses at 1064 nm accurately synchronized with femtosecond laser pulses at 794 nm[J]. Acta Physic Sinica, 2007, 56(5): 2821-2827.  
翟惠, 徐世祥, 许智雄, 等. 与 794 nm 飞秒激光精确同步的无直流背底的 1064 nm 脉冲光的产生[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2821-2827.
- [11] Gao Yunkai, Jiang Yuntao, Li Xuechun. A new scheme of time-synchronization between long optical pulse and short optical pulse[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(7): 977-980.  
高云凯, 蒋运涛, 李学春. 一种新的长短光脉冲同步方案[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 977-980.
- [12] Zhou Zhaihe, Wang Liqun, Shen Chao, *et al.* Design of magnetostrictive high-precision time measurement system based on CPLD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1): 103-108.  
周翟和, 汪丽群, 沈超, 等. 基于 CPLD 的磁致伸缩高精度时间测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 103-108.
- [13] Yang Bing, Cui Yongjun. Design of high precision ultrasonic flowmeter based on TDC-GP2[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39(2): 447-452.  
杨兵, 崔永俊. 基于 TDC-GP2 的高精度超声波流量计的设计[J]. 电子器件, 2016, 39(2): 447-452.
- [14] Levchanovskiy F V, Murashkevich S M. De-Li-DAQ-2D-a new data acquisition system for position-sensitive neutron detectors with delay-line readout[J]. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016, 13(5): 591-594.
- [15] Wu Kaixuan, Mao Youming, Dai Qin, *et al.* Study of digital filter in the pulse distance measuring system based on TDC and FPGA[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2016, 35(1): 31-34.  
吴凯旋, 毛有明, 岱钦, 等. TDC 与 FPGA 脉冲激光测距系统的数字除噪方法研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2016, 35(1): 31-34.
- [16] Du Niantong, Zhou Bin. A relative frequency difference detection method based on TDC[J]. Transducer and Microsystem Technologies 2016, 35(2): 140-146.  
杜念通, 周斌. 一种基于 TDC 的相对频差测量方法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(2): 140-146.
- [17] Zhang Yanyan, Li Guoyang, Fan Wei, *et al.* High precision synchronous trigger technology based on high power energy petawatt system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 081405.  
张妍妍, 李国杨, 范薇, 等. 基于大能量拍瓦系统的高精度同步触发技术[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 081405.
- [18] Liu Xingyang, Zhou Dawei, Dai Shaoyang, *et al.* Precise control of fiber-based femtosecond optical frequency comb[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(5): 543-548.  
刘星洋, 周大伟, 戴少阳, 等. 光纤飞秒光梳频率精密控制的研究[J]. 量子电子学报, 2013, 30(5): 543-548.
- [19] Han Bing, Lin Yurong, Deng Zhenglong, *et al.* Overview on modeling and compensation of FOG temperature drift[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(2): 218-223.  
韩冰, 林玉荣, 邓正隆. 光纤陀螺温度漂移误差的建模与补偿综述[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(2): 218-223.