

## 基于光电-电光变换的高功率激光装置时标激光系统

张波<sup>1,2</sup>, 胡东霞<sup>1\*</sup>, 彭志涛<sup>1</sup>, 张锐<sup>1</sup>, 周丹丹<sup>1</sup>, 党钊<sup>1</sup>, 赵军普<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;  
2. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088)

**摘要:** 提出了一种时标基准信号红外长程传输结合近程光电-电光转换的时标激光系统设计方案, 该方案首先使用红外单模光纤完成时间基准信号的长程传输, 然后使用光电探测器将红外时标基准信号转换为电信号驱动蓝光直调 LD 激光器, 最终获得输出波长为 450 nm, 输出功率 47 mW, 脉冲宽度为 120 ps 的时标光信号。实验结果表明, 所提方案可为激光驱动器提供窄脉宽, 可长程传输的时标光信号用于甚多束紫外激光脉冲同步同发监测, 同步监测精度可达 10 ps。文中技术方案规避了敏感的固体激光放大与倍频过程, 提高了时标光脉冲波形的稳定度与同步监测系统的可靠性。

**关键词:** 光电-电光转换; 同步监测; 直接调制; LD 激光器

**中图分类号:** TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230234

### 0 引言

高功率激光装置中为实现靶丸均匀压缩并抑制聚变过程中的流体不稳定性, 要求打靶的三倍频激光脉冲具有极高的时间同步精度。脉冲同步的初始测量与调节通常在一轮实验开始前通过在靶点架设的测量设备完成<sup>[1-6]</sup>, 实验开始后靶点处的同步测量设备不能长期占用靶点位置对脉冲同步进行随发次监测。然而, 由于各种扰动因素的存在(光路准直、器件更换等), 实验中各光束的同步状态可能会发生变化。为发现和跟踪光束同步在实验中的变化, 需要另外建立光束同步状态监测手段, 获得各光束的实时同步差, 便于实验数据分析和驱动器状态监控。

物理实验开始后的光束同步监测通常基于三倍频取样光的测量波形进行。在靶场光束取样测量系统不做变动的情况下, 各光束取样光同步状态变化与主激光的同步状态变化完全同步, 如果将时标信号输入波形测量示波器建立固定的时间基准, 通过比较测量波形与时间基准的同步差即可获得各光束的同步

状态变化。

目前, 国内外大型激光装置上输入测量示波器的时标信号均为电同步触发信号, 该方案建设成本低, 使用维护方便, 但电同步脉冲与主激光同步晃动大(PV 值 150 ps), 在强电磁环境下会受干扰, 无法满足精密物理实验中的同步监测需求。为解决这一问题, 我国的高功率激光装置在测量光束较少时采用红外时标脉冲长程传输, 在示波器附近进行光电变换形成电时标信号输入示波器的方案。这一方案监测精度高, 抗干扰能力强, 但时标信号需单独占用一个示波器通道, 增加了额外的系统建设成本。

当时标信号与激光脉冲能够共用激光脉冲测量探测器时, 时标信号既能实现高精度抗干扰同步监测, 也不额外占用测量通道, 但是靶场激光脉冲波形测量所用的探测器其响应波段为蓝紫光波段, 无法识别可通过光纤长程传输的红外时标脉冲。若采用红外固体激光倍频后产生时标脉冲的方法, 又面临为保证输出能量和波形的稳定性, 尤其是为了保证倍频过程的稳定(倍频效率对晶体温度敏感), 系统构造复

收稿日期: 2023-04-18; 修订日期: 2023-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61605185, 62075201)

作者简介: 张波, 男, 副研究员, 博士生, 主要从事高功率激光参数测量技术方面的研究。

导师简介: 彭志涛, 男, 研究员, 博士, 主要从事高功率激光参数测量技术方面的研究。

通讯作者: 胡东霞, 男, 研究员, 博士, 主要从事高功率激光总体技术方面的研究。

杂, 监视和反馈调节多, 成本高的问题<sup>[7-11]</sup>。

为解决靶场三倍频光束同步状态精密监测的需求并降低建设成本, 提出了一种基于时间基准信号红外长程传输结合近程光电-电光转换的时标激光系统方案, 该方案首先使用红外单模光纤完成时间基准信号的保真长程传输, 然后使用光电探测器将红外时标基准信号转换为电信号驱动蓝光直调 LD 激光器, 获得输出波长为 450 nm, 输出功率 47 mW, 脉冲宽度为 120 ps 的时标光信号; 最后将 450 nm 的时标光脉冲与波形测量取样光脉冲同时输入大口径真空光电管进行光电转换, 示波器采集和记录取样光波形和 450 nm 时的标光波形, 分析发次间取样光波形与时标光波形的同步误差即可对打靶光束的同步误差进行监测。文中方法具有时间基准信号传输距离长, 系统可靠性强 (主要有源器件位于末端且分散布置), 配置灵活的特点; 时标光信号由蓝光 LD 产生, 规避了复杂和敏感的固体激光放大与倍频, 有利于获得能量稳定、波形一致的时标光脉冲用于同步监测。

## 1 系统结构与原理

### 1.1 光束同步监测系统设计

国内外的大型激光装置, 在测量靶场波形时为降低成本多采用透镜 (相位板) 取样+光纤传输时分复用的架构<sup>[12-14]</sup>。我国的超大型激光装置在测量靶场三倍频波形时, 为保证测量结果准确并降低建设成本, 采用透镜取样+光纤传输并束时分复用的架构, 每路波形测量取样光经一个 3×3 阵列透镜取样耦合到光纤集束, 每 4 路波形经光纤集束传输后通过一个光学聚焦并束机构进入一个光敏面直径为  $\Phi 10$  mm 的真空光电管进行光电转换, 示波器记录光电管的输出电信号获得测量波形<sup>[15]</sup>。

当时标脉冲能够通过光纤与取样光脉冲一同输入光学聚焦并束机构并通过真空光电管完成光电转换时, 通过分析示波器上取样光脉冲与时标光脉冲的间隔即可对打靶光束的脉冲同步进行监测, 时标光脉冲与波形测量系统相耦合的脉冲同步监测原理如图 1 所示。

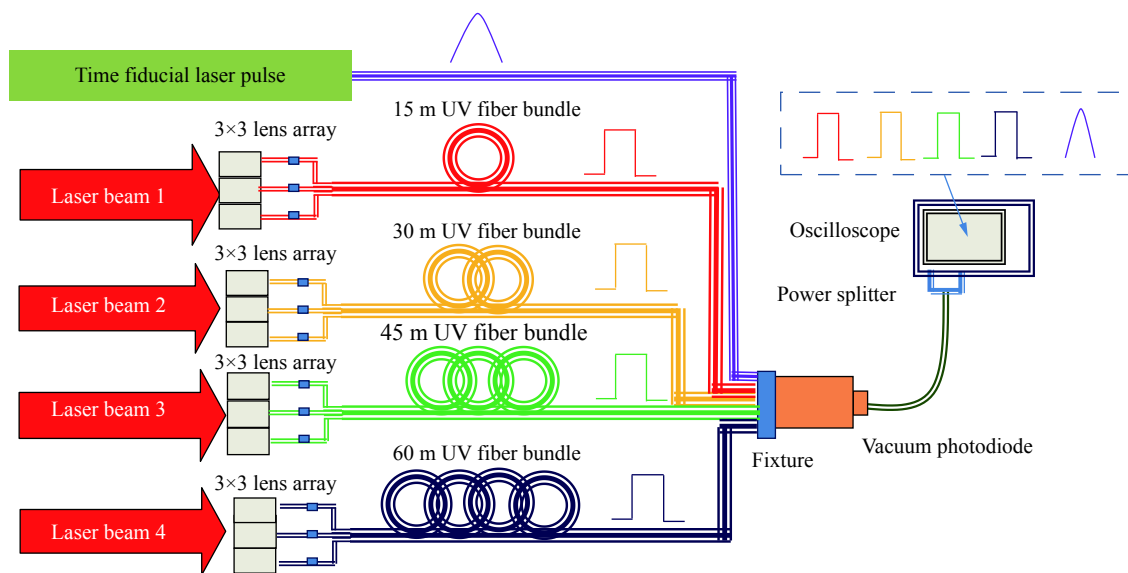


图 1 脉冲同步监测原理图

Fig.1 Schematic of laser pulse synchronization monitor

### 1.2 时标激光脉冲的产生与特性

测量取样光脉冲的光电管在蓝紫波段灵敏度可达数 V/W 量级, 时标脉冲处于这一波段时其功率需求并不高。为降低建设和维护成本, 增加系统配置的

灵活度, 文中方案中时标光采用红外时间基准长程传输+光电转换+电光转换的方式产生, 低功率的红外时标光经单模光纤长程传输到示波器位置后进行光电转换变为电脉冲, 电脉冲驱动直接调制 LD 激光器产

生符合输入要求的时标脉冲。该方案规避了复杂和敏感的激光放大与倍频过程,保证了时标波形输出的高度一致性,降低了建设成本,还增加了系统的可靠性(一个直接调制 LD 激光器损坏只影响一台示波器上光路的同步监测)。时标激光产生原理如图 2 所示。

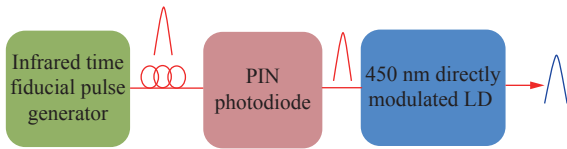


图 2 时标脉冲产生原理图

Fig.2 Schematic of time fiducial pulse produce

红外时间基准信号由任意波形发生器驱动马赫-曾德尔型幅度调制器调制单纵模激光器并经放大、分束过程产生(如图 3 所示)。任意波形发生器输出半高全宽(FWHM)100 ps 的电脉冲时,分束输出的红外时间基准信号能量大于等于 5 pJ,能量稳定度优于 1%(PV 值),经带宽 4 G 的 PIN 半导体光电管探测模块进行光电转换,半导体光电探测模块的输出电脉冲上升沿为 77 ps,FWHM 为 112 ps。

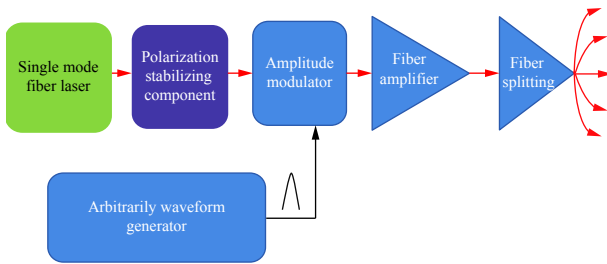


图 3 红外时标信号产生原理图

Fig.3 Schematic of time infrared fiducial signal produce

直调 LD 激光器是时标脉冲产生的关键器件,直调型 LD 激光器通过直接控制半导体激光器注入电流的大小来改变激光器的输出波形及强弱,其输出光功率与驱动电流的关系如公式(1)和图 4 所示<sup>[16-18]</sup>。

$$P = \frac{\eta E}{e}(I - I_{th}) \quad (1)$$

式中: $P$  为输出光功率; $I$  为驱动电流; $I_{th}$  为阈值电流; $E$  为光子能量; $\eta$  为激光器的外微分量子效率; $e$  为电子电荷。从图 4 中可以看出,当驱动电流小于阈值电

流时,激光器基本不发光;当驱动电流大于阈值电流  $I_{th}$  时,激光器开始发射激光,且随着电流的增加线性增长,当增大到一定值时进入非线性饱和区。LD 激光器输出激光的强弱直接与驱动电流大小有关。因此当半导体光电管输出信号注入 LD 激光器后,其形成的电流变化  $I_b$  可加载到半导体激光器上,其输出的激光波形将直接反映注入时间基准信号的波形特征。

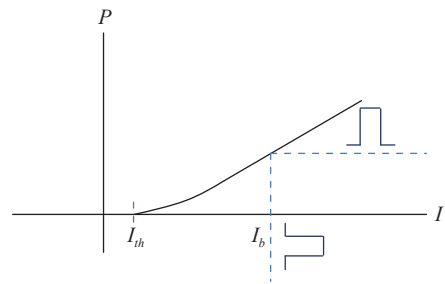
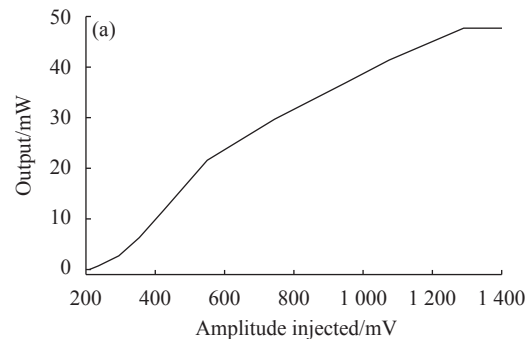


图 4 LD 输出光功率与驱动电流的关系

Fig.4 The relationship between output power and drive current of LD

靶场三倍频波形测量所用真空光电管带宽 6 G,光阴极材料为蓝紫光灵敏型双碱阴极,响应波长 190~680 nm,峰值响应度 4 V/W@350 nm,在 230~500 nm 波段响应灵敏度较高( $\geq 2$  V/W),在 <230 nm 和 >500 nm 的波段,光电管的灵敏度呈断崖式下降。根据光电管的光谱响应和带宽特性,基于 GaN 基蓝光 LD 完成了直调型 LD 激光器的研制。LD 激光器的输出波长为 450 nm,3 dB 响应带宽(9 K~3 G) Hz,激光器输出功率与注入电脉冲的幅值关系如图 5(a) 所示,注入电脉冲的幅值为 1.2 V 时,LD 激光器达到最大输出功率为 47 mW,此时真空光电管的输出幅值为 115 mV;当注入电脉冲的幅值大于等于 600 mV 时,激光器稳定线性输出,输出功率波动为 10%。



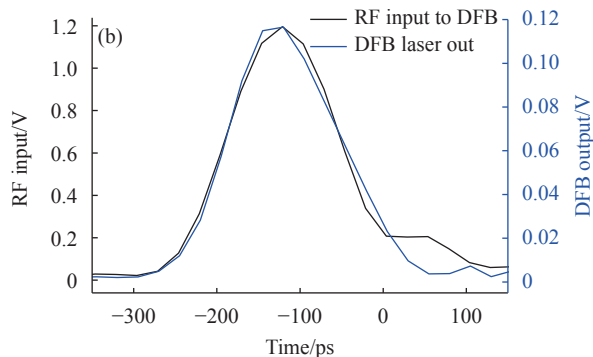


图 5 LD 激光器的输出特性。(a) 注入电脉冲幅值与输出光功率的关系; (b) 输入电脉冲波形与输出时标光波形的比较

Fig.5 Output characteristics of LD laser. (a) Relationship of amplitude injected and laser power output; (b) Comparison of the electronic waveform injected and laser waveform output

搭配带宽 6 G 的真空光电管, LD 激光器输出时标脉冲波形的上升沿为 97 ps, 脉冲 FWHM 为 158 ps, 注入 LD 激光器的电脉冲波形和 LD 输出时标光波形的测量结果如图 5(b) 所示。从图 5(b) 可知, 在注入电脉冲幅值处于 LD 线性工作范围内时, 激光器的输出波形较好地跟随了注入电脉冲的波形, 能够将红外时基信号无畸变地转换为 450 nm 的时标光信号。

### 1.3 同步监测精度分析

当被监测的三倍频光束波形稳定并对三倍频波形测量结果做归一化处理, 基于光电-电光变换的时标激光系统其同步监测误差主要来源有 3 个部分: 时标信号光功率波动引起的时标信号幅度起伏、示波器噪声、传输光纤延时的抖动。

1) 时标光脉冲功率波动引入的监测抖动: 理论模拟显示, 当时标脉冲能量波动为 10% 时, 以脉冲后沿 50% 高度为判据, 能量波动引入的同步监测误差  $\delta_1=4.7$  ps(如图 6 所示)。

2) 示波器噪声引入的监测抖动: 监测系统基于示波器判读同步误差, 示波器的底噪会同时叠加到波形和时标信号上引起波形和时标信号幅度的变化, 产生判读误差。实验所用示波器的噪声值为满度值的  $\pm 1\%$ , 当波形和时标幅值在示波器上均位于满刻度的 70% 时, 示波器噪声在时标信号和波形信号幅值测量结果中的最大比例为  $\pm 1.4\%$ , 理论模拟显示, 示波器噪声引入的波形判读误差  $\delta_2$  和时标信号判读误差  $\delta_3$  均为 2.6 ps(如图 7 所示)。

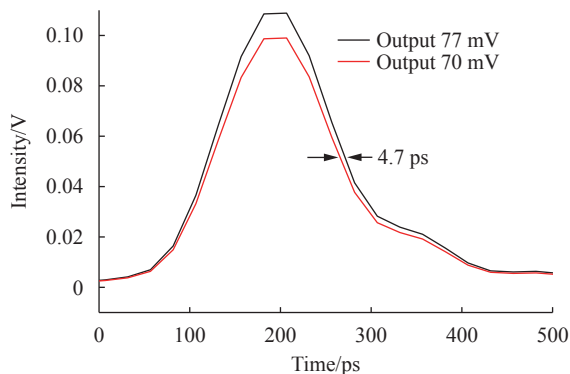


图 6 能量波动引入同步监测误差的理论模拟

Fig.6 Simulation result of synchronization monitoring error caused by energy fluctuation

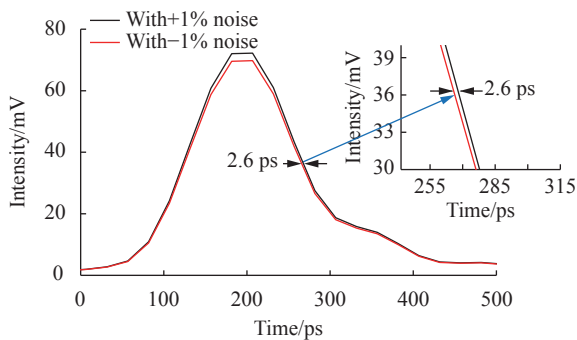


图 7 示波器噪声引入同步监测误差的理论模拟

Fig.7 Simulation result of synchronization monitoring error caused by oscilloscope noise

3) 温度变化导致传输光纤长度变化引起的同步监测抖动: 同步监测系统红外时标信号在光纤中的传输长度为 200 m, 所用 G655 单模光纤每千米在 1053 nm 波段的温度系数为 0.008 m/°C, 时标系统工作环境的温度范围为 24.5~25.5 °C, 温度变化引起的光纤长度变化为 1.6 mm, 引起的光程差和同步监测波动  $\delta_4$  为 8 ps。

测量时标信号所用的真空光电管, 其噪声与工作电压有关系, 工作电压为 1000~1600 V 时, 暗电流噪声在  $5 \times (10^{-4} \sim 10^{-3})$  mV 之间, 与示波器噪声相比为一小量, 可忽略其对同步监测的影响, 将红外时标光信号转换成电信号所用的 PIN 型半导体光电管, 其暗电流噪声为  $2.5 \times 10^{-4}$  mV, 与示波器噪声相比为一小量, 其对同步监测的影响也可忽略。

$\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ 、 $\delta_4$  互不相关, 忽略光电管噪声对同步监测系统的影响, 同步监测系统的最大监测误差  $\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = 10$  ps。

## 2 实 验

为对文中方案进行验证,搭建了如图 8 所示的实验装置,红外时标光源分束输出后的两个时间基准信号一路经 2 m 单模红外光纤传输并衰减后由 PIN 光电管 1 转换为电脉冲信号输入示波器模拟波形信号并作为触发源(模拟波形脉冲能量变化小于±1%);另一路经 200 m 单模红外光纤传输并衰减后先经 PIN 光电管 2 转换为电脉冲,电脉冲再输入 450 nm 直调 LD

驱动激光器产生 450 nm 时标脉冲,450 nm 时标脉冲输出后进入真空光电管,真空光电管的输出信号进入示波器的另一通道。由于时标信号和模拟波形的初始脉冲源为同一台红外时间基准信号产生模块,在示波器上观察时标脉冲波形相对于模拟波形的晃动即可获得系统的同步监测精度,实验所用 PIN 半导体光电管模拟带宽为 4 G,真空光电管模拟带宽 6 G;所用数字示波器模拟带宽 8 G,采样率 40 GS/s。

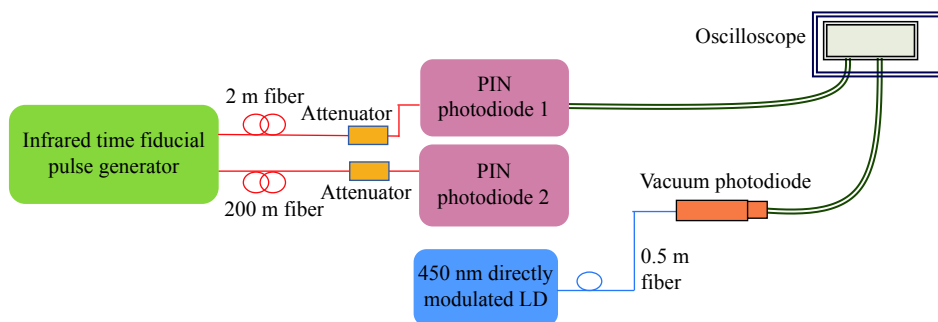


图 8 同步监测方案验证实验原理图

Fig.8 Diagram of synchronization monitor scheme verification experiment

实验结果如图 9 所示,实验中以模拟波形脉冲上升沿 35% 的位置作为触发和时间基准,模拟波形幅值(峰值)为 71~73.6 mV,模拟波形自身存在 3.5 ps 的时间抖动(以脉冲下降沿 50% 的位置判定),这一抖动由示波器噪声和模拟波形能量波动共同作用引起。实验中模拟波形测量所用示波器档位为 10 mV/div,示波器噪声±1 mV,引入  $\delta_2=2.6$  ps 的时间抖动;模拟波形脉冲能量波动±1%,引入  $\delta_5=1.9$  ps 的时间抖动,模

拟波形时间抖动计算值  $\delta_{wave} = \sqrt{\delta_2^2 + \delta_5^2} = 3.3$  ps,计算值与实验观测值符合的较好。

时标光波形幅值(峰值)为 68.8~74.1 mV,抖动 7.2 ps,测量所用示波器档位为 10 mV/div。时标脉冲时间观测值抖动的来源为时标光脉冲功率抖动、模拟波形能量波动引起的触发动抖、示波器噪声及光纤长度变化。实验过程中实验室的温度变化为 24.8~25.2 °C,温度变化引起的光纤长度变化为 0.64 mm,引起的光程差变化  $\delta_3=3.2$  ps;在此条件下时标脉冲时间抖动的计算值  $\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2} = 7.03$  ps,与观测值符合的较好。

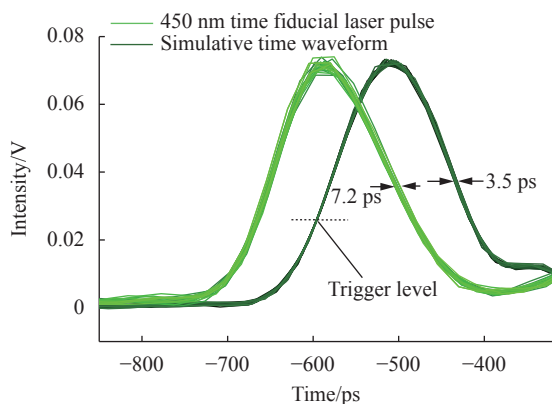


图 9 同步监测方案验证实验结果

Fig.9 The experiment result of synchronization monitor scheme

## 3 结 论

提出了一种基于时标基准信号红外长程传输结合近程光电-电光转换的时标激光系统设计方案。该技术方案使用红外单模光纤完成时间基准信号的长程传输,在示波器附近接收时间基准信号,将其转换为电脉冲并驱动直调 LD 激光器产生 450 nm 时标光脉冲用于脉冲同步监测。该方案基于光纤系统和直调 LD 激光器产生蓝绿波段时标光,规避了复杂和敏

感的固体激光的放大与倍频,得到了波形稳定一致的时标光脉冲波形。方案中的主要有源器件 LD 激光器独立分散布局于系统末端,可靠性强,便于维护与调节。实验结果表明,文中的技术方案可为激光驱动器提供窄脉宽,可长程传输的时标光信号用于脉冲同步监测,同步监测精度可达 10 ps。该方案的理论及实验结果为高功率激光装置脉冲同步同发监测系统的建设提供了支撑。

#### 参考文献:

- [1] Donaldson W R, Bonr R, Keek R L, et al. UV power balance on the OMEGA laser[C]//Proceedings of SPIE, 1999, 3609: 121-127.
- [2] Sun Zhihong, Wang Wenyi, Liu Hua, et al. Power balance measurement technique of multi-beam laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1493-1497. (in Chinese)
- [3] Zhou Huazhen. The applied research on "SG-II" power balance controlled by Angular variable mirror[D]. Beijing: Graduate School of Academy of Engineering Physics, 2003. (in Chinese)
- [4] Xu Lan. Study on the built-up high power multi-pass solid state laser system's power balance[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese)
- [5] Huang Jie, Cai Xijie, Lin Zunqi. Primary energy balance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(11): 1553-1556. (in Chinese)
- [6] Zhang Bo, Peng Zhitao, Xia Yanwen, et al. Conjugate reflection based measurement of time-synchronization in high-power laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104002. (in Chinese)
- [7] Okishev A V, Roides R G, Begishev I A, et al. All-solid-state, diode-pumped, multi-harmonic laser system for timing fiducial[C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6053: 60530J.
- [8] Yannick Schiano, Emmanuel Bar, André Richard, et al. Time fiducial on the LIL facility at CEA/CESTA[C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6584: 65840N.
- [9] Lin Honghuan, Jiang Dongbin, Wang Jianjun, et al. Laser time fiducial for precise physical experiment in Shenguang-III prototype facility [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(2): 025208. (in Chinese)
- [10] Zhao Wei, Liu Jinsheng, Yang Binzhou, et al. Study of UV laser fiducial monitor for X-ray streak camera [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(1): 127-130. (in Chinese)
- [11] Chen Hui, Bai Zhenxu, Wang Jiancai, et al. Hundred-watt green picosecond laser based on LBO frequency-doubled photonic crystal fiber amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20200522. (in Chinese)
- [12] Guardalben M J, Barczys M, Kruschwitz B E, et al. Laser-system model for enhanced operational performance and flexibility on OMEGA EP [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8(1): e8.
- [13] Thomas S, Boyd B, Davis D T, et al. Temporal multiplexing for economical measurement of power versus time on NIF[C]//Proceedings of SPIE, 1997, 3047: 700-706.
- [14] Ermolaeva G M, Eron'yan M A, Dukel'skii K V, et al. Low-dispersion optical fiber highly transparent in the UV spectral range [J]. *Optical Engineering*, 2006, 43(12): 2896-2903.
- [15] Zhang Bo, Peng Zhitao, Xia Yanwen, et al. High precise UV frequency modulation pulse waveform measurement system based on lens array and fiber bundle [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 173(11): 112878.
- [16] Huang Yu, Qin Bo, Luo Qingsong. Design of a flexible driver for the direct-modulated laser with multi-rate input [J]. *Journal of CAEIT*, 2013, 8(4): 350-357. (in Chinese)
- [17] Shi Wei, Liu Xuanfu, Li Desheng. Comparative study on the current density and radiation quantum efficiency of solid state lighting blue LED&LD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(6): 792-795. (in Chinese)
- [18] Lin Ping, Liu Baiyu, Gou Yongsheng, et al. Laser pulse shaping technology based on semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 103-107. (in Chinese)

# Laser time fiducial system for high-power laser facility based on optic-electric and electric-optic conversion

Zhang Bo<sup>1,2</sup>, Hu Dongxia<sup>1\*</sup>, Peng Zhitao<sup>1</sup>, Zhang Rui<sup>1</sup>, Zhou Dandan<sup>1</sup>, Dang Zhao<sup>1</sup>, Zhao Junpu<sup>1</sup>

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

## Abstract:

**Objective** Laser time fiducial system is needed in high power laser facility for tracking synchronization change in experiment caused by disturbances such as collimation and device replacement. Traditional time fiducial is an electrical trigger pulse input to the AUX channel of oscilloscope which is convenient but has obvious jitter (about 150 ps). Moreover, the electrical trigger sensitive to the electromagnetic interference. Another time fiducial form is an infrared fiducial can transfer a long distance in fiber and been send to an independent channel of oscilloscope. Infrared fiducial has a good accuracy but employ a measurement channel. In this article, we propose a new time fiducial scheme based on optic-electric and electric-optic transformation for getting a blue time fiducial signal @450 nm which can use the vacuum photodiode detecting together with UV pulse. The scheme provides a rapid fiducial signal with long transmission ability for UV pulse synchronization monitor and has a monitoring precision as high as 10 ps.

**Methods** The study presents a fiducial system scheme based on optic-electric and electric-optic conversion. Firstly, arbitrarily waveform generator driven a M-Z modulator to modulate continuous infrared laser and infrared time fiducial signal been produced. Secondly, infrared time fiducial transferred a long distance by SM fiber and been converted to electrical signal by a photodiode. Thirdly, the electrical signal drive a direct-modulation LD and a blue time fiducial signal @450 nm is gotten. The final fiducial signal can be reach an index of 47 mW output power, 10% power jitter and 120 ps laser pulse width.

**Results and Discussions** According to the scheme, the monitor jitter caused by fiducial power jitter, fiber length variation follow with temperature, oscilloscope noise and photodiode noise have been tested and analyzed. According to the analysis, the scheme can get a monitor accuracy of 10 ps with a 24.5-25.5 °C temperature variation. An experiment for examine monitor accuracy is done with 24.8-25.2 °C temperature variation, the monitor accuracy gotten in experiment is 7.2 ps which is coincide with the theoretical analysis result (7.03 ps).

**Conclusions** In this study, a fiducial system scheme based on optic-electric and electric-optic conversion is proposed for high power laser facility synchronization monitor. In the scheme, infrared time fiducial signal firstly been transferred a long distance by SM fiber and been converted to electrical signal by a photodiode, after that the electrical signal drive a direct-modulation LD and a blue time fiducial signal @450 nm is gotten. The final fiducial signal can be reach an index of 47 mW output power, 10% power jitter and 120 ps laser pulse width. The experiment and theoretical analysis indicates that the method can providing a rapid fiducial signal with long transmission ability for UV pulse synchronization monitor, the monitoring precision can be as high as 10 ps.

**Key words:** optic-electric and electric-optic conversion; synchronization monitor; directly modulation; LD laser

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (61605185, 62075201)