

神光-II 激光装置高精度时间同步时标系统

朱浩瀚^{1,2}, 汪小超^{2*}, 黄文发², 肖助力², 姜秀青², 周申蕾², 范薇², 石志东¹

¹上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;

²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 在使用高功率激光装置进行物理实验时, 高精度时间同步的时标系统是实现物理过程精确诊断的必要条件。为了满足物理实验需求, 该系统采用任意波形发生器输出信号时分复用结合高速电光调制的技术方案, 同源产生了主激光、时标光、电时标和高精度触发信号等多路信号。时标系统共可输出 532, 355, 266 nm 三种波长共 10 路梳状时标光信号及 8 路梳状电时标信号、两路快前沿高幅值触发信号。时标信号与主激光时间同步抖动峰峰值达到 12.80 ps, 梳状时标光信号脉冲周期峰值抖动为 6.40 ps, 接近目前采用的测量系统极限。完成了时标系统在高功率激光装置中的应用演示, 满足了诊断设备应用要求; 对条纹相机不同扫程进行时间基准标定实验, 可有效校准相机大扫程的时间误差。

关键词 激光光学; 时标系统; 高精度时间同步; 任意波形发生器; 条纹相机

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1101011

High-Precision Time-Synchronization Fiducial System of SG-II High-Power Laser Driver

Zhu Haohan^{1,2}, Wang Xiaochao^{2*}, Huang Wenfa², Xiao Zhuli², Jiang Xiuqing²,
Zhou Shenlei², Fan Wei², Shi Zhidong¹

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

Abstract A high-precision time-synchronization fiducial system is necessary when using high-power laser drivers in physical experiments. To meet the demands of physical experiments, a time division multiplexing scheme based on an arbitrary waveform generator and high-speed electrooptic modulation is proposed. The time-synchronization fiducial system based on this scheme can generate multichannel signals, such as main laser, optic time fiducial lasers, electric time fiducial signals, and high-precision triggers. The proposed system can output 10 comb-shaped optic time fiducial lasers at three wavelengths, i. e., 532, 355, and 266 nm, 8 comb-shaped electric time fiducial signals, and two high-precision triggers with fast rise time and large amplitude. The peak-to-peak synchronization jitter value between the optic time fiducial laser and main laser is measured to be 12.80 ps, and the peak jitter of the optic time fiducial laser's period is 6.40 ps, which is close to the limit of the measurement system currently in use. A demonstration experiment of this system in a high-power laser driver is implemented to confirm that the system meets diagnostics requirements. Additionally, the time reference calibration of the streak camera's different scanning strokes is processed to effectively calibrate the time error of the camera in large sweeps.

Key words laser optics; time fiducial system; high-precision time synchronization; arbitrary waveform generator; streak camera

OCIS codes 140.3460; 140.3538; 140.3610

1 引 言

高功率激光装置被广泛应用于惯性约束核聚变、高能高密度物理和天体物理等研究领域^[1-4]，目前，美国、法国、中国、日本等国家均开展了高功率激光装置的技术研究^[5-10]。

在利用高功率激光装置进行物理实验时，要求使用的测量设备具有足够的时间分辨能力。常用的诊断仪器一般有高速示波器、光学条纹相机、X光条纹相机和X光分幅相机等^[11-16]；但是设备触发过程中引入的抖动会导致测得的物理过程起始时间相对模糊，因此需要建立精密时标系统来提高物理实验的精密性；同时条纹相机等诊断设备也需要与主激光高精度同步的激光脉冲作为时间基准对测量图像进行时间标定。

目前，世界上大型的激光驱动器都建有相应的时标系统以解决上述问题。美国的OMEGA装置上的时标光由与主激光同步的固体激光器产生^[17]；国家点火装置(NIF)上采用了光纤堆积器，可实现脉冲串输出，结构简单，但受整体装置结构限制，需要在远端进行倍频，基频光传输能量接近石英光纤破坏阈值^[18]；法国的兆焦耳装置(LMJ)采用了单脉冲单波长的方式作为时标信号，时标信号与主激光之间的时间

抖动小于8 ps^[19-20]；国内的神光-III装置采用与主激光时间锁定的任意波形发生器(AWG)进行电光调制的方式产生时标光信号，信号经稳偏放大后产生二倍频和三倍频信号，二倍频光平均能量不稳定性为1.96% (方均根,RMS)^[21]。以上这些时标系统都有各自的局限性，且均未提供高精度的电触发和电时标信号。

根据物理实验提出的要求，本文提出了应用于神光-II(SG-II)装置的多功能时标系统，包含多波长时标光、多路高精度同步触发电信号和电时标信号输出，可为物理实验提供精确的时间基准。方案采用与主激光同源的AWG，利用时分复用技术产生各路时标信号种子，保证了高精度的时间同步；时标系统提供二、三、四倍频的三种波长时标光，并输出了与时标光同源的高精度电时标和电触发信号，时间同步精度达到12.80 ps(峰峰值)。目前经物理诊断设备测试，系统输出性能稳定，已初步用于条纹相机大尺度时间轴的精确标定。

2 实验研究

2.1 时标系统总体技术方案

神光-II装置时标系统如图1所示，主要由脉冲产生、放大传输、谐波转换、电信号转换，以及时标分发等几个部分组成。

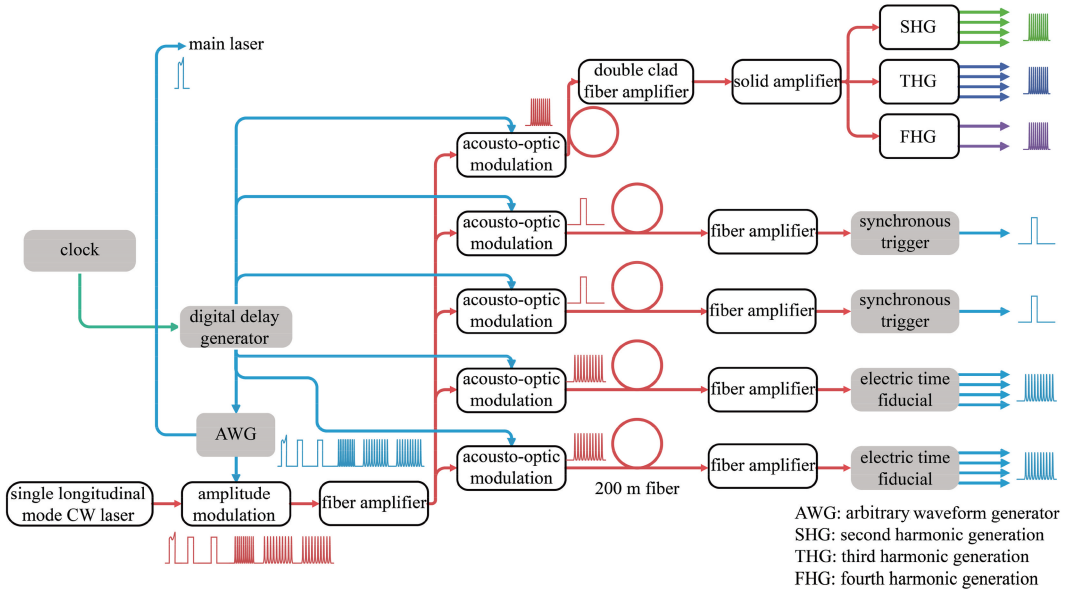


图 1 神光-II 装置时标系统示意图

Fig. 1 Schematic of time-synchronization fiducial system of SG-II laser facility

为了确保高精度的同步性能，基于时分复用技术，由 AWG 产生的与主激光同源的电脉冲信号进入高速电光调制器，调制器对单纵模激光器输出的连续光进行调制，以产生所需的整形脉冲光信号，输

出包括高精度同步触发信号、电时标信号和时标光信号等多路信号的种子。整形脉冲光信号经光纤放大器放大分束后输出至声光调制器进行选单，注入后续传输放大系统。其中，时标光信号种子经多级

放大后进行谐波转换产生波长为 532, 355, 266 nm 的二倍频、三倍频、四倍频时标光, 分别耦合进入芯径为 600 μm 的大芯径多模光纤束, 再分发至诊断设备处。电时标和电触发信号种子经后续光电转换等处理和分发后产生多路电时标信号和电触发信号, 由高速线缆传输至诊断设备。

2.2 基于时分复用的同源种子脉冲产生

对 AWG 输出的时标信号与主激光信号进行时分复用, 即 AWG 产生一串多个脉冲信号, 经高速电放大器(带宽 20 GHz)放大后加载到高速电光调制器(带宽 20 GHz)上, 将分布反馈式(DFB)激光器输

出的 1064 nm 连续光整形为激光脉冲序列, 经放大和分束后利用声光斩波器选单产生多路独立种子, 分别进入不同的链路进行后续传输处理。AWG 输出的时标系统与主激光的时分复用脉冲如图 2 所示, 图中的 6 个波形分别为主激光信号、两路同步触发信号、两路电时标信号及一路时标光信号, 时标系统 5 个信号的时间波形及相对延时等特性均可在 AWG 上实现灵活调整, 也可以灵活实现更多路的拓展。系统采用全保偏结构, 偏振特性稳定。多路时标种子采用与主激光同源的方式产生, 满足了物理实验对时标高精度时间同步的要求。

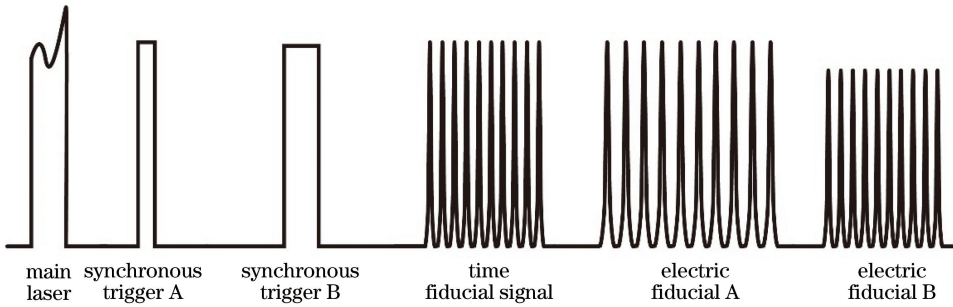


图 2 时标系统与主激光的时分复用脉冲示意图

Fig. 2 Time division multiplexing for time fiducial system and main laser

时标系统的种子脉冲基于 AWG 产生, AWG 对时间波形具有灵活的调控能力, 可以实现对子脉冲宽度、脉冲间隔和脉冲幅度一致性的精确控制, 根据诊断设备不同的分辨率需求, 可生成不同脉冲宽度和间

隔的脉冲串, 如图 3 所示, 脉冲串共有 10 个脉冲, 使用高速光电管(带宽 45 GHz)的示波器(采样率 12 GHz)测得的脉冲宽度分别为 69.87 ps 和 99.29 ps, 脉冲间隔分别为 279.46 ps 和 360.54 ps, 与设计值一致。

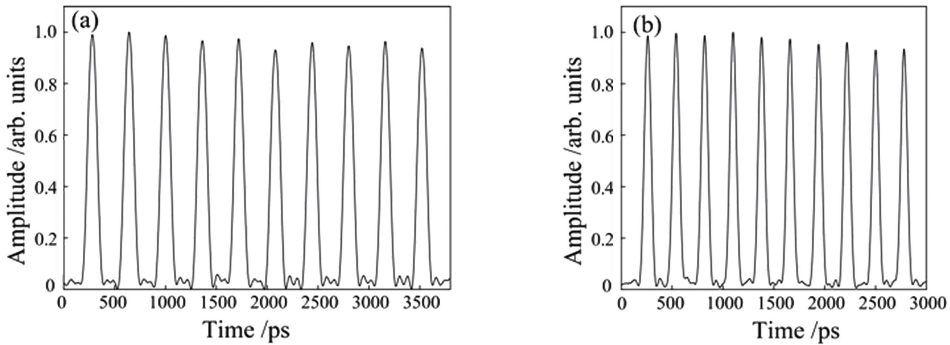


图 3 种子源输出的不同脉冲宽度和间隔的脉冲串。(a) 脉冲宽度 $\tau_w=99.24$ ps, 脉冲间隔 $\tau=360.54$ ps; (b) 脉冲宽度 $\tau_w=69.87$ ps, 脉冲间隔 $\tau=279.46$ ps

Fig. 3 Output pulse stack with different pulse widths and intervals from seed source. (a) Pulse width $\tau_w=99.24$ ps, pulse interval $\tau=360.54$ ps; (b) pulse width $\tau_w=69.87$ ps, pulse interval $\tau=279.46$ ps

该系统的种子是 AWG 产生的电脉冲信号, 因此脉冲的宽度和上升沿特性主要受到 AWG 的采样率、电放大器和强度调制器的带宽的限制, 脉冲间隔的最小调整量则取决于 AWG 的采样率。目前, 系统中采用的是 2.5×10^{10} Sampling \cdot s⁻¹ 的 AWG、20 GHz 的电放大器和强度调制器, 理论输出最短脉

冲应为 40 ps 左右, 受示波器带宽限制(12 GHz), 测得的终端时标光可输出的最短脉冲约为 60 ps。

2.3 脉冲放大与谐波转换

时标光的种子是 AWG 输出的同源种子脉冲经声光斩波器选单后产生的一个脉冲串, 共包含 10 个子脉冲, 脉冲间隔约为 300 ps, 脉冲宽度约为 100 ps,

单个脉冲能量约为几纳焦,经过 200 m 的铠装保偏光纤传输至终端。采用双包层光纤放大器结合固体放大器的方式对时标光种子信号进行放大,其中双包层光纤放大器将脉冲串放大至百纳焦,以作为掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)固体放大器的注入。

对单纵模激光器的连续光、高速电光调制器输出的脉冲串、经过光纤放大器后的脉冲串,以及经过长程传输后再经双包层放大器放大后输出的脉冲串等的光谱进行了测试,测得光谱宽度均为0.03 nm,该光谱宽度接近光纤光谱仪(AQ6370, Yokogawa, 日本)的测量极限,中心波长均为1064.10 nm,典型光谱如图 4 所示,脉冲串从产生到进入固体放大之前光谱未发生变化,仍保持窄线宽的状态。根据相关文献[22-23],在 Nd:YAG 固体放大器中光谱不会发生变化,通过偏硼酸钡(BBO)晶体进行谐波转换后光谱宽度也不会发生明显变化。

脉冲放大与谐波转换模块结构如图 5 所示,利用法拉第旋光器和电光开关,将时标光在固体放大器内进行四程放大,能量提升至数毫焦。放大后的

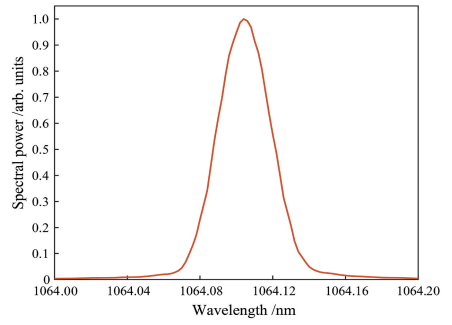


图 4 进入固体放大器之前的脉冲串典型光谱
Fig. 4 Typical spectral profile of pulse stack before entering solid amplifier

脉冲串进入谐波转换模块,谐波转换模块中先使用波片调整光束的偏振,再使用偏振分光棱镜将光分束,采用 BBO 晶体进行倍频,利用色分离镜将不同波长的时标光分离输出,三倍频时标光独立输出,二倍频则利用四倍频的漏光输出。输出的二、三、四倍频的最大能量分别可达 2, 3.5, 1.2 mJ,实际使用中根据诊断设备需求可以通过调节放大器增益调节输出能量。

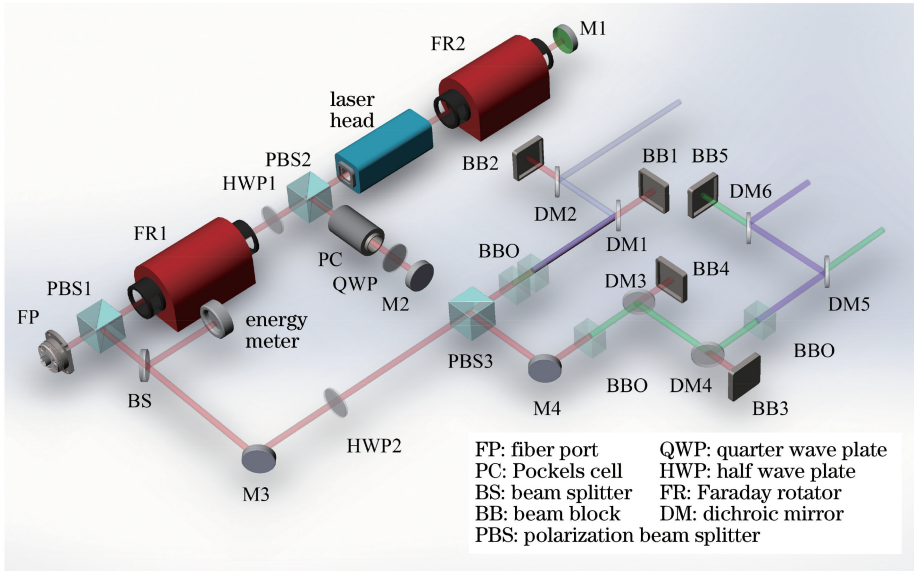


图 5 脉冲放大与谐波转换模块结构图

Fig. 5 Schematic of solid amplifier and harmonic generation

谐波转换后的三种波长时标光分别通过透镜耦合进入长度为 20 m、纤芯直径为 600 μm 的大芯径多模光纤束,分束并传输至终端各诊断设备,其中二、三倍频分束为四路,四倍频分束为两路输出。实际使用中,倍频部分输出能量一般为百微焦,此时多模光纤传输未观察到明显的非线性效应,输出光束时间波形没有发生明显变化,多模光纤传输前后的二倍频脉冲宽度对比如图 6 所示。由图 6 可见,耦

合进入光纤的脉冲宽度约为 181.12 ps,输出光的脉冲宽度约为 187.25 ps,该差别在测量设备的测量误差允许范围内。

系统输出各信号的不稳定性,以及各信号与主激光的同步精度均为衡量该时标系统特性的重要参数。使用示波器和高速光电管对脉冲宽度和脉冲间隔两项参数进行测试,利用高速光电管对光信号进行光电转换,再接入示波器,读取信号脉宽和脉冲间

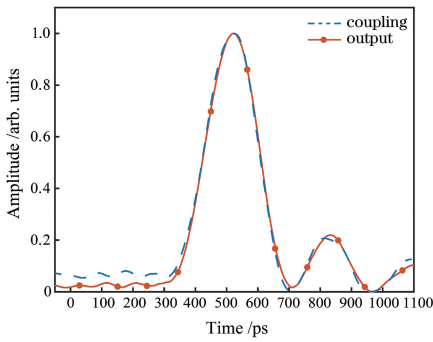


图 6 多模光纤传输前后的二倍频脉冲宽度对比

Fig. 6 Comparison of 2ω pulse widths before and after multi-mode fiber transmission

隔的测量值,每秒记录一次,共记录 2 h,通过对测量值进行分析得出信号脉宽和脉冲间隔的抖动。因为时标脉冲宽度很窄,接近示波器的测量极限,测得的脉冲宽度峰值变化量受示波器测量影响较大,峰值不稳定性不具有比较意义。使用高速示波器和高速光电管测得的时标光在 2 h 内的脉冲宽度抖动为 1.11 ps(RMS),脉冲间隔抖动为 6.40 ps(峰峰值),0.73 ps(RMS)。为了减小测量系统的影响,使用单脉冲分束再合束的方式形成两个间隔为 816 ps 的严格的同源脉冲,示波器测得这两个脉冲在 2 h 内的脉冲间隔抖动为 5.23 ps(峰峰值),1.02 ps(RMS)。时标光脉冲的稳定性接近目前测量系统的极限。

使用神光-II 装置的种子源模拟主激光,利用示波器测试主激光与时标光之间的时间同步抖动,使用同一台 AWG 输出主激光和时标光的种子。为了测试方便,时标光信号使用单脉冲波形,主激光信号与时标光信号经过光纤合束器合束后再经高速光电管进入示波器,如图 7 所示,使用示波器单路通道读取主激光信号与时标光信号的间隔并进行记录,每秒记录一次,共记录 2 h,通过对测量值进行分析得出主激光与时标光信号之间的抖动。使用这种方法测得的时标光与主激光在 2 h 内时间同步抖动为 12.80 ps(峰峰值),1.84 ps(RMS)。

引起时标光时间同步抖动的原因包括光纤介质受温度变化引起的折射率变化^[24]、电子学器件受温度影响引起的延时变化^[25]、AWG 时钟基准的固有抖动^[26]和示波器时钟基准的固有抖动^[27]等,上述原因引起的时间抖动可以通过温度补偿、使用更高精度的参考时钟等技术进行进一步提升。针对当前物理实验所提出的需求,该时标系统产生的时标光信号的时间抖动远优于参数要求。

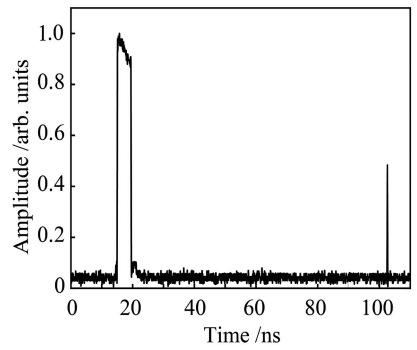


图 7 主激光与时标光之间的抖动测试曲线

Fig. 7 Test curve of jitter between main laser and optic time fiducial laser

2.4 条纹相机测试结果

使用可见光条纹相机测得的二倍频时标信号如图 8 所示。图 8(a)为使用可见光条纹相机测试的系统输出的二倍频时标信号,时标光序列共包括 10 个子脉冲,图中每个光斑对应时标脉冲序列中的一个子脉冲。由图 8(a)可知,条纹相机上显示的光斑边缘清晰可见且无拖尾现象。该条纹相机产生的图像在时间维度上共有 1400 个像素,根据条纹相机时间窗口和像素的关系,可以计算出脉冲周期为 319.37 ps。使用示波器和高速光电管测得种子源输出的序列脉冲周期为 320.36 ps,种子源脉冲序列如图 8(b)所示,该误差在测试设备的测量误差范围内,脉冲序列脉冲间隔与测量结果一致,该时标光信号可以作为条纹相机的时间基准,提高了物理诊断中时间测量的精度。

此外,利用 AWG 的任意整形能力,对条纹相机大时间范围内的时间基准偏差进行测试。因为条纹相机的扫描速度具有非线性,在使用条纹相机前需要对其进行定标。利用时标系统的任意整形能力及

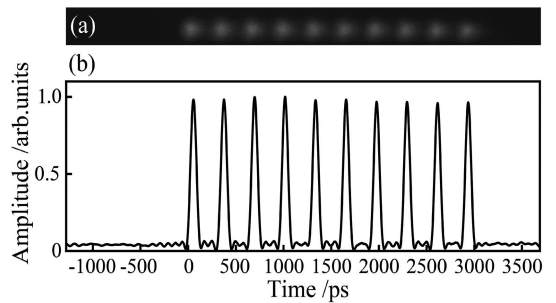


图 8 可见光条纹相机测得的二倍频时标信号。

(a) 条纹相机测试结果;(b) 种子源脉冲序列

Fig. 8 2ω optic time fiducial laser signal measured by visible streak camera. (a) Tested result of streak camera; (b) pulse stack from seed source

输出的高稳定时标光信号,可以对条纹相机的扫描速度进行标定。可见光条纹相机 $5\ \mu\text{s}$ 窗口测得的二倍频时标信号如图 9 所示。图 9(a)为利用 AWG 输出的三个间隔 $1\ \mu\text{s}$ 的时标脉冲,在该条纹相机上 $5\ \mu\text{s}$ 档位测试的结果;图 9(b)是示波器测得的种子源输出脉冲串,2 h 内脉冲间隔平均值为 $1.00\ \mu\text{s}$,与 AWG 设计值一致。按照该条纹相机的出厂标定结果计算得脉冲间隔约为 $980\ \text{ns}$,与真实值相差约 $20\ \text{ns}$,误差约为 2% 。该方法可以简便快速地为条纹相机提供标定,从而为物理实验的开展提供了便利。

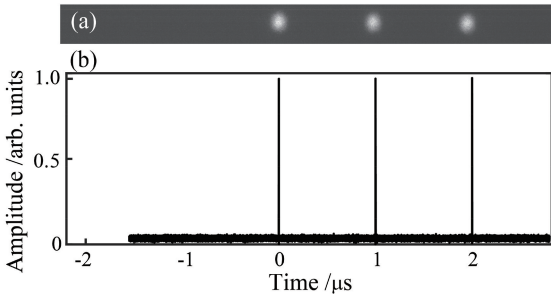


图 9 可见光条纹相机 $5\ \mu\text{s}$ 窗口测得的二倍频时标信号。
(a) 条纹相机测试结果; (b) 种子源脉冲序列
Fig. 9 2ω optic time fiducial laser signal measured by visible streak camera in $5\ \mu\text{s}$ time window.
(a) Tested result of streak camera; (b) pulse stack from seed source

2.5 电时标和电触发

除时标光信号外,时标系统还可提供用于诊断设备触发的多路高精度触发信号和电时标信号。电触发信号是通过将种子源产生的方波激光信号进行光电转换后再利用快速比较器进行幅度稳定,再经高速电放大器放大,输出快前沿的脉冲信号,用于触发诊断设备;而电时标则利用高速光电转换器件对种子源产生的短脉冲串进行光电转换,输出电脉冲序列,分束后分发出多路信号供设备使用。电触发信号和电时标信号的种子源均基于 AWG 的时分复用功能产生,时间波形、同步延时灵活可控,与主激光高精度时间同步。

图 10 为使用示波器测得的输出电时标序列,共有 10 个脉冲,其单个脉冲幅度大于 $2\ \text{V}$,脉冲宽度约为 $100\ \text{ps}$,周期为 $279.07\ \text{ps}$ 。因为电时标的种子脉冲来自 AWG,所以电时标的脉冲宽度、周期、脉冲数量等也可以基于 AWG 进行灵活调整。

使用类似测试时标光信号稳定性的方法测试电时标的稳定性,主激光信号经高速光电管进行光电转换后进入示波器,电时标信号进入示波器的另一

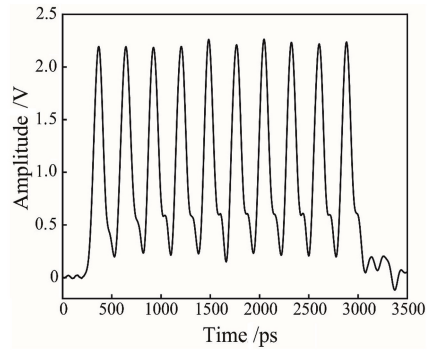


图 10 系统输出的电时标信号

个通道,使用示波器读取电时标的脉冲宽度、脉冲间隔和主激光与电时标之间的时间间隔,并进行记录,每秒记录一次,共记录 2 h,通过对测量值进行分析得到电时标信号的稳定性。测得电时标在 2 h 内的脉冲宽度抖动为 $1.21\ \text{ps}$ (RMS),脉冲间隔抖动为 $8.44\ \text{ps}$ (峰峰值), $1.05\ \text{ps}$ (RMS),接近示波器测量极限,电时标与主激光在 2 h 内的时间同步抖动为 $16.95\ \text{ps}$ (峰峰值), $3.02\ \text{ps}$ (RMS)。引起电时标信号时间抖动的原因与引起时标光信号时间抖动的原因相同,因为在电时标产生过程中使用了更多的电子器件,包括电放大器、功分器等,电子学器件引起的时间抖动更大,所以电时标的同步抖动略大于时标光信号的同步抖动。

图 11 所示为高精度同步触发信号特性,图 11(a)为脉宽为 $9\ \text{ns}$ 的同步触发信号。对于同步触发信号,通常更关注它的幅度和上升沿特性,上升沿的提高可以有效提高同步精度。如图 11(b)所示,该脉冲具有高速上升沿,上升沿持续时间约为 $161.56\ \text{ps}$,幅度约有 $6\ \text{V}$ 。对于同步触发信号来说,更关注它的同步抖动,采用与测试电时标类似的方法,主激光信号经高速光电管进行光电转换后进入示波器,同步触发信号进入示波器的另一个通道,使用示波器读取主激光与同步触发信号的时间间隔并进行记录,每秒记录一次,共记录 2 h,通过对测量值进行分析得到电触发信号的稳定性。测得同步触发信号与主激光信号在 2 h 内的时间同步抖动峰值为 $33.30\ \text{ps}$ 。影响高精度同步触发信号时间抖动的因素除了与时标光、电时标相同的因素之外还包括高速比较器的固有抖动,所以高精度触发信号的时间抖动较电时标更大。

2.6 时标系统参数汇总

神光-II 时标系统提供的时标光、电触发和电时

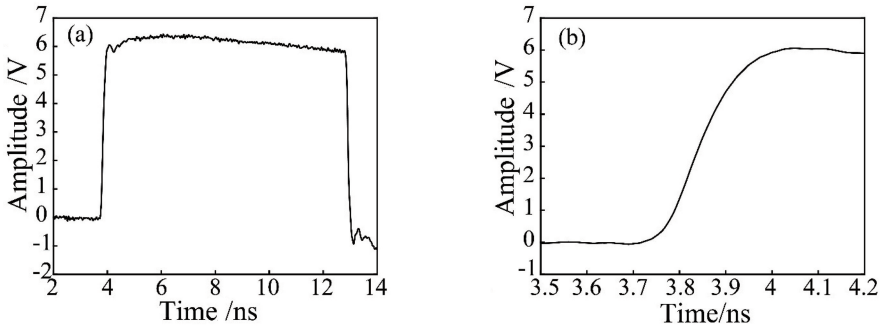


图 11 高精度同步触发信号特性曲线。(a)时间波形;(b)上升沿

Fig. 11 Characteristic curves of high-precision synchronous trigger. (a) Time-domain waveform; (b) rising edge

标信号可为物理诊断设备提供高精度时间基准。系统共输出 4 路二倍频时标光、4 路三倍频时标光、2 路四倍频时标光信号、8 路电时标信号和 2 路同步触发信号,共计 20 路信号。一套时标光、两组(每组 4 路)电时标和两路电触发信号的种子源均来源于 AWG 的任意整形输出,时间波形和延时均独立可调,同时具备更多路信号输出的扩展能力。

该系统输出时标光的最短脉宽可小于 100 ps,

脉冲间隔可宽至 1 μ s,输出子脉冲个数可随需求调整,2 h 内能量不稳定性小于 1.58%(RMS),其余关键参数如表 1 所示。该系统中时标光部分的脉冲宽度、脉冲间隔主要受 AWG 带宽和采样率、高速电光调制器和电放大器带宽的影响,能量不稳定性主要来源于固体放大,脉冲串输出能量则主要受到大芯径多模光纤束在紫外波长下破坏阈值较低和损耗较大以及非线性效应的限制。

表 1 时标系统时标光信号关键参数

Table 1 Key parameters of time fiducial laser in time fiducial system

Type of output	Wavelength λ /nm	Minium pulse width τ_{min} /ps	Pulse interval τ	Number of subpulses	Pulse energy W / μ J	Advance time		Interface type
						of pulse relative to main laser τ_d /ns	Number of distributed channel	
SHG	532	<100	200 ps-1 μ s	10	≥ 1	± 100	4	SMA fiber
THG	355	<100	200 ps-1 μ s	10	≥ 3	± 100	4	SMA fiber
FHG	266	<100	200 ps-1 μ s	10	≥ 2	about 130	2	SMA fiber/space light output

电时标和电触发信号的关键参数如表 2 所示,因为有光电转换过程的存在,电时标信号脉冲相比时标光信号会有一定程度的展宽。2 h 内电时标信号脉冲能量不稳定性为 1.10%(RMS)。电

触发信号上升沿持续时间更短可以提高同步精度,方案中利用快速比较器和高速电放大器可以输出快前沿的电触发信号,上升沿宽度小于 200 ps。

表 2 时标系统电时标和电触发信号关键参数

Table 2 Key parameters of electric time fiducial and synchronous trigger signals

Type of output	Amplitude /V	Pulse width τ_{min}	Rise time τ_r /ps	Number of subpulses	Advance time of pulse relative to main laser τ_d /ns	Number of distributed channel	Interface type
Electric time fiducial signal	≥ 2	<200 ps	<80	10	± 65	8	SMA cable
Synchronous trigger	≥ 5	>10 ns	<200	-	50-200	4	SMA cable

表 3 所示为时标光和电时标信号脉冲宽度、脉冲间隔在 2 h 内的不稳定性以及各信号与主激光在 2 h 内的同步抖动,其中部分测量值已经接近目前

测量系统的极限,这些抖动与温度变化引起的光波导折射率变化、电子学器件的固有抖动、电子设备内部时钟基准的固有抖动等有关。

表 3 时标信号的不稳定性与同步抖动

Table 3 Instability and synchronization jitter of time fiducial signals

Type of output	Pulse width τ_{width}/ps (RMS)	Pulse interval τ_{in}/ps		Jitter with main laser τ_{jitter}/ps	
		RMS	Peak	RMS	Peak
Optical fiducial signal	1.11	0.73	6.40	1.84	12.80
Electric fiducial signal	1.21	1.05	8.44	3.02	16.95

3 结 论

为了保证高功率激光装置物理实验结果测量的准确性,用与主激光同步的精密时标作为时间基准很有必要。目前,已经建成的惯性约束核聚变装置中,基本都建有与自身物理需求相匹配的时标系统。提出了一套时标光系统,与其他同类装置的时标系统相比,该系统具备输出三种不同波长时标光的能力,且包含了与时标光同源的高精度电触发与电时标。采用了 AWG 驱动电调制器产生与主激光信号同源的时标种子源的方式,提高了时间同步精度,时标光信号与主激光信号同步的时间抖动达到 12.80 ps,精简了系统结构,单个脉冲的波形和延时更易精确调节,提高了系统的输出性能。同时该时标系统为条纹相机的标定提供了一种简单易行的方法,方便了研究人员的使用。

参 考 文 献

[1] Sircombe N J, Ramsay M G, Hughes S J, *et al.* Multi-scale modelling for HEDP experiments on Orion[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 717: 012081.

[2] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, *et al.* High power glass laser research progresses in NLHPLP [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10084: 1008405.

[3] Shaughnessy D A, Gharibyan N, Moody K J, *et al.* Nuclear science research with dynamic high energy density plasmas at NIF [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 717: 012080.

[4] Casner A, Caillaud T, Darbon S, *et al.* LMJ/PETAL laser facility: overview and opportunities for laboratory astrophysics [J]. High Energy Density Physics, 2015, 17: 2-11.

[5] Caillaud T, Aloyz E, Briat M, *et al.* Recent advance in target diagnostics on the laser mégajoule (LMJ) [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9966: 996606.

[6] Zheng W G, Wei X F, Zhu Q H, *et al.* Laser performance of the SG-III laser facility [J]. High

Power Laser Science and Engineering, 2016, 4: e21.

[7] Danson C, Hillier D, Hopps N, *et al.* Petawatt class lasers worldwide[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3: e3.

[8] Goncharov V N, Regan S P, Campbell E M, *et al.* National direct-drive program on OMEGA and the National Ignition Facility [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2017, 59(1): 014008.

[9] Azechi H, Nakai M, Shigemori K, *et al.* Direct-drive hydrodynamic instability experiments on the GEKKO XII laser [J]. Physics of Plasmas, 1997, 4 (11): 4079-4089.

[10] Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, *et al.* Review on development of Shenguang-II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002. 朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.

[11] Shiraga H, Miyanaga N, Heya M, *et al.* Ultrafast two-dimensional X-ray imaging with X-ray streak cameras for laser fusion research (invited) [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(1): 745-749.

[12] Kilkenny J D, Cable M D, Clower C A, *et al.* Diagnostic systems for the National Ignition Facility (NIF) (invited) [J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(1): 288-295.

[13] Khan S F, Bell P M, Bradley D K, *et al.* Measuring X-ray burn history with the streaked polar instrumentation for diagnosing energetic radiation (SPIDER) at the National Ignition Facility (NIF) [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8505: 850505.

[14] Oertel J A, Aragonéz R, Archuleta T, *et al.* Gated X-ray detector for the National Ignition Facility [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77 (10): 10E308.

[15] Kimbrough J R, Bell P M, Bradley D K, *et al.* Standard design for National Ignition Facility X-ray streak and framing cameras [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10E530.

[16] Cao Z R, Yuan Z, Chen T, *et al.* Progress and plans of X-ray temporal and spatial diagnosis technology of

- Shengguang facilities [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(6): 065206.
- 曹柱荣, 袁铮, 陈韬, 等. 神光装置上 X 射线时空诊断技术概况与展望[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(6): 065206.
- [17] Babushkin A, Seka W D, Letzring S A, *et al.* Multicolor fiducial laser for streak cameras and optical diagnostics for the OMEGA laser system[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2869: 540-544.
- [18] Homoelle D, Bowers M, Browning D, *et al.* A compact UV timing fiducial system for use with X-ray streak cameras at NIF[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8505: 850504.
- [19] Drouet V, Prat M, Raybaut P, *et al.* LMJ timing and fiducial system: overview of the global architecture and performances [C] // 2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, April 12-16, 2015, Denver, CO, USA. New York: IEEE, 2015: 15278076.
- [20] Schiano Y, Bar E, Richard A, *et al.* Time fiducial on the LIL facility at CEA/CESTA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6584: 65840N.
- [21] Zhang R, Tian X C, Zhou D D, *et al.* Research of time fiducial laser and probe laser of velocity interferometer system for any reflector for Shengguang-III laser facility[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 024203.
- 张锐, 田小程, 周丹丹, 等. 神光-III 激光装置时标激光和任意反射面速度干涉仪探针光源产生技术[J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 024203.
- [22] Lian F Q, Fan Z W, Bai Z A, *et al.* A Nd:YAG regenerative amplifier seeded by 1064 nm picosecond fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63 (13): 134207.
- 连富强, 樊仲维, 白振岍, 等. 基于 1064 nm 光纤皮秒种子源的 Nd:YAG 再生放大器[J]. *物理学报*, 2014, 63(13): 134207.
- [23] Cheng M Y, Wang Z H, He H J, *et al.* Efficient third harmonic generation of 355 nm picosecond laser pulse [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68 (12): 124205.
- 程梦尧, 王兆华, 何会军, 等. 高效率三倍频产生 355 nm 皮秒激光的实验研究[J]. *物理学报*, 2019, 68(12): 124205.
- [24] Marciante J R, Bittle W A, Zuegel J D. Subpicosecond jitter from a precision optical triggering and timing system without active stabilization[C] // 2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2006: JWB28.
- [25] Kucharski D, Kornegay K T. Jitter considerations in the design of a 10-Gb/s automatic gain control amplifier [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(2): 590-597.
- [26] Kurosawa N, Kobayashi H, Kogure H, *et al.* Sampling clock jitter effects in digital-to-analog converters [J]. *Measurement*, 2002, 31 (3): 187-199.
- [27] Wang Y, Zhu J M, Miao J Y. Correction of time base error for high speed sampling oscilloscope[C] // 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, August 16-19, 2013, Harbin, China. New York: IEEE, 2013: 88-91.