

用于神光Ⅲ原型装置精密物理实验的时标激光系统

林宏奂[†] 蒋东宾 王建军 李明中 张锐 邓颖 许党朋 党钊

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2009年3月16日收到; 2010年3月24日收到修改稿)

用与大型激光装置输出主激光脉冲同步的梳状脉冲作为时间标尺, 标定强激光与靶丸作用的过程, 对强场物理实验测量及模拟实现精密化具有重要的意义. 报道了一种电光调制结合光学方法产生与主激光精确同步的多频率时标激光脉冲的光纤系统. 采用电光调制产生 150 ps 快光脉冲, 通过光纤堆积产生 1053 nm 的基频梳状脉冲信号, 经过放大和倍频输出 527 和 351 nm 的绿光及紫外倍频梳状脉冲激光. 系统可稳定地为神光Ⅲ原型装置提供精密物理实验所必需的各种频率的时标激光, 并且可根据物理实验需要灵活地调整梳状脉冲间隔和幅度, 具有很好的适应性.

关键词: 激光聚变驱动器, 时标光, 光纤激光系统

PACS: 52.57.-z, 42.60.By, 42.55.Wd

1. 引言

在激光驱动的惯性约束聚变物理实验中, 一般采用示波器和分辨率小于 20 ps 的光学条纹相机(可见波段)和 X 光条纹相机(紫外波段)测量高功率激光脉冲作用于靶丸的物理过程的时间分辨图像, 如激光辐射的吸收过程、激光等离子体不稳定性与驱动紫外(UV)激光的相互关系、强激光烧蚀物质的速率等^[1,2]. 另外, 采用条纹相机测量高功率激光脉冲与靶丸作用过程中各阶段相对于主激光脉冲的时间也是至关重要的, 这对通过数值方法精密模拟该过程非常重要.

然而, 目前神光Ⅲ原型激光装置采用与主激光同步电脉冲触发示波器和条纹相机的方式由于电同步脉冲与主激光的同步晃动大(同步晃动均方根(RMS)大于 100 ps), 且在强电磁环境下易受干扰, 测得的物理过程的起始时刻与主激光时间关系相对模糊, 同时也模糊了高功率激光脉冲与靶丸作用过程中各阶段相对于主激光脉冲的时间关系, 影响了物理实验及数值模拟的精密性, 严重制约了神光Ⅲ原型装置提供物理实验的能力.

如果采用与主激光精确同步的激光脉冲作为

时间参考提前主激光到测试设备, 就可以很好地解决上述的问题^[1-4]. 如美国劳伦斯利弗莫尔实验室(LLNL)的 OMGA 装置和法国的 LMJ 激光装置. OMGA 装置的时标激光由与激光驱动器同步的另一固体激光器产生, 但这种方式占用大量空间, 且时标脉冲间的时间间隔不可调整, 具有应用的局限性^[5,6]. LMJ 激光装置采用与主激光同步的中心波长 405 nm 的 LD 输出脉宽 65 ps 的单脉冲作为时标. 这种方式时标激光波长单一, 输出只有单脉冲, 不适用可见至红外波段 ns 打靶脉冲物理过程的诊断需求^[7].

根据神光Ⅲ原型装置精密物理实验的需要, 结合光纤激光系统可编程控制、分束可靠、传输灵活稳定、稳定可靠、体积小、对环境无特殊要求的优点, 我们提出了一种电光调制结合光学方法产生时标光脉冲的光纤系统, 通过调制产生与主激光脉冲精密同步的 150 ps 脉冲, 输入光纤堆积器^[8]产生 5 路梳状时标脉冲, 经过放大倍频后为神光Ⅲ原型装置提供 1053, 527 和 351 nm 的时标. 该系统输出稳定, 已成功应用于神光Ⅲ原型装置的物理实验, 取得了很好的效果, 实现了物理实验精密化及神光Ⅲ原型装置性能的巨大提升. 目前, 国内其他大型激光装置还没有这样的时标激光脉冲产生系统. 相比

[†] E-mail: happylin2003@yeah.net

于OMGA装置和LMJ装置的时标系统,系统又具有稳定和输出灵活的优点.

2. 系统结构及原理

2.1. 光时标实现物理实验精密化的原理

采用时标激光系统实现物理实验精密化的原理如图1所示. 神光III原型装置光纤前端^[9]产生的整形激光脉冲被后续系统放大后通过倍频转换后聚焦到靶点与靶丸作用产生各种包含物理信息的信号. 光学条纹相机、X光条纹相机和探测器分别测量不同波段的物理信号. 如果没有时间基准,就不能确定测得各种物理量的相互时间关系. 以前采用基准电信号触发各种测量设备,其本身的晃动足以

模糊这种相互关系,同时电信号在强电磁环境下极易受到干扰,这样严重影响了物理实验的精确性. 采用光纤前端系统产生梳状激光短脉冲,通过光纤分束,一路被光电转换提供给示波器,另一路通过放大、倍频产生351和527nm的梳状短脉冲耦合进入传输光纤直接输入光学和X光条纹相机. 这样,激光装置打靶时,各种设备在测得物理信号的同时也测得光时标信号. 由于光时标与主激光精密同步,不存在触发晃动,覆盖了所有测量波段,且不受干扰,根据光时标信号传输的延迟关系就可很方便地确定各种物理量的精确时序关系. 另外,条纹相机时间扫描存在非线性响应问题,根据梳状脉冲绝对时间间隔可以判断条纹相机的工作状态,同时精确测算物理过程的速率,较只用条纹相机定标更加精密^[5].

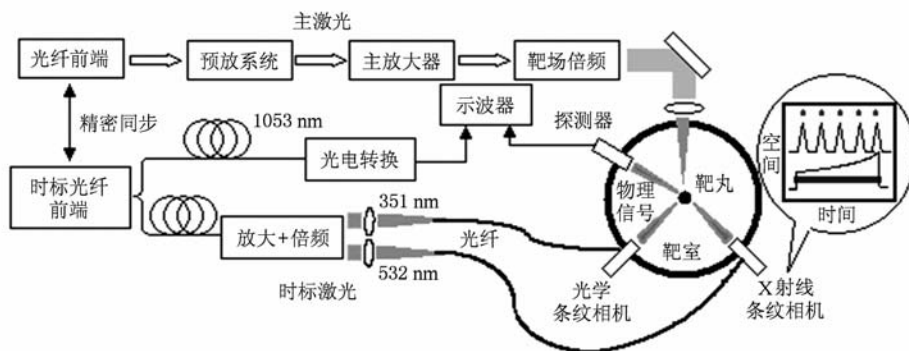


图1 光时标的原理

2.2. 时标激光的产生

时标激光脉冲产生系统结构如图2所示. 掺镱单纵模光纤振荡器输出20mW的1053nm连续激

光,经偏振控制器输入幅度调制器. 同步系统输出一路同步脉冲信号触发快脉冲发生器产生150ps的快电脉冲信号加在幅度调制器上调制连续激光产生150ps的激光脉冲. 150ps的脉冲经过一级光

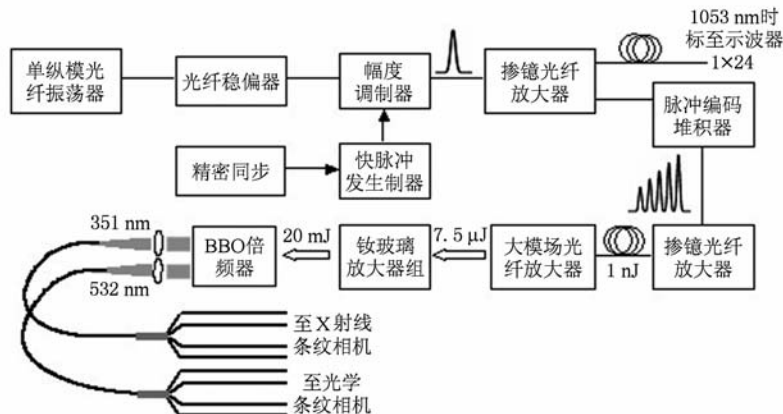


图2 时标激光脉冲产生系统原理

纤放大器放大后通过 20:80 光纤分束器分成两路脉冲:其中一路脉冲又经过 50 m 光纤传输至靶场附近通过 1×24 光纤分束器分束传输至光电转换器转换成电信号为测量示波器提供基频光时标;另一路脉冲作为基元脉冲输入 5 脉冲堆积器^[8],产生时间间隔为 500 ps 的梳状脉冲.梳状脉冲经过放大,同样经过 50 m 光纤传输至靶场附近,再输入大模场光纤放大器放大至 10 kW(脉冲总能量为 7.5 μJ,单脉冲能量为 1.5 μJ).光纤系统中,偏振控制器采用取样方式自动检测输入连续激光的偏振态,并调整其偏振状态使输入激光的偏振方向与幅度调制器的偏振方向一致,提高了系统输出的稳定性^[9,10].

大模场放大器输出接准直器,将大模场光纤输出的信号准直成直径由 1.5 mm 的光束输入钨玻璃放大器组和 BBO 晶体构成的倍频光产生系统.由于大模场放大器已经将脉冲放大至 10 μJ 量级,已经不需要采用 Nd:YLF 高增益放大器提供 10⁶ 级增益的放大^[11],而采用钨玻璃棒放大器组即可将脉冲放大至 20 mJ.20 mJ 的 1053 nm 脉冲经过 BBO 晶体构成的倍频器倍频产生 10 和 3.2 mJ 的 527 及 351 nm 激光脉冲,通过透镜聚焦耦合进入芯径为 500 μm 的石英光纤分束器传输 5 m 分别为 4 台光学条纹相机和 4 台 X 光条纹相机提供可见光和 UV 时标.

2.3. 梳状脉冲的产生

全光纤梳状脉冲产生系统中脉冲堆积器是产生梳状脉冲的关键.如图 3 所示,150 ps 的脉冲经过分束器并通过精确延时进入 2 个 3 路堆积模块.在 3 路堆积模块中,各路脉冲经过可变延时器延时(延时 250 ps)和可变光衰减反射镜后被反射再次通过可变延时器和分束器合成 3 路梳状脉冲.反射的 3 路脉冲延时 1.5 ns 后经过分束器合成间隔 500 ps 的 6 路梳状脉冲.梳状脉冲由单个 150 ps 脉冲合成,其上升沿小于 100 ps.单路脉冲幅度的可调谐精度可由编程光衰减反射镜决定,为 40 dB,而梳状路

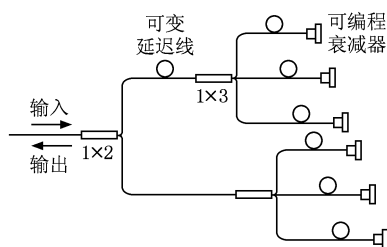


图 3 光纤脉冲堆积器结构

脉冲间的间隔可由可编程光纤延迟线调整(精度达 1 ps).因此,这种方法可提供幅度和间隔可变的梳状脉冲,可以根据放大过程中增益饱和程度的不同修正梳状脉冲的畸变,同时也可根据物理诊断的需要调节脉冲间的间隔.由于目前只需要 5 路梳状脉冲,因此将最后一路脉冲衰减至零.

3. 系统输出及物理实验结果

采用 LeCroyWavepro760Zi 示波器(带宽为 6 GHz,采样率为 40 GS/s)和 SD43 光电转换器(带宽为 8 GHz)测得的光纤系统输出的梳状脉冲如图 4 所示.单脉冲宽度为 150 ps,脉冲间隔为 500 ps.由于光纤堆积器各路损耗不能控制一致,在衰减器为衰减零时,输出的各路脉冲的幅度不一致.通过调节光纤堆积器中衰减器的衰减倍数,使各路脉冲幅度递增以预补偿后续放大过程中增益饱和带来的畸变,使其倍频后各路脉冲的幅度保持一致.图中内插图为基元脉冲,也是 1053 nm 基频光时标.

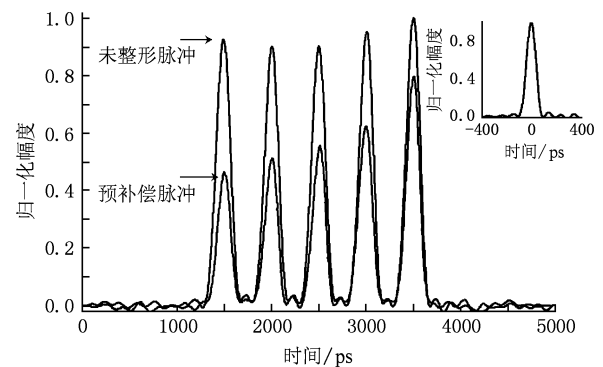


图 4 光纤系统输出的梳状脉冲 插图为 150 ps 基元脉冲

图 5(a)–(c)为神光 III 原型装置靶场 X 光条纹相机同一扫描屏下测得的 UV 光时标信号及神光 III 原型装置主激光(脉宽为 300 ps)与金球靶作用后发射的 UV 光脉冲,图中纵坐标为光场分布,横坐标为时间分布.从图 5(b)可以看出,经过 500 μm 石英光纤多模传输后,时标脉冲发生展宽,但间隔不变,仍为 500 ps,而 UV 时标光近场分布接近于高斯分布,如图 5(b).在主脉冲宽度更宽时(如神光 III 原型装置的工作脉宽 1 和 3 ns),通过对比 X 光条纹相机同一扫描屏下 UV 时标光脉冲波形与主脉冲波形,可以标定主脉冲与靶瓦作用时辐射的速率等.采用带宽为 12 GHz,采样率为 40 GS/s 的示波器测量了时标脉冲与主激光脉冲的同步晃动:测得两者间的

峰-峰晃动为 40 ps (即 ± 20 ps), 而 RMS 值小于 6 ps, 完全满足精密物理实验小于 10 ps (RMS) 晃动的要求. 图 5(d) 为可见光条纹相机同一扫屏下测得

的 527 nm 的时标信号及神光 III 原型装置主激光与金球靶作用后发射的光脉冲, 图中纵坐标为时间分布, 横坐标为光谱.

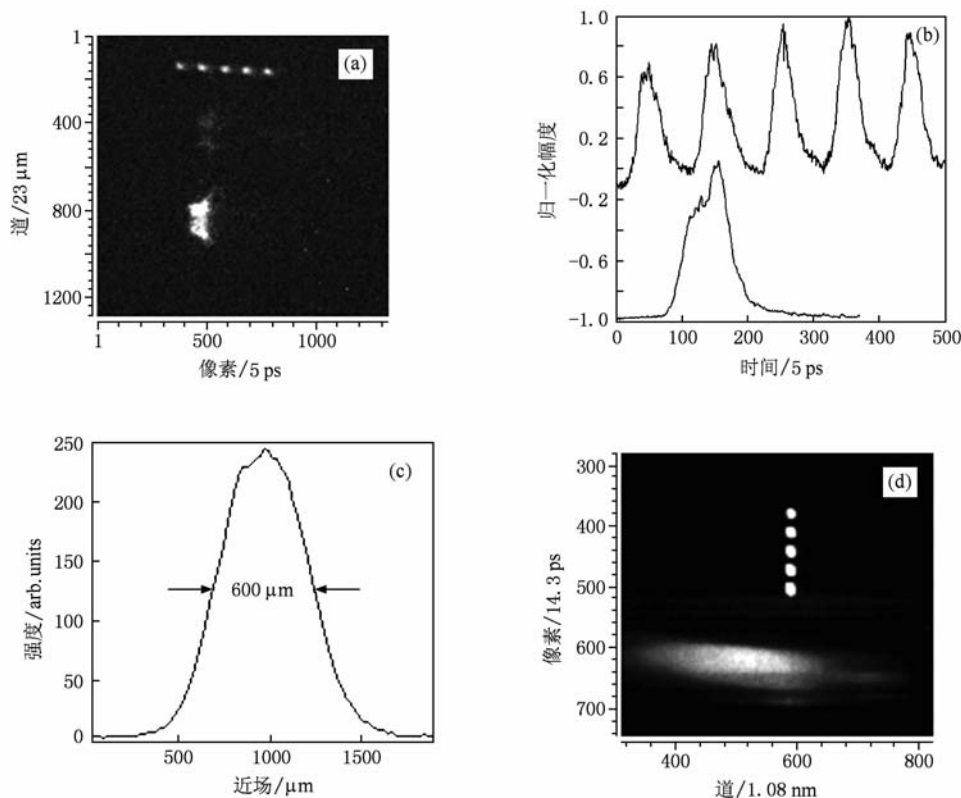


图 5 X 光条纹相机测得的 UV 光时标信号及可见光条纹相机测得的 527 nm 时标信号 (a) 金球靶 UV 光及 UV 光时标信号, 时间扫描从左至右; (b) UV 光时标信号及金球靶 UV 光时间波形; (c) X 光条纹相机测得的 UV 时标光近场; (d) 可见光条纹相机测得的 527 nm 时标信号及主脉冲信号, 时间扫描从下至上

4. 结 论

研制了一种电光调制结合光学方法产生时标光脉冲的系统, 可产生与主激光高精度同步的基频、二倍频及三倍频时标脉冲, 通过光纤分束传输与多台示

波器、X 光条纹相机及可见光条纹相机连接, 建立了激光驱动的惯性约束聚变物理实验中测量所得各波段信号与主激光信号的绝对时间关系, 实现了强场物理实验的精密化. 目前, 该系统已成功应用于神光 III 原型装置, 完成与主激光百余发次联机发射实验, 实现了神光 III 原型激光装置物理实验能力大的提升.

- [1] Nilson D G, Macgowan B J, Cambell E M, Modecki H 1986 *Rev. Sci. Instrum.* **57** 2187
- [2] Huen T 1987 *Proc. SPIE* **832** 63
- [3] Jaanimagi P A, Dasilva L, Gregorg G G, Hestdalen C, Kiiikka C D, Kotmel R, Richardson M C 1986 *Rev. Sci. Instrum.* **57** 2189
- [4] Mens A, Gontier D, Giraud P, Thebault J P 1990 *Proc. SPIE* **1358** 878
- [5] Babushkin A, Seka W, Letzring S A 1997 *Proc. SPIE* **2869** 540
- [6] Okishev A V, Roides R G, Begishev I A, Zuegel J D 2006 *Proc. SPIE* **6053** 60530J-1

- [7] Schiano Y, Bar E, Richard A, Feral C, Darquey P 2007 *Proc. SPIE* **6584** 65840N-1
- [8] Lin H H, Sui Z, Wang J J, Zhang R, Li M Z 2007 *Acta Optica Sinica* **27** 466 (in Chinese) [林宏奂、隋展、王建军、张锐、李明中 2007 *光学学报* **27** 466]
- [9] Lin H H, Wang J J, Sui Z, Li M Z, Chen G H, Ding L, Tang J, Deng Q H, Luo Y M, Dong Y F, Li F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1771 (in Chinese) [林宏奂、王建军、隋展、李明中、陈光辉、丁磊、唐军、邓青华、罗亦明、董一方、李峰 2008 *物理学报* **57** 1771]

- [10] Lin H H, Lu Z H, Wang J J, Chen D H, Deng Q H, Li M Z, Li X Q 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 1461 (in Chinese)[林宏奂、卢振华、王建军、陈德怀、邓青华、李明中、李小群 2008 强激光与粒子束 **20** 1461]
- [11] Luo Y M, Li M Z, Tang J, Wang J J, Fu X J, Jia W, Deng Q H 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** (S0) 45 (in Chinese)[罗亦鸣、李明中、唐 军、王建军、傅学军、贾伟、邓青华 2005 强激光与粒子束 **17**(S0) 45]

Laser time fiducial for precise physical experiment in Shenguang-III prototype facility

Lin Hong-Huan[†] Jiang Dong-Bin Wang Jian-Jun Li Ming-Zhong Zhang Rui
Deng Ying Xu Dang-Peng Dang Zhao

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 16 March 2009; revised manuscript received 24 March 2010)

Abstract

Using comb laser pulses synchronized with the main pulse output by large laser facility as time fiducial to scale the reaction process between high power laser pulse and target is very important for the realization of precise measurement and simulation in the intense field experiment. We demonstrate a fiber multiharmonic time fiducial laser pulse generation system using optic-electric modulation and optical pulse stacking. A unit optical pulse with a width of 150 ps generated by modulation was stacked in a fiber stacker to form a 1053 nm comb pulse. The pulse was then amplified and frequency-converted to generate green (527 nm) and UV (351 nm) fiducials. The system can stably provide Shenguang-III prototype facility with multi-frequency laser time fiducials which is essential for the precise physical experiment. In addition, the system is highly adaptive since it can generate fiducial signals with variable pulse intervals and amplitudes flexibly according to the requirements of different physical experiments.

Keywords: laser fusion driver, time fiducial, fiber laser system

PACS: 52.57.-z, 42.60.By, 42.55.Wd

[†] E-mail: happylin2003@yeah.net