

文章编号: 0258-7025(2008)01-0031-04

整形激光脉冲与激光探针同步技术

王江峰 朱海东 李学春 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 实现了应用于神光 II 装置中的高精度整形激光脉冲与激光探针同步方案。在该方案中,激光探针经硅光导开关进行光电转换之后作为激光脉冲整形单元的触发信号,使激光脉冲整形单元,输出与激光探针同步的整形激光脉冲。为了降低由于触发信号不稳定引起的抖动,在光电转换之前放大激光探针,以调整激光脉冲整形单元触发信号的幅度。在神光 II 装置中实现了整形激光脉冲与激光探针小于 4.5 ps(均方根)的时间同步精度。

关键词 激光技术;时间同步;激光探针;脉冲整形

中图分类号 TL 65 文献标识码 A

Time-Synchronization Technique between Shaped Optical Pulse and Probe Optical Pulse

Wang Jiangfeng Zhu Haidong Li Xuechun Zhu Jianqiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A scheme of high-accuracy time-synchronization between a shaped optical pulse and a probe optical pulse has been developed and used in the Shenguang II facility. In this scheme, the probe optical pulse is firstly photoelectrically converted by the Si photoconductive switch and then used to trigger the laser pulse-shaping subsystem, so that laser pulse-shaping subsystem produces a shaped optical pulse synchronized with the probe optical pulse. In order to decrease time jitter induced by amplitude fluctuation of the triggering signal, the probe optical pulse is amplified to adjust amplitude of the triggering signal before photoelectric conversion. The synchronization root-mean-error less than 4.5 ps between the two pulses has been achieved with this scheme.

Key words laser technique; time synchronization; probe optical pulse; pulse shaping

1 引言

在惯性约束聚变(ICF)装置的打靶实验中,通常需要对等离子体各种参数进行诊断,了解等离子体中发生的各种现象,研究其中详细的物理过程^[1]。激光探针具有很高的时间分辨率,可在短时间内捕获等离子体像、给出重要的物理信息,是等离子体冕区物理诊断不可缺少的工具^[2]。为了准确地获取实验信息,避免等离子体中谐波分量的干扰,激光探针与打靶激光必须具有准确的时间同步关系。

惯性约束聚变装置前端系统输出的低功率整形激光脉冲通过多级钽玻璃放大器放大,形成打靶激光。前端系统激光脉冲整形单元能够输出特定域

波形的整形激光脉冲,预补偿在放大过程中出现的由于饱和增益等原因引起的波形失真^[3,4]。本文详细报道了神光 II 装置的同步方案,利用硅光导开关,使激光探针直接控制激光脉冲整形单元输出整形激光脉冲,实现了纳秒级整形激光脉冲与脉宽 83 ps 的激光探针小于 4.5 ps(均方根)的时间同步精度,满足了神光 II 装置对整形激光脉冲与激光探针同步精度的要求。

2 激光脉冲的同步

同步方案与激光脉冲整形技术息息相关。目前,激光脉冲整形主要使用单纵模长脉冲削波方案,

收稿日期:2007-05-14; 收到修改稿日期:2007-09-04

基金项目:国家 863-416 计划资助项目。

作者简介:王江峰(1981—),男,陕西人,博士研究生,主要从事高功率固体激光器前端系统中再生放大器研究。

E-mail: wajfeng@163.com

导师简介:李学春(1972—),男,吉林人,研究员,博士,主要从事激光技术与光纤应用研究。E-mail:lixuechun@siom.ac.cn

在美国的 OMEGA 装置^[5]和我国的神光 II 装置^[6]中,都采用了基于波导调制器的单纵模长脉冲削波方案。该方案中,激光脉冲整形单元使用特定电压波形的整形电脉冲驱动波导调制器,其输出为^[7]

$$I_o(t) = I_i(t) \sin^2 \left[\frac{\pi V_e(t)}{2V_\pi} \right], \quad (1)$$

式中 $I_o(t)$ 为整形激光脉冲, $I_i(t)$ 为输入激光脉冲, $V_e(t)$ 为整形电脉冲, V_π 为波导调制器半波电压。

在 OMEGA 装置中,使用一电信号同时控制激光探针和整形激光脉冲的输出,实现了两者之间 10 ps(均方根)同步精度^[8]。38 MHz 正弦电信号驱动锁模激光器输出脉宽为百皮秒的激光探针,同时,该正弦信号的一部分转化为方波信号,作为整形电脉冲发生器的触发信号。由于具有门触发特性,它将在正弦信号零点被触发,输出整形电脉冲,波导调制器将输出整形激光脉冲。通过这种方式,实现了整形激光脉冲与激光探针之间的同步,同步精度为

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_{\text{CWML}}^2 + \Delta t_{\text{con1}}^2 + \Delta t_{\text{tri}}^2 + \Delta t_{\text{shap}}^2}, \quad (2)$$

式中 Δt_{CWML} 为驱动锁模激光器正弦信号与锁模激光器输出激光脉冲之间的时间晃动, Δt_{con1} 为正弦信号转化过程中引入的时间晃动, Δt_{tri} 为触发整形电脉冲发生器过程中引入的时间晃动, Δt_{shap} 为激光脉冲整形单元内部引入的时间晃动。

在神光 II 装置中,为了减少影响同步的因素(图 1),通过硅光导开关,激光探针直接触发整形电脉冲发生器,控制整形激光脉冲的输出。两种脉冲之间的时间间隔晃动为

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_{\text{con2}}^2 + \Delta t_{\text{tri}}^2 + \Delta t_{\text{shap}}^2}, \quad (3)$$

式中 Δt_{con2} 为硅光导开关进行光电转换时引入的时间晃动,由于 Δt_{con2} 很小,可以忽略不计,所以 $\Delta t \approx \sqrt{\Delta t_{\text{tri}}^2 + \Delta t_{\text{shap}}^2}$ 。相对于 OMEGA 装置,该方案消除了两项影响同步的因素,能够实现更高的同步精度。

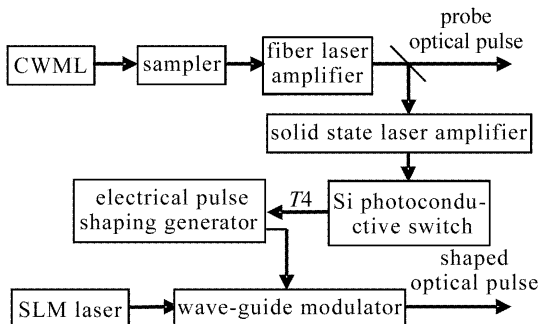


图 1 同步方案

Fig. 1 Scheme of synchronization

3 同步方案

实验方案(图 1)中,通过选单单元对来源于锁模激光器(CWML, Time-Bandwidth, G-100-YLF)的锁模激光脉冲选单产生激光探针,然后,经过分束,一束激光探针注入后续放大器组中放大,并进行等离子体探测。另一束激光探针被硅光导开关转换为电脉冲 T_4 , 触发整形电脉冲发生器,控制波导调制器对单纵模连续激光(SLM laser)削波,输出与激光探针同步的整形激光脉冲。激光放大器保证了电脉冲 T_4 的大小能够触发整形电脉冲发生器,避免直接放大 T_4 而引入时间晃动。

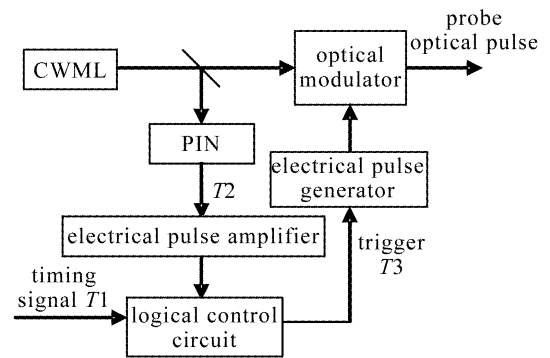


图 2 选单单元结构

Fig. 2 Diagram of the sampler that samples the mode locked laser pulse train

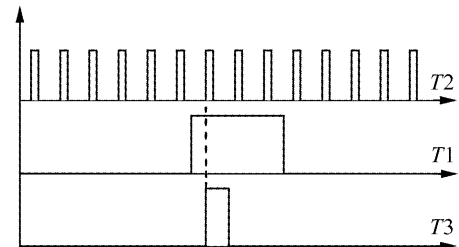


图 3 信号 T_1, T_2 与 T_3 的时间关系示意图

Fig. 3 Schematic of time relation between T_1, T_2 and T_3

锁模激光器输出 70 MHz 的锁模激光脉冲,激光脉冲时间宽度 83 ps,工作波长 1053 nm。选单单元(图 2)以神光 II 总控时钟信号 T_1 作为选单信号,对锁模激光脉冲序列选单,获取与总控时钟信号重复频率相同的激光探针。激光脉冲序列经过 3 dB 分束,其中一束光照射 PIN 探头,输出电脉冲 T_2 ;另一束光导入电光调制器,并由电脉冲发生器驱动电光调制器,输出激光探针。放大电路将信号 T_2 从 200 mV 放大至 4 V(大于晶体管-晶体管逻辑电路(TTL)触发电平),保证能够触发时钟逻辑控制电路。该电路的作用和一个与门类似,能够通过 T_1 与 T_2 获得选单同步信号 T_3 ,图 3 显示了信号 T_1 ,

T_2 与 T_3 的时间关系示意图。同步信号 T_3 触发电脉冲发生器,生成合适的方波电脉冲,驱动电光调制器。调整电脉冲发生器输出电脉冲的延时和脉宽,保证抽样单元能够完整地输出脉宽 83 ps 的激光探针。

由于激光探针存在一定的波动,电脉冲 T_4 幅值也会在一定范围内变动,如图 4 所示,它触发整形单元时将引入时间晃动

$$\Delta t_{\text{tri}} = V_{\text{tri}} \frac{t_{\text{rise}}}{V_{\text{map}}} \left(\frac{1}{V_{\text{map}}/\Delta V_{\text{map}} - 1} \right), \quad (4)$$

式中 V_{map} 为电脉冲 T_4 的幅值, ΔV_{map} 为电脉冲 T_4 幅值的波动范围, t_{rise} 为 T_4 的上升沿时间, V_{tri} 为整形单元的触发电平 (3.4 V)。 t_{rise} 大约为 200 ps, 由探针激光时间波形和硅光导开关的响应时间决定,一般不随着 V_{map} 的变化而变化。由此可见, T_4 幅值越高,上升沿斜率越大, Δt_{tri} 越小,对同步的影响越小。

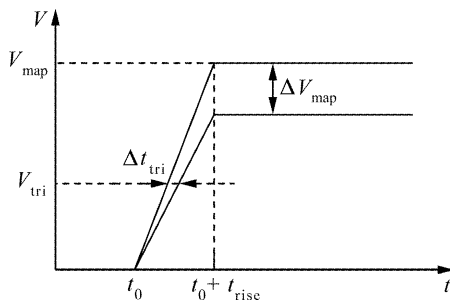


图 4 电脉冲 T_4 幅值波动引起的时间晃动 Δt_{tri}

Fig. 4 Time jitter Δt_{tri} caused by amplitude fluctuation of electrical pulse T_4

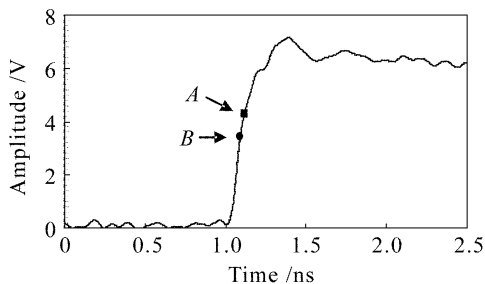


图 5 硅光导开关的输出信号 T_4 , 点 B 对应电压 3.4 V

Fig. 5 Output voltage T_4 from the Si photoconductive switch, and the voltage at point B is 3.4 V

由图 5 可以看出,电脉冲 T_4 前沿存在拐点 A , 拐点 A 以下上升沿斜率最大。为了保证尽可能好的同步性能,降低电脉冲 T_4 幅值波动的影响,减小 Δt_{tri} ,一方面,保证拐点 A 电压大于触发电平 (B 点),使触发点在 T_4 信号上升沿斜率最大段;另一方面, T_4 需要达到尽可能高的幅值,以获得更高的上升沿斜率。实验中,使用四程固体放大器放大激光探针,

提高 T_4 信号的幅度。 T_4 信号的幅值为 7.14 V,幅值波动为 10%,引入时间晃动 $\Delta t_{\text{tri}} < 10$ ps。

4 实验结果

使用 3 dB 光纤耦合器将整形激光脉冲与激光探针耦合进同一根光纤并通过光纤放大器和固体激光放大器放大,方便使用条纹相机测量两个脉冲之间时间间隔的变化(图 6)。为了提高条纹相机显示分辨率,整形激光脉冲设计为脉宽约 100 ps 的近高斯时域波形激光脉冲。同时,调整 3 dB 耦合器输入端的光纤长度,改变整形激光脉冲与激光探针之间的时间间隔,保证两个脉冲能够同时被条纹相机测量及显示,并在条纹相机显示端被区分开来。在测量过程中,测量两个激光脉冲峰顶之间的时间间隔变化,测量结果显示,两个激光脉冲峰顶时间间隔为 269 ps,统计 1 h,两个脉冲时间同步精度小于 4.5 ps (均方根)。相对于 OMEGA 装置,神光 II 装置同步方案消除了 Δt_{con1} 与 Δt_{CWML} 对同步精度的影响。实验证明,该方案具有更好的时间同步精度。

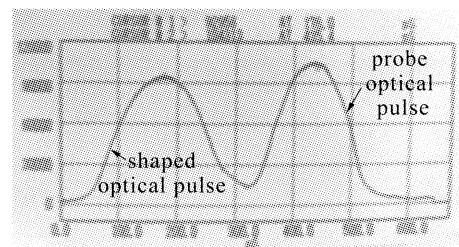


图 6 整形激光脉冲与激光探针之间时间间隔的测量

Fig. 6 Measured time interval between shaped optical pulse and probe optical pulse

5 结论

使用锁模激光器作为激光探针的光源,使用电光调制器对其选单,得到激光探针。利用激光放大器放大激光探针,照射硅光导开关,其输出作为激光脉冲整形单元的触发信号,以此建立整形激光脉冲与激光探针的时间同步关系,实现了小于 4.5 ps (均方根) 的同步精度,满足了神光 II 装置对整形激光脉冲与激光探针时间同步精度的要求。

参 考 文 献

- 1 Zheng Zhijian, Ding Yongkun, Ding Yaonan *et al.*. Recent progress and application of diagnostic technique in laser fusion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11): 1073~1078
郑志坚,丁永坤,丁耀南等. 激光-惯性约束聚变综合诊断系统 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(11): 1073~1078

- 2 Qin Xingwu, Yuan Xiaodun, Huang Jin *et al.*. Ps laser probe for laser plasma diagnosis [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(10):1274~1276
秦兴武,袁晓东,黄进等. 用于等离子体诊断的 ps 激光探针[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(10):1274~1276
- 3 Chu Xiaoliang, Zhang Bin. Study on the propagation properties of the ultrashort pulse in the amplified medium [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):641~644
楚晓亮,张彬. 超短脉冲在放大介质中传输特性研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6):641~644
- 4 Wang Yanhai, Wang Jiangfeng, Li Xuechun. Laser pulse shaping and modification techniques in front-end of high-power laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):477~481
王艳海,王江峰,李学春. 高功率激光装置前端系统激光脉冲的时间整形及修正技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):477~481
- 5 Mark D. Skeldon. Optical pulse-shaping system based on an electro-optic modulator driven by an aperture-coupled-stripline electrical-waveform generator [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10):2423~2426
- 6 Gao Yunkai, Jiang Yuntao, Li Xuechun. Laser pulse-shaping system based on aperture-coupled striplines [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1619~1622
高云凯,蒋运涛,李学春. 基于孔径耦合带状线的激光脉冲整形系统[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12):1619~1622
- 7 Zhao Wenyi, Jin Guoliang, Ying Zaisheng *et al.*. Modeling and optimal design of Mach-Zehnder modulators by the finite-difference beam propagation method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(2):156~161
赵文怡,金国良,应再生等. 基于有限差分束传播法的 Mach-Zehnder 型波导光电调制器的模拟设计[J]. *光子学报*, 1998, **27**(2):156~161
- 8 M. D. Skeldon. A high-bandwidth electrical waveform generation based on an aperture coupled stripline [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(9):3559~3566

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

《中国激光》编辑部