2015年12月

文章编号: 2095-4980(2015)06-0971-05

基于级联光电的 ns 激光脉冲高对比度波形测量

董 军,孙志红,卢宗贵,彭志涛*,夏彦文,元浩宇,张 波,刘 华,吕嘉坤,唐 军

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要:为满足激光驱动惯性约束聚变(ICF)点火中高对比度整形脉冲波形测试的需求,基于 多脉冲波形拼接的级联光电探测法,在神光 III 主机装置上开展了 ns 高功率激光脉冲波形高对比度 测量的实验研究。利用具有截止饱和特性的超快光电探测器,在实验中对凹形脉冲深度进行多通 道波形测试。实验结果显示,经过多脉冲拼接得到的凹形脉冲底部具有 350:1 的对比度,远大于单 通道单脉冲波形 30:1 的对比度。

关键词:级联光电探测;对比度;脉冲;波形拼接 中图分类号:TN247 **文献标识码:**A **doi**: 10.11805/TKYDA201506.971

High-contrast measurement for ns high-power laser pulse based on cascaded photodetection

DONG Jun, SUN Zhihong, LU Zhonggui, PENG Zhitao^{*}, XIA Yanwen, YUAN Haoyu, ZHANG Bo, LIU Hua, LV Jiakun, TANG Jun

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For the requirements of the measurement of the high-contrast shaped pulse Inertial Confinement Fusion(ICF) based on the cascaded photodetection of multiple pulses, experimental research on high-contrast measurement for ns high-power laser pulse is developed at SG-III laser system. Using the ultra-fast photodetector, the bottom of a concave pulse is measured through multi-channels in experiment. The experimental results show that the concave pulse obtained by the multi-pulses joint is of the contrast of 350:1 better than 30:1 obtained through single channel.

Key words: cascaded photodetection; contrast; pulse; waveform joint

在激光驱动的惯性约束聚变(ICF)中,点火过程是由强激光在与靶作用过程中产生的冲击波对靶丸进行压缩, 当作用区域的温度和密度达到适当条件时,点火即发生,因此,冲击波在ICF的压缩阶段起主导作用^[1-3]。但使用 单一冲击波,不论所施加的激光强度有多大,最大压缩限制在4的因子内。为获得更高的压缩因子、较小的所需 能量,必须通过一个连续多重的冲击波执行等熵压缩来实现。连续多重冲击波可利用整形的多台阶激光脉冲产生, 使得靶表面的压力逐渐增加,每次产生的冲击强度就会增加,从而达到有效压缩的目的^[4-7]。

根据点火物理需求,激光驱动器产生的是一个纳米级的、多台阶、高对比度的三倍频激光脉冲,在中心点火方案中,三倍频整形激光脉冲前沿台阶与峰值间的对比度根据不同的方案,最高达到150:1^[8-9],而在冲击点火方案中,三倍频整形激光脉冲前沿台阶与峰值间的对比度更达到400:1。要获得这种多台阶、高对比度的脉冲整形能力,一种适应多台阶纳秒级整形脉冲,且具有更高对比度的精密脉冲波形测量手段是必不可少的。基于上述需求,提出基于脉冲波形拼接的级联光电探测技术来实现纳秒级、高对比度激光脉冲时间波形的精密测量。

1 测量原理

激光脉冲波形高对比度测量工作原理如图1所示。通过级联具有不同衰减配置的衰减器,将一束激光脉冲分为多路脉冲,利用级联光电转换器件将多路激光脉冲转换为电信号,由于所使用的光电转换模块具有截止饱和特

性,对各路电信号在幅度上进行限幅,之后输入至示波器多个具有不同档位的通道。由于不同档位通道具有不同 的电压量程和分辨能力,电压量程越小,波形幅度分辨能力越强,获取微弱信号的能力越强。因此示波器各通道 输出波形包含了原输入光脉冲在不同幅度分辨尺度下的信息。通过示波器多通道采集以及多个通道脉冲波形的合 并与重构,最终实现纳秒级、多台阶、高对比度的激光脉冲时间波形精密测量。



Fig.1 Measure principle of cascaded photodetector for ns high-contrast pulse 图 1 纳秒级、高对比度、激光脉冲波形测量原理示意图

2 光电转换模块特性研究

根据上述工作原理,要实现高对比度纳秒脉冲的波形测量,首先要选取恰当的光电转换器件,需具有大的线性动态范围、低的本地噪音、电压饱和截止、短的响应时间等光电特性,本文选取德国ALPHALAS GmbH公司生产的UPD系列高速探测器(型号: UPD-200-UP),作为高对比度纳秒脉冲的波形测量的光电转换模块,对其光电特性开展单项研究。

2.1 线性动态范围和输出饱和特性

神光III主机输出1 053 nm,1 Hz,3 ns方波,通过UPD探测器和8G示波器(最大输出幅度为8 V)在不同能量下对脉冲波形进行测试,输入脉冲能量相对值与输出脉冲波形幅度之间的关系如图2所示。

图2(a)显示:当输出波形幅度小于1.5 V时,输出波形幅值与相对输入脉冲能量之间具有良好的线性关系,与输出0.21 V的波形前后沿吻合较好,未见畸变。图2(b)显示:当输出大于1.5 V的波形与输出0.142 V的波形相比,后沿则发生了轻微畸变,考虑到测量方案中不同幅度的波形之间的数据拼接,可以认为该型号的高速探测器的线性动态范围为0~1.5 V。

除了线性动态范围,光电探测器的输出饱和特性还直接关系到所使用的数字示波器是否处于安全范围之内。 示波器的安全使用,要求光电探测器的输出幅度应具有截止限幅特性,并且截止值应小于示波器的最大量程,以 免损坏示波器。图2(a)显示,随着能量增加,输出幅度至6.4 V后不再增加,饱和曲线至6.4 V由上升曲线变为水 平直线,可认为该型号的UPD高速探测器的截止饱和输出值为6.4 V。与之配套使用的高速示波器采用8G示波器, 最大量程为8 V,处于示波器的安全使用范围内。

2.2 高速探测器的本底噪音

根据图1所示测量原理,采用的是不同幅度波形的数据拼接,因此要实现高对比度的全波形高精确度测量,除了探测器具有大的线性动态范围之外,在示波器低档位下探测器信号输出的本底噪音也必须尽可能地小。而脉冲波形的本底噪音是由光电探测器和数字示波器引入的。分别在示波器10 mV档位和20 mV档位对UPD高速探测器的本底噪音进行测试,获取噪音幅度的PV值大小。测试结果如图3所示。图3显示:在10 mV档位下,噪音本底幅度PV值<6 mV。

图2和图3所示UPD高速探测器的特性显示,1.5 V的线性动态范围和10 mV档位下噪音本底幅度3 mV的PV值, 使得该探测器在高精确度全波形测量方案中具备500:1对比度的理论测试能力。 茟





3 示波器多通道脉冲波形拼接方法的研究

从测量原理可知,示波器不同档位具有不同的幅度分辨能力,档位越低,窗口越小,幅度分辨能力越高,获 取微弱信号的能力就越强。利用这一特性,使用低档位获取脉冲前后沿更低幅度的弱信号信息,高档位用来获取 脉冲主峰信息,实现高对比度脉冲波形的测量。然而要获得完整的全脉冲波形,就必须将示波器多个不同档位的 通道波形数据进行拼接,即在通道能量比相同的前提下,用低档位低嗓音幅度区的波形数据替换高档位高嗓音区 波形中与之相同幅度区域的数据。数据的拼接包含以下内容:

1) 精确获取不同通道数据间的时间延迟。根据UPD 高速探测器的饱和特性,不论在线性区还是饱和区,各 种幅度输出脉冲波形前沿的一致性良好,因此将低档位 脉冲和高档位脉冲归一化后,获取2个脉冲前沿半高全宽 处时间轴坐标差即为2个通道间的时间延迟。

2)数据拼接,需要精确获取示波器各通道接收到的 电信号幅度比,由于大型激光装置在大能量发次间存在 着能量差异,因此通过能量测量来精确获取会造成测量 光路的复杂。当各路UPD探测器均工作在线性区间时, 示波器各通道接收到的电信号幅度比等于各通道脉冲波 形在相同幅度值下的脉宽之比(认为各UPD探测器的特



性相同,忽略相互间的差异)。因此,将各路 UPD 探测器尽可能地工作在线性区靠近最大值区域,已获得尽可能 大的对比度范围,通过各路波形在相同幅度值下的脉宽比得到示波器各通道接收到的电信号幅度比。按照幅度比

第13卷

将各路波形数据进行放大或缩小,对于截止波形则根据各自窗口大小再进行截取。从而保证脉冲波形在幅度上的 准确拼接,如图4所示。

在相同的幅度比下,通过来自最小幅度窗口的截止波形数据A替换高一级幅度窗口波形数据中的等量部分B, 得到一个拼接后的半波形数据C;然后用数据C去替换更高级幅度窗口波形数据中的等量部分D,最后得到一个拼 接后的完整波形数据。因此在拼接后的波形中不仅可以观察到完整的波形轮廓,也能观察到微弱的预脉冲信号。

4 实验结果与讨论

根据图1所示的测量原理,基于脉冲波形拼接的级联光 电探测技术,开展凹形脉冲波形凹形深度调试的验证实验。

实验在神光III主机A6S3束组预放输出端开展,实验方 案采用3个UPD探测器的级联方式,光路如图5所示。图中: MM为移动式全反镜;L为透镜;BS1,BS2分别为不同反射 率的分束镜;M为固定式全反镜;UPD-1,UPD-2与UPD-3分 别为具有截止饱和特性的高速光电探测器。



Fig.5 Experimental setup of high contrast concave pulse measurement at the fundamental frequency 图 5 基频光下开展高对比度凹形脉冲测量的验证实验光路

实验时,通过前端系统输出7 ns凹形方波,凹形宽度为5 ns,2个边锋宽度各为1 ns,通过前端系统进行凹形波 形深度调试,凹形最低处与波形峰值间对比度要求大于300:1。将示波器第1通道设置为低档位通道,10 mV档; 第2通道为中档位通道,60 mV档;第3通道为高档位通道,200 mV档。3个通道的凹形测试波形如图6所示。



图 6 三个通道的凹形测试波形

根据第3节所述的多通道脉冲波形数据拼接方法,将图6 中所示的3个不同档位通道的波形数据进行拼接,拼接后全波 形数据如图7所示。

图6(c)所示采用示波器单通道测试,波形凹形底部幅度为 30 mV,凹形脉冲的对比度只有30:1,而图7显示:经过多通 道波形测试及波形拼接,波形凹形底部幅度约为3.5 mV,峰值 为1.22 V,则凹形区域对比度为350:1。

5 结论

多台阶、高对比度、三倍频纳秒激光脉冲波形的精密测量 在ICF点火研究领域具有非常重要的意义。通过研究,针对高

对比度激光脉冲波形的精密测量确定采用基于脉冲波形拼接的多级联光电探测的技术方案,实验研究获得了 >350:1对比度的测量结果,满足神光III主机性能提升对高对比度整形脉冲波形测量的技术要求。



 Fig.7 A 7 ns concave pulse-waveform obtained through the joining of three waveforms
 图 7 三通道波形拼接后 7 ns 凹形全波形脉冲

参考文献:

- Nuckolls J O,Wood L O,Thiessen A L,et al. Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear(CTR) applications[J]. Nature, 1972,239(5368):139-142.
- [2] Lindi J D,Amendt P,Berger R L,et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. Phys. Plasmas, 2004,11(2):339-491.
- [3] Lindi J D. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. Phys. Plasmas, 1995,2(11):3933-4024.
- [4] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, et al. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers[J]. Phys. Plasmas, 1994,1(5):1626-1634.
- [5] Kodama R, Shiraga H, Shigemori K, et al. Nuclear fusion: Fast heating scalable to laser fusion ignition[J]. Nature, 2002, 418(6901):933-934.
- [6] Kodama R,Norreys P A,Mima K,et al. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition[J]. Nature, 2001,412(6849):798-802.
- [7] Betti R,ZHOU C D,Anderson K S,et al. Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density[J]. Phys. Rev. Lett. 2007,98(15):155001-1-155001-4.
- [8] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, et al. National ignition facility laser performance status[J]. Applied Optics, 2007, 46(16):3276-3303.
- [9] 李小群,党钊,陈骥,等. 一种单次精密时序电脉冲的产生方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2007,5(2):126-129.
 (LI Xiaoqun,DANG Zhao,CHEN Ji,et al. Method of single low jitter timing electronic pulse sequence generation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2007,5(2):126-129.)

作者简介:



董 军(1968-),男,四川省绵阳市人, 博士,副研究员,从事高功率激光系统研 究.email:jundong68@sohu.com.

彭志涛(1972-),男,兰州市人,博士, 研究员,从事高功率激光器研究.

元浩宇(1983-),男,四川省绵阳市人,本科,从事强 激光参数诊断技术研究.

刘 华(1966-),男,四川省绵阳市人,副研究员,从 事高功率激光脉冲能量测试技术研究.

唐 军(1974-),男,重庆人,硕士,副研究员,从事 控制理论及控制工程研究. **孙志红**(1965-),女,兰州市人,硕士,研究员, 主要从事激光器研究工作.

卢宗贵(1978-),男,太原市人,硕士,助理研 究员,从事光学设计和短脉冲激光参数诊断技术研究.

夏彦文(1972-),男,重庆市人,博士,副研究员,从事强激光参数诊断工作等研究.

张 波(1988-),男,昆明市人,硕士,从事高 功率激光脉冲光电检测技术研究.

吕嘉坤(1990-),男,广东省深圳市人,从事激 光参数诊断运行工作.

第6期