

高功率激光装置三倍频脉冲时间波形测量技术

孙志红 吕嘉坤 张波 董军 卢宗贵 彭志涛*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 高功率激光装置三倍频时间波形测量采用无畸变的光栅衍射取样技术、高速光电管和示波器探测设备及多通道复用技术,给出了靶场多路三倍频光束的高时间分辨和高动态范围的时间波形测试,详细的测试技术和方法分析对高功率激光装置三倍频时间波形精密诊断提供技术支撑。

关键词 测量; 时间波形; 三倍频; 高功率激光装置

中图分类号 TN 247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0308001

Temporal Profile Measurement of Frequency Tripled Beam for High Power Laser Facility

Sun Zhihong Lü Jiakun Zhang Bo Dong Jun Lu Zonggui Peng Zhitao

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

Abstract The temporal profile of frequency tripled beam of the high power laser facility is measured using the distortionless sampling by the diffraction of the beam sampling grating, transient photodiode, high-speed digital oscillograph and the multiplexing technology of multichannel. The high resolution and dynamic range of the temporal profiles of frequency tripled beam are obtained. The detailed measurement technology and methods are important for the precision diagnosis of the temporal profile measurement system of frequency tripled beam of the high power laser facility.

Key words measurement; temporal profile; frequency tripled beam; high power laser facility

OCIS codes 140.3460; 140.3295; 060.5060; 060.2300

1 引 言

高功率激光装置要求在运行发射后,靶场的三倍频测量组件快速完成多束激光的参数常规测量以及数据采集、处理和储存,为装置各类反馈控制以及稳定与安全运行提供必要的参数,为物理实验提供的靶场激光参数测量包括脉冲能量、时间分布、功率、时间同步等^[1-4]。由于惯性约束核聚变(ICF)激光装置靶场结构复杂,高精度的靶点激光参数的实时测量成为整个激光链路上难度较大的工作。

三倍频时间波形反映激光束通过倍频晶体转换为三倍频激光进入靶室进行物理实验激光时间特性,是衡量高功率激光装置综合性能的一项重要指标参数。要满足纳秒时间三倍频波形信号的高精度和高灵敏度测试,获得与被测激光时间分布特性一致的光束取样是测量的关键,测量器件的响应特性也是主要关注的问题,故探讨无畸变取样、高精度探测和高动态范围时间波形的测试技术方法是非常重要的。为了满足高功率激光装置三倍频时间波形参数诊断要求,采用光电管结合示波器方法测试三倍频时间波形,探讨了光栅衍射取样的合理性,克服了光栅二级衍射光对测试的影响,对测量组件时间响应进行测试标定,采用数字示波器的两个通道分别进行主峰和脉冲前沿的通道复用技术提高测量系统动态范围。研究工作对于提高多束激光时间波形测试的诊断能力是非常有意义的。

收稿日期: 2015-08-12; 收到修改稿日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(61377102)

作者简介: 孙志红(1965—),女,硕士,副研究员,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: sunzh01@163.com

*通信联系人。E-mail: peng_zhitao@163.com

2 三倍频脉冲时间波形测量技术

目前高功率激光装置三倍频激光参数测量主要采用反射和衍射取样方式,反射式取样采用三倍频转换晶体后的大口径打靶透镜^[5]表面的反射光,取样受限于透镜表面反射率的变化,衍射取样采用基于取样光栅(BSG)^[6]取样,在主光路的打靶透镜后采用BSG取样的主要优点是终端光学元件损伤导致的终端透射率降低和光栅的损伤不会影响取样份额,故这是目前比较好的一种选择,已成为高功率激光装置靶场激光参数测量主要取样方式。三倍频激光脉冲测量示意图如图1所示。为了方便测试靶场三倍频时间波形,将三倍频取样后的光束导出靶室。图1中,三倍频激光经过BSG一级衍射光取样,经过取样劈板,45°反射镜和具有六档衰减的衰减轮盘(图中未标示)后穿过真空法兰窗口和大倍率衰减片后进入探测设备,取样劈板为不镀膜的石英劈板,经过取样劈板的反射和透射分别进行时间波形和能量测试。为了满足高时间分辨测试要求,采用宽频带高速电缆和转接头、高速双平面二极管和高速数字示波器,经过取样后的三倍频光束通过光电转换、数据采集、上传和存贮单元,完成三倍频激光时间测量。数字示波器模拟带宽8 GHz,平面二极管上升时间优于70 ps。

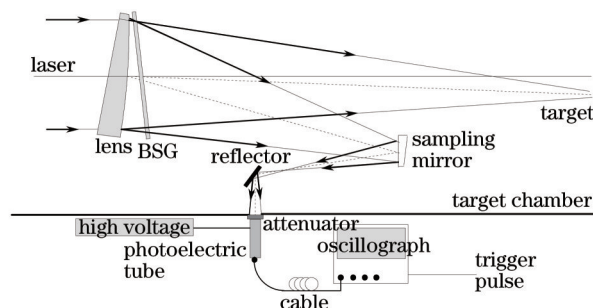


图1 高功率激光装置三倍频脉冲时间波形测试光路示意图

Fig.1 Experimental layout of the temporal profile measurement system of frequency tripled beam

2.1 采用BSG衍射取样与靶点后光束的时间波形比对测试

三倍频时间波形测试的目的是通过取样测试获得靶点处三倍频光的时间特性。高功率激光装置综合诊断系统靶点后的三倍频测量单元对靶点后的时间波形进行直接测试,在综合诊断系统的靶点后和经过BSG衍射取样后的三倍频测量具有同一发次三倍频时间波形,将其进行对比,使用的光电管响应一致,输出信号接入一个示波器两个通道,波形比对结果如图2所示。可见,靶点后和经过BSG衍射取样后的三倍频时间波形形状一致,幅度差值很小,从而说明BSG取样对三倍频时间波形没有产生畸变。

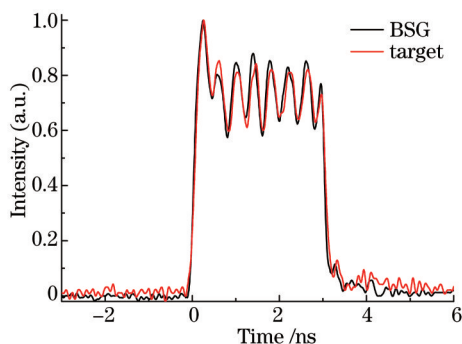


图2 靶点和BSG衍射后三倍频波形对比

Fig.2 Comparison of temporal profile of frequency tripled beam after grating sampling and target

2.2 BSG二级衍射光的干扰与克服

采用经过BSG取样的三倍频时间测试中发现波形畸变,在3 ns时间波形上还有一个脉冲宽度相同,时间上相差2 ns的一个波形,如图3(a)。由于BSG二级衍射光的焦距为574 mm,二级光衍射角(与光栅法线夹角)为38.6°,初步分析判断极有可能是二级衍射光也同时进入光电管,之后在二级衍射光进入光电管路径上放置衰减片,测试到二级衍射光产生的时间波形幅度同时减少,见图3(b)。采用挡片挡住二级衍射光,获得了无二级衍射干扰的时间波形,见图3(c)。

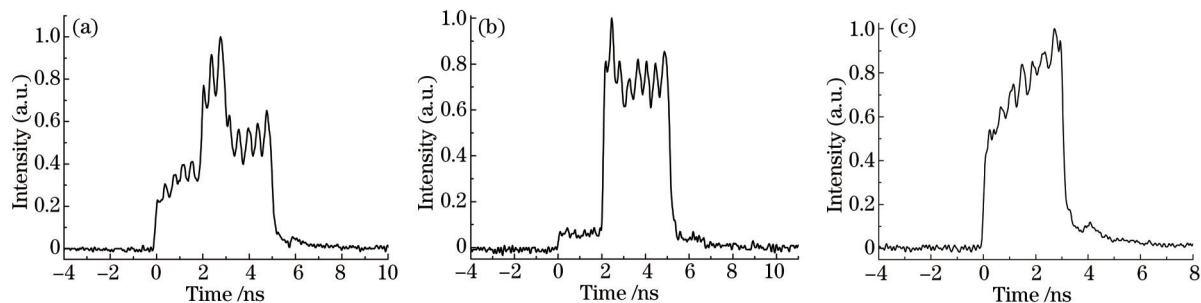


图3 三倍频光束时间波形。(a)含二级衍射光的波形;(b)对二级衍射光进行衰减后的波形;(c)消除二级衍射光后的波形

Fig.3 Temporal profile of frequency tripled beam while the second order diffraction beam is (a) incident to photodiode, (b) attenuated, and (c) intercepted

2.3 测量组件的时间分辨率测试

三倍频时间测量组件的一个重要参数就是组件的时间分辨率,在三倍频时间测试中主要考虑上升沿,它是组件所涉及的元器件,包含光电管的上升时间、示波器和电缆带宽引入的带宽总和。

首先,离线标定给出三倍频时间测量组件所使用的光电管的上升时间。采用脉冲宽度为 8 ps 的 351 nm 激光器,将激光器光束入射到三倍频激光时间测量光电管,采用 6 GHz 示波器和 1 m 宽频带电缆测量激光脉冲的上升时间,测试的典型时间波形如图 4 所示。6 GHz 示波器引入的展宽为 75 ps、激光脉冲宽度为 8 ps,1 m 电缆引入约 18 GHz 的带宽,可忽略不计。图 4 给出测量脉冲的上升时间为 102.3 ps,扣除示波器带宽和激光器脉宽,则光电管的上升时间为 69.1 ps。

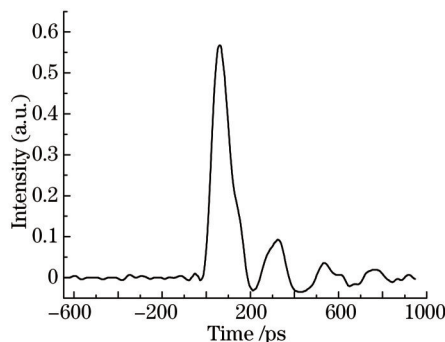


图4 皮秒脉冲离线测试光电管上升时间的典型时间波形

Fig.4 Temporal profile while testing the rise time of photodiode using picosecond pulse

然后,给出激光时间测量组件的上升时间。三倍频时间组件采用 8 GHz 示波器和 4 m 电缆,8 GHz 示波器引入带宽 t_2 约为 56.3 ps,4 m 电缆引入带宽 t_3 约为 75 ps, t_1 为光电管的上升时间,组件实际测试时的上升时间近似为 $\sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2}$ 。48 路高功率激光器的三倍频时间测量组件包含 48 个探测器和 12 台示波器(四个探测器使用一台示波器的四个通道),光电管的上升时间在 30.6~69.1 ps 之间,则激光时间测量组件的上升时间在 98.6~116.5 ps 之间。

2.4 采用多通道复用技术提高测量系统动态范围

数字示波器高档位高噪声和低档位低噪声的特点决定了数字示波器单通道的测量动态范围约为 30:1。基于数字示波器自身的特点,采用数字示波器双通道复用技术测量激光脉冲时间波形,从而提高测量系统动态范围。将光电转换器输出的电信号通过功分器分成两路,分别连接到数字示波器的两个通道上,两个通道采用不同的档位,高档位用于测量信号的主峰波形,低档位用于测量信号的底部波形,数字示波器的低档位引入的电噪声小,而高档位保证了数字示波器的测量范围,最后将两个通道的数据利用计算机软件进行合并重构激光脉冲时间波形,这样,可以获得高对比度时间波形测试,以满足高功率激光装置束间功率平衡和物理实验对台阶整形激光脉冲精密测量的要求。

改变输入能量,测试激光脉冲通过三倍频时间测量组件的输出电压信号,给出组件的固有线性动态范围区间。图 5 给出三倍频时间测量组件测试输出 0.19~8 V 的时间波形,可以看出在小于 8 V 的测量范围内时

间波形没有畸变。

采用双通道复用技术提高测量的动态范围。如果两个测量通道分别采用“1 V档”和“10 mV档”的垂直档位,测量主峰波形幅值1 V,用“10 mV档”测量脉冲波形的底部细节,引入的电噪声约为1.5 mV,图6给出“10 mV档”对应噪声波形,这样理论上可以得出,采用双通道复用技术,三倍频时间波形测量组件可以达到的最大信噪比测试优于500:1。

实际测试中,三倍频激光脉冲时间波形的幅值约为500 mV,如果采用功率分配器,则三倍频时间波形信号幅度约为250 mV,考虑信号的最小幅值应比噪声略大,采用“10 mV档”测量脉冲波形的底部细节最小信号约为2 mV,这样,对比度测量可以达到120:1。

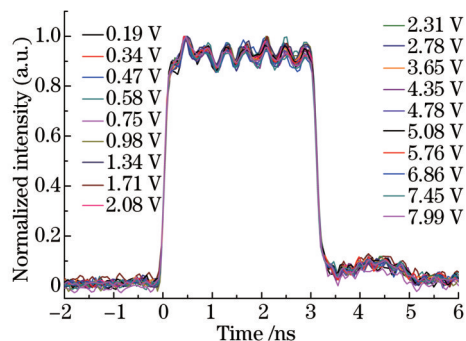


图5 三倍频时间测量组件测试输出0.19~8 V的时间波形

Fig.5 Temporal profile while the output is 0.19~8 V

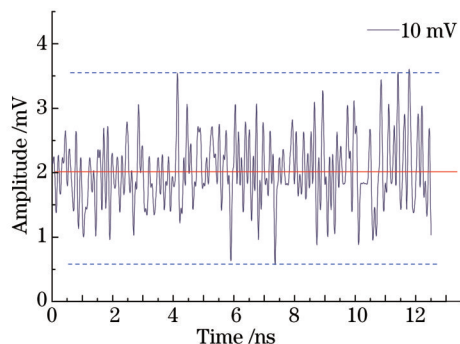


图6 10 mV档位的噪声幅度测试

Fig.6 Noise amplitude while the measurement range is 10 mV

3 测试结果及分析

采用研制的时间测量组件,对高功率激光装置多路脉冲时间波形进行测试,输出光束参数为脉冲波形宽度3 ns,脉冲能量约2850 J,典型三倍频时间波形如图7所示。三倍频时间波形测试主要参数为脉冲宽度(FWHM)和脉冲上升沿,对于平顶脉冲,脉冲宽度(FWHM)表示激光脉冲时间波形的50%强度处所对应的的时间间隔,其10%强度处与90%强度处之间的时间间隔为脉冲上升沿。

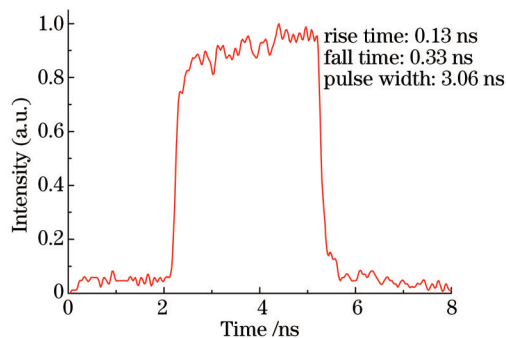


图7 典型三倍频激光脉冲时间波形(上升沿0.13 ns,下降沿0.33 ns,脉冲宽度3.06 ns)

Fig.7 Typical temporal profile of frequency tripled beam (the rise time, fall time and the pulse width are 0.13, 0.33 and 3.06 ns, respectively)

脉冲上升沿测量中,首先在示波器上读出时间波形上升沿的示值 τ_1 ,然后扣除测量系统响应上升时间的标定值 τ_2 ,计算得到上升沿的实际测量值为 $\tau = \sqrt{\tau_1^2 - \tau_2^2}$ 。计算上升沿的实际测量值时采用方和根准则,这是基于高斯系统而得到的,对于非高斯系统,用方和根准则计算时存在系统误差^[7-8],在此不予考虑。上升沿测量的不确定度主要来源有数字示波器采样率引入上升沿的示值的不确定度分量 $\Delta\tau_1$ 和测量系统响应上升时间引入的不确定度分量 $\Delta\tau_2$ 。通过示波器获取脉冲时间波形时的不确定度主要是通过示波器的采样过程引入的(示波器的采样率为有限值),该项不确定度分量按B类不确定度评定。测试时所使用示波器的采样率为40 ps,单次测量,该项误差服从均匀分布,其标准不确定度为: $u_1 = 20/\sqrt{3}$ (ps)。时间波形上升沿的示值 τ_1 ,包括10%强度处与90%强度处数字示波器采样率引入上升沿的示值的不确定度分量,所以, $\Delta\tau_1 = \sqrt{2}u_1$ 。实

际测试中, $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2$ 。根据误差传递公式,可以得到时间波形上升沿标准不确定度为 $\Delta\tau = \Delta\tau_1 \cdot \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} / \sqrt{\tau_1^2 - \tau_2^2}$ (ps)。

脉冲宽度测量中,在示波器上给出时间波形上升和下降沿 50%强度处所对应的的时间 τ_3 和 τ_4 ,脉冲宽度测量值为 $\tau' = \tau_3 - \tau_4$ 。通常,通过测量系统(光电管,电缆,示波器等)获得的时间波形信号是被观测信号与测试系统的卷积结果,根据第 2.3 节测试结果,在此认为测量系统响应是脉冲宽度为 120 ps 的高斯脉冲,图 8 给出宽度为 3 ns 的理想方波经过半峰全宽为 120 ps 的高斯脉冲数学上卷积运算,卷积后脉冲波形宽度不变,只是边缘变缓。图中,1 为高斯脉冲,2 为方波,1 和 2 的卷积的半峰全宽为 3 ns。根据模拟计算可知,测量系统的响对于激光脉冲波形宽度测试没有影响,在脉冲宽度测量中可以不考虑测试系统的响应引入的不确定度,这样,脉冲宽度测量不确定度主要来源有数字示波器采样率引入上升和下降沿的示值的不确定度量 $\Delta\tau_3$ 和 $\Delta\tau_4$,根据前面分析, $\Delta\tau_3 = \Delta\tau_4 = 20/\sqrt{3}$ (ps)。根据误差传递公式,可以得到时间波形脉冲宽度测量的标准不确定度为 $\Delta\tau' = 16.3$ ps。

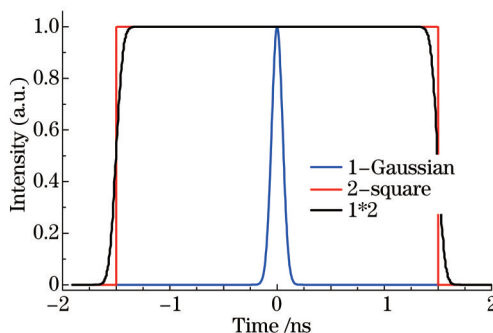


图 8 半峰全宽为 120 ps 的高斯脉冲与宽度为 3 ns 的方波及其卷积运算结果

Fig.8 Comparison of the temporal profile square of 3 ns and Gaussian pulse of 120 ps and the convolution result

4 结 论

高功率激光装置三倍频时间波形测量采用光栅的一级衍射光用于取样光束,比对测试验证了采用光栅衍射取样的时间波形测试的可行性,实验结果显示,三倍频测量组件所采集到的脉冲波形与靶点后所采集到的脉冲波形基本一致。克服了三倍频时间波形测量中将取样光导出靶室后光栅二级衍射光对测试的影响;采用皮秒激光对测量组件的时间分辨率进行测试;为了提高测量系统动态范围,将光电转换后的电信号通过功率分配器连接到数字示波器的两个通道上分别进行主峰和脉冲前沿测试;获得了高功率激光装置多路三倍频时间波形,并对测试结果进行误差分析,测试技术和方法讨论对于高功率激光装置三倍频时间波形精密诊断是非常重要的。

参 考 文 献

- 1 Xia Yanwen, Sun Zhihong, Zhao Runchang, *et al.*. Reconstruct for measurement system of temporal profile on SG-III prototype laser facility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1453-1457.
夏彦文, 孙志红, 赵润昌, 等. 神光 III 原型装置基频激光脉冲波形测量系统的研制[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1453-1457.
- 2 Sun Zhihong, Dong Jun, Peng Zhitao, *et al.*. Synchronization measurement of multi-beams for high power laser facility[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0908004.
孙志红, 董 军, 彭志涛, 等. 高功率激光装置多路光束时间同步测试技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0908004.
- 3 Xu Dangpeng, Wang Jianjun, Huang Zhihua, *et al.*. Pulse waveform real-time precision measurement technique for multi-beam high repetition frequency all fiber laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(8): 081004.
许党朋, 王建军, 黄志华, 等. 多束高重复频率全光纤激光脉冲时间波形实时精密测量技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(8): 081004.
- 4 Cheng Ningbo, Li Fuquan, Feng Bin, *et al.*. Research on route optimization for laser beam alignment at target area of an ICF laser facility [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0202005.
程宁波, 李富全, 冯 斌, 等. ICF 激光装置靶场光束引导路径的优化研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0202005.

- 5 Shao Ping, Xia Lan, Zhao Dongfeng, *et al.*. Measurement and debugging of wedge-shaped lens in high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408006.
邵平, 夏兰, 赵东峰, 等. 高功率激光装置终端楔形透镜的测试与调试[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408006.
- 6 Peng Zhitao, Sun Zhihong, Liu Hua, *et al.*. Research on temporal profile measurement by BSG sampling[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 280-282.
彭志涛, 孙志红, 刘华, 等. BSG取样方式的时间脉冲波形测试研究[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 280-282.
- 7 Zhao Kejia, Liu Mingliang, Yu Yuehua, *et al.*. Research on the conversion factors between rise time and bandwidth of broadband sampling oscilloscope[J]. Acta Metrologica Sinica, 2006, 27(2): 160-163.
赵科佳, 刘明亮, 郁月华, 等. 宽带取样示波器上升时间与带宽的转换系数的研究[J]. 计量学报, 2006, 27(2): 160-163.
- 8 Yu Xuefeng, Yu Jie. The error analysis of rise time measurement with an oscilloscope[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2002, 22(1): 36-41.
余学锋, 于洁. 示波器上升时间测量的误差分析[J]. 宇航计测技术, 2002, 22(1): 36-41.

栏目编辑: 何卓铭