

纳秒整形激光脉冲波形的高对比度诊断

夏彦文, 郑奎兴, 刘 华, 赵军普, 彭志涛, 孙志红, 董 军, 李 森

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 激光脉冲波形的精密诊断是大型激光装置运行控制和精密物理实验的前提, 而动态范围的大小是衡量诊断系统的关键指标之一。为了满足高功率激光装置对纳秒级整形激光脉冲对比度控制及精密诊断的需求, 采用双探测器与数字示波器四通道分组并行取样的诊断方法, 通过将整形激光脉冲分解为不同的幅值区域并送入示波器的不同输入通道, 每个通道采用不同的垂直灵敏度档位进行探测, 最后利用共同的时基完成波形的对接重构。研究表明, 采用的方法可以实现 2 500:1 的动态范围, 在偏差为 2% 的测量精度内, 可以实现对比度高达 100:1 的多台阶整形脉冲的全波形测量。

关键词: 诊断; 脉冲波形; 示波器; 动态范围; 对比度; 高功率激光

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1106002

High contrast temporal shape diagnostics for nanosecond laser reshaping pulse

Xia Yanwen, Zheng Kuixing, Liu Hua, Zhao Junpu, Peng Zhitao, Sun Zhihong, Dong Jun, Li Sen

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

Abstract: The ability of temporal pulse reshaping is an important content in high power laser facility operation and fusion ignition experiment. In order to verify reshaping effect, the diagnostic system was optimized by optical and electrical power splitting, the system detected laser pulse shapes with two high-speed vacuum biplanar photodiodes (VPD), coupled to a four-channels 8 GHz oscilloscope. The effective dynamic range of the diagnostic system for measurement of pulses with high-power contrast was increased by splitting the signal from every VPD evenly into two channels of the oscilloscope with different sensitivity setting, the detected pulse from the four channels was stitched back together to form the complete pulse. The result show that the detector and oscilloscope combination has a 10% to 90% rise time of 60 ps, the diagnostic reaches 2 500:1 dynamic range for contrast ratios up to 100:1 at an within 2% uncertainty.

Key words: diagnostics; temporal shape; oscillograph; dynamic range; contrast; high power laser

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(61377102); 国防基础科研计划(B1520133010)

作者简介: 夏彦文(1972-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事高功率激光参数诊断方面的研究。Email: xiayanwen1972@163.com

0 引言

在高功率激光脉冲与物质相互作用的过程中, 为了提高靶丸对激光的吸收^[1], 需要不同的整形激光脉冲^[2-3], 对整形激光脉冲波形评价的关键指标是对比度, 对比度是指激光主脉冲峰值强度与预设的前沿脉冲峰值强度或前沿底座强度的比值。在强激光打固体靶的各种实验中, 预脉冲所产生的等离子体会改变靶物质的状态, 不同的预脉冲设置会获得不同的实验结果, 因此对激光脉冲波形的精密诊断是精密物理实验、激光装置运行控制的前提, 而诊断系统的动态范围决定了脉冲对比度的测试精度。

纳秒级整形脉冲的诊断难点在于不仅需要知道脉冲波形的整体信息, 还需要获得较长时间范围内(约 20 ns)的多个次级尖峰(或台阶)之间的精确强度比值。对于要求几十皮秒分辨的纳秒量级脉冲, 采用光电探测器结合数字示波器是目前最流行的测量方法, 然而数字示波器和光电探测器自身的动态范围限制了整个测量系统的动态范围, 因此在设计建造过程中, 对激光装置的激光输出性能指标要求还必须考虑到当时的测试技术水平^[4-6]。

考虑到设备的安全性, 传统的靠光电探测器饱和和输出来测预脉冲的方法已不可取, 为了扩大诊断系统的动态范围, 美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)初期计划采用单个探测器探测结合示波器四通道(channel, ch)复用的方法^[7], 但由于一系列的技术原因^[8], 最终选用示波器双通道复用的方案, 获得 1 000:1 的动态范围、98 ps 的上升时

间的结果^[9], 但该方法难以实现多台阶波形的高精度测量, 目前未见有实质性的突破; 国内上光所采用对同一脉冲多次求平均的方法, 由于采用示波器单通道记录, 只能获得 100:1 的对比度结果^[10]。

为了精密测试大口径高通量验证实验平台输出的整形脉冲波形, 文中通过分析采用光电探测器结合数字示波器测试脉冲的极限动态范围, 提出采用双探测器结合示波器四通道测试的方法, 对其进行了分析及实验验证。

1 诊断方法

对于用于惯性约束聚变的整形激光脉冲诊断, 采用光学条纹相机可以获得极高的时间分辨率, 但这样的设备极其昂贵, 且动态范围难以进一步提高, 示波器具有不错的带宽、线性度好、输入通道多(通常为四个)、灵敏度档位可以任意设置的特点, 自然成为最佳的首选测量设备, 与之配置的光电探测器应满足输出响应快、输出电流大、阻抗匹配好(较小的后沿阻尼振荡)的要求, 一般选用双平面光电管。

大口径高通量验证实验平台的整形激光脉冲测试采用数字示波器通道分组并行取样的测量方法, 即双探测器与示波器四通道结合的方案, 如图 1 所示: 被测脉冲经分光镜分成等强度的两束, 分别进入各自的双平面光电管进行光电转换, 在光电管后分别连接 1:2 的功分器, 分别将电信号分成两路, 接入示波器的四个通道, 每个通道采用不同的垂直灵敏度档位, 分别测量脉冲的不同幅值区域, 最后将四个通道的波形数据利用计算机软件进行合并重构, 完

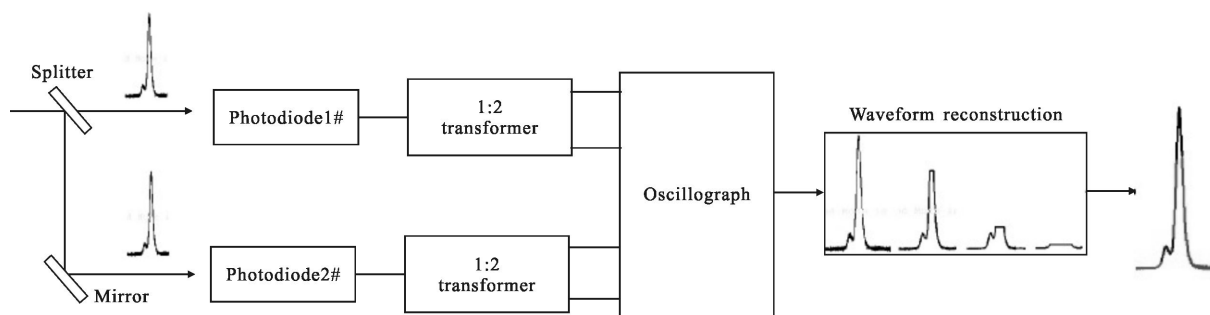


图 1 激光整形脉冲波形精密诊断原理图

Fig.1 Diagnostic principle diagram of laser reshaping pulse

成对激光脉冲时间波形的测量。

测试前,首先利用输出约 10 ps 的短脉冲代替整形激光脉冲,通过设置示波器各通道的灵敏度档位将各脉冲峰值控制在示波器的最佳显示状态,通过读取脉冲的峰值间隔确定脉冲重构的时间基准。采用这种方法,充分利用了光电探测器和示波器的动态范围,同时将示波器的输入控制在安全幅值范围内,避免误操作(注入激光强度过大)损坏示波器。

2 指标分析

2.1 动态范围分析

多台阶整形脉冲的全波形测试系统的关键指标为脉冲响应时间(即上升时间、下降时间)和动态范围。前者通过选用高带宽的探测记录设备和高频传输线实现,而后者与探测记录设备自身的动态范围有关。

光电探测器的线性及输出幅值是限制测试系统动态范围的一个因素。目前能够实现高带宽、大电流输出的探测器件主要是双平面光电管,图 2 为某型号双平面光电管的实测结果,具有 60 ps 的上升时间和 90 ps 的下降时间、最大输出电流达 0.3 A,对应示波器最大输出 7.5 V,且后沿阻尼振荡小,从图 2(b)可以看出,扣除测量带来的误差,可以认为最大输出线性幅值为 5 V。

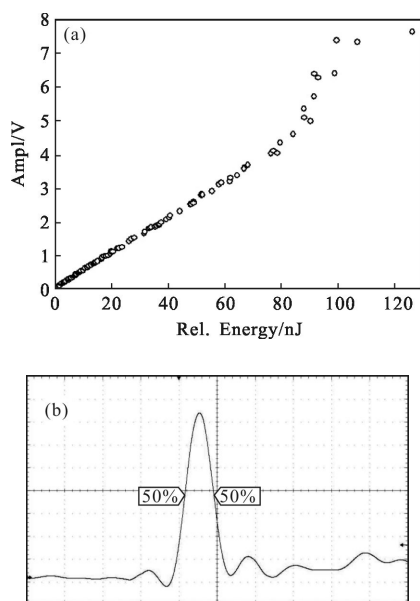


图 2 双平面光电管的(a)输出特性曲线及(b)脉冲响应

Fig.2 Typical output characteristics(a) and response pulse of VPD (b)

选用的高速数字示波器允许的最大输出幅值为 5 V,最高灵敏度档位的噪声均方差约为 0.5 mV(见表 1),模拟带宽 8 GHz,先验性选取最低可探测信号幅值为 1 mV,那么理论上示波器的动态范围可达 $5\text{ V}/1\text{ mV}=5\ 000:1$ 。

表 1 数字示波器不同灵敏度档位的电噪声典型测试结果

Tab.1 Test results of noise level of oscillograph with different vertical sensitivity setting

Sensitivity /mV·div ⁻¹	5	10	20	50	100	200	500	1 000
Full-scale sensitivity /mV	40	80	160	400	800	1 600	4 000	8 000
Dispersion /mV	0.50	0.49	1.03	2.21	5.01	9.32	22.57	45.83

通常的数字示波器采用 8 比特(bit)的模数转换器,实际有效的模数转换仅有 6.3 bit (信噪比 $S/N=26.3:1 \approx 80:1$),这就意味着要实现 2%(信噪比 $S/N=50:1$)的测量精度,信号幅值必须超过示波器满屏的 63%($50/26.3=63\%$)。一般情况下,数字示波器有四个相同的输入通道,每个输入通道的全屏灵敏度可在 20 mV~10 V 间设置,不同灵敏度档位的电噪声差别很大,表 1 为某型号的示波器的一组实测数据(测试时光电探测器处于遮光工作状态),最高灵敏度档位为 5 mV/div 时,满屏最大信号幅值为 40 mV,偏差为 2%的测量点对应的幅值为 $40\text{ mV} \times 63\% = 25.2\text{ mV}$ (按表 1 实测统计结果计算,为 25 mV),这意味着在 25.2 mV~5 V 内的脉冲信号可以保证偏差为 2%的测量精度,但由于每个通道测量的最大对比度不超过 1:0.63,这样即使四个通道联合使用也只能分段保证总计 $0.63^{-4} \approx 6$ 倍幅值范围内的信号。简单地说,处在 25 mV~5 V 区域内相差约 200 倍的激光脉冲波形,只有约 6 倍区域内的波形满足偏差为 2%的测量精度要求。

因此,采用图 1 的方法测脉冲波形的对比度,记录的脉冲峰值上限受限于光电探测器(功分后最大线性电压 2.5 V),下限受限于示波器灵敏度档位设置;示波器单通道记录具有约 80:1 的动态范围,多通道配合使用可以实现 2 500:1 的动态范围;预脉冲高于 25 mV 的脉冲,只有约 6 倍区域内的波形满足

2%的测量精度要求;在 2%的测量精度下,示波器单通道可测的对比度约为 $1:0.63 \approx 1.6:1$,多通道配合使用可测的对比度为 $2.5\text{ V}:25\text{ mV}=100:1$ 。

2.2 脉冲波形的影响

针对不同的整形脉冲,需有针对性地设置每个通道的灵敏度档位,以图 3 给出的几种典型的整形脉冲为例说明:不同台阶区域采用不同的垂直灵敏度档位记录,图中 Ch1~Ch4 表示示波器的四个通道,阴影水平区域表示该段脉冲波形幅值满足 2%的测量精度要求,bc 段表示主脉冲上升时间段。

在图 3(a)中,多级预台阶脉冲幅值逐级上升,主脉冲 bc 段上升时间约为 100 ps,几乎达到示波器时

间轴量化极限,对应的量化数据只有约 2~3 个,如果 Ch4 对应的预脉冲幅值高于 25 mV,实际可以实现对比度小于 100:1 的、不多于四级台阶的脉冲全波形高精度(幅值不确定度 $\leq 2\%$ 、上升时间 $\sim 100\text{ ps}$)诊断;在图 3(b)中,主脉冲 bc 段上升时间约为 1 ns,对应的量化点约 20~30 个,该段各点的测量不确定度主要由 Ch1 的灵敏度档位对应的标准偏差决定,在 Ch2 采用 5 mV/div 档位、Ch1 采用 500 mV/div 档位的极限情况下,b 点附近波形幅值的相对偏差达 $22.57\text{ mV}/40\text{ mV} \approx 50\%$!也即从 c 到 b,波形测量的相对偏差由 2%递增到 50%,因此为了提高精度,只能通过对高稳定的输入脉冲进行重复测量求平均;

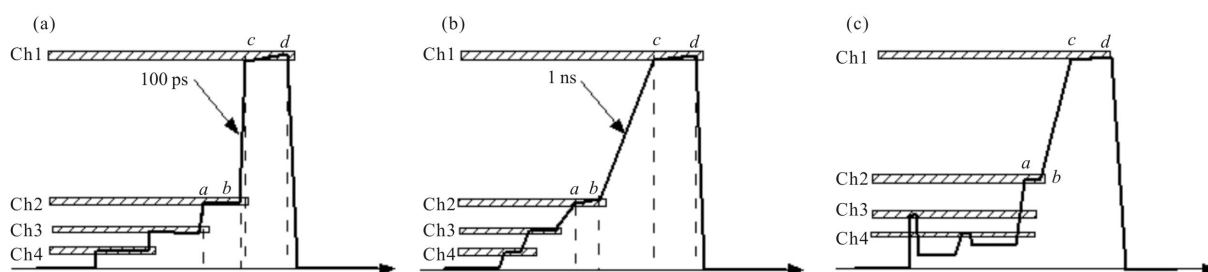


图 3 几种典型的整形脉冲模型

Fig.3 Several kinds of complicated laser reshaping pulses

图 3(c)的情况更复杂,既存在平台又存在预脉冲,精度上两者难以同时兼顾,并且如果两预脉冲相隔太近且前脉冲峰值远高于后脉冲峰值的情况下,测量后脉冲时由于前脉冲峰值过大导致示波器处于饱和状态,有可能使得后脉冲落在示波器恢复时间内(可参考图 5(a)的 Ch3、Ch4),严重影响对后脉冲的诊断,这样的情况难以保证后续预脉冲的测量精度,也失去了四通道测量的意义。

还有一种情况更复杂,即尽管要求诊断系统响应的上升时间在 100 ps 左右,实际被测整形脉冲的上升、下降时间远低于 100 ps,光电探测器固有的前后沿阻尼振荡会严重影响对预脉冲峰值以及台阶脉冲幅值的判断,这时必须选用响应更快的光电探测器。

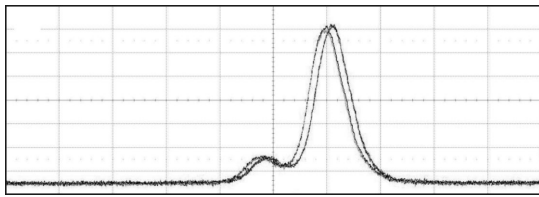
以上分析表明,既要满足很高的对比度又要保证任意波形各点处较高的测量精度是及其困难的测量任务,在相同的精度要求下,不同的整形脉冲有可

能选用不同的诊断设备;在测量多台阶(多个次尖峰)的整形脉冲时,对每个波形点应实行不同的权重分配,应优先测量所关注的台阶(次)脉冲,脉冲其余部分的精度只能靠多次平均保证。

3 实验验证

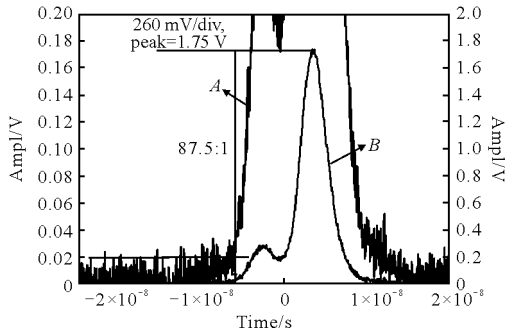
采用图 2 给定的光电探测器,对图 1 所描述的方法进行验证,首先验证单通道的动态范围。实验中示波器灵敏度设置在 260 mV/div 档位,获得的波形见图 4(a),这几乎是该档位所能获得的最大对比度测量范围,该档位的噪声标准偏差约为 10 mV,满屏时为 $260\text{ mV} \times 8 = 2.08\text{ V}$ (低于光电管双通道平分后的最大线性输出 2.5 V),如果以 20 mV 作为最低可探测水平(相对不确定度为 $10\text{ mV}/20\text{ mV}=50\%$),那么该档位的动态范围为 $2\text{ V}/20\text{ mV}=100$ 。图 4(b)给出了该脉冲的不同垂直比例显示的线性波形,从图中可

以看出,可分辨的对比度约为 90:1。



(a) 原始图

(a) Original image



(b) 对比度显示

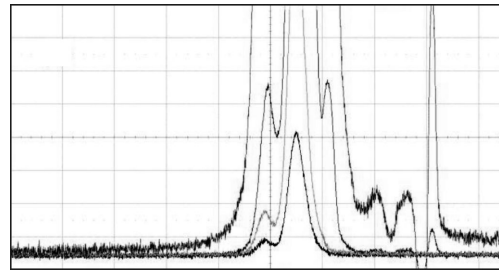
(b) Contrast showing

图 4 对比度为 87.5:1 的样品脉冲

Fig.4 Acquired simulated pulse with 87.5:1 contrast ratio

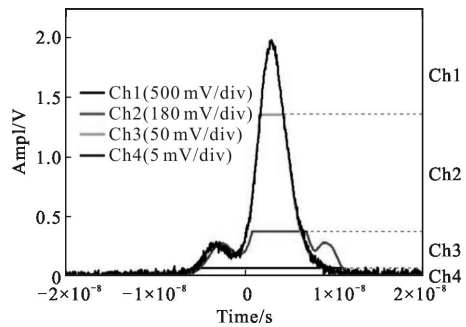
图 5(a)为在最高输出 2 V 的条件下,采用双光电管结合示波器四通道并行采集的原始脉冲波形图,图 5(b)为等比例显示的脉冲波形,图 5(c)为拼接后的脉冲波形。从图 5(a)可以看出,由于示波器自身的原因,当脉冲峰值超过示波器通道量程过大时,测得的脉冲后沿会出现振荡信号(见图(a)的 Ch3、Ch4),因此后沿脉冲不拼接。

为了展示脉冲的对比度特征,对图 5 获得的四通道的波形采用半对数坐标显示,见图 6(a)~(d)。依据脉冲波形的特征,可以采用不同的通道组合。采用双通道结合,可以精确测量双台阶(双尖峰)脉冲的对比度,比如采用图 6(a)与图 6(d)结合,可以精确



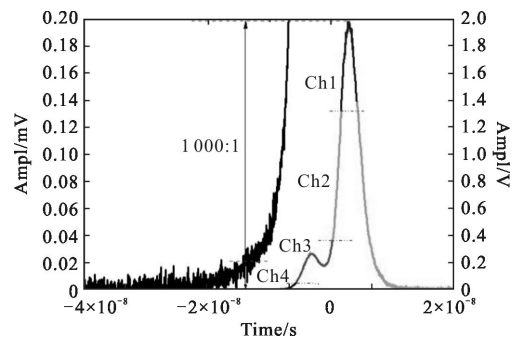
(a) 原始波形图

(a) Original oscillograph



(b) 在振幅等比例、同时刻显示下的四通道的脉冲波形

(b) Oscillograph showed under the condition of the same time and the same sensitivity setting



(c) 重构的脉冲波形

(c) Stitched pulse profile

图 5 示波器四通道采集的脉冲时间波形及重构波形

Fig.5 Laser pulse acquired by four channels of one oscilloscope

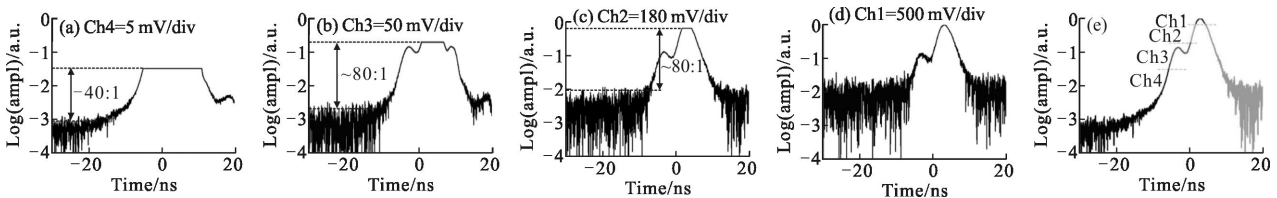


图 6 示波器(a)通道 4, (b) 通道 3, (c) 通道 2, (d) 通道 1 记录的脉冲波形,以及(e)最终的重构脉冲

Fig.6 Laser pulse recorded on (a) channel 4, (b) channel 3, (c) channel 2, (d) channel 1 of the oscilloscope and (e) the reconstructed pulse waveform

(2%的偏差)测量对比度达 80:1(2V:25 mV)的双台阶(双尖峰)脉冲的幅(峰)值比。类似地,采用四通道结合(见图 6(e)),可以精确测量多达四个台阶的脉冲的对比度;从图 5(c)、6(e)可以看出,这时可以很好地分辨幅值为 1 mV 的基底脉冲,如果考虑峰值幅值最大可以达到 2.5 V,实际可以实现 2 500:1 的动态范围。

4 结 论

在分析国内外高功率激光脉冲全波形诊断的基础上,全面分析了诊断设备以及脉冲波形本身对测量的影响,提出采用双光电探测器与数字示波器四通道分组并行取样的测量方法,实现了 60 ps 的上升时间、2 500:1 的动态范围,在偏差为 2%的精度内,可以测量对比度最高达 100:1 的四台阶脉冲幅值,对于脉冲全波形诊断,一般只有约 6 倍区域内的波形满足偏差为 2%的测量精度要求,脉冲其余部分的测量精度只能靠多次平均提高。

采用的方法不适用于预脉冲相隔太近且前脉冲峰值远高于后脉冲峰值等过于复杂的整形脉冲,也不适用于测量后沿次脉冲的对比度以及上升时间过快的整形脉冲,这类脉冲只能采用其它措施或方法——比如条纹相机或者脉冲限幅技术——进行诊断,这是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] Lindl J D, Mead W C. Two dimensional simulation of fluid instability in laser fusion pellets[J]. *Phys Rev Lett*, 1975, 34(20): 1273-1276.
- [2] Nakat Suka M, Miyanaga N, Kanabe T, et al. Partially coherent light source for ICF experiment [C]//SPIE, 1993, 1870: 151-162.
- [3] Mat Suoka S, Miyanaga N, Ando A, et al. Flexible pulse shaping of partially coherent light on GEKKO XII [C]//SPIE, 1995, 2633: 627-633.
- [4] Boyd R D, Bliss E S, Boege S J, et al. Alignment and diagnostics on the National Ignition Facility laser system [C]//SPIE, 1999, 3782: 496-501.
- [5] Xia Yanwen, Sun Zhihong, Zhao Runchang, et al. Improvement of infrared temporal profile measurement system for SG-III prototype laser facility [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1453-1457. (in Chinese)
夏彦文, 孙志红, 赵润昌, 等. 神光 III 原型装置红外脉冲波形测量系统的研制 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1453-1457.
- [6] Lu Zonggui, Xia Yanwen, Tang Jun, et al. Pulse-shape measurement technology for multi-beams infrared laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1129-1132. (in Chinese)
卢宗贵, 夏彦文, 唐军, 等. 多路红外激光脉冲波形测量技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1129-1132.
- [7] Thomas S, Boyd B, Davis D T, et al. Temporal multiplexing for economical measurement of power versus time on NIF [C]//SPIE, 1997, 3047: 700-706.
- [8] Milan D. Measurements at 351nm of temporal dispersion in fibers; UCRL-ID-132866, 1998(12): 1-24.
- [9] 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.
- [10] Pan Xue, Li Xuechun, Li Guoyang, et al. Enhanced-dynamic-range single-shot measurement of nanosecond optical pulse based on fiber pulse replication loop. [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0408005. (in Chinese)
潘雪, 李学春, 李国扬, 等. 利用脉冲复制环提高纳秒脉冲单次测量的动态范围[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408005.