

文章编号: 0253-2239(2010)04-1051-04

# 神光-Ⅲ原型装置初步的激光脉冲整形实验

王文义 赵润昌 栗敬钦\* 李海 梁樾 莫磊 王方

刘兰琴 孙志红 朱启华 景峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 针对物理实验要求的三台阶整形脉冲(脉冲宽度比为 1.5 ns:1 ns:0.5 ns, 幅度比为 1:4:16), 在神光-Ⅲ原型(TIL)装置上开展了脉冲时间波形整形实验研究。首先, 针对发射目标利用激光性能仿真模型预测注入激光系统的激光能量和脉冲波形。然后, 在脉冲整形后进行不同功率的激光发射对脉冲波形进一步修正: 利用实验测量的频率转换效率修正各光束  $1\omega$  能量和  $1\omega$  脉冲波形; 通过拟合实验测量的能量数据修正注入激光能量; 通过增益-通量曲线修正注入激光脉冲波形。最后, 将各束注入脉冲波形再次折中作为脉冲波形调整的最终依据。实验结果表明, 对靶面要求的  $3\omega$ -3 ns-0.5 kJ(单束)的三台阶整形脉冲, 8 束脉冲波形与要求比较一致; 三个台阶的束间瞬时均方根功率不平衡分别约为 30%, 10% 和 5%。

**关键词** 高功率激光; 脉冲整形; 功率平衡; 神光-Ⅲ原型装置

中图分类号 O434.12 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1051

## Preliminary Laser-Pulse-Shaping Experiment on Technical Integration Line

Wang Wenyi Zhao Runchang Su Jingqin Li Hai Liang Yue Mo Lei

Wang Fang Liu Lanqin Sun Zhihong Zhu Qihua Jing Feng

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

**Abstract** To meet three-step  $3\omega$  temporally shaped pulse (the pulse-width ratio of three steps is 1.5 ns:1 ns:0.5 ns and the amplitude ratio is 1:4:16) required by physics experiment, preliminary laser-pulse-shaping experiment is performed on technical integration line (TIL). Firstly, laser energy and pulse shape of the injection laser system (pre-amplification system) are primarily predicted to tune out systematic differences among the eight beams by laser performance simulation model according to the shot mission and previous data. Secondly, several laser shots at different laser power are done to further modify the pulse shape;  $1\omega$  energy and  $1\omega$  pulse are corrected by the experimental frequency conversion efficiency for every beam. The injection laser energy by fitting experimental input and output energy data, and the injection pulse shape by gain-fluence curve based on the above corrected  $1\omega$  pulse and  $1\omega$  energy. Finally, all the injection pulses are compromised again for the final pulse shaping. The experimental 8-beam three-step pulses of  $3\omega$  at target are comparatively consistent with the requirement. For  $3\omega$ -3 ns-0.5 kJ (single-beam) pulse, the three-step beam-to-beam instantaneous root mean square (rms) power imbalance are about 30%, 10% and 5%, respectively.

**Key words** high-power laser; pulse shaping; power balance; technical integration line

## 1 引 言

功率平衡是高功率固体激光装置的重要性能指标之一。功率平衡一般要求激光装置的各光束光输出激光能量一致、输出脉冲波形一致。研究表明, 使脉冲后期功率不平衡降低的增益饱和效应与脉冲早

期低强度下的频率转换过程的强烈强度依赖结合在一起, 使得整形脉冲早期(低强度部分)的功率不平衡最大<sup>[1~4]</sup>。因而, 整形脉冲实现功率平衡的控制难度更大。目前, 国内对高功率激光装置方波脉冲波形的控制问题研究较多<sup>[5~7]</sup>, 对整形脉冲波形的

收稿日期: 2009-08-01; 收到修改稿日期: 2009-10-14

基金项目: 国家 863 计划和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2007B08005)资助课题。

作者简介: 王文义(1975-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率激光装置的光传输、放大方面的研究。

E-mail: wangexiao2012@163.com

\* 通信联系人。E-mail: sujingqin@hotmail.com

控制尚未见报道。

本文针对物理实验要求的三台阶整形脉冲,通过理论模型预测和实验脉冲波形调整等方法,在神光-Ⅲ原型装置(TIL)上开展了初步的脉冲整形实验研究,并对三台阶脉冲的功率平衡情况进行了分析。

## 2 脉冲整形过程

### 2.1 脉冲整形的总体思路

针对物理实验要求的三台阶整形脉冲,首先利用脉冲波形预测模型<sup>[8]</sup>给出初步结果,然后利用预测脉冲通过前端系统的闭环控制进行初步脉冲整形,最后通过几次激光发射对实验结果不断修正。

物理实验要求的  $3\omega$ (351 nm)三台阶脉冲如图 1 所示。三个台阶的脉冲宽度比为 1.5 ns:1 ns:0.5 ns,三个台阶的幅度比为 1:4:16,单脉冲能量为 500 J。

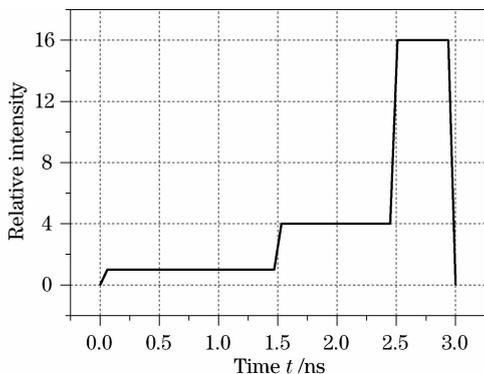


图 1 物理实验要求的  $3\omega$  三台阶整形脉冲波形

Fig. 1 Three-step  $3\omega$  temporally shaped pulse required by physics experiment

### 2.2 脉冲波形预测过程

如图 2 所示,脉冲波形预测(反演)按照“ $3\omega \rightarrow$

$1\omega \rightarrow$ 注入”的顺序分两段进行,即频率转换段和基频段。频率转换段由  $3\omega$  波形经靶场系统反演到主放系统输出  $1\omega$  波形;基频段根据主放系统输出波形依次经过主放系统、预放系统反演到前端输出位置(前端系统的任意波形发生器和前端输出波形通过闭环控制对脉冲波形进行调整)。值得指出的是,TIL 8 束激光共用同一个种子脉冲(即前端输出脉冲),脉冲波形的调整只能针对一个脉冲波形,因而将预测到前端输出位置的各束脉冲波形进行折衷,即将 8 束激光脉冲波形平均得到脉冲整形的目标脉冲。

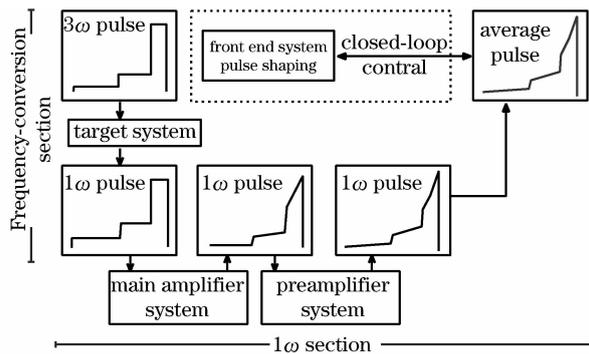


图 2 脉冲波形预测流程示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of pulse-shape prediction process

对频率转换段,由于窄带脉冲激光的频率转换效率只和功率密度有关,采用拟合实验频率转换效率曲线( $3\omega$  功率密度和  $1\omega$  功率密度的对应关系)的方法求解。利用频率转换效率曲线由  $3\omega$  波形求解  $1\omega$  波形,对  $1\omega$  波形积分即得到  $1\omega$  能量。典型的三台阶脉冲经频率转换段反演结果,如图 3 所示。频率转换效率曲线可以根据实验数据利用高斯函数和线性回归算法拟合得到。

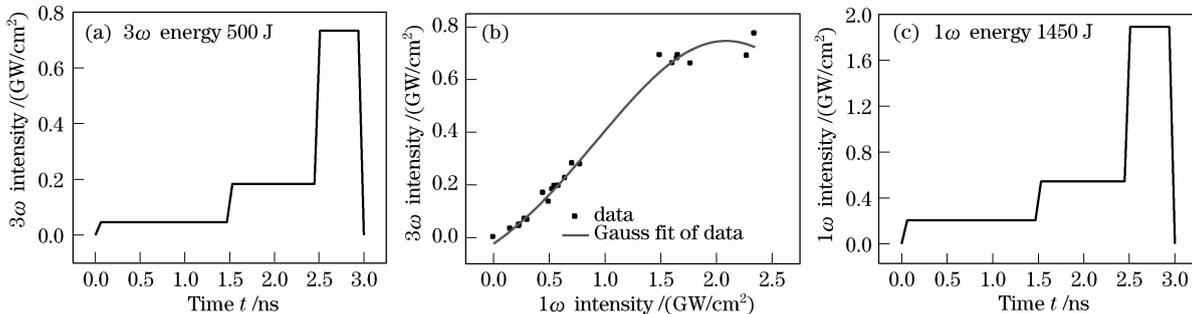


图 3 频率转换段脉冲波形反演示例。(a)要求的  $3\omega$  脉冲,(b)拟合实验效率曲线和(c)求解的  $1\omega$  脉冲

Fig. 3 Inversion pulse waveform example of frequency conversion section. (a) Required  $3\omega$  pulse, (b) fitting curve of frequency conversion efficiency and (c) resolved  $1\omega$  pulse

对基频段,脉冲波形的反演采用基于类似脉冲波形的增益通量曲线法。一般认为,在其它条件相同时窄带脉冲激光的放大过程与脉冲形状无关,但实际计算中发现,在多级放大过程中高对比度的整形脉冲(如 Haan 脉冲<sup>[1]</sup>)比单调的指数形脉冲的放大程度仍有百分之几的相对差异,而相似波形的差异很小,因而基于类似波形进行求解。初步判断其

原因是多级放大过程中各时刻的增益恢复和能量提取程度的不同导致。

使用增益通量曲线法求解三台阶脉冲的注入脉冲如图 4(a)所示,将求出的注入波形代入 SG99<sup>[9]</sup>放大模型进行验算得到的  $1\omega$  脉冲波形与要求的  $1\omega$  脉冲一致,如图 4(b)所示。

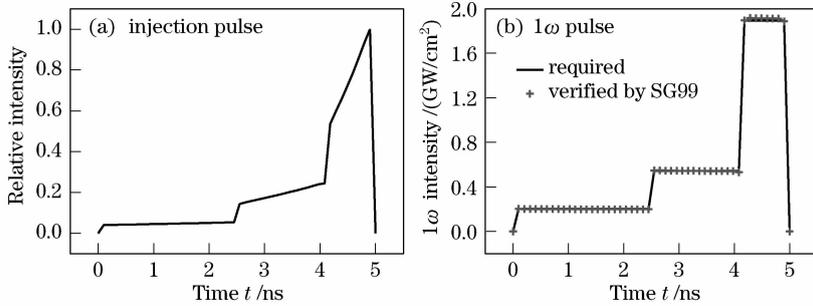


图 4 基频段脉冲波形反演示例。(a)注入脉冲和(b) $1\omega$ 脉冲

Fig. 4 Inversion example of  $1\omega$  section. (a) Resolved injection pulse and (b)  $1\omega$  pulse

### 2.3 实验脉冲整形过程

实验脉冲整形过程如图 5 所示。首先,在 1 ns 方波脉冲输出条件下将频率转换晶体调到三倍频效率最佳位置,固定该位置进行不同功率的 1 ns 方波脉冲激光发射,得到 1 ns 方波脉冲的频率转换效率曲线。将三台阶整形脉冲视为三个不同功率的方波,根据 1 ns 方波的频率转换效率曲线预测前端输出脉冲波形。然后,根据预测的脉冲波形在前端进

行初步脉冲整形,并进行三台阶脉冲激光发射。由于 1 ns 方波与三台阶脉冲的频率转换效率曲线有一定差异,直接由 1 ns 方波的效率曲线得到的三台阶脉冲一般不满足要求。需要再进行几次三台阶脉冲激光发射,并利用三台阶波形的效率曲线和预测模型对整形脉冲进行修正。如果实验得到的三台阶脉冲满足物理实验要求,则脉冲整形完成。

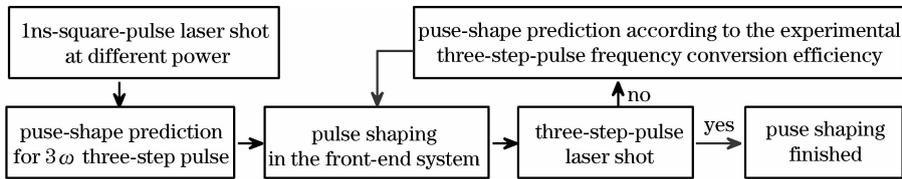


图 5 实验脉冲整形过程示意图

Fig. 5 Illustration of experimentally pulse shaping process

### 3 实验结果分析

对实验测量的脉冲波形,选取各波形半高全宽

的中心位置作为功率平衡计算的时间基准<sup>[10]</sup>。对于几个纳秒的激光脉冲,一般采用束间瞬时功率的

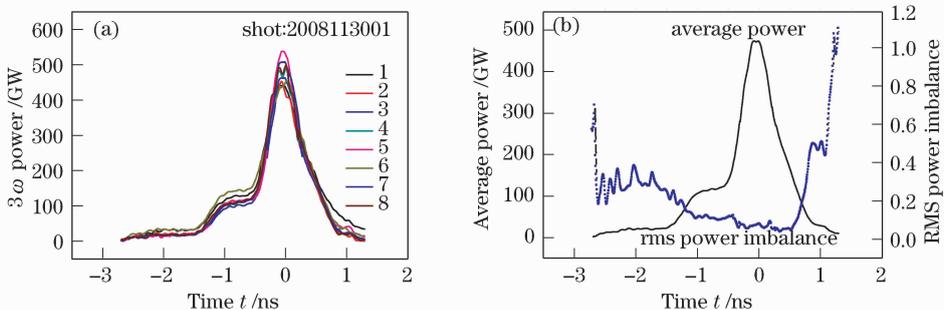


图 6 (a) TIL 典型的 8 束  $3\omega$  三台阶整形脉冲和(b)束间瞬时功率不平衡

Fig. 6 (a) Typical  $3\omega$  three-step pluses of 8 beams on TIL and (b) instantaneous rms power imbalance

均方根值(RMS)计算功率不平衡度<sup>[2]</sup>。典型的 8 束  $3\omega$  三台阶整形脉冲和束间瞬时功率不平衡,如图 6 所示。由图 6(a)可见, $3\omega$  波形与要求的脉冲波形比较一致,但上升沿和下降沿并不陡峭,第三台阶波形为高斯形,无明显平顶,这主要是因前端系统的任意波形发生器的控制精度不高所造成的。由图 6(b)可见,对靶面  $3\omega$  的三台阶脉冲,第一台阶的功率不平衡最大,约 30%左右;第二台阶 10%左右;第三台阶约 5%左右。

## 4 结 论

针对 TIL 装置,通过脉冲波形预测、脉冲整形和多次激光发射结果的反复迭代,获得了物理实验要求的三台阶整形脉冲。从实验结果看,要实现较高对比度的整形脉冲的功率平衡,有必要改进 TIL 使其具备对各光束脉冲波形调整的独立控制能力。

### 参 考 文 献

- O. S. Jones, D. R. Speck, W. H. Williams *et al.*. The NIF's power and energy ratings for ICF-shaped pulses [C]. *SPIE*, 1998, **3492**: 49~54
- S. Glenzer, O. Jones, D. R. Speck *et al.*.  $3\omega$  power balance procedure on the NIF[P]. UCRL-ID-142777, 2001,1~10
- C. C. Widmayer, O. S. Jones, D. Speck R. *et al.*. The NIF's power and energy ratings for flat-in-time pulses [C]. *SPIE*, 1998, **3492**: 11~21
- Wang Wenyi, Su Jingqin, Li Yangchun *et al.*. Power-balance numerical analysis of high-power Laser[J]. *Chinese J. lasers*, 2008, **35**(S1):73~77  
王文义,栗敬钦,李阳春等. 高功率激光功率平衡的数值分析[J]. 中国激光,2008, **35**(S1):73~77
- Liu Renhong, Cai Xijie, Yang Lin *et al.*. Numerical simulation of output pulse shape for "Shengguang II"[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(12): 4189~4193  
刘仁红,蔡希洁,杨琳等. 神光-II装置激光输出波形的数值模拟[J]. 物理学报, 2004, **53**(12): 4189~4193
- Zhao Shulin, Zhu Baoqiang, Zhan Tingyu *et al.*. Research on pulse shape properties of high-power Nd :glass laser frequency tripling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(8): 4170~4175  
赵书林,朱宝强,詹庭宇等. 高功率钕玻璃激光三倍频脉冲时间波形的研究[J]. 物理学报, 2006, **55**(8): 4170~4175
- Tang Lijia, Cai Xijie, Lin Zunqi. Control of pulse shape in "shengguang II" main amplifiers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(6): 1075~1079  
唐立家,蔡希洁,林尊琪. 神光-II"主放大器中的波形控制[J]. 物理学报, 2001, **50**(6): 1075~1079
- Wang Wenyi, Su Jingqin, Zhao Runchang *et al.*. High-power solid-state laser performance simulation model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(S1): 23~27  
王文义,栗敬钦,赵润昌等. 高功率固体激光性能仿真模型[J]. 光学学报,2008, **28**(S1): 23~27
- Jingqin Su, Wenyi Wang, Feng Jing *et al.*. The code SG99 for high power laser propagation and its application [C]. *SPIE*, 2005, **5627**:527~531
- Sun Zhihong, Wang Wenyi, Liu Hua *et al.*. The technology of power balance measurement of multi-beam laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6):1493~1497  
孙志红,王文义,刘华等. 多路激光功率平衡测量技术研究[J]. 中国激光,2009, **36**(6):1493~1497