

# SILEX-I 超短脉冲激光装置放大前级输出 能量稳定性提升

黄晚晴 谢 娜 孙 立 王晓东 郭 仪 李 庆

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理国家重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 输出能量的稳定性是超短脉冲激光装置的一个重要指标。为提升 SILEX-I 超短脉冲激光装置放大前级的能量稳定性,通过实验测量了放大前级的再生放大器和预放大器及其抽运光的能量稳定性,发现抽运光的能量波动对再生放大器的能量稳定性影响较大,是放大前级输出能量波动的主要来源。为解决这一问题,采用 Frantz-Nodvik 方程和统计方法对抽运光波动造成的主激光波动进行了理论分析和数值模拟。分析了多种稳定性提升措施,如导出延后、饱和放大和多束抽运光抽运等。采用稳幅器件有效地提高了输出能量的稳定性,放大前级的输出能量波动的均方根值从 4% 左右降到 1% 以下。

**关键词** 激光光学;超短脉冲激光装置;激光技术;再生放大器;能量稳定性

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100512

## Improving Energy Stability of Front Amplifier in SILEX-I Laser Facility

Huang Wanqing Xie Na Sun Li Wang Xiaodong Guo Yi Li Qing

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

**Abstract** The stability of output energy is an important parameter for ultra-short laser facility. To improve the energy stability of the front amplifier in SILEX-I ultra-short laser facility, the energy fluctuation of regenerative amplifier and pre-amplifier and their pump laser are measured by experiment. It reveals that the fluctuation of the pump energy has great influence on the stability of regenerative amplifier. It is the main cause of the energy fluctuation of the front amplifier. To solve this problem, the fluctuation of the main laser caused by the unstable pump laser is simulated based on Frantz-Nodvik equation and statistical method. Ways of improving the stability have been analyzed such as delaying the output, saturated amplification, and using multiple pump lasers. Stabilization is achieved by adopting an amplitude stabilizer. The root mean square (RMS) of energy output is lowered from about 4% to below 1%.

**Key words** laser optics; ultra-short laser facility; laser technology; regenerative amplifier; energy stability

**OCIS codes** 140.3280; 140.3425; 140.4480

## 1 引 言

超短超强脉冲激光在 X 射线激光、惯性约束聚变、实验天体物理、激光粒子加速器等强场物理领域有着重要的应用<sup>[1,2]</sup>。激光装置的输出能量的稳定性是一个重要的指标,直接影响到物理实验的成功率和可重复性。超短超强脉冲激光装置的放大前级一般由再生放大器和预放大器构成,具有极高增益(大于  $10^6$ ),其输出能量的稳定性直接决定系统的

能量稳定性,对装置运行很重要<sup>[3,4]</sup>。为提高 SILEX-I 超短脉冲激光装置放大前级的能量稳定性,本文测量了放大前级的再生放大器和预放大器及其抽运光的能量稳定性,基于 Frantz-Nodvik 方程和统计方法对能量波动进行了理论分析和模拟,分析多种稳定性提升措施,并对稳幅器件输出能量的稳定性开展了实验,最终使得输出能量波动的均方根(RMS)值减小了 88.7%,获得了稳定的输出。

**收稿日期**: 2011-02-24; **收到修改稿日期**: 2011-03-24

**基金项目**: 国防科技重点实验室基金(9140C680301100C6806)资助课题。

**作者简介**: 黄晚晴(1984—),女,硕士,实习研究员,主要从事激光损伤和超短脉冲激光装置性能提升方面的研究。

E-mail: huangwq@caep.ac.cn

## 2 输出能量稳定性的测量

SILEX-I 超短脉冲激光装置的放大前级由一台 SAGA 激光器抽运。对输入的种子光和再生放大器、预放大器两级的输出光的能量波动进行了测量,同时对抽运光的能量波动进行了测量。每组数据连续测量 1000 发激光脉冲,得到能量波动的 RMS 值,测量结果如下:

- 1) 输入种子光能量波动 RMS 值为 0.2%;
- 2) 再生放大器输出能量波动 RMS 值为 5.4%;
- 3) 预放大器输出能量波动 RMS 值为 3.61%;
- 4) 抽运光输出能量波动 RMS 值为 1.24%。

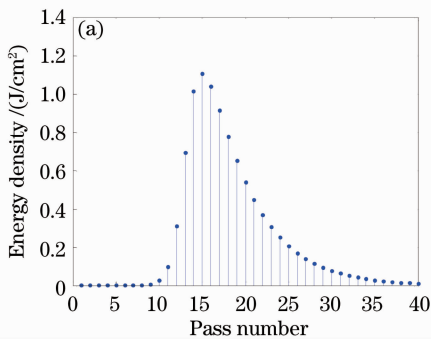
从测量结果来看,再生放大器给放大前级引入了较大能量波动,是后级能量波动的源头。

## 3 再生放大器的理论分析与模拟

再生放大器是放大过程的重要一环。从振荡器的脉冲序列中选出一个种子光,使其在腔内多次往返。由于种子光脉冲能充分提取介质储能,所以可获得很高的增益<sup>[5]</sup>。由于其工作原理,抽运光能量的较小波动就会对其输出能量的稳定性有较大的影响,对此可进行以下模拟。

根据 Frantz-Nodvik 方程<sup>[6]</sup>,考虑放大过程中的损耗及下能级的弛豫,可知放大过程中的能流递推关系为

$$\begin{cases} J_{k+1} = TJ_s \ln\{G_k [\exp(J_k/J_s) - 1] + 1\} \\ G_k = \exp(g_k) \\ g_{k+1} = g_k - p\Delta J_k/J_s \\ \Delta J_k = J_{k+1}/T - J_k \\ \eta_k = \Delta J_{k-1}/(J_s g_{k-1}) \end{cases}, \quad (1)$$



式中  $k$  为激光在腔内走过的程数,  $J$  为激光能流,  $T$  为损耗,  $\eta$  为提取效率,  $p$  为增益恢复数,  $J_s$  为饱和能流。由此,可得到一个激光脉冲在再生腔内的演化过程。代入 SILEX-I 装置再生放大器的实际参数进行计算,结果如图 1 所示,当放大过程中的净增益大于零时,脉冲随着放大次数的增加不断增长,达到峰值时大部分储能已被提取、增益与损耗开始平衡,如果脉冲再进入介质中,则损耗大于增益、净增益为负,脉冲幅度逐渐降低,直至脉冲消失。

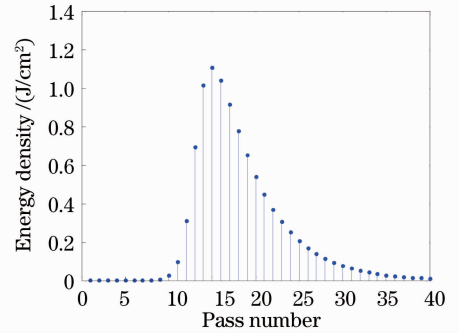


图 1 再生放大器内的脉冲演化

Fig. 1 Pulse evolution in regenerative cavity

因此,为获得高能量的输出脉冲,一般通过调节系统延时,将脉冲在达到峰值能量后导出。但在实际装置中,脉冲在再生腔内多次通过电光开关和晶体,会引入色散,使脉冲展宽。引入的色散在最后需由压缩光栅来补偿<sup>[7]</sup>,这就要求脉冲的腔内色散是定值,即要求脉冲在腔内的放大程数一定。如果抽运光的强度大,则脉冲达到峰值所需的程数少,整个脉冲包络前移。如图 2(b)的抽运光能量密度为图 2(a)的 1.3 倍,其它参数不变。可见抽运光强时,峰值能流密度高,且建立时间快。

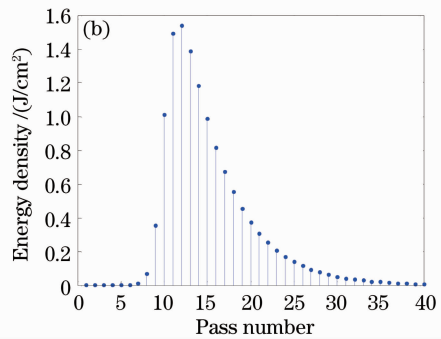


图 2 不同抽运强度下激光脉冲在再生腔内的演化

Fig. 2 Pulse evolution in regenerative cavity under different pump densities

当抽运光输出能量抖动时,会造成脉冲包络前后抖动,峰值建立时间不一致。当在固定时间导出脉冲时,获得的脉冲能量相应抖动。这是再生放大

器输出能量不稳定的主要原因。

将实际测量到的数据带入程序进行模拟计算。抽运光的波动可从统计的角度考虑,这种随机波动

受很多因素的同时影响,从定义上满足正态分布<sup>[8]</sup>,其概率密度函数的形式为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

该正态分布的方差  $\sigma^2$  即为波动的 RMS 值。模拟中采用测量到的抽运光能量波动的 RMS 值(1.24%)。将这个正态分布代入能流密度方程,可得到对应的输出脉冲能量抖动。计算 1000 发脉冲,并将其能流密度演化图叠加在一起,结果如图 3 所示。

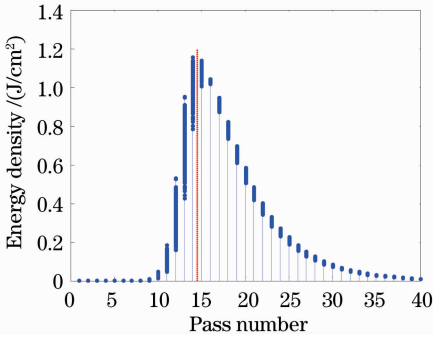


图 3 抽运光能量波动下 1000 发主激光脉冲的叠加

Fig. 3 Overprint of 1000 laser shots with pump energy fluctuation

可见,如果在峰值脉冲后导出(红线处),会导致输出脉冲能量的很大波动。经计算,输出脉冲的 RMS 值为 5.41%。与测量结果基本相符。

## 4 输出能量稳定性的提高

对抽运光能量不稳定性带来的再生输出能量不稳定性,可有以下措施来改进:

### 1) 导出延后

由图 3 可见,如果将导出延后 2 程,可获得相对较小的能量抖动。再往后延迟,波动幅度又会再次变大。在实际工作中,可通过测量不同延时情况下输出能量的波动,最终找到一个能量相对稳定的导出延时。

### 2) 增加抽运光数量

提升稳定性也可以从抽运光入手。抽运光一般采用的是商用激光器,其输出稳定性有其极限,RMS 值理论指标为 1%。但如果采用多台激光器来同时抽运,可以获得更稳定的抽运光。这可以用统计理论来解释为

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma^2}{n}\right)^2} \cdot n = \frac{\sigma^2}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

式中  $\sigma^2$  为正态分布的方差,对应 1 台激光器的波动的 RMS 值。 $n$  台激光器同时抽运,等同于  $n$  个独立

的正态分布的叠加。则最后波动的 RMS 值可以减小  $n$  的平方根倍。但这种方法成本较高。

### 3) 饱和放大

能量波动较大的脉冲,进入后级的多程放大器。如果使后级放大器对输入脉冲进行饱和放大,则可以一定程度上抹平输入脉冲的能量波动。由前面测量结果可见,由于预放大器接近饱和放大状态,已使得其输出的稳定性优于了再生放大器的输出。如果在现有参数不变的情况下,将预放大器程数由现有的 4 程增加至 6 程,就可以达到饱和放大,预计其输出 RMS 值可降至 1.73%。目前这一工作正在进行中。

### 4) 稳幅器件

稳幅器件有多种构型和设计,其根本的原理是测量激光脉冲的输出能量,并反馈回可控制输出能量的器件,实现闭环的能量稳定<sup>[9,10]</sup>。在实验中,采用了新型的稳幅器件,对激光脉冲实现了实时的自稳幅,取得了良好的结果。

采用的稳幅器基本原理如下:输入激光通过棱镜和波片分光,小部分进入光电导,大部分进入延迟线。光电导根据激光的能量强度,对延迟线中的电光开关加不同的电压,改变其对激光的透过率。通过精确调节波片和电光开关的姿态,可使电光开关的透射率与输入光强有接近反比的关系,则可实现稳定地输出激光能量。其原理如图 4 所示。

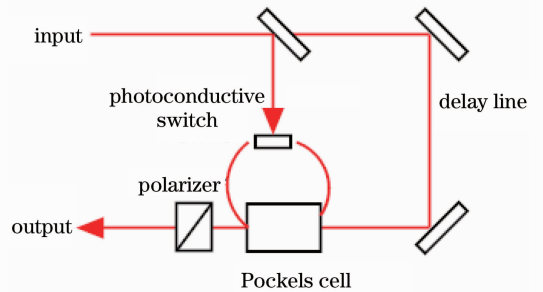


图 4 稳幅器原理图

Fig. 4 Principle scheme of the amplitude stabilizer

将稳幅器放置在预放大器之后,使其对预放大器的输出脉冲进行稳幅。采用能量卡计对入射光和出射光进行同时监测。实验测量了 1000 发次的激光脉冲,得到结果如图 5 所示。

预放大器的输出能量波动的 RMS 值为 3.94%,经稳幅后输出能量的 RMS 值减小为 0.88%,稳定性提升到原来的 4.5 倍。同时,通过加入衰减,对稳幅器在不同的输入能量下均进行了测量,对 3, 5 和 10 mJ 的输入能量,稳幅器均可取得类似结果,对入

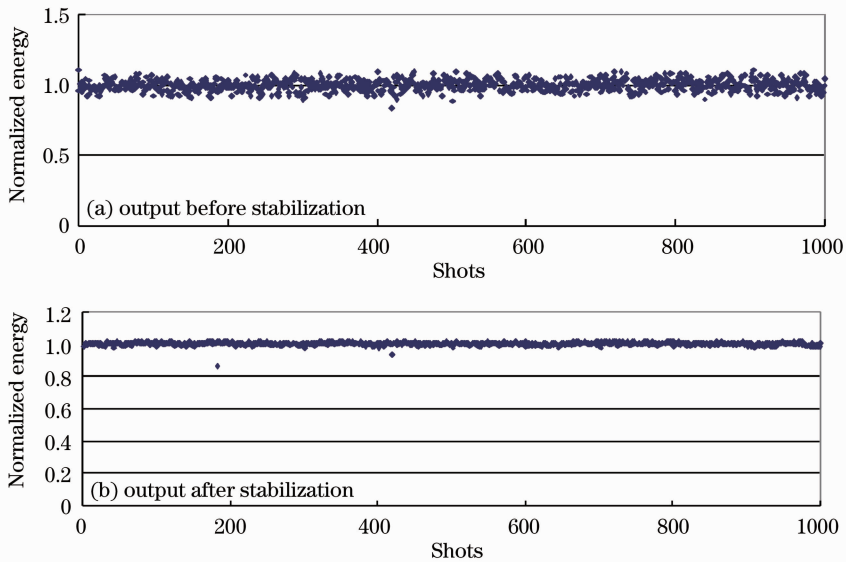


图 5 1000 发次的能量波动(用平均能量归一化后)

Fig. 5 Energy fluctuation of 1000 laser shots (normalized by average energy)

射激光的透射率可保持在 50%。由于稳幅器是通过调节开关透射率,使其与输入光强成反比来实现稳幅,再加上固有的损耗,使得稳幅器的损耗较大,输出能量约为输入能量最小值的 60%。所以,输入激光的波动最低点决定了稳幅器的效率。对于损耗的能量,通过增加前面预放大器的程数,可以得到补偿。

## 5 结 论

超短超强脉冲激光装置放大前级的输出能量稳定性是一个重要的指标,而能量波动主要来自再生放大器的输出能量波动。通过对 SILEX-I 超短脉冲激光装置放大前级的能量波动进行测量和分析,提出了多种措施提升能量稳定性。最终通过稳幅器件的应用,将放大前级输出能量波动的 RMS 值从 4% 降到 1% 以下,实现了放大前级能量的稳定输出。

### 参 考 文 献

- 1 S. Backus, C. G. Durfee III, M. M. Murnane *et al.*. High power ultrafast lasers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(3): 1207~1223
- 2 M. D. Perry, G. Mourou. Terawatt to pett watt subpicosecond lasers[J]. *Science*, 1994, **264**(5161): 917~924

- 3 Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhou Shan *et al.*. Online calibration methods for high energy laser energy measuring equipment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2399~2403  
魏继峰, 关有光, 周 山等. 高能激光能量测量装置的现场标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2399~2403
- 4 Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhou Shan *et al.*. Effect to online energy measurement device for long-pulse laser by laser pulse width[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 1088~1092  
魏继峰, 关有光, 周 山等. 激光脉冲宽度对长脉冲激光能量在线测量装置的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 1088~1092
- 5 Chang Liang, Chen Meng, Li Gang *et al.*. Thermal characteristic analysis of laser diode side-pumped regenerative amplifier for kHz picosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 873~876  
常 亮, 陈 檬, 李 港等. 激光二极管侧面抽运千赫兹皮秒激光再生放大器的热特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 873~876
- 6 L. M. Fran, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~2349
- 7 Zhang Junwei, Wang Xiao, Lin Donghui *et al.*. Dynamic response control and analysis of large aperture tiled grating mount [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112010  
张军伟, 王 道, 林东晖等. 大口径光栅拼接架动力响应控制分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112010
- 8 Liu Xiaoshi, Cheng Hongjian, He Lamei. Probability and Mathematical Statistics [M]. Beijing: Science Press, 2000. 71~73  
刘 晓 石, 陈 鸿 建, 何 腊 梅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 71~73
- 9 L. Conti, M. De Rosa, F. Marin. Low-amplitude-noise laser for AURIGA detector optical readout [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(31): 5732~5738
- 10 R. S. Abbott, P. J. King. Diode-pumped Nd: YAG laser intensity noise suppression using a current shunt[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(2): 1346~1349