

# 利用光参量啁啾脉冲放大进行任意光谱整形方案的稳定性分析

潘 雪 李学春 王江峰 姜有恩 张 鹏 卢兴华 李 响

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

**摘要** 为了在光参量啁啾脉冲放大系统中获得百飞秒脉冲,需要对注入种子啁啾脉冲进行光谱整形来补偿增益窄化、增益饱和以及自相位调制。利用时域整形的抽运光在参量耦合过程中对注入超高斯啁啾种子光进行任意光谱整形是一种新型的光谱整形方法,与在参量作用之前对种子光的光谱整形进行对比,它不会引入光谱相位调制,而且光谱整形和能量放大可以同时进行,通过数值模拟可知两种方案对于注入抽运光和种子光的稳定性要求基本相同。为了保证参量作用后的信号光的能量抖动优于 $\pm 5\%$ ,对于抽运光来说,其峰值光强变化必须控制在 $\pm 1\%$ 以下,而对于输入的种子光光强可以控制在 $\pm 3\%$ 以下。

**关键词** 非线性光学;光谱整形;光参量啁啾脉冲放大;增益窄化;增益饱和

**中图分类号** O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0102004

## Study on Stability of Arbitrary Spectral Shaping Using Optical Parametric Chirped Pulse Amplification

Pan Xue Li Xuechun Wang Jiangfeng Jiang Youen Zhang Peng  
Lu Xinghua Li Xiang

(National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** In order to obtain pulse width of hundred femtoseconds in optical parametric chirped pulse amplification system, the spectrum of the seed pulse is shaped to compensate gain narrowing, gain saturation and self phase modulation. A new arbitrary spectral shaping method for chirped seed pulse can be achieved with pump pulse time shaping in optical parametric amplification. Compared with the spectral shaping method for chirped seed pulse before optical parametric amplification, the new method will not bring the spectral phase modulation, and the procedure of spectral shaping and energy amplifying will go on in the same time. The results from numerical simulation indicate that the two methods require the same stability for input pump and seed pulse. To insure the amplified signal energy stability is better than  $\pm 5\%$  after parametric coupling, the peak intensity change of pump pulse must be controlled less than  $\pm 1\%$ , and the peak intensity stability of seed pulse can be controlled in the range of  $\pm 3\%$ .

**Key words** nonlinear optics; spectral shaping; optical parametric chirped pulse amplification; gain narrowing; gain saturation

**OCIS codes** 190.4970; 300.6420; 320.5540

## 1 引 言

激光脉冲峰值功率的不断提高为惯性约束核聚

变、强场物理等领域提供了强有力的实验手段。在惯性约束核聚变装置中,输出的激光脉冲的峰值功

收稿日期: 2010-04-07; 收到修改稿日期: 2010-05-16

作者简介: 潘 雪(1984—),女,博士研究生,主要从事光参量啁啾脉冲放大信噪比提高以及脉冲整形等方面的研究。

E-mail: pxll33@siom.ac.cn

导师简介: 李学春(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与光纤应用等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn

率主要由压缩脉冲的能量和脉宽决定。由于受限于激光能量的提高,通过压缩激光脉冲的脉宽是进一步提高激光脉冲峰值功率的有效方法。对于理想的啁啾脉冲放大系统来说,压缩脉冲的脉宽以及信噪比分别取决于压缩之前的种子脉冲光谱宽度和光谱分布。放大过程中的增益窄化和增益饱和效应会使放大脉冲的光谱宽度和光谱分布发生改变,从而影响最短的输出脉冲宽度<sup>[1]</sup>。光谱预补偿技术就是在激光进入放大系统之前先进行光谱整形,衰减光谱峰值波长附近的成分来补偿放大器的增益不均匀性,减轻光谱窄化效应的影响,同时破坏光谱红端和蓝端的不对称性来补偿增益饱和,从而获得更短的压缩激光脉冲来进一步提高峰值功率。在理论上假定放大后的啁啾脉冲光谱分布为高斯或超高斯的情况下,对高功率钕玻璃激光放大系统进行逆运算,得到中心凹陷、光谱蓝移的种子啁啾光的光谱分布,为光谱整形提供了理论依据<sup>[2,3]</sup>。

光谱整形方法很多,最常用的是在再生放大腔中加入干涉滤波片或石英双折射晶片,但它们增加了再生放大腔的损耗且调节复杂<sup>[4]</sup>。可编程声光光谱色散滤波器可以通过控制声波信号来任意改变光谱的形状,方便调节,但光谱调制的稳定性较难控制<sup>[5]</sup>。对于窄带光谱来说,由于光谱分辨率的要求高,近年来提出了利用变栅距反射光栅<sup>[6]</sup>以及石英

晶体平凸透镜<sup>[7]</sup>等新的光谱整形技术。郭爱林等<sup>[8]</sup>对石英晶体窄带光谱整形技术进行了理论分析和实验研究,虽然不会引入降低压缩脉冲信噪比的光谱相位畸变,但是很难得到不对称的光谱分布从而补偿增益饱和效应。张颖等<sup>[9]</sup>提出了利用光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)行任意光谱整形的新方案并进行了实验验证,但是没有对此方案的稳定性进行详细的理论分析。本文通过数值模拟,对利用OPCPA进行任意光谱整形的稳定性和可行性进行了分析,并且与在参量作用前对种子光进行光谱整形的方案进行了比较。

## 2 理论分析

在光参量啁啾脉冲放大过程中,由于抽运光与展宽后的啁啾信号光参量耦合过程中的增益是由抽运光强所决定的<sup>[10,11]</sup>,所以通过对抽运光进行时域整形,即改变抽运光的功率谱密度,与未饱和参量作用后的信号光的时域分布就由抽运光光强分布所决定,所以也就间接地对信号光进行了时域整形,由于啁啾激光脉冲频率间隔和时间间隔的对应关系,种子光的频谱也得到了相应的调制,这就是利用OPCPA进行任意光谱整形的原理,如图1所示。

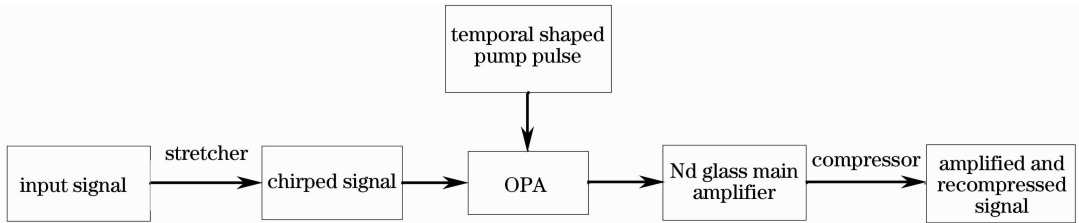


图1 OPCPA光谱整形示意图

Fig.1 Schematic of an OPCPA spectral shaping system

对于目前神光II升级拍瓦(PW)装置来说,它最终要求的输出脉宽为1 ps,输出能量为1 kJ。根据傅里叶变换极限,它对压缩之前光谱的要求并不高,只有1.47 nm。所以不用考虑增益窄化与增益饱和所带来的问题。但是为了得到百飞秒短脉冲,根据理想的傅里叶变换极限,脉冲的带宽越宽,变换极限下的脉宽越窄,所以限制了压缩之前的光谱宽度。对于波长为1053 nm的信号光来说,6.5 nm谱宽傅里叶变换极限宽度为230 fs,而5 nm的谱宽对应294 fs。根据神光九路钕玻璃功率放大链的参

数,在系统透射率为22%的条件下,假设终端放大后进入压缩器之前的脉冲能量达到1000 J,钕玻璃主放大器输出脉冲波形如图2(a)实线所示的1.5 ns的高斯脉冲,频谱宽度如图2(b)实线所示为5 nm,在钕玻璃主放大链中同时考虑了增益窄化、增益饱和和自相位调制作用,经过逆运算得到了输入主放大链即经过前端光参量放大(OPA)整形后的信号光能量在10 mJ左右,且其光谱分布和时间分布如图2虚线所示,由图2虚线所示的双峰脉冲波形以及光谱可知OPA整形目标函数。

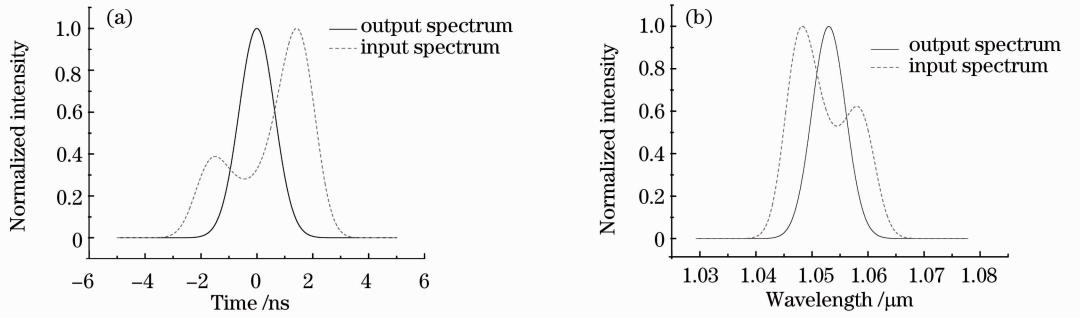


图 2 钕玻璃主放大链的输入和输出光脉冲所需具有的时域波形图(a)和光谱分布图(b)

 Fig. 2 (a) Temporal pulse waveform before and after Nd glass main amplifier  
 (b) spectral pulse waveform before and after Nd glass main amplifier

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_s}{\partial z} &= -i \frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{n_s c} E_i^* E_p \exp(-i\Delta k z), \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} &= -i \frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{n_i c} E_s^* E_p \exp(-i\Delta k z), \\ \frac{\partial E_p}{\partial z} &= -i \frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{n_p c} E_s E_i \exp(+i\Delta k z),\end{aligned}\quad (1)$$

(1)式是忽略了色散和空间衍射效应的三波耦合方程,其中 $E_s, E_i, E_p$ 分别是信号光、闲置光和抽运光, $\omega_s, \omega_i, \omega_p$ 分别是信号光、闲置光和抽运光的角频率, $n_s, n_i, n_p$ 是信号光、闲置光和抽运光的折射率, $d_{\text{eff}}$ 为有效倍频系数, $c$ 为光速, $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ 为相位失配量,能量转化过程中满足 $\omega_s = \omega_p - \omega_i$ 。仅仅已知输入和输出信号光的条件下,由于初始条件不足很难逆推出所需的抽运光波形。但是可以采用4阶龙格-库塔算法正推,然后不断地修正初始条件使得到的放大信号光逼近目标函数。具体来说,在利用OPCPA实现光谱整形方案中,假设信号光为固定的超高斯波形,抽运光为不对称双峰结构,通过调整抽运光双峰宽度、间距以及调制度等参数可以得到接近目标函数的输出,同理也可以固定抽运脉冲,用同样的方法与对进入OPCPA之前的信号光进行光谱整形的方案进行比较,调整注入信号光来逼近目标函数,然后在输出脉冲稳定性允许范围内,分析两种方法对抽运光稳定性的要求。

### 3 数值模拟与结果分析

#### 3.1 不对称时域双峰分布的抽运光在OPCPA参量过程中对注入种子光的光谱整形

模拟OPCPA参量过程中不对称时域双峰结构抽运光波形对展宽的啁啾种子光的光谱整形,基本参数如表1所示。

表 1 抽运源与种子源脉冲输入参数

Table 1 Input parameters of pump and seed pulse

	Pump	Seed pulse
Pulse width (FWHM) /ns	7	5.8
Wavelength /nm	526.5	1053
Beam diameter /mm	3.0	3.0
Pulse energy /nJ	$8.24 \times 10^7$	6.4
Peak intensity /(W/cm <sup>2</sup> )	$5.57 \times 10^8$	50
Nonlinear angle /(°)	0.42	0.5
Phase match angle /(°)	12.32	

图2(a)和(b)中虚线为参量耦合整形的目标时域波形及其傅里叶变换频谱。为了简便,以目标时域波形为准,只要能够得到图2(a)所示的目标时域波形,根据傅里叶变换对应关系,其频谱即光谱整形结果必定为图2(b)所示的虚线。OPA采用三硼酸锂(LBO)进行理论模拟,注入种子光为10阶超高斯波形,通过调整不对称时域双峰抽运光参数使输出放大的信号光逼近目标函数如图2(a)虚线所示。由图3(c)可知,此时参量作用还处于未饱和放大阶段,能量的传递方向由抽运光转移到信号光,所以45 mm处可以得到所需的整形输出光脉冲。随着晶体长度的增加,参量作用慢慢进入饱和、过饱和状态,此时能量的传递方向发生逆转,由于参量增益与抽运光强成正比,所以对于前峰低后峰高的抽运光来说,放大的啁啾种子光的后沿最先进入饱和,而由图3(b)可知,当晶体长度大于50 mm时,放大后的种子光的波形由于后峰已经进入饱和状态而引起光强时域波形畸变。由图3(c)所示,当参量作用长度为45 mm时,输出的信号光能量为7 mJ,而增益为 $10^6$ 。但是线性区的参量转换效率较低,抽运光的能量没有被充分地利用。

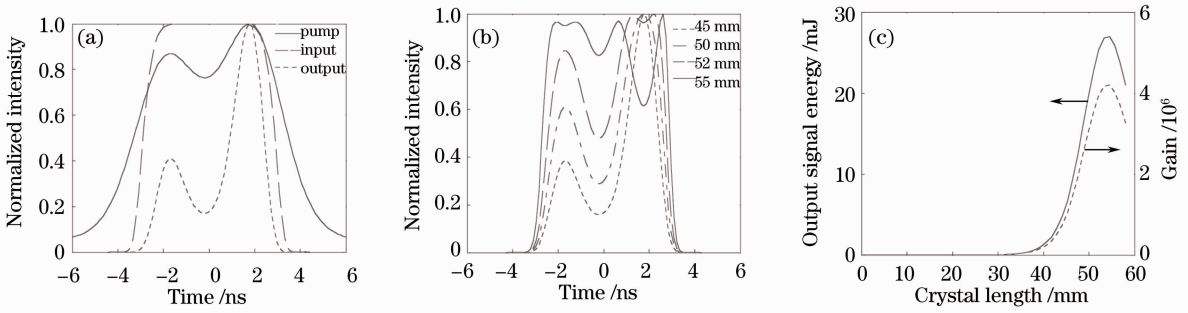


图 3 (a)晶体长度为 45 mm 时输入抽运光和种子光以及放大后信号光的光强分布图, (b)不同晶体长度参量放大后信号光的光强分布图, (c)参量作用后的输出信号光能量与增益随晶体长度的变化关系

Fig. 3 (a) Intensity distributions of input pump pulse, input signal pulse and output signal (crystal length is 45 mm), (b) intensity distributions of amplified signal with different crystal lengths, (c) relation between output signal energy or gain and crystal length

图 4(a)中实线表示抽运峰值强度为 557 MW/cm<sup>2</sup>, 虚线表示抽运光强起伏  $\pm 3.6\%$ , 竖直线表示输出放大信号的稳定区, 此处能量起伏小于 1%, 其所对应的晶体长度为 56 mm, 但由图 3(b)可知, 由于增益过饱和效应, 输出信号光光强分布已经发生了明显的畸变, 在双峰处有明显的能量逆转现象。所以利用 OPCPA 进行任意光谱整形的方法不能使参量作用在稳定区, 为了使放大种子光得到相应于抽运光时域波形的光谱整形效果, 上面已经验证了应该选择长度为 45 mm 的 LBO 晶体, 从图 4(b)中可以看出, 光强时域分布变化不大, 也就是说对光

谱整形效果影响不明显, 但是从图 4(a)中计算出的输出信号的能量起伏已经超过了 20%, 所以参量作用过程发生在线性区虽然能够得到所需的整形放大光脉冲, 但是其稳定性很差, 表 2, 3 分别统计了在 45 mm LBO 晶体中, 初始条件为输入种子光峰值光强为 50 W/cm<sup>2</sup>, 抽运光峰值光强为 557 MW/cm<sup>2</sup> 时进行的参量作用。表 2 为在输入种子光峰值光强不变的条件下, 抽运光强度起伏对输出信号光能量抖动的影响, 同理, 表 3 为在输入抽运光峰值光强不变的条件下, 输入种子光强度起伏对输出信号光能量抖动的影响。

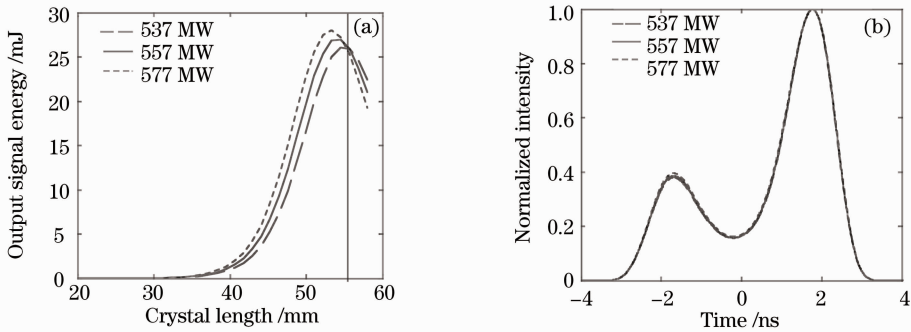


图 4 当抽运光强起伏  $\pm 3.6\%$  时, 参量作用输出能量随晶体长度的变化(a)和晶体长度为 45 mm 时输出的信号光光强分布图(b)

Fig. 4 (a) Relation between output signal energy and crystal length, (b) intensity distribution of amplified signal with 45 mm crystal length when the peak intensity fluctuation of pump is  $\pm 3.6\%$

表 2 抽运光的强度抖动对参量作用后的信号光的稳定性影响

Table 2 Influence of output signal with pump intensity fluctuation

Intensity fluctuation of pump / ( $\pm\%$ )	5.4	3.6	2.5	1.8	1	0.7
Energy fluctuation of output signal / ( $\pm\%$ )	36	24	17	12	7	4.8

表 3 输入种子光的强度抖动对参量作用后的信号光的稳定性影响

Table 3 Influence of output signal with the seed pulse intensity fluctuation

Intensity fluctuation of pump / ( $\pm\%$ )	5	4	3	2	1	0.5
Energy fluctuation of output signal / ( $\pm\%$ )	8.5	6.8	5.2	3.4	1.7	0.85

由表 2,3 可知,为了控制参量作用输出信号光的能量抖动优于 $\pm 5\%$ ,对于抽运光来说光强变化必须控制在 $\pm 1\%$ 以下,而对于输入的种子光光强应该控制在 $\pm 3\%$ 以下。输出的信号光的光强变化与注入种子光的稳定性基本一致,所以为了得到能量 $\pm 5\%$ 输出的信号光,对抽运光的稳定性要求比较高,在 $\pm 1\%$ 以下,而注入信号光的稳定性只要控制在 $\pm 3\%$ 即可。

### 3.2 不对称时域双峰分布注入种子光经过 OPCPA 参量过程后的稳定性分析

另一种整形方法,也是通常所采用的方案,就是在进入 OPA 之前即啁啾脉冲的展宽过程中进行光谱整形,得到不对称时域双峰结构的注入种子光,然后通过参量耦合作用进行能量放大。利用和 3.1 节同样的方法,此时抽运光为 10 阶超高斯光束,通过调整不对称时域双峰结构的信号光来比较两种方案对抽运光以及注入种子光稳定性的要求。基本数据

如表 4 所示。

表 4 抽运源与种子源脉冲参数

Table 4 Input parameters of pump and seed pulse

	Pump	Seed pulse
Pulse width (FWHM) /ns	5.8	5.8
Wavelength /nm	526.5	1053
Beam diameter /mm	3.0	3.0
Pulse energy /nJ	$7.7 \times 10^7$	2.5
Peak intensity /( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	$6.0 \times 10^8$	2
Nonlinear angle /( $^\circ$ )	0.42	0.5

同理,如图 5(a)所示,在 45 mm LBO 晶体中得到了最逼近图 2(a)所示的整形输出信号光。由图 5(c)可知此时输出的信号光能量为 8 mJ,而增益为 $3 \times 10^6$ 。从参量作用输出能量随晶体长度的变化曲线上可以看到,两种方案都工作在相同的未饱和区,由表 2 和图 5 比较可知,它们在同样的抽运光峰值强度抖动下,输出信号光的稳定性基本相同。

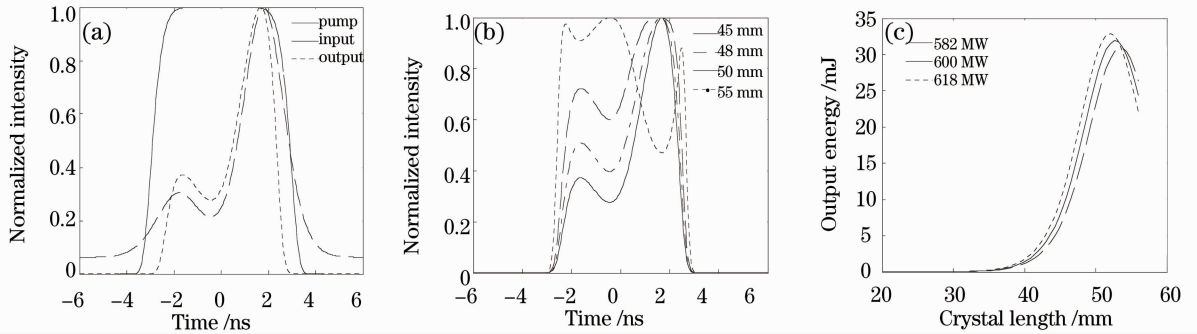


图 5 (a)晶体长度为 45 mm 时输入抽运光和种子光以及放大后信号光的光强分布图,(b)不同晶体长度参量放大后信号光的光强分布图,(c)抽运光峰值强度起伏 $\pm 3\%$ 时,输出信号光能量与晶体长度的变化关系

Fig.5 (a) Intensity distribution of input pump pulse, input signal pulse and output signal(crystal length is 45 mm), (b) intensity distribution of amplified signal with different crystal lengths, (c) relation between output signal energy and gain and crystal length when the peak intensity fluctuation of pump is  $\pm 3\%$

表 5 当输入种子光峰值光强为  $2 \text{ W}/\text{cm}^2$  时,抽运光的强度对参量作用后的信号光的稳定性影响

Table 5 Influence of output signal with pump intensity fluctuation when input seed pulse peak intensity is  $2 \text{ W}/\text{cm}^2$

Intensity fluctuation of pump /( $\pm \%$ )	8.3	3	2.5	1	0.5
Energy fluctuation of output signal /( $\pm \%$ )	36	22	18	7	3.6

## 4 结 论

减小脉宽是获得高功率的有效途径。为了获得超短脉冲,在进入激光主放大链之前,也就是 OPA 输出端就应该得到具有一定能量的整形啁啾光脉冲,从而预补偿在主放大链中的增益窄化以及增益饱和。通常会对输入 OPA 的种子光在展宽过程中进行整形,然后再进行参量放大获得所需能量;另一种方法就是利用时域任意整形的抽运光在

OPA 参量放大过程中对信号光进行任意光谱整形。通过数值模拟在两种方案中得到了相同的光谱整形效果,即目标函数。分析结果表明,前者虽然对注入信号光以及抽运光的脉宽以及能量的要求都比后者低,且输出信号光的能量和转换效率较高,但是它对信号光的整形和放大是分开进行的,而且通常是通过在 OPCPA 展宽的过程中利用变栅距反射光栅以及石英晶体平凸透镜难于实现不对称双峰结构光谱

整形。而后者直接利用 OPA 参量过程中整形的抽运光来实现任意光谱整形和放大,虽然它是以提取抽运光能量为代价来实现超高斯分布,能量较高的注入种子光进行任意光谱整形,但是由于抽运光极窄的带宽不会在参量放大过程中对种子光引入其他的光谱相位调制,而且光谱整形和能量放大同时进行,所以此方法简单灵活。由于两种方案都需要参量作用在未饱和的线性区,为了保证参量作用后的信号光的能量抖动优于 $\pm 5\%$ ,对于抽运光来说,其峰值光强变化必须控制在 $\pm 1\%$ 以下,而对于输入的种子光光强可以控制在 $\pm 3\%$ 以下,所以两种方案中输出信号光的能量稳定性对抽运光稳定性的要求极高。

### 参 考 文 献

- 1 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 721~729  
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 721~729
- 2 Zhang Ying, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Spectral shaping in high-power Nd:glass chirped pulse amplification system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1767~1771  
张颖, 魏晓峰, 朱启华等. 高功率钕玻璃啁啾脉冲放大系统光谱整形[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1767~1771
- 3 Guo Ailin. Spectral Shaping of High-Power Ultra-Short Laser Pulse [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009, 21~30  
郭爱林. 高功率超短激光脉冲光谱整形技术[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2009. 21~30
- 4 C. P. J. Barty, G. Korn, F. Raksi *et al.*. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 219~221
- 5 Pierre Tournois. Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**(8): 245~249
- 6 Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 272~274  
郭爱林, 杨庆伟, 谢兴龙等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 272~274
- 7 Ailin Guo, Qingwei Yang, Fuling Zhang *et al.*. Spatial beam shaping by quartz crystal plano-convex lens[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 586~587
- 8 Guo Ailin, Yang Qingwei, Zhang Fuling *et al.*. Spectrum shaping of chirped pulse[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1582~1585  
郭爱林, 杨庆伟, 张福领等. 啁啾脉冲的光谱整形[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1582~1585
- 9 Ying Zhang, Xiaoming Zeng, Yanlei Zuo *et al.*. Arbitrary spectral shaping using optical parametric chirped pulse amplification[C]. The 8<sup>th</sup> Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Shanghai, 2009
- 10 Wang Yanhai, Pan Xue, Wang Jiangfeng *et al.*. Restrictions of signal-to-noise ratio by amplified spontaneous emission noise of pump pulse in optical parametric chirped pulse amplification system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 980~985  
王艳海, 潘雪, 王江峰等. 抽运光中 ASE 噪声对 OPCPA 信噪比的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 980~985
- 11 Wang Yanhai, Pan Xue, Li Xuechun *et al.*. The influence of wavefront-distorted pump pulse on the beam quality of OPA front-end system of the petawatt laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3088~3093  
王艳海, 潘雪, 李学春等. 抽运光波前畸变对拍瓦激光器前端 OPA 光束质量的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3088~3093