

基于光-光同步放大抑制光谱红移的光谱整形技术

储玉喜¹, 柴路¹, 甘泽彪², 梁晓燕², 胡明列¹, 王清月¹

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

²中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800

摘要 在基于钛宝石啁啾脉冲放大(CPA)技术获得拍瓦级输出的激光装置中,光谱发射截面的不同和饱和放大的影响会使放大光谱产生增益窄化和光谱红移。光谱红移效应普遍存在于激光放大过程中,尤其在能量饱和放大时更加严重。基于中国科学院上海光学精密机械研究所 5.0 PW 激光装置的实验结果,针对 Apollon-10 PW 激光装置的光谱控制,在理论上提出一种基于光-光同步放大的光谱整形技术,用以抑制高能放大过程中的光谱红移。该技术基于传统的放大模型,通过在功放级引入短脉冲抽运,利用抽运光和啁啾种子光同步放大的方式抑制了光谱的红移。该技术无需引入任何其他光学器件,也不会引入附加损耗,操作简单。数值模拟结果表明,利用该技术可以有效地对放大的光谱进行整形,抑制了光谱红移效应。

关键词 激光光学; 超强超快激光; 啁啾脉冲放大; 钛宝石晶体; 光谱整形

中图分类号 O437.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1201001

Spectrum Shaping Technique Based on Optical-Optical Synchronization Amplification for Suppressing Spectral Redshift

Chu Yuxi¹, Chai Lu¹, Gan Zebiao², Liang Xiaoyan², Hu Minglie¹, Wang Qingyue¹

¹Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In the petawatt (PW)-class ultra-intense ultra-short laser system based on the Ti:sapphire (Ti:S) chirped pulse amplification (CPA) technique, there is gain narrowing and redshift of the spectrum caused by the different spectral emission cross section and the effect of saturation amplification. The redshift of the spectrum appears widely in the process of laser amplification, especially in the high energy and saturation amplification process. In this paper, aiming at the spectrum control of Apollon-10 PW, we theoretically propose a new spectral shaping technique to suppress redshift of the spectrum in saturated laser amplifiers based on optical-optical synchronization amplification. The technique is based on the experimental results of 5.0 PW laser system in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. The technique is based on the conventional amplification model and optical-optical synchronization amplification through introducing the pump with short pulse width in power amplifier. The technique does not need to introduce other optical devices and does not introduce additional losses, and its operation is simple. Theoretical simulations show that the technique can effectively realize the shaping of amplified spectrum, which suppresses the redshift effect of the spectrum.

Key words laser optics; ultra-intense ultra-fast optics; chirped pulse amplification; Ti:sapphire crystal; spectrum shaping

OCIS codes 140.3280; 140.3538; 320.5540

收稿日期: 2017-06-22; **收到修改稿日期:** 2017-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(61322502,61535009)、长江学者和创新团队发展计划资助课题(IRT13033)

作者简介: 储玉喜(1986—),男,博士后,主要从事超短高能激光放大方面的研究。E-mail: chuyuxi@tju.edu.cn

导师简介: 胡明列(1978—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事飞秒激光技术、光子晶体光纤、超短脉冲光纤激光器及放大器等方面的研究。E-mail: huminglie@tju.edu.cn(通信联系人)

1 引言

啁啾脉冲放大(CPA)^[1]技术的提出使超强超短激光得到了迅速发展。其中,基于钛宝石(Ti:S)的 CPA 技术是获取数拍瓦级超强超短激光脉冲的主流技术。迄今为止,一些实验室已经建立了基于钛宝石的拍瓦级激光系统^[2-6]。目前,国际上多个研究机构正在研制 10 PW 量级的超强超短激光系统^[7-8]。其中,法国 Apillon-10 PW 激光系统设计的工作波段为 800 nm^[6],该装置前端采用了光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术,输出能量为毫焦量级;后续的放大器采用了钛宝石晶体的啁啾脉冲放大,特别是终端放大器中的钛宝石晶体,其直径达到 200 mm,抽运能量达到 550 J,最终实现了压缩后 150 J 能量、15 fs 脉宽、10 PW 峰值功率的输出。

在啁啾激光脉冲放大过程中,由于钛宝石晶体不同光谱的受激发射截面不同以及饱和放大效应,放大后的宽带光谱会产生增益窄化和光谱红移^[9-13]。Apillon-10 PW 激光装置为了实现最终压缩后 15 fs 的脉宽,需要对放大系统的光谱进行精密控制^[14]。首先,为了抑制增益窄化效应,该装置采用 OPCPA 技术替代再生腔作为前端,设计输出能量为 30 mJ。其次,为了抑制光谱红移,该装置在后续放大器每一级之间都引入了反射式光谱滤波器,通过对不同光谱成分引入不同的损耗来达到抑制光谱红移的效果。该技术可以有效抑制光谱红移,但同时也会引入比较大的损耗,使整体的放大效率降低。另外,该方案对滤波器的要求较高,要求其不仅要具有精确的反射率,还要具有较高的损伤阈值和较低的色散引入。

本文针对 Apillon-10 PW 激光装置中的光谱控制,从理论上提出了一种新的基于光-光同步放大的光谱整形技术,用来抑制高能量放大过程中的光谱红移。由于钛宝石晶体的增益随波长的变化是固定的,通常抑制光谱红移都是从种子光出发,采用光学器件增加种子光不同光谱的损耗来抑制光谱红移。本文提出的光谱整形技术是基于传统放大模型的,从钛宝石的增益出发,在放大级引入短脉冲抽运,抽运光和啁啾种子光同时注入放大器中,实现了钛宝石增益随时间发生变化,进而实现了增益随波长发生变化。基于中国科学院上海光学精密机械研究所 5.0 PW 钛宝石激光装置输出的实验光谱进行数值模拟,在 $\Phi 80$ mm 钛宝石功放级中验证该技术。模拟结果证明了通过抽运光与啁啾种子光的同步放大可以有效地对放大光谱进行整形,抑制光谱红移效应,保证种子光最终放大后的光谱宽度。该技术无需引入任何其他光学器件,也不会引入附加损耗,操作简单,在基于钛宝石实现 10 PW 超强超短激光脉冲装置中具有潜在应用。

2 基于光-光同步放大技术抑制光谱红移的系统结构及原理

2.1 系统结构

基于中国科学院上海光学精密机械研究所 5.0 PW 钛宝石激光装置,采用光-光同步放大技术实现光谱整形的系统结构如图 1 所示,其中 CW-SLM 表示连续波-单纵模, $\Delta\lambda$ 为半峰全宽。该装置是典型的钛宝石 CPA 放大结构,800 nm 种子光前端基于双 CPA(D-CPA)结构,以空心光纤空间整形加交叉偏振波产生(XPW)技术为脉冲净化手段,产生高对比度的种子光脉冲^[5]。经过对比度提升后的种子光注入到展宽器中进行展宽,种子光的时域宽度展宽至半峰全宽(FWHM)约 1.4 ns,全宽约 2.0 ns。展宽后的种子光注入至再生放大器(RA)中进行放大,在再生放大器中插入了光谱滤波片,用于抑制放大过程中的增益窄化。光谱滤波片的原理在于滤波片对各个波长引入不同的损耗,对不同的激光波长具有不同的透过率(即对光谱进行振幅调制),从而抑制再生放大器中的增益窄化。再生放大器输出的能量约为 1.6 mJ,光斑尺寸为 2 mm,重复频率为 10 Hz。再生放大器输出的种子光经扩束后入射到两个多通放大器 M1 和 M2,放大后的能量为 350 mJ。放大后的种子光再注入至四通放大器 M3 中,能量达到 3.5 J。3.5 J 种子光经扩束至 60 mm 后注入至 $\Phi 80$ mm 钛宝石晶体的功放级。经功放级放大后最高能量可以达到 40 J。40 J 的种子光再经扩束至 110 mm 后注入到终端放大器,终端放大器采用的是 $\Phi 150$ mm 的钛宝石晶体。种子光放大系统为图 1 所示的红色背景部分,利用 $\Phi 80$ mm 钛宝石功放级来实现光谱红移的抑制。

为了获得更高的抽运能量,并实现延时单独控制, $\Phi 80$ mm 钛宝石晶体和 $\Phi 150$ mm 钛宝石晶体的抽运采用了两套独立的钕玻璃抽运系统。1053 nm 激光脉冲由连续的单纵模激光器经时域整形器件削波产生,在之前的系统中, $\Phi 80$ mm 和 $\Phi 150$ mm 钛宝石晶体抽运光的脉宽均为 20 ns。在本研究中,设计 $\Phi 80$ mm

的钛宝石功放级抽运脉冲宽度为 3.0 ns,抽运光分成两路 beamline 1 和 beamline 2,beamline 1 的抽运光和第一程入射的种子光时间重叠,通过改变 beamline 1 和 beamline 2 的光程,使第二程的种子光和远端的 beamline 2 的抽运光重叠,如图 1 所示。对于 $\Phi 150$ mm 的钛宝石晶体,为了更好地抑制寄生振荡,削波产生的脉冲宽度仍然是 20 ns。削波产生的种子脉冲经再生放大器、钕玻璃放大器后倍频产生 527 nm 的抽运光抽运钛宝石晶体。整个抽运系统为图 1 所示的绿色背景部分。抽运光和种子光之间的延时通过 20 路延时器(Thales 公司)来控制。

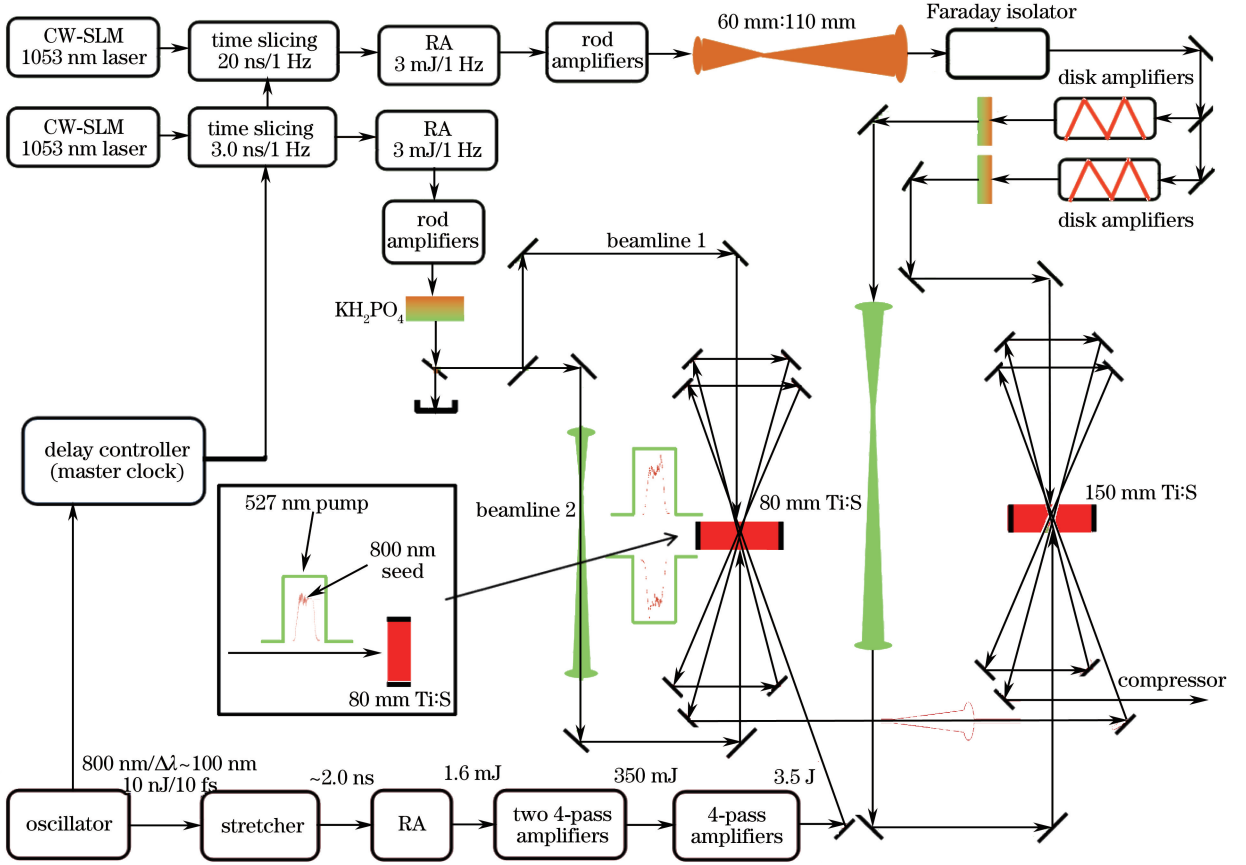


图 1 基于光-光同步放大技术实现时域整形的系统结构

Fig. 1 Spectrum shaping system based on optical-optical synchronization amplification technology

2.2 原 理

通过本课题组之前的实验结果^[5]和参考文献^[9]的分析可以得出,钛宝石晶体的增益属于均匀加宽的体系,钛宝石晶体的动力学过程属于四能级系统。当抽运光抽运钛宝石晶体时,晶体单位体积内的储能是对抽运脉冲时域的积分,随着时间增加,上能级粒子数增加。因此,钛宝石晶体内某一位置处的反转粒子数可写成^[15]:

$$\Delta N(x, t) = N_T \left\{ 1 - \frac{1}{1 - \exp(-\alpha x) \{1 - \exp[E_p(x, t)/F_{sat}]\}} \right\}, \quad (1)$$

式中 $E_p(x, t)$ 为单位体积内的抽运密度, F_{sat} 为饱和能量密度, N_T 为钛宝石晶体的掺杂浓度, α 为晶体的吸收系数。功放级的钛宝石放大器采用的晶体尺寸为 $\Phi 80$ mm \times 32 mm, 吸收系数 $\alpha = 0.94$ cm⁻¹。在数值计算中,钛宝石晶体被分成了 100 片,每片厚度为 0.32 mm。当考虑抽运光的时域分布时,钛宝石晶体内的反转粒子数是对抽运脉冲时域的积分。因此,在 t_k 时刻,第 n 片晶体内的反转粒子数密度可写成:

$$\Delta N(n, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} \Delta N(n, t) dt, \quad (2)$$

式中 t_0 为抽运光前沿到达晶体的时刻。由于室温下钛宝石晶体的上能级寿命为 3.0 μ s,而抽运脉宽为纳秒

量级,因此不考虑抽运时间内的自发辐射损耗。假设种子光在 t_k 时刻注入,种子光会被放大。对于四能级的钛宝石晶体,放大过程可以表示为^[16]:

$$G_L(n, \omega, t_k) = \frac{1}{\sigma(\omega)J(n-1)} \ln\{1 + \{\exp[\sigma(\omega)J(n-1)] - 1\} \exp[\sigma(\omega)\Delta N(n, t_k)dx]\} \quad (3)$$

式中 $G_L(n, \omega, t_k)$ 为 t_k 时刻第 n 片晶体频率为 ω 的纵向增益, $n=1, \dots, 100$; $J(0)$ 为初始入射的单位面积上的光子数; $J(n-1)$ 为第 $n-1$ 片晶体出射的单位面积上的光子数,且为第 n 片晶体的入射光子数; $\sigma(\omega)$ 为增益截面; dx 为晶体的厚度。根据上面的公式推导可以得出,钛宝石晶体的增益是随着抽运时间增加而增加的。此时,在抽运时间内,种子光同时注入,由于增益随抽运时间增加而增大,使得种子光后沿获得的储能高于前沿。同时,由于 800 nm 的种子光是正啁啾展宽的,即光谱和时域是对应的,且长波长在前沿,短波长在后沿;因此使得具有短波长后沿的增益大于长波长的前沿,从而实现了光谱的整形和对光谱红移的抑制。

3 理论模拟结果

在 5.0 PW 激光系统中,从再生腔到 $\Phi 80$ mm 钛宝石放大器的光谱演变如图 2 所示。绿色实线表示再生放大器输出的光谱,黑色虚线、蓝色点划线、粉红色实线分别表示的是三级多通放大器 M1、M2、M3 的输出光谱。通过前端再生放大器的光谱控制,使再生放大器输出的光谱明显蓝移,以补偿后续放大器引入的光谱红移,同时抑制了再生放大器带来的光谱窄化。经过多级放大后,光谱出现了红移,由于在前级的放大中,种子光的放大并没有处于饱和放大,因此红移效应并不非常严重。

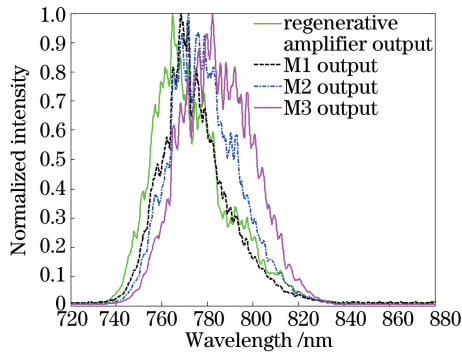


图 2 再生放大器到 $\Phi 80$ mm 钛宝石放大器的光谱演变

Fig. 2 Spectral evolution from regenerative amplifier to $\Phi 80$ mm Ti:S amplifier

基于实验测得的光谱,以能量 3.5 J 的入射种子光作为注入,光斑尺寸为 60 mm,设定抽运光的时间宽度为 3.0 ns(FWHM),抽运光斑为 65 mm。

根据上述理论模型,利用迭代算法和实际的激光参数,模拟了未采用光谱红移抑制技术和采用光-光同步放大技术两种情况下,钛宝石晶体的小信号增益分布、实际种子光注入饱和放大时的增益分布,以及种子光经放大后的最终光谱形状。与此同时,还对比了不同抽运脉冲时域波形条件下和不同情况下钛宝石的放大输出特性。

3.1 超高斯时域抽运

首先假定抽运光的时域波形为超高斯分布,通过调整延时使种子光中心与抽运光中心重合。基于理论分析,首先模拟了两种情况下的小信号增益。第一种情况是假设抽运光完全被吸收时,不同光谱成分的小信号增益;第二种情况是抽运光和种子光同步注入钛宝石晶体时,不同光谱成分的小信号增益。抽运能量为 80 J,模拟结果如图 3 所示,蓝色实线是第一种情况下的小信号增益分布,蓝色虚线是第二种情况下的小信号增益分布,红色点划线是种子光的归一化强度,绿色虚线是抽运光的归一化强度。

由图 3 可知,在第一种情况下,由于抽运光已经完全吸收,因此不同光谱成分的小信号增益取决于增益截面的分布,小信号增益的最大值对应的波长为 795 nm。在第二种情况下,随着抽运光的吸收,储能逐渐增加,由于种子光在放大过程中一直处在增益晶体上能级粒子数的积累阶段,因此种子光不同光谱成分获得的储能是不同的,最终的小信号增益分布取决于储能和增益截面,小信号增益的最大值对应的波长变成了

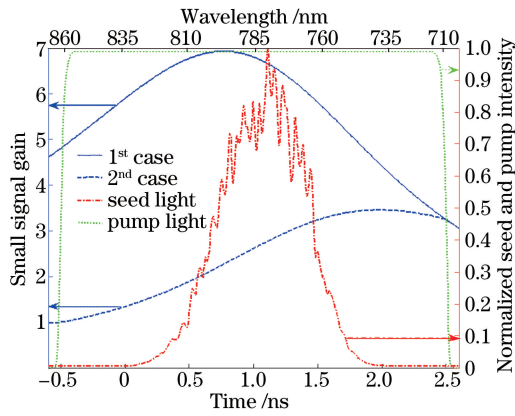


图 3 小信号增益随时间和波长的变化

Fig. 3 Variations of small signal gain with time and wavelength

730 nm。对比两种情况下的小信号增益可以看出,采用同步放大技术可以使钛宝石晶体固有的增益特性发生改变,小信号增益中心波长产生蓝移,从而达到了光谱整形的效果。

实际上,在种子光注入时并不是小信号增益,因此利用实际的注入种子光参数(3.5 J/65 mm)模拟了两种情况的增益分布。为了对比说明,以第一程的增益为例,计算结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,在考虑饱和放大时,种子光的增益发生了很大变化。在第一种情况下,最高增益对应的波长已经由 795 nm 变成了 812 nm,增益出现了明显的红移。在第二种情况下,735 nm 处的增益最高,增益红移可以得到很好的控制。

利用实际的注入种子光参数,通过模拟计算得到了两种情况下种子光最终的放大光谱。在这两种情况下最终都能够实现饱和输出,在第一种情况下经过三程放大达到了饱和输出,而在第二种情况下需要四程放大才能达到饱和输出,模拟结果如图 5 所示。图中红色点划线是初始的入射光,黑色实线是第一种情况下的输出光谱,蓝色虚线是第二种情况下输出的光谱。通过对比可以看出,在没有采用光谱整形技术下, $\Phi 80$ mm 钛宝石放大后的光谱出现了明显的红移,如果该光谱作为终端放大器的注入光谱,光谱红移将会更加严重。采用光-光同步放大光谱整形技术时,放大的光谱不但没有出现光谱红移,还出现了少量蓝移。整形后的光谱作为终端放大器的注入光谱可以有效补偿增益饱和带来的光谱红移。

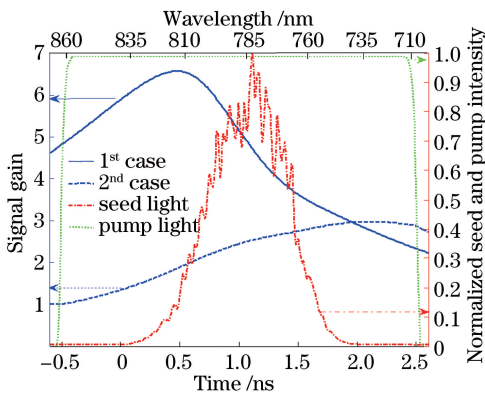


图 4 第一程种子光放大时的增益随时间和波长的变化

Fig. 4 Variations of seed gain of the first pass amplification with time and wavelength

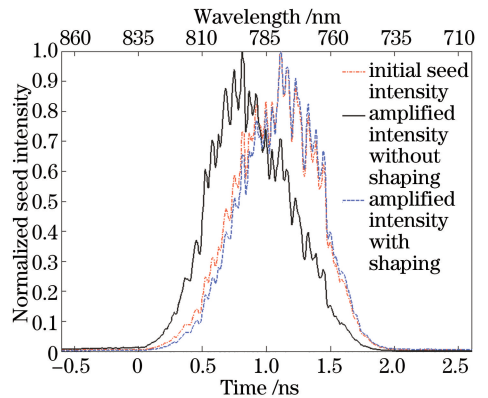


图 5 $\Phi 80$ mm 钛宝石放大器放大输出的光谱

Fig. 5 Amplified output spectra of $\Phi 80$ mm Ti:S amplifier

3.2 时域畸变抽运

在实际的激光放大系统中,抽运光的时域分布在大多数情况下不是超高斯分布,假设抽运激光的时域分布是由增益饱和导致畸变后的时域波形,如图 6 中绿色虚线所示。基于该抽运波形模拟了上述两种情况的小信号增益、实际种子光注入时第一程放大种子光的增益分布和最终放大后种子光的输出光谱,模拟结果分别如图 6~8 所示。

由图 6~8 可以看出:时域畸变的抽运光对第一种情况没有任何改变;在第二种情况下,时域畸变的抽运

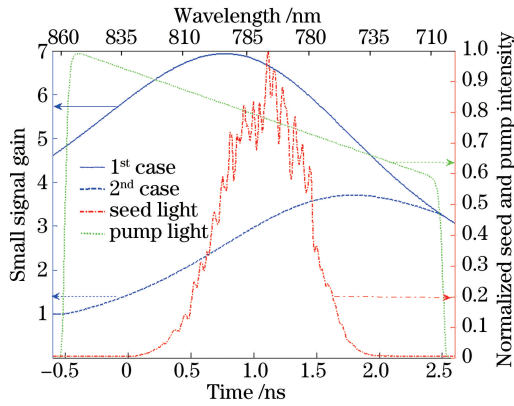


图 6 抽运时域畸变情况下小信号增益随时间和波长的变化

Fig. 6 Variations of small signal gain with time and wavelength under the condition of distorted pump

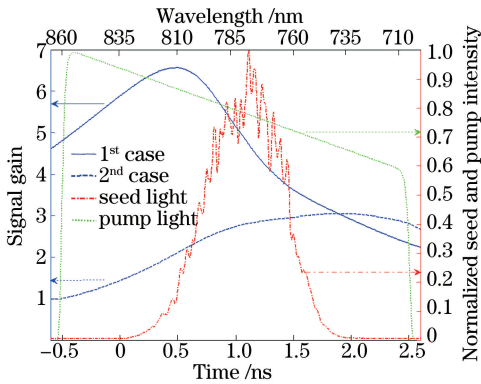


图 7 抽运时域畸变情况下第一程种子光放大时的增益随时间和波长的变化

Fig. 7 Variations of seed gain of the first pass amplification with time and wavelength under the condition of distorted pump

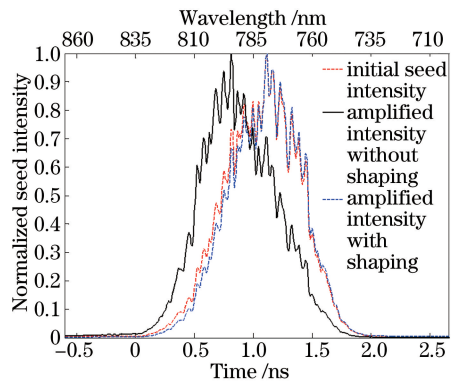


图 8 抽运时域畸变时 $\Phi 80$ mm 钛宝石放大器的放大输出光谱

Fig. 8 Amplified output spectra of $\Phi 80$ mm Ti:S amplifier under the condition of distorted pump

光仅仅改变的是储能和增益的速度,对增益的分布和最终放大后的光谱影响很小。可见,采用光-光同步放大技术进行光谱整形对抽运的时域分布要求不高。与此同时,由于抽运光的脉宽为 3.0 ns(FWHM),而实际的种子光全宽为 2.0 ns,因此本研究还模拟了抽运光和种子光的延时改变对抑制红移效果的影响。当抽运光和种子光的中心时刻偏离 ± 100 ps 时,延时改变对最终放大后的光谱影响非常小,可以忽略不计。结果表明,要求抽运光和种子光的同步精度并不高,这增加了实际实验的可操作性^[17]。

4 结 论

在高能量的钛宝石超强超快激光装置中,由于增益截面分布和增益饱和效应的影响,种子光在放大过程中会产生光谱红移效应。不同于传统的对种子光不同光谱成分引入不同损耗的方式,提出了一种基于光-光同步放大的光谱整形新技术,通过抽运光和种子光的同步放大,使啁啾种子光时域的不同部分获得的增益不同,实现了对种子光的光谱整形。在 5.0 PW 激光系统的基础上,对 $\Phi 80$ mm 钛宝石功放级进行模拟,对比了两种情况下的增益分布和最终放大的光谱输出。模拟结果表明该技术可以有效抑制光谱红移,可以为终端放大器提供带有补偿的种子光光谱;同时,该技术对抽运光的时域形状要求低,且不会引入附加损耗,成本低廉,操作简单,具有很强的实用性。

参 考 文 献

[1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219-221.

- [2] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, *et al.* 0.85-PW, 33 fs Ti:sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(17): 1594-1596.
- [3] Yu T J, Lee S K, Sung J H, *et al.* Generation of high-contrast 30 fs, 1.5 PW laser pulse from chirped-pulse amplification Ti:sapphire laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10807-10815.
- [4] Laux S, Lureau F, Radier C, *et al.* Suppression of parasitic lasing in high energy, high repetition rate Ti:sapphire laser amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1913-1915.
- [5] Chu Y X, Liang X Y, Yu L H, *et al.* High-contrast 2.0 petawatt Ti:sapphire laser system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29231-29239.
- [6] Xu Lu, Yin Dingjun, Lu Haihe, *et al.* Design and application of Nd:glass disc-amplifier as pump source of 5 PW Ti:sapphire chirped pulsed amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1201006.
徐露, 印定军, 陆海鹤, 等. 用于抽运 5 PW 钛宝石啁啾脉冲放大器的钕玻璃片状放大器的设计与应用[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1201006.
- [7] Mourou G A, Koron G, Sandner W, *et al.* ELI-extreme light infrastructure, science and technology with ultra-intense lasers[R]. *White Book*, 2011.
- [8] Chériaux G, Giambruno F, Fréneaux A, *et al.* Apollon-10 PW: status and implementation[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1462(1): 78-83.
- [9] Moulton P F. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃ [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, 3(1): 125-133.
- [10] Oksenhendler T, Kaplan D, Tournois P, *et al.* Intracavity acousto-optic programmable gain control for ultra-wide-band regenerative amplifiers[J]. *Applied Physics B*, 2006, 83(4): 491-495.
- [11] Durfee C G, Backus S, Murnane M, *et al.* Design and implementation of a TW-class high average power laser system [J]. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics*, 1998, 4(2): 395-406.
- [12] Verluise F, Laude V, Cheng Z, *et al.* Amplitude and phase control of ultrashort pulses by use of an acousto-optic programmable dispersive filter: pulse compression and shaping[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(8): 575-577.
- [13] le Blanc C, Curley P, Salin F. Gain-narrowing and gain-shifting of ultra-short pulses in Ti:sapphire amplifiers[J]. *Optics Communications*, 1996, 131(4): 391-398.
- [14] Giambruno F, Radier C, Rey G, *et al.* Design of a 10 PW (150 J/15 fs) peak power laser system with Ti:sapphire medium through spectral control[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(17): 2617-2621.
- [15] Ross I N, Matousek P, New G H C, *et al.* Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(12): 2945-2956.
- [16] Frantz L M, Nodvik L S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *Applied Physics*, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [17] Zhang Yanyan, Li Guoyang, Fan Wei, *et al.* High precision synchronous trigger technology based on high power energy petawatt system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081405.
张妍妍, 李国扬, 范薇, 等. 基于大能量拍瓦系统的高精度同步触发技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081405.