

用于大口径钛宝石放大器的四路钕玻璃抽运源

黄培^{1,2,3**}, 甘泽彪¹, 李文启^{1,2,3}, 於亮红¹, 郭震^{1,2}, 曹鹤^{1,2,3}, 王建业^{1,2,3}, 梁晓燕^{1*}, 李儒新^{1***}

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³上海科技大学, 上海 201210

摘要 研制了一套能量输出稳定、光斑分布均匀、时域近方波形的四路钕玻璃抽运源系统。系统能够输出 4×180 J 的基频能量(波长为 1053 nm), 4×80 J 的倍频能量(波长为 526.5 nm)。主要结构包括四部分: 前端种子源、再生放大器、钕玻璃棒放链和 KDP 倍频晶体。利用偏振片实现了垂直偏振的两路基频光合束, 经过第二类相位匹配 KDP 晶体倍频, 获得了共线且同偏振的 526.5 nm 倍频光, 实现了用于 150 mm 口径钛宝石放大器的结构紧凑的双脉冲抽运源。

关键词 激光器; 放大器; 抽运源; 钕玻璃; 大口径钛宝石; 时域双脉冲

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801001

Four-Outputs Nd:glass Pump Source for Large Aperture Ti:Sapphire Amplifier

Huang Pei^{1,2,3**}, Gan Zebiao¹, Li Wenqi^{1,2,3}, Yu Lianghong¹, Guo Zhen^{1,2},
Cao He^{1,2,3}, Wang Jianye^{1,2,3}, Liang Xiaoyan^{1*}, Li Ruxin^{1***}

¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract We built a set of four-outputs Nd:glass pump source system with stable energy output, uniform spot and time-domain approximate square waveform. The system can achieve output of 4×180 J at 1053 nm in fundamental frequency and 4×80 J at 526.5 nm in double frequency. The main structure consists of 4 parts, which are the front-end seed source, the regenerative amplifier, Nd:glass rod amplifier chain and the KDP frequency doubling crystal. Those two fundamental frequency beams with vertical polarization are combined by the polarizer. The 526.5 nm double frequency laser pulse with the same directivity and polarization is obtained after Type-II phase matching frequency-doubling KDP crystal. As a result, the compact dual pulse pump source for the Ti:sapphire amplifier is realized.

Key words lasers; amplifiers; pump source; Nd:glass; large aperture Ti:sapphire; time-domain dual pulse

OCIS codes 140.3280; 140.3590; 140.5560; 140.7090

1 引 言

自从 1985 年 Mourou 等首次发明啁啾脉冲放大^[1](CPA)技术以来,超短超强激光系统发生了革命性突破。目前国际上多个国家正在建设拍瓦级超短超强激光装置,例如欧盟的 ELI 计划、法国 Apollon 计划、英国卢瑟福实验室 Vulcan 计划、俄

罗斯 PEARL 计划等。钕玻璃的激光系统由于输出能量高、输出稳定等优点,成为高功率飞秒钛宝石 CPA 激光装置必不可少的抽运源。基于钛宝石晶体和啁啾脉冲放大技术的 10 PW 超短超强激光装置(SULF),包含三套钕玻璃激光抽运源和三台大口径钛宝石放大器。在前期的实验中,利用钕玻璃片状放大器抽运 150 mm 口径钛宝石,在 800 nm 波

收稿日期: 2018-02-08; 修回日期: 2018-03-09; 录用日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61775223)、中国科学院战略性科技先导专项(B类)(XDB1603)

* E-mail: liangxy@siom.ac.cn; ** E-mail: huangpei@siom.ac.cn; *** E-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn

段实现了 202.8 J 宽带激光脉冲输出,压缩后峰值功率达到 5.3 PW^[2],系统的重复频率为 2 h/shot。

当前采用大口径钛宝石作为终端放大器时,CPA 技术面临的一个关键问题是钛宝石中的寄生振荡^[3]。目前,常采用 EDP(Extraction During Pumping)技术来抑制寄生振荡^[4]。EDP 技术是用于控制抽运光-信号光延时^[5],在信号光通过之前,钛宝石放大器仅吸收一部分抽运能量,在信号光通过之后,再吸收剩余抽运能量,吸收后等待信号光下一次通过放大^[6]。本文设计四路钕玻璃棒状放大器抽运源,采用时域双脉冲抽运的方式,抽运 150 mm 口径的钛宝石晶体。通

过空间上拉开两脉冲之间的光程,并利用偏振合束器输出,获得了一个等效的时域长脉冲,便于利用 EDP 技术来抑制寄生振荡效应。

2 实验装置和布局

用于 150 mm 口径的钛宝石放大器的四路钕玻璃抽运源实验装置如图 1 所示,主要包括四部分:前端种子源(Seed)、再生放大器(Regenerative Amplifier, Reg Amp)、钕玻璃棒放链(40 mm 口径棒状放大器:40 Amp;80 mm 口径棒状放大器:80-1 到 80-8;法拉第隔离器 Faraday ISO)和 KDP 倍频晶体。

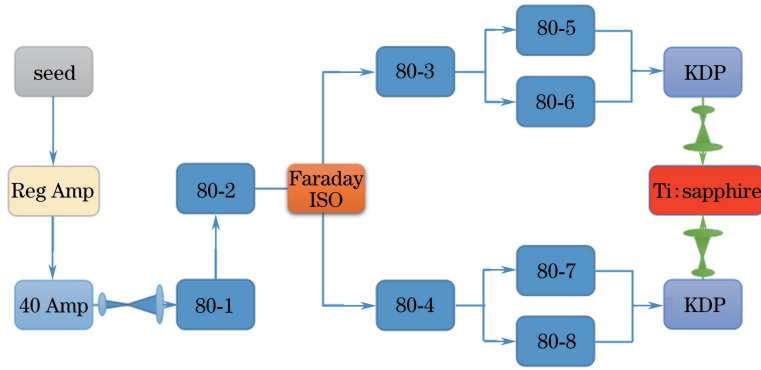


图 1 用于 150 mm 口径的钛宝石放大器的四路钕玻璃抽运源布局图

Fig. 1 Layout of the four-outputs Nd:glass pump source for 150 mm aperture Ti:sapphire amplifier

种子源为光纤耦合输出的单模半导体激光器,经过铌酸锂强度调制器后削波整形为时域脉冲宽度为 12 ns、重复频率为 1 Hz 的脉冲激光。种子光经过再生放大器和预放大器后输出 10 mJ 的激光脉冲,再注入到钕玻璃放大链中进行放大,得到 4×180 J(激光波长为 1053 nm)基频光输出。最后经 KDP 晶体倍频后为 CPA 终端放大器钛宝石提供总能量为 300 J、光束直径 $\phi 125$ mm、波长为 527 nm 的抽运激光脉冲。其中整个光路严格按照像传递系统排布,同时通过软边光阑和真空滤波器进行切趾、

滤波,以保证抽运光在放大过程中的光束质量。

2.1 再生放大器

系统中使用的再生放大器如图 2 所示。再生放大器腔长为 5 m,能够容纳最大脉宽为 20 ns 的激光脉冲。HWP 为半波片,TFP 为偏振棱镜,FR 为法拉第旋光器,QWP 为四分之一波片,PC 为普克尔盒电光开关,AMP 为激光二极管抽运的 Nd:YLF 放大器。Nd:YLF 晶体具有热透镜效应小、线偏振输出等优点。c 轴切割的 Nd:YLF 晶体增益峰值为 1053 nm,适合匹配后续钕玻璃棒状放大器,因此被

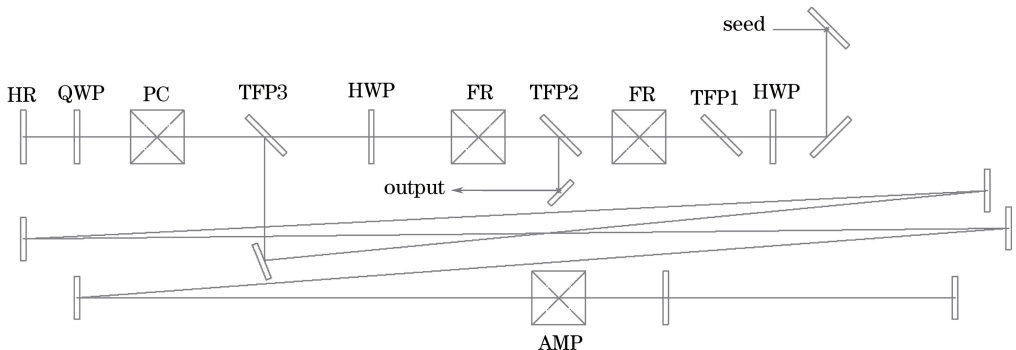


图 2 再生放大器布局图

Fig. 2 Layout of regenerative amplifier

选作再生放大器增益介质。

种子脉冲由前端铌酸锂强度调制器削波整形后,通过单模保偏光纤准直出射。种子脉冲为 p 偏振,通过偏振片透射进入再生腔。此时普克尔盒不加电压,处于关闭状态。种子光经 0° 反射镜反射两次通过四分之一波片,成为 s 偏振光,再次经过偏振片时反射,在腔内继续循环往复。此时普克尔盒加四分之一波电压,处于工作状态。种子脉冲第二次往返通过普克尔盒和四分之一波片时,普克尔盒和四分之一波片的作用相互抵消,种子脉冲继续在再生腔内循环放大。当脉冲放大至增益介质饱和状态时,种子光在再生放大腔内循环 50 程左右,此时普

表 1 钕玻璃棒状放大器的小信号增益与方均根误差

Table 1 Small signal gains and RMS error of the Nd:glass rod amplifier

Amplifier identifier	40-1	80-1	80-2	80-3	80-4	80-5	80-6	80-7	80-8
Small signal gains	22.84	7.16	6.40	6.27	6.18	7.28	7.23	6.32	6.22
RMS error /%	2.8	5.7	6.8	9.5	5.8	9.7	2.5	9.6	8.9

由于氙灯抽运导致增益介质的热效应^[7],侧面抽运的方式在提供高能量抽运的同时,在增益介质上产生了横向温度梯度,使得增益介质的热透镜效应和热致双折射变得明显,放大的光束质量下降严重。首先,钕玻璃的折射率是关于温度的函数,温度梯度导致钕玻璃不同位置的折射率发生变化,而且前端种子光为高斯分布,轴向钕玻璃的吸收衰减,也加剧了温度梯度的形成;其次,热应力通过光弹效应引起折射率变化,使得各向同性的介质变为各向异性,产生应力双折射效应,这会破坏初始线偏光的偏振态,增加系统损耗,降低脉冲输出能量;最后,退偏使得光斑在通过隔离器等偏振相关元件时损耗不均匀,导致光斑均匀性变差。因此,采用电子水冷器与水泵结合的方式,将钕玻璃棒状放大器的温度控制在 25°C 左右^[8],同时钕玻璃棒状放大器工作间隔设置为 20 min。

2.3 用于钛宝石放大器的时域多脉冲抽运方案

用于 150 mm 口径钛宝石放大器的抽运源需要提供大约 300 J 的倍频能量。通常情况下,提供如此高能量的抽运源会选择片状钕玻璃放大器^[9],但是片状放大器的工作间隔为 2 h/shot,实用性较低。为了保证能量输出的同时提高抽运源重复频率,实验采用四级棒状放大器,抽运源工作的时间间隔下降为 20 min/shot。钛宝石采用双端面抽运方式,每个端面有两个能量近似相同的脉冲,利用空间拉开两脉冲之间的光程。为保证结构的紧凑性,将每个端面的两个抽运脉冲进行合束,构成共线的时域双

脉冲抽运光。同时利用抽运光-信号光延时调节来抑制寄生振荡。此方案在保证抽运光的能量在时域合理分布的同时,可以有效抑制钛宝石晶体的寄生振荡和横向自发辐射。

2.2 钕玻璃放大链

钕玻璃棒状放大器使用国产 Nd31 型磷酸盐玻璃,第一级钕玻璃棒状放大器外形尺寸为 $\phi 40\text{ mm} \times 460\text{ mm}$,之后四级钕玻璃棒状放大器外形尺寸为 $\phi 80\text{ mm} \times 460\text{ mm}$ 。钕玻璃棒的两端面法线与光轴夹角为 $5^\circ \pm 2'$,以抑制自激振荡。放大器采用侧面抽运的方式,每枚钕玻璃棒状放大器使用 8 支氙灯,环状排列于钕玻璃周围。聚光腔采用椭圆镀银腔设计。钕玻璃棒状放大器的小信号增益如表 1 所示。

时域多脉冲抽运方案 E1 路布局图如图 3 所示(E2 路与 E1 路布局相同)。抽运脉冲 E 经过 1:1 分光镜 S0,分成两个相同能量的脉冲 E1 和 E2,分别抽运钛宝石放大器的两个端面。E1 与 E2 再分别通过 1:1 分光镜 S1 和 S2,分成 E1-1、E1-2 和 E2-1、E2-2 四个子脉冲,分别抽运钛宝石的两个端面。通过调节光程差,可以控制各个子脉冲之间的相对延时。同时为了保证光束传输质量,在其中光程较长的一路加入满足像传递关系的真空滤波器(SF-4),使得两个子脉冲的成像位置同时位于 KDP 晶体中。

由于大口径钛宝石放大器通常采用多通结构,抽运光的多脉冲抽运结构与信号光的多通放大结构使得布局非常紧张,导致抽运光和信号光入射钛宝石的角度增大,造成能量损失、光束传输质量下降等问题。而且由于钛宝石放大器对于抽运能量吸收的偏振敏感性,通常的偏振合束方案并不适用。因此实验采用了全新的同偏振抽运脉冲合束方案。抽运光为 s 偏振,经过分光镜 S1 后,其中一路 E1-2 经过石英旋光片(QPR),其偏振态旋转为 p 偏振,与 E1-1 路垂直。然后利用偏振合束将两个偏振垂直的 1053 nm 基频光脉冲合为一束。再通过 45° 石英旋光片,两基频光脉冲的偏振方向旋转 45° 。最后利用二类相位匹配 KDP 晶体倍频,生成 527 nm 倍频

光,两倍频抽运脉冲具有相同的偏振方向,并且在空间上合束。节省了空间布局,极大地提高了系统的

空间紧凑性,并保证抽运光与信号光的入射角度处于合理的范围内。偏振合束原理如图 4 所示。

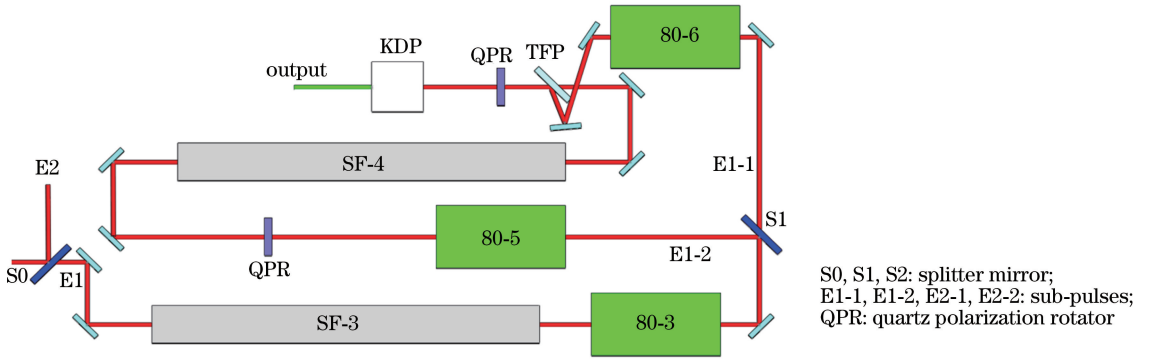


图 3 时域双脉冲抽运方案布局图

Fig. 3 Layout of time-domain dual pulse pump

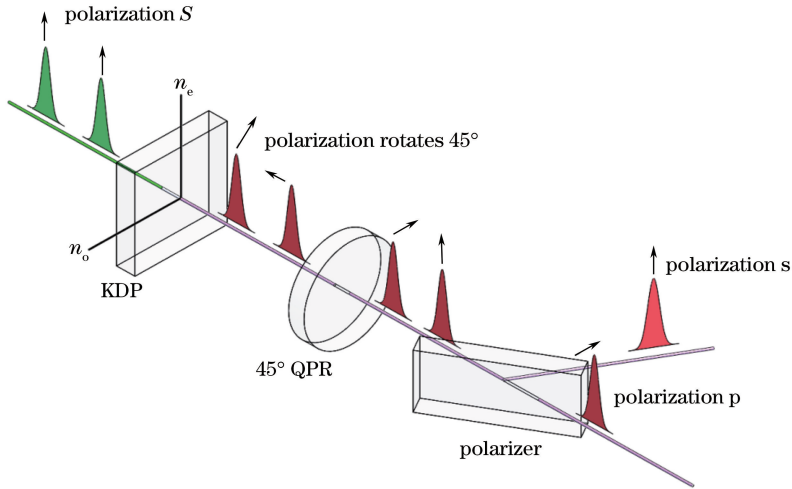


图 4 同偏振抽运脉冲合束方案

Fig. 4 Scheme of the combination of the same-polarization pump pulses

3 实验结果及讨论

根据理论计算,设计钛宝石放大器口径为 150 mm, 527 nm 抽运光斑直径为 125 mm, 800 nm±50 nm 信号光斑直径为 120 mm。结合以上方案,从能量、光束演变、时域演变三个方面分析此四路钕玻璃抽运源的性能。

3.1 终端脉冲输出能量

种子激光脉冲经过再生放大器和预放大器后,扩束至 $\phi 28$ mm 注入 $\phi 40$ mm 钕玻璃棒状放大器 40-1,脉冲能量从毫焦量级放大至焦耳量级。放大后的激光脉冲经过软边光阑空间剪趾(SA),光斑扩束至 $\phi 65$ mm 后注入至 $\phi 80$ mm 口径钕玻璃棒状放大器 80-1 和 80-2。此过程经过隔离器和偏振片等元件产生传输损耗以及空间剪趾损耗,最大可实现 30 J 左右输出。通过 1:1 分光镜,每一路激光脉

冲能量为 15 J 左右,再经过 1:1 像传递空间滤波器和 $\phi 80$ mm 口径钕玻璃棒状放大器 80-3(80-4),激光脉冲放大至 90 J 左右。最后再进行一次 1:1 分光,通过最后一级 80 mm 口径钕玻璃棒状放大器 80-5(80-6、80-7、80-8),脉冲能量由 45 J 左右放大至 180 J 左右。每一路激光脉冲通过 KDP 晶体倍频,再扩束至 $\phi 125$ mm,钛宝石放大器端面将接收到 4 路 75 J 的 527 nm 抽运光。

为了更好地控制前端注入能量,进一步了解前端注入能量与终端抽运输出能量的关系,实验中保持放电延时、温度等条件不变,测量前端注入能量在 10~15 mJ 之间时,终端基频能量输出的情况,结果如图 5 所示。可见前端注入能量在 10~15 mJ 时,终端脉冲输出能量与前端注入能量大致满足线性关系。当前端注入超过 13 mJ 时,E1-1 路终端抽运脉冲能量变化较为平缓,原因为钕玻璃棒状放大器的增益饱和。

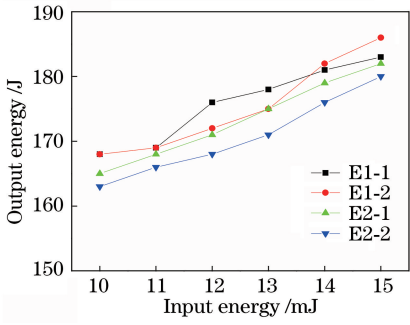


图 5 前端注入-抽运源能量输出关系图

Fig. 5 Relationship of front-end input and final-end output
实验继续优化脉冲氙灯与种子光注入之间的延时,测得前端注入 13 mJ 时四路抽运输出能量如表 2 所示,可以看出实现了基频能量为 170 J、倍频能量为 75 J、倍频效率为 44% 的目标。抽运脉冲输出的基频和倍频 RMS 值处于较低水平,表明延时控制、钹玻璃棒状放大器温度控制以及空间稳定性都达到预计效果,故用于大口径钛宝石放大器的四路

表 2 前端注入 13 mJ 抽运源能量输出

Table 2 Output of the pump source with front-end input of 13 mJ

Parameter	E1-1	E1-2	E2-1	E2-2
Output average of basic frequency / J	178.0	173.4	175.6	170.1
Output average of double frequency / J	77.9	77.6	78.2	74.7
RMS of double frequency / %	2.05	8.41	3.61	5.53
Efficiency of double frequency / %	43.8	44.8	44.5	43.9

钹玻璃抽运源拥有较高的稳定性。

3.2 光束空间演变

对于光路长达数十米的超强超短激光系统,像传递系统是高保真光束传输的必不可少的条件^[10]。系统中光束空间演变如图 6 所示。可以看出,此抽运源的终端输出[图 6(d)]近似为平顶分布,并且有效抑制了衍射引起的强度调制,光强分布均匀,对比度较高。

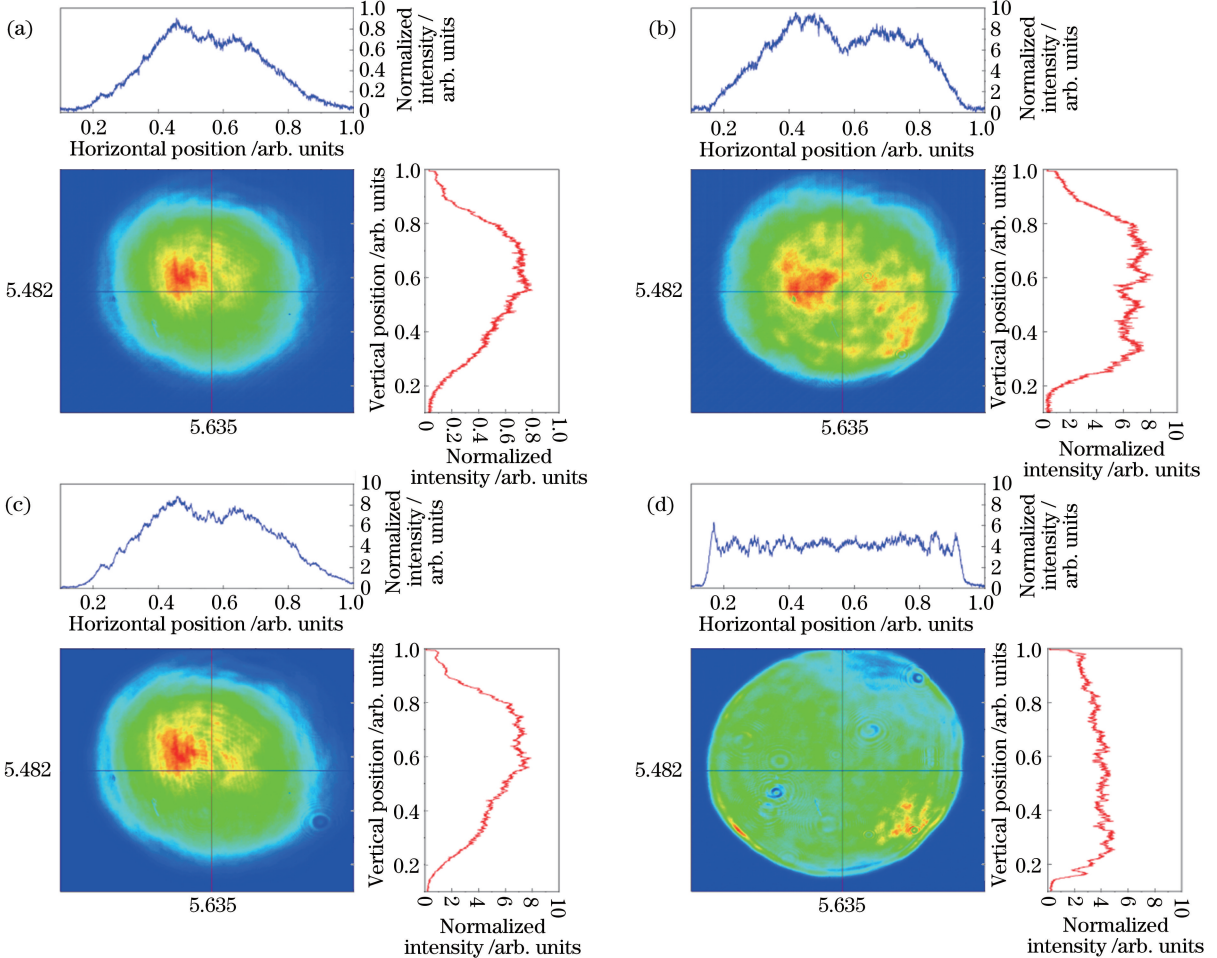


图 6 抽运源光束空间演变。(a)前端静态光斑;(b)静态输出光斑;(c) $\phi 40$ mm 钹玻璃棒状放大器放大光斑;(d)经钹玻璃棒状放大链放大后输出光斑

Fig. 6 Spatial evolutions of the pump source. (a) Front-end spot without amplification; (b) output spot without amplification; (c) output spot amplified by $\phi 40$ mm Nd:glass rod amplifier; (d) output spot amplified by Nd:glass rod amplifier chain

3.3 光束时域演变

由于增益饱和,激光脉冲在经过放大后脉冲前沿可能会过于陡峭,存在损伤光学元件等风险^[11],因此需要在抽运源前端使用可控的时空整形技术,以补偿后续钕玻璃放大链引入的陡峭前沿。实验采用铌酸锂波形整形器调制产生时域波形斜率,以实现预补偿的目标。

前端能量注入为 10 mJ,终端能量输出为 160 J 时,测量得到的时域波形如图 7 所示,时域脉冲宽度

为 12.1 ns,双脉冲抽运时域延时为 12.7 ns [图 7(f)]。由于抽运源系统单路基频光具备最高输出 200 J 能量的能力,为保证更高能量下仍然可以抑制脉冲前沿变陡峭的趋势,在前端加入较大的预补偿。对于 160 J 的输出,预补偿有余量。因此,在抽运源中,脉冲前沿斜率逐渐增加,最终输出的时域波形 [图 7(e)]与平顶分布相比,仍具有微小的偏离。相对于 OPCPA 技术来说,CPA 技术对于抽运脉冲的时域波形容忍度较高,这也是 CPA 技术的优点之一。

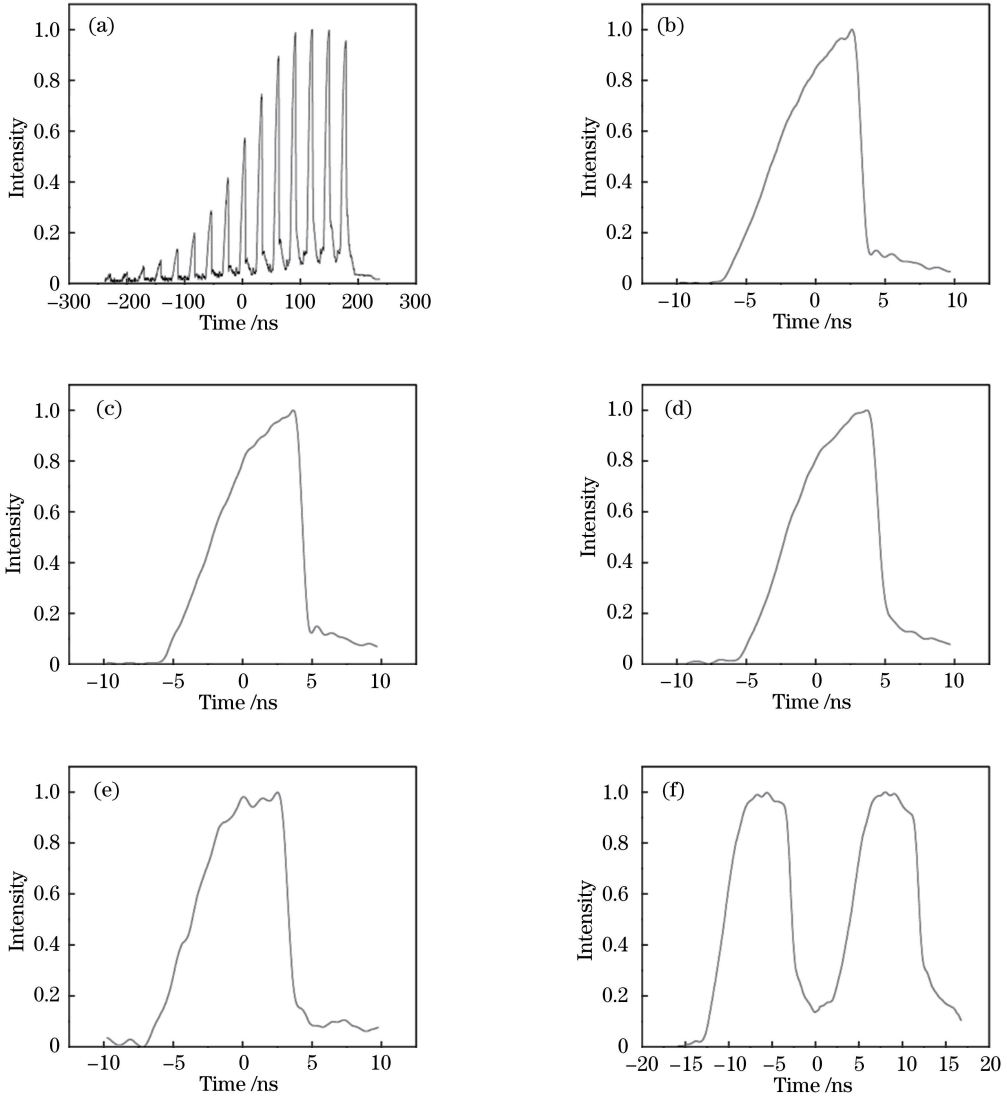


图 7 抽运源中时域波形演变。(a)再生放大器腔内;(b)再生放大器输出;(c)预放大器输出;(d)经 $\phi 40$ mm 钕玻璃棒状放大器放大后;(e)经过 $\phi 80$ mm 钕玻璃棒状放大器放大后;(f)时域双脉冲抽运空间合束后的时域波形

Fig. 7 Time-domain wavefront evolutions of the pump source. (a) In the regenerative amplifier; (b) regenerative amplifier output; (c) pre-amplifier output; (d) after $\phi 40$ mm Nd:glass rod amplifier; (e) after $\phi 80$ mm Nd:glass rod amplifier; (f) after beam combination pumped by time-domain dual-pulse

4 结 论

研制了一套用于 150 mm 大口径钛宝石的四路钕玻璃抽运源系统,采用再生放大器、多级钕玻璃棒状放大器,实现了 4×180 J 的基频脉冲能量, 4×80 J 的倍频脉冲能量,光斑分布均匀,时域波形为方波脉冲的抽运输出,抽运源输出能量稳定性优于 10%。同时采用时域双脉冲同偏振合束方案,保证了光束质量,节省空间布局,提升了抽运源的应用性与可操作性。其抽运的 150 mm 口径钛宝石放大器实现 200 J 以上输出。

参 考 文 献

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [2] Gan Z, Yu L, Li S, *et al.* 200 J high efficiency Ti:sapphire chirped pulse amplifier pumped by temporal dual-pulse[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5169.
- [3] Liang X, Leng Y, Wang C, *et al.* Parasitic lasing suppression in high gain femtosecond petawatt Ti:sapphire amplifier [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15335-15341.
- [4] Chvykov V, Nagymihaly R S, Cao H, *et al.* Design of a thin disk amplifier with extraction during pumping for high peak and average power Ti:Sa systems (EDP-TD) [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3721-3733.
- [5] Chu Y, Liang X, Yu L, *et al.* Theoretical model to suppress parasitic lasing in large-aperture Ti:sapphire amplifiers using a temporal dual-pulse pump [J]. *Optics Communications*, 2014, 318(318): 67-73.
- [6] Chu Y, Gan Z, Liang X, *et al.* High-energy large-aperture Ti:sapphire amplifier for 5 PW laser pulses [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5011-5014.
- [7] Wen L, Chen L, Liu J G, *et al.* Investigation on thermal effect of N31 neodymium glass in high gain performance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0306001.
温磊, 陈林, 刘建国, 等. 大口径 N31 钕玻璃片高增益情况下热性能研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0306001.
- [8] Li W W, Li S G, Chen H Y, *et al.* Pumping thermal damage resistance properties of a new Nd-doped phosphate laser glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0906003.
李韦韦, 李顺光, 陈辉宇, 等. 新型掺钕磷酸盐激光玻璃的耐抽运热破坏性质 [J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0906003.
- [9] Xu L, Yin D J, Lu H H, *et al.* Design and application of Nd:glass disc-amplifier as pump source of 5 PW Ti:Sapphire chirped pulsed amplifier [J]. *Chinese Journal of 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.
- [10] Chai T T, Chai L, Zhu W A, *et al.* Improving output efficiency of terahertz wave by controlling temporal and spatial chirps of pump pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026019.
柴婷婷, 柴路, 朱伟岸, 等. 调控抽运脉冲的时、空啁啾改善太赫兹波输出效率 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026019.
- [11] Xue X T, Zhao Y Y, Li R F, *et al.* Effects of spectral modulation on time-domain characteristics of pulse in amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501001.
薛兴泰, 赵研英, 李荣凤, 等. 光谱调制对放大器脉冲时域特性的影响 [J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501001.