

引用格式: LI Pengfei, ZHAO Zuncheng, LU Wei, et al. High Contrast Femtosecond Laser Regenerative Amplifier Based on Dual-channel Pre-pulse Cleaning and Intracavity Spectral Filtering[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11):1114003  
李鹏飞, 赵遵成, 鲁巍, 等. 基于双通预脉冲清洁及腔内频谱滤波的高对比度飞秒激光再生放大器[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 1114003

# 基于双通预脉冲清洁及腔内频谱滤波的 高对比度飞秒激光再生放大器

李鹏飞<sup>1,2</sup>, 赵遵成<sup>1,2</sup>, 鲁巍<sup>3</sup>, 洪德昇<sup>4</sup>, 陈培荣<sup>5</sup>, 张传标<sup>5</sup>,  
田晓光<sup>5</sup>, 刘畅<sup>1,2</sup>, 陈聪<sup>1,2</sup>

(1 河南大学 物理与电子学院, 河南 开封 475004)

(2 河南大学 河南省铝镁铜基原位复合金属材料工程实验室, 河南 开封 475004)

(3 清华大学 工程物理系, 北京 100000)

(4 北京量子信息科学研究院, 北京 100000)

(5 河南省启封新源光电科技有限公司, 河南 开封 475000)

**摘要:** 为了提高再生放大器输出激光脉冲的对比度, 需要同时提高激光脉冲纳秒尺度的对比度和皮秒尺度的对比度。利用普克尔盒对主脉冲和预脉冲时间滤波的方法, 设计了普克尔盒的双通预脉冲清洁装置, 通过该装置使再生放大器输出激光纳秒尺度的预脉冲对比度提高了 5 个数量级; 利用频谱整形方法, 通过在放大器腔内适当位置插入频谱整形滤波片使得主脉冲前 400 ps 处的放大自发辐射对比度提高了 1 个数量级。最终, 在双通预脉冲清洁与腔内频谱滤波共同作用下, 再生放大器输出激光纳秒尺度的预脉冲对比度从  $4.3 \times 10^{-4}$  提高到了  $6.6 \times 10^{-10}$ , 放大自发辐射对比度(主脉冲前 400 ps)从  $5.0 \times 10^{-8}$  提高到了  $5.0 \times 10^{-9}$ 。

**关键词:** 飞秒激光; 再生放大器; 双通预脉冲清洁; 腔内频谱滤波; 频谱整形滤波片; 对比度

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225111.1114003

## 0 引言

啁啾脉冲放大技术(Chirped-Pulse Amplification, CPA)<sup>[1]</sup>的提出, 极大地提高了激光器的峰值功率, 从而推动了激光驱动的 X 射线<sup>[2]</sup>、惯性约束核聚变<sup>[3]</sup>、激光离子加速器<sup>[4]</sup>等极端物理实验的进展。基于再生放大的 CPA 系统由于其本身产生的放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)和偏振元件消光比不够等原因, 放大后的激光脉冲不可避免地存在背景噪声。这些噪声源主要包括激光前沿的预脉冲和 ASE 等<sup>[5]</sup>。激光前沿的预脉冲、ASE 以及其它背景噪声与主脉冲之间的强度之比就是激光脉冲的对比度<sup>[6-7]</sup>。在高峰值功率激光脉冲与材料相互作用的实验中, 激光脉冲的聚焦峰值功率密度往往大于  $10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>, 而再生放大器产生的激光脉冲, 对比度一般只有  $10^{-6}$ , 因此预脉冲或 ASE 的峰值功率密度达到了  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>。这样的激光强度已经超过了多数材料的电离阈值, 会预先电离靶材形成等离子体, 从而影响主脉冲与靶材间的相互作用<sup>[8-9]</sup>, 进而影响实验结果的处理。因此在强场物理实验中, 提升激光脉冲的对比度十分重要。

基于 CPA 技术设计的高峰值功率激光器, 往往是再生放大器限制了激光脉冲的对比度。近年来为了抑制放大光的背景噪声, 人们提出了很多方法。中科院上海光学精密机械研究所的许毅等一方面通过提升注入种子光的能量来抑制腔内 ASE 的产生<sup>[10]</sup>, 另一方面通过两套普克尔盒和两个偏振片将激光脉冲的预脉冲

基金项目: 河南省重大科技专项科研基金(No. 181100211300)

第一作者: 李鹏飞(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超短超强激光技术。Email: lipengfei\_pengfei@163.com

导师(通讯作者): 赵遵成(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为超短超强激光。Email: zhaozuncheng@vip.henu.edu.cn

鲁巍(1977—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为先进加速与光源。Email: weilu@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2022-04-02; 录用日期: 2022-05-20

<http://www.photon.ac.cn>

对比度提高了5个数量级<sup>[11]</sup>。韩国光州科学技术院的KIM M等通过匹配种子光和ASE的光谱来提高输出激光脉冲的ASE对比度<sup>[12]</sup>。日本关西光子科学研究所的KIRIYAMA H等通过饱和和吸收体来提升放大光的对比度,相比传统的CPA系统,放大光的ASE对比度提升了2个数量级<sup>[13]</sup>。法国国家科学研究中心的JULLIEN A等使用BaF<sub>2</sub>晶体设计的交叉偏振波技术得到高达10<sup>-10</sup>的对比度激光脉冲输出<sup>[14]</sup>。德国耶拿市弗里德里希·席勒大学的RODEL C等通过等离子镜技术将放大光的对比度提升了3个数量级<sup>[15]</sup>。

在高功率激光脉冲与材料相互作用的实验中,往往要求激光脉冲既要有高的ASE对比度,也要有高的预脉冲对比度。为同时实现这两个目标,本文提出了一个新的光学系统。该系统一方面通过在设计的环形腔内加入频谱整形滤波片(Spectral Shaping Filter, SSF)抑制环形腔内ASE被放大,从而提升再生放大器输出激光脉冲的ASE对比度;另一方面在放大器的出光口处设计了普克尔盒的双通预脉冲清洁装置,以提高激光的预脉冲对比度。

## 1 高对比度再生放大器的设计

重复频率为100 Hz的高对比度飞秒钛宝石再生放大器的设计思路为:振荡器产生的纳焦量级飞秒激光脉冲首先进入展宽器,在时域上展宽到几百皮秒后,通过放大器将展宽后的激光脉冲能量放大至毫焦量级,再经由双通预脉冲清洁装置提高放大光的预脉冲对比度,最后进入脉冲压缩器将激光脉冲宽度压缩回飞秒量级<sup>[16]</sup>。

图1是高对比度的飞秒钛宝石再生放大器的光路示意图,其中 $\lambda/2$ 为二分之一波片,M1~M4为曲面镜,M5~M11为750~850 nm 45°全反的宽带平面反射镜,M12、M13为750~850 nm 0°~45°全反的宽带平面反射镜,M14、M15为750~850 nm 0°全反的宽带平面反射镜,L1为凹透镜,L2为凸透镜,L3为平凸透镜,PD为高速光电探测器,CG1、CG2为反射式光栅,P1为750~850 nm 偏振分光棱镜,P2、P3为格兰激光棱镜,Ti:Sa为掺钛蓝宝石晶体,PC1、PC2为普克尔盒。方案中采用河南省启封新能源光电科技有限公司生产的型号为Nano-15的振荡器,该振荡器可提供单脉冲能量为2.25 nJ、光谱的半高宽(Full Width Half Maximum, FWHM)为111 nm的种子光。振荡器输出激光脉冲的光谱使用Ocean Optics公司生产的型号为USB4000的光谱仪测量,测量结果如图2所示。种子光经光隔离器后进入Öffner型展宽器<sup>[17]</sup>,该展宽器由一面凹面镜、一面凸面镜、一面高反镜和一面光栅组成。在相同尺寸的条件下,相对于Martinez展宽器<sup>[18]</sup>,其不仅有低的像差,还能提供更大的色散量。Öffner型展宽器可将种子光在时域上展宽到400 ps且能量的输出效率达到50%以上。放大器采用的环形腔可以保证激光脉冲在腔内单向传输,阻止放大器腔内的ASE反向进入

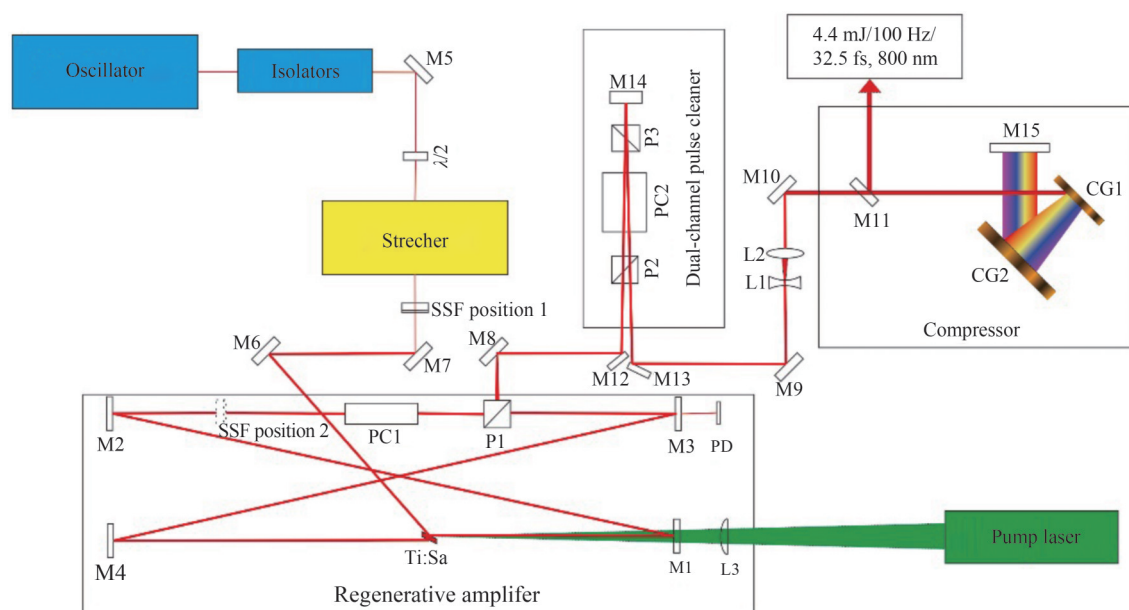


图1 再生放大器光路示意图

Fig. 1 Optical path design of regenerative amplifier

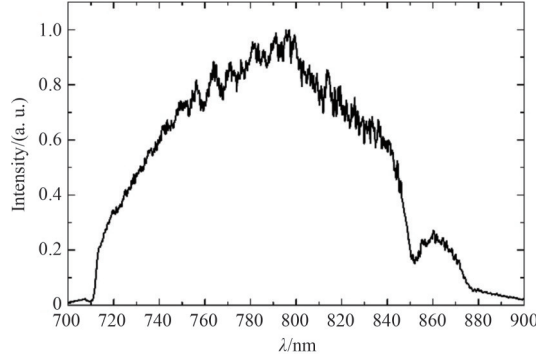


图2 振荡器输出光谱曲线

Fig. 2 Output spectrum curve of oscillator

振荡器,避免振荡器锁模被破坏。放大器谐振腔内 ASE 强度公式为<sup>[19-20]</sup>

$$I_{\text{ASE}} = \frac{I_s \Omega G_0}{4 (\ln G_0)^{1/2}} \quad (1)$$

$$\Omega \sim \omega^2 / L^2 \quad (2)$$

$$\omega^2 \sim L \lambda \quad (3)$$

式中,  $I_{\text{ASE}}$  为腔内 ASE 的强度,  $\Omega$  为空间立体角,  $\omega$  为腰斑半径,  $L$  为腔长,  $G_0$  为小信号增益系数。由式(1)~(3)可知,谐振腔内 ASE 的强度与放大器的腔长成反比。在相同尺寸的条件下,环形腔相比于线性腔不仅腔长更长,而且单向传播抑制了环形腔内的 ASE 被放大,获得了高对比度的激光脉冲<sup>[21-22]</sup>。放大器采用环形腔的腔长为 2.2 m,可以放置在长 80 cm、宽 30 cm、高 25 cm 的腔壳内,结构简单紧凑。

本光学系统中,使用 Alpine Research Optics 公司生产的 SSF 对再生放大器的放大光谱进行整形,获得需要光谱的放大光,其透射曲线如图 3 所示。基本原理是通过改变不同波长范围光的偏振方向,搭配相应偏振片来控制特定波长范围光的透射率。当宽光谱的激光脉冲通过 SSF 时,不同波长范围光的透射率  $T$  与晶体厚度  $l$  的关系为<sup>[23]</sup>

$$T(\lambda) = 1 - \sin^2(2\phi) \frac{n_o^4 - n_o^2 \cos^2\theta}{n_o^2 - \cos^2\phi \cos^2\theta} \times \sin^2 \left[ \frac{\pi t n_e (1 + \cos^2\theta \cos^2\phi / n_e^2 - \cos^2\theta \cos^2\phi / n_o^2)}{\lambda (1 - \cos^2\theta \cos^2\phi / n_e^2 - \cos^2\theta \cos^2\phi / n_o^2)^{1/2}} - \frac{\pi t n_o}{\lambda (1 - \cos^2\theta / n_o^2)^{1/2}} \right] \quad (4)$$

式中,  $\phi$  是 SSF 的光轴与入射面的夹角,  $\theta$  是 SSF 的表面与入射面的夹角,  $n_o$  和  $n_e$  是波长  $\lambda$  的 o 光和 e 光在石英中的折射率。由式(4)可知,不同波长分量的光通过 SSF 时,其透射率会随着晶体的厚度和激光进入 SSF 入射角度而变化,进而改变通过 SSF 不同波长分量光的强度,获得需要的光谱形状。

搭建再生放大器时,首先依据需求选择合适厚度的 SSF,然后通过控制激光进入 SSF 的入射角度来调节通过 SSF 不同波长范围光的强度,由此改变不同波长范围光通过 SSF 的实际透射率。使用 SSF 对放大光谱整形具有两个优势:一方面,SSF 将放大光谱中心波长附近的光强变弱,利用放大过程的增益作用,抑制放大光谱的增益窄化,使放大光谱的半高宽变宽,获得更短脉宽的放大光,提高激光脉冲的峰值功率;另一方面通过调整激光进入 SSF 的入射角度,改变放大光中不同波长范围光的强度,使放大光中长波长范围的光强变弱,抑制放大光的光谱红移,获得所需光谱宽度和形状的放大光。

如图 4 所示,光学系统放大器的出光口处设计了普克尔盒的双通预脉冲清洁装置,该装置由一套普克尔

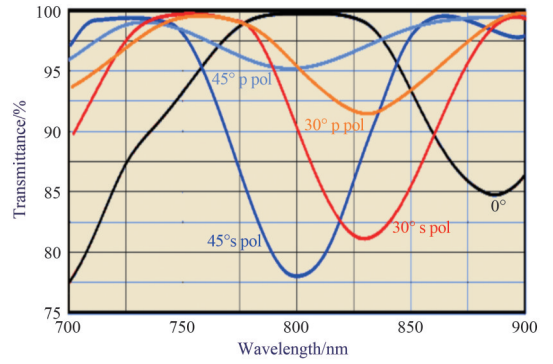

 图3 SSF 的透射曲线<sup>[24]</sup>

 Fig. 3 Transmission curve of SSF<sup>[24]</sup>

盒PC2、一片 $0^\circ$ 全反的宽带平面反射镜M14和两块消光比为 $10^5:1$ 的格兰激光棱镜P2、P3组成。因为放大光通过双通预脉冲清洁装置的时间总和小于1 ns,而普克尔盒半波电压持续时间约为10 ns,所以通过调节普克尔盒高压与激光脉冲的时间差,可以在普克尔盒的高压时间窗口内完成两次激光脉冲清洁。具体过程为:假设放大光是S偏振光,经过格兰激光棱镜P2后,第一次通过普克尔盒PC2,放大光中主脉冲将要通过普克尔盒PC2时加高压,此时主脉冲的偏振方向偏转 $90^\circ$ (P偏振光),而预脉冲的偏振方向不改变(S偏振光)。通过格兰激光棱镜P3后,大部分预脉冲被反射出清洁装置。由于普克尔盒和格兰激光棱镜消光比的限制,小部分预脉冲会和主脉冲一起通过格兰激光棱镜P3,这样就将激光脉冲中较大部分预脉冲与主脉冲分开,完成激光脉冲的第一次脉冲清洁。随后经过反射镜M14反射,清洁后的激光脉冲通过格兰激光棱镜P3后,第二次通过普克尔盒PC2,此时普克尔盒的高压并没有消失,放大光中主脉冲的偏振方向旋转 $90^\circ$ (主脉冲是S偏振光,预脉冲是P偏振光)。通过格兰激光棱镜P2后,大部分预脉冲被其反射出清洁装置,完成了第二次脉冲清洁。在同一普克尔盒上进行两次激光脉冲清洁可大大提高“清洁”效率并节约了时间滤波器的成本和空间。

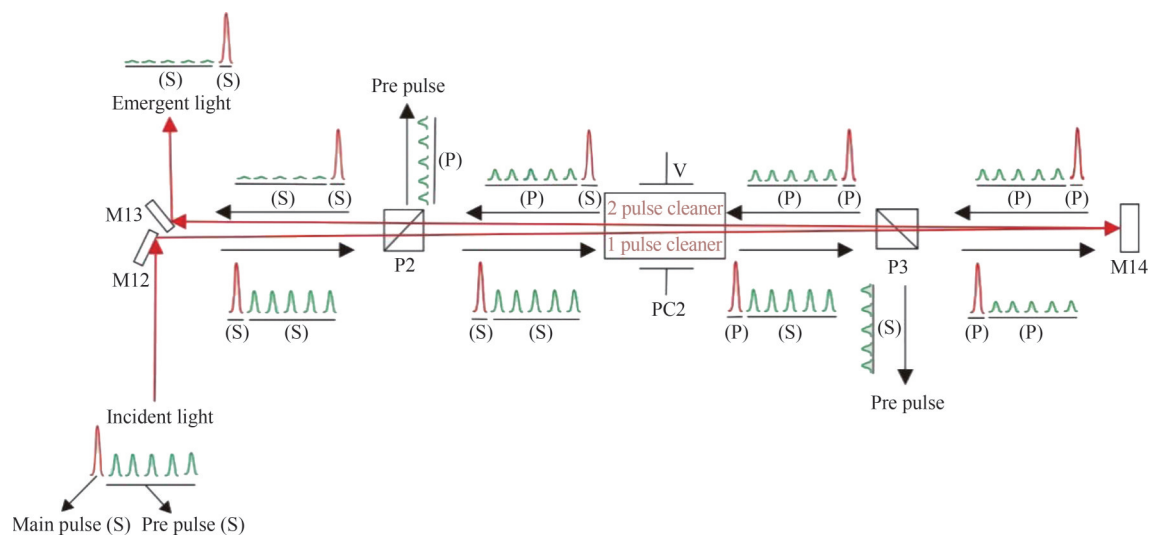


图4 双通预脉冲清洁装置原理图  
Fig. 4 Schematic diagram of dual-channel pulse cleaning device

实验可知,因为普克尔盒和格兰激光棱镜消光比的限制,单通预脉冲清洁后,预脉冲对比度提升约2~3个数量级,所以该双通预脉冲清洁装置可将激光脉冲的预脉冲对比度提升5~6个数量级。

理论上,当格兰激光棱镜和普克尔盒中磷酸二氧钾( $KD_2PO_4$ , DKDP)晶体体积足够大时,通过合理的光路设计和调节普克尔盒施加高压的时间,可在该双通预脉冲清洁装置中完成多次脉冲清洁。但是这样的清洁装置成本过高,体积较大,操作复杂,有违设计初衷。因此,本文设计了普克尔盒的双通预脉冲清洁装置,相较于传统的时间滤波器,该方案不仅节约成本,而且结构简单紧凑,有利于集成到大型激光系统内。

本光学系统中脉宽压缩器主要由一对平行放置的反射式全息光栅组成。再生放大器输出的脉冲经由一组扩束系统后将放大光的光束直径扩束到11 mm后进入Treacy结构的反射式光栅对压缩器,对放大光进行脉宽压缩。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 双通预脉冲清洁装置实验结果与分析

将Thorlabs公司的型号为DET-10A的高速光电探测器PD置于腔镜M3后,通过M3的漏光来监测激光脉冲在环形腔内的放大过程。为了克服放大光谱的增益窄化和光谱红移问题,将特殊镀膜的SSF放置在环形腔内。

该再生放大器中抽运源采用的是一台LD泵浦激光器,它是腔外倍频532 nm的100 Hz固体激光器。单脉冲能量为43 mJ时,8 h的能量稳定度为0.51%(标准差或者均方差与平均值之比),如图5(a)所示。在43 mJ抽运能量下,种子光在环形腔中经历19次放大后从环形腔中倒空,获得单脉冲能量7 mJ的放大光,放大器的输出

效率为16.2%。在理想条件下,激光脉冲光谱的半高宽 $\tau_p$ 和脉冲宽度 $\Delta\nu$ 成反比<sup>[25]</sup>。为了获得理论上的脉宽极限,通过调整环形腔内入射SSF激光的角度,改变SSF对环形腔内不同波长放大光的透射率,获得较宽光谱的激光脉冲,最终获得光谱半高宽为45 nm的激光脉冲,如图7(a)所示。根据傅里叶变换,理论上脉宽极限为31.4 fs。测得放大光通过双通预脉冲清洁装置后的单脉冲能量为6 mJ。在洁净间温度为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ,湿度为40%左右的条件下,测得8 h能量稳定度为0.38%,如图5(b)所示。

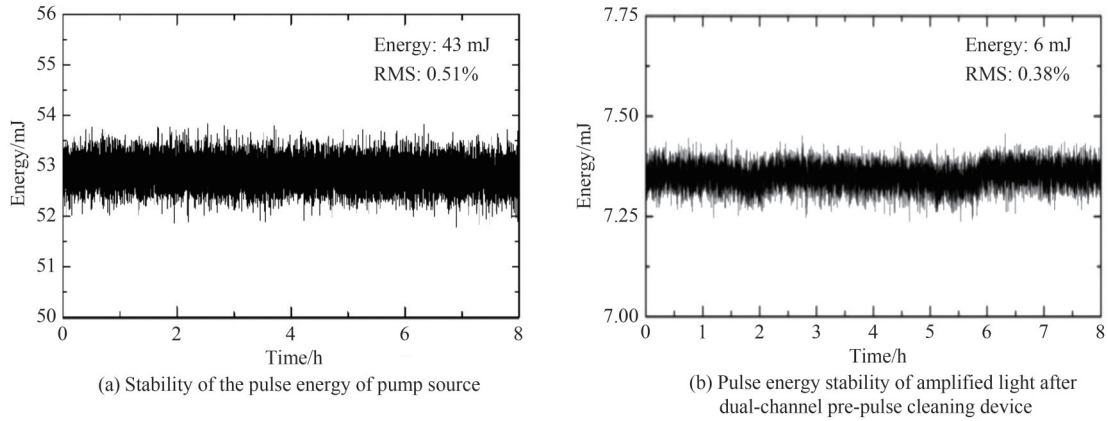


图5 腔内加SSF时,抽运脉冲能量稳定性和双通预脉冲清洁装置后放大光的能量稳定度

Fig. 5 When SSF is added to the cavity, the energy stability of the pump pulse and the energy stability of the amplified light after passing through the dual-channel pre-pulse cleaning device

使用高速光电探测器和普源精电科技股份有限公司的DS4034型示波器测量激光脉冲的预脉冲对比度。将主脉冲的强度归一化后,得到清洁前后预脉冲的强度数据如图6所示。以-7.3 ns处的预脉冲为例,在双通预脉冲清洁装置中,放大后的激光脉冲经过第一次脉冲清洁后,其预脉冲对比度提升 $3.7 \times 10^2$ 倍。通过M14反射后,经历第二次脉冲清洁后,激光脉冲的预脉冲对比度提升了 $1.75 \times 10^3$ 倍。最终放大器输出激光脉冲的预脉冲对比度从 $4.3 \times 10^{-4}$ 提高到 $6.6 \times 10^{-10}$ ,提升了5个数量级。

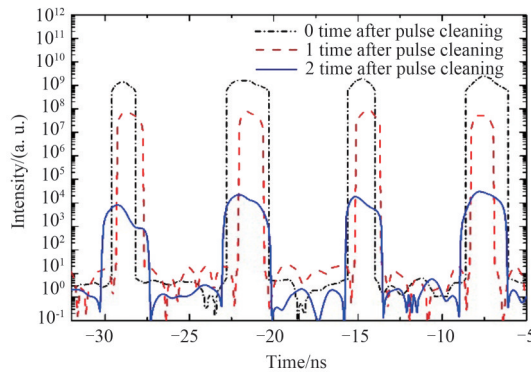


图6 通过双通预脉冲清洁装置前后的预脉冲强度曲线

Fig. 6 Pre-pulse intensity curve before and after passing through the dual-channel pre-pulse cleaning device

将清洁后的激光脉冲导入光栅对压缩器,压缩后的单脉冲能量为4.4 mJ,压缩器效率为74%。使用FASTLITE公司生产的WIZZLER测量其脉冲宽度和光谱相位曲线。微调光栅对的角度和距离,得到最窄脉宽为32.5 fs,如图7(b)所示。

采用Amplitude Technologies公司的型号为SEQUOIA的三阶自相关仪测量腔内加SSF时再生放大器输出激光的ASE对比度。如图8所示,激光主脉冲前400 ps的ASE对比度为 $5.0 \times 10^{-9}$ 。三阶自相关仪测得轨迹中-46.1 ps、-24.3 ps和-12.8 ps的位置出现了3个脉冲,它们与46.1 ps、24.3 ps和12.8 ps处的脉冲相对应且强度较小。因为三阶自相关仪是利用二次谐波与主脉冲间的相互作用测得的对比度,而且二次谐波的对比度本身高于主脉冲,所以三阶自相关仪测得轨迹中,当前脉冲与后脉冲时间对应且后脉冲强度大

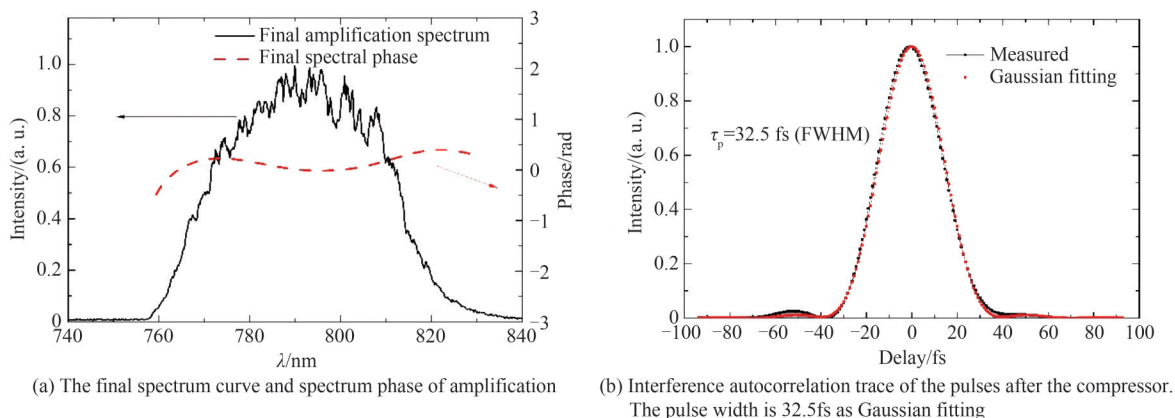


图7 腔内加SSF时,最终放大光谱曲线和光谱相位以及压缩后的脉冲宽度测量的自相关曲线  
Fig. 7 When SSF is added to the cavity, the final spectrum curve and spectrum phase of amplification and interference autocorrelation trace of the pulses after the compressor

于前脉冲时,可以判断测得的前脉冲是假信号<sup>[26]</sup>。腔内使用的SSF厚度为 $(2 \pm 0.25)$  mm,而46.1 ps、24.3 ps和12.8 ps激光传播距离分别约为13.83 mm、7.29 mm、3.84 mm,显然,它们都约等于SSF厚度的偶数倍。由此可知,主脉冲前的3个脉冲是主脉冲在SSF中多次反射产生的后脉冲在三阶自相关仪中形成的假信号。除主脉冲外,其余脉冲都是后脉冲。它们并不影响激光脉冲的对比度,这里不再介绍。

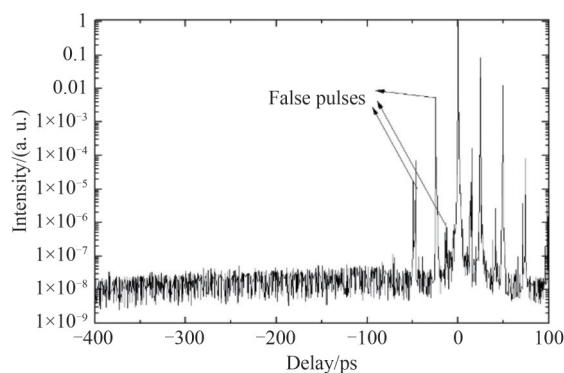


图8 SSF置于放大器腔内时三阶自相关仪的轨迹  
Fig. 8 When the SSF is placed in the amplifier cavity, the track of the third-order autocorrelation

## 2.2 放大器腔内、腔外放置SSF对ASE对比度影响的实验结果与分析

由于放大过程中宽光谱放大光的增益窄化和光谱红移,再生放大器需使用SSF对放大光谱整形,为此,研究SSF置于放大器腔内和展宽器后放大器前(腔外)对放大光ASE对比度的影响。先后将一片SSF放置在放大器腔内和腔外,进行两组实验,如图1所示(实线SSF是腔外位置,虚线SSF是腔内位置)。2.1节中已经完成了SSF置于放大器环形腔内的实验。此时,可以获得单脉冲能量为4.4 mJ、光谱半高宽为45 nm、脉宽为32.5 fs、主脉冲前400 ps的ASE对比度为 $5.0 \times 10^{-9}$ 的激光脉冲。针对设计的环形腔放大器,在相同条件下,研究将SSF置于环形腔外对压缩后激光脉冲ASE对比度的影响,进一步地比较SSF置于环形腔内外的异同。

飞秒激光放大过程不可避免地产生ASE,因为放大光的ASE对比度仅与放大器的腔型设计和激光器中光学元件的精密程度有关<sup>[27-28]</sup>,故而,在其它条件不变的情况下,泵浦光能量不同而引起放大光能量的变化,并不影响放大光的ASE对比度。因此,实验中将2.1节环形腔内的SSF取出,放置在展宽器后面,放大器前面。重新调试放大器、双通预脉冲清洁装置和压缩器,使种子光在放大器的环形腔内经历相同的放大次数后输出放大光,随后通过双通预脉冲清洁装置进行脉冲清洁,最后在光栅对压缩器中压缩。

激光器在抽运能量40 mJ的条件下,经历19次放大后,获得单脉冲能量为14.7 mJ的放大光,放大器的输出效率为36.7%。调节环形腔外SSF的角度,获得光谱宽度和形状与2.1节相似,光谱半高宽为47 nm的放大光,如图9(a)所示。根据傅里叶变换,理论上脉宽极限为30.7 fs。放大光通过双通预脉冲清洁装置后

输出单脉冲能量为 12.5 mJ 的激光脉冲,在洁净间温度为  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ,湿度为 40% 左右的条件下,测得 8 h 能量稳定度为 0.51%,如图 10 所示。清洁后的激光脉冲经压缩器压缩后,使用 WIZZLER 设备测得激光脉冲最窄脉宽为 32.2 fs,同时测量放大光的光谱相位曲线,如图 9 所示。压缩后激光的单脉冲能量为 9.3 mJ。三阶自相关仪测得在环形腔外加 SSF 时,放大光主脉冲前 400 ps 的 ASE 对比度为  $5.0 \times 10^{-8}$ 。

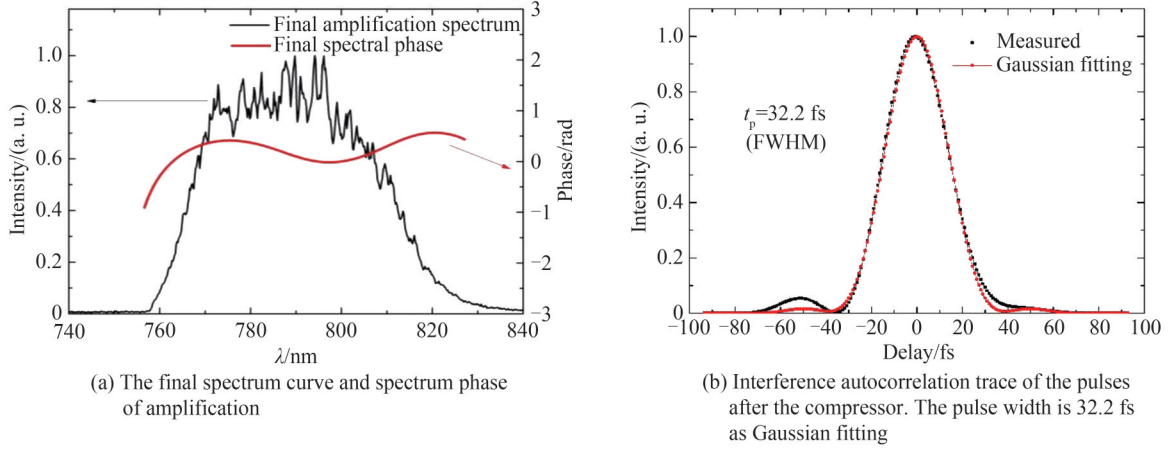


图 9 腔外加 SSF 时,最终放大光谱曲线和光谱相位以及压缩后的脉冲宽度测量的自相关曲线

Fig. 9 When SSF is applied outside the cavity, the final spectrum curve and spectrum phase of amplification and interference autocorrelation trace of the pulses after the compressor

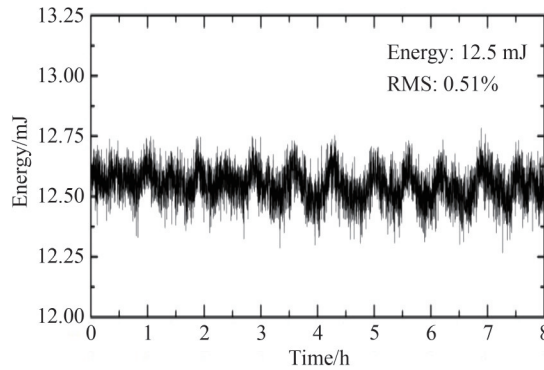


图 10 腔外加 SSF 时通过双通预脉冲清洁装置后放大光的能量稳定度

Fig. 10 Pulse energy stability of amplified light after passing through dual-channel pre-pulse cleaning device when SSF is applied outside the cavity

如图 11 所示,腔内加 SSF 时,激光主脉冲前 400 ps 的 ASE 对比度为  $5.0 \times 10^{-9}$ ,环形腔外加 SSF 时,激光主脉冲前 400 ps 的 ASE 对比度为  $5.0 \times 10^{-8}$ 。分析可知,相比腔外加 SSF,腔内加 SSF 时输出的激光脉冲的 ASE 对比度提高了 1 个数量级。

在环形腔内放置 SSF 时,使用光谱仪测得激光通过 SSF 前后的光谱,将它们归一化后相除得到 SSF 的实际透射曲线(实线),然后使用光谱仪测得放大器腔内的 ASE 光谱曲线(虚线),这一结果可以从图 12 看到。由图可知,SSF 的实际透射率最低的位置恰好是环形腔中 ASE 光谱强度最强的位置。因此,环形腔内加 SSF 可以有效地抑制腔内 ASE 被放大,提升放大光的 ASE 对比度。反之,不能实现这样的效果,即腔外

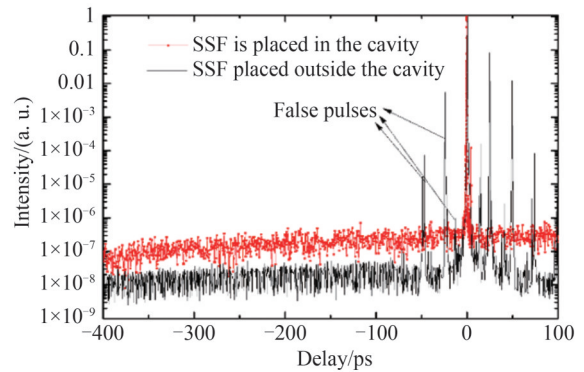


图 11 SSF 置于放大器腔内和腔外三阶自相关仪的不同轨迹

Fig. 11 When the SSF is placed inside and outside the amplifier cavity, the trajectory of third-order autocorrelation

加 SSF 不能抑制放大器腔内的 ASE 被放大。此外,当腔外前加 SSF 时,种子光能量仅被 SSF 衰减一次,而环形腔内加 SSF 时,种子光被 SSF 衰减的次数与其在环形腔中的放大次数相同(19 次)。因此,腔外加 SSF 时用于放大的种子光能量是大于环形腔内加 SSF 的。中科院上海光学精密机械研究所的许毅等已经证明了放大光的 ASE 对比度会随着种子光能量的增加而增加<sup>[11]</sup>。因此在不考虑其他条件情况下,腔外加 SSF 时输出放大光的 ASE 对比度应优于腔内加 SSF 时,但是这和实验结果相反,更能说明腔内加 SSF 可以有效抑制腔内 ASE 被放大,提升放大光的 ASE 对比度。

对于设计的环形腔结构,当腔内加 SSF 时,放大器的输出效率为 16.2%,放大光 8 h 的能量稳定度为

0.38%。而腔外加 SSF 时,放大器的输出效率为 36.7%,放大光 8 h 的能量稳定度为 0.51%。相比腔外加 SSF,腔内加 SSF 时放大器的输出效率虽然降低了 20.5%,但是放大光不仅在能量稳定度方面增加了 0.13%,而且在 ASE 对比度上更是提高了 1 个数量级。所以将 SSF 置于环形腔内,可以获得性能更优的放大光。

### 3 结论

本文报道了一种采用环形腔设计的高对比度再生放大器系统。该系统输出脉宽为 32.5 fs、单脉冲能量为 4.4 mJ、重复频率为 100 Hz、预脉冲对比度为  $6.6 \times 10^{-10}$ 、主脉冲前 400 ps 处的 ASE 对比度为  $5.0 \times 10^{-9}$  的脉冲激光。它同时提升了再生放大器输出激光脉冲的预脉冲对比度和 ASE 对比度。具体地,一方面通过一种新型双通预脉冲清洁装置,使用单一普克尔盒,将激光脉冲的预脉冲对比度提升了 5 个数量级以上。另一方面通过在设计的放大器腔内加 SSF,不仅使输出激光脉冲的 ASE 对比度提升了 1 个数量级,而且有效抑制了放大光的增益窄化和光谱红移。高对比度再生放大器可为多种强场物理实验所需的高峰值功率激光器提供高对比度的优质种子光源。

**致谢** 感谢 Alpine Research Optics 公司提供的 SSF 透射曲线图以及河南省启封新源光电科技有限公司提供的实验条件。

#### 参考文献

- [1] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219-221.
- [2] GRUSE J N, STREETER M, THORNTON C, et al. Application of compact laser-driven accelerator X-ray sources for industrial imaging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2020, 11(983): 164369.
- [3] ZHANG J, WANG W M, YANG X H, et al. Double-cone ignition scheme for inertial confinement fusion [J]. Philosophical Transactions A, 2020, 378(2184): 20200015.
- [4] HANNASCH A, LISI L, BROOKS J, et al. Compact spectral characterization of 5-500 MeV X-rays from the texas petawatt laser-driven plasma accelerator[C]. Proceedings of the Advanced Accelerator Concepts Seminar Series 2020, 2021.
- [5] 魏志义. 超快光学前沿[M]. 1 版. 上海:上海交通大学出版社, 2014: 56-57.
- [6] KIRIYAMA H, PIROZHKOV A S, NISHIUCHI M, et al. Petawatt femtosecond laser pulses from titanium-doped sapphire crystal[J]. Crystals, 2020, 10(9): 783.
- [7] KALASHNIKOV M, OSVAY K, SANDNER W, et al. High-power Ti:sapphire lasers: temporal contrast and spectral narrowing[J]. Laser and Particle Beams, 2007, 25: 219-223.
- [8] WANG Dahui, SHOU Yinren, WANG Pengjie, et al. Laser-induced damage thresholds of ultrathin targets and their constraint on laser contrast in laser-driven ion acceleration experiments[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8(4): e41.
- [9] MARTYNYENKO A S, PIKUZ S A, SKOBELEV I Y, et al. Effect of plastic coating on the density of plasma formed in Si foil targets irradiated by ultra-high-contrast relativistic laser pulses[J]. Physical Review E, 2020, 101(4): 043208.
- [10] XU Yi, LENG Yuxin, LIN Lihuang, et al. Amplified spontaneous emission contrast of CPA laser[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(1): 123-125.
- [11] XU Y, GUO X Y, HUANG Y S, et al. Enhancement of temporal contrast in a femtosecond petawatt Ti:sapphire laser

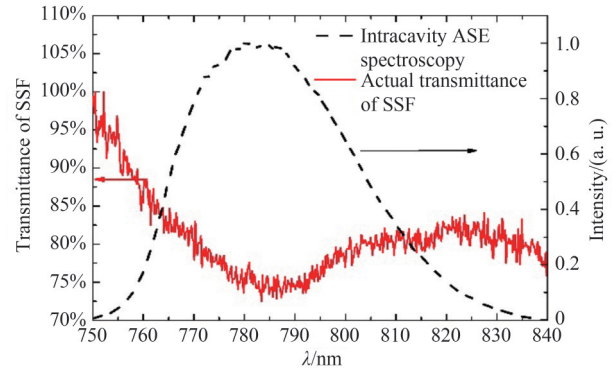


图 12 SSF 的实际透射曲线以及环形腔内不加 SSF 时腔内 ASE 的光谱

Fig. 12 The actual transmission curve of the SSF and the spectrum of the ASE in the ring cavity without SSF



- [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(9): 095302.
- [12] KIM M, KIM J, PHUNG V L J, et al. Contrast ratio enhancement by spectral matching of a seed laser pulse and ASE in a Ti:sapphire laser system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14158–14163.
- [13] KIRIYAMA H, SHIMOMURA T, SASAO H, et al. Temporal contrast enhancement of petawatt-class laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3363–3365.
- [14] JULLIEN A, ALBERT O, BURG Y F, et al.  $10^{-10}$  temporal contrast for femtosecond ultraintense lasers by cross-polarized wave generation[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 920–922.
- [15] RÖDEL C, HEYER M, BEHMKE M, et al. High repetition rate plasma mirror for temporal contrast enhancement of terawatt femtosecond laser pulses by three orders of magnitude[J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(2): 295–302.
- [16] ZHOU Changhe. Chirped pulse amplification: review and prospective from diffractive optics (Invited)[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(11): 110502.
- [17] SUN Darui, SONG Yanrong, ZHANG Zhigang, et al. Compare of characteristics between Martinez and Öffner stretchers used in chirped pulse amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(4): 870–874.  
孙大睿, 宋晏蓉, 张志刚, 等. 用于飞秒脉冲放大器的马丁内兹展宽器与欧浮纳展宽器性能比较[J]. *物理学报*, 2003, 52(4): 870–874.
- [18] MARTINEZ O E. 3000 Times grating compressor with positive group velocity dispersion: application fiber compensation in 1.3–1.6  $\mu\text{m}$  region[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(1): 59–64.
- [19] LIU Cheng, WANG Zhaohua, SHEN Zhongwei, et al. A long ring regenerative cavity for high energy chirped pulse amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 094209.  
刘成, 王兆华, 沈忠伟, 等. 高能量环形长腔再生放大啁啾脉冲激光的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 094209.
- [20] YANOVSKY V, FELIX X, MOUROU G. Why ring regenerative amplification (regen)?[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74: S181–S183.
- [21] 杨威. Tm:YAG 环形腔单纵模激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 7–10.
- [22] ZHONG Wei, TENG Hao, WANG Zhaohua, et al. A ring Ti:sapphire regenerative amplifier for high energy chirped pulse amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 104211.  
张伟, 滕浩, 王兆华, 等. 采用环形再生腔结构的飞秒激光啁啾脉冲放大研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(10): 104211.
- [23] LENG Yuxin, LIN Lihuang, XU Zhizhan. Spectrum shaping in a Ti:Sapphire regenerative amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(2): 170–173.  
冷雨欣, 林礼煌, 徐至展. 掺钛蓝宝石再生放大器的光谱整形[J]. *光学学报*, 2002, 22(2): 170–173.
- [24] WINCHESTER C B. Alpine research optics [EB/OL]. [2022-04-02]. <https://arocorp.com/wp-content/uploads/Product-Specs-SF6040-SF6080.pdf>.
- [25] 何鹏. 高平均功率飞秒钛宝石激光以及周期量级光脉冲的产生与控制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016: 17.
- [26] HUNG Tesheng, YANG Chihsiang, WANG Jyhpyng, et al. A 110-TW multiple-beam laser system with a 5-TW wavelength-tunable auxiliary beam for versatile control of laser-plasma interaction[J]. *Applied Physics B*, 2014, (117): 1189–1200.
- [27] YANG Qingwei, GUO Ailin, XIE Xinglong, et al. Influence of mirror curvature radius manufacture errors in Öffner stretcher on output pulse contrast[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1584–1589.  
杨庆伟, 郭爱林, 谢兴龙, 等. Öffner展宽器曲面镜误差对输出脉冲对比度的影响[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1584–1589.
- [28] HOOKER C, TANG Y, CHEKHLOV O, et al. Improving coherent contrast of petawatt laser pulses[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2193–2203.

## High Contrast Femtosecond Laser Regenerative Amplifier Based on Dual-channel Pre-pulse Cleaning and Intracavity Spectral Filtering

LI Pengfei<sup>1,2</sup>, ZHAO Zuncheng<sup>1,2</sup>, LU Wei<sup>3</sup>, HONG Desheng<sup>4</sup>, CHEN Peirong<sup>5</sup>,  
ZHANG Chuanbiao<sup>5</sup>, TIAN Xiaoguang<sup>5</sup>, LIU Chang<sup>1,2</sup>, CHEN Cong<sup>1,2</sup>

(1 School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)

(2 Henan Engineering Research Center of Metal Matrix in situ Composites Based on Aluminum, Magnesium or Copper, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)

(3 Tsinghua University, Beijing 100000, China)

(4 Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100000, China)

(5 Newlight Source Qifeng Technology, Kaifeng, Henan 475000, China)

**Abstract:** In experiments of pulsed laser-matter interaction, pre-pulse with higher peak power interacting

with matter produces a plasma that corrupts the experimental results. To avoid this problem, it is necessary to reduce the peak power of the pre-pulses. Therefore, it is necessary to find a way to improve the temporal contrast of the pulsed laser, which is also the main purpose of this paper. When using chirped pulse amplification technology to design femtosecond Ti: sapphire regenerative amplifier with high peak power, on the one hand, the amplified spontaneous emission in the amplified laser will be amplified before the seed light, so the temporal contrast of the amplified spontaneous emission of the amplified laser will be low; on the other hand, due to the low extinction ratio of the polarization selective device in the amplifier, the pre-pulse temporal contrast of the amplified light will be low, both of which will lead to low temporal contrast of the amplified light.

In order to improve the temporal contrast of laser pulse output by regenerative amplifier, it is necessary to improve the temporal contrast of nanosecond and temporal contrast of picosecond laser pulse simultaneously. On the one hand, this paper studies the influence of a compact dual-channel pulse cleaner for the Pockels Cells on nanosecond pre-pulse temporal contrast, through this device, two laser pulse cleaning can be completed on a set of the Pockels Cells which makes the pre-pulse temporal contrast of regenerative amplifier by 5 orders of magnitude. On the other hand, the influence of the position where the regenerative amplifier is inserted into the spectral shaping filter on laser pulse amplified spontaneous emission contrast is studied. By inserting the spectral shaping filter in an appropriate position in the ring cavity and adjusting the angle of the spectral shaping filter, the position with the lowest actual transmittance of the spectral shaping filter is just the position with the strongest amplified spontaneous emission spectral intensity in the ring cavity. It is shown that amplified spontaneous emission can be reduced by 1 order of magnitude in the range of a few hundred picoseconds. The pre-pulse temporal contrast ratio is enhanced from the original  $4.3 \times 10^{-4}$  to  $6.6 \times 10^{-10}$ , and the amplified spontaneous emission temporal contrast ratio (400 ps before the main pulse) is improved from  $5.0 \times 10^{-8}$  to  $5.0 \times 10^{-9}$ .

This optical system which includes both dual-channel pre-pulse cleaner and intracavity spectral filtering has the following advantages: the dual-channel pre-pulse cleaning devices using only a single Pockels Cells is placed at the optical outlet of the amplifier. This device not only greatly increases the pre-pulse temporal contrast of the laser pulse, but also effectively reduces the volume of pre-pulse cleaning device, avoiding the redundancy of optical elements and the space waste caused by the additional pre-pulse cleaning device, thus reducing the cost. Then, instead of changing the seed light energy, the amplified spontaneous emission contrast of the laser pulse output by the regenerative amplifier is improved by adding a spectral shaping filter at a suitable position in the cavity. This method not only effectively suppresses the problem that the amplified spontaneous emission in the amplifier cavity is amplified, but also suppresses red shift and gain narrowing of the spectrum during the amplification process. This process simultaneously achieves the purpose of outputting a broad-spectrum laser pulse and enhancing the temporal contrast of the amplified laser. In addition, adding a spectral shaping filter in the cavity can effectively improve the energy stability of the amplified laser. The above scheme comprehensively improves the temporal contrast and stability of laser pulses output by the regenerative amplifier, and provides high-quality seed light for subsequent laser energy amplification.

**Key words:** Femtosecond Laser; Regenerative amplifier; Dual-channel pre-pulse cleaning; Intracavity spectral filtering; Spectral shaping filter; Temporal contrast

**OCIS Codes:** 140.7090; 230.5440; 300.6170; 140.3280