

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2022.04.011

基于同心展宽器的飞秒啁啾脉冲放大研究

杨浩^{1,2}, 滕浩^{2,4*}, 吕仁冲^{1,2}, 朱江峰^{1*}, 魏志义^{2,3,4}

(1 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710126;

2 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190;

3 中国科学院大学物理学院, 北京 100049;

4 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808)

摘要: 在啁啾脉冲放大 (CPA) 系统中, 时域展宽器与压缩器的匹配是获得高对比度飞秒脉冲的关键。相比较常规的 Martinez 和 Öffner 结构的展宽器, 基于同心结构的展宽器由于物与像完全重合, 可以消除像差带来的高阶色散的影响, 进而采用光栅对压缩器以获得更好的压缩效果。透射光栅对和凹面反射镜组合实现的同心展宽器具有结构紧凑的优点, 将该展宽器替代原有的 Martinez 型展宽器, 在重复频率为 1 kHz、泵浦功率为 11.4 W 的泵浦条件下, 展宽后的啁啾脉冲经环形腔钛宝石再生放大器进行能量放大, 再由光栅对进行压缩, 可获得脉冲宽度为 47.5 fs 的压缩结果, 接近于光谱带宽 22.1 nm 的傅里叶变换极限。该结果表明基于透射光栅的同心展宽器可以获得较好的飞秒脉冲压缩效果。

关键词: 激光技术; 飞秒激光; 啁啾脉冲放大; 脉冲展宽器; 再生放大器

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2022)04-00566-08

Study on femtosecond chirped-pulse amplification based on concentric stretcher

YANG Hao^{1,2}, TENG Hao^{2,4*}, LYU Renchong^{1,2}, ZHU Jiangfeng^{1*}, WEI Zhiyi^{2,3,4}

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710126, China;

2 Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3 School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4 Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China)

Abstract: The matching of time domain stretcher and compressor is the key to obtain high contrast femtosecond pulse in chirped-pulse amplification (CPA) laser system. Compared with the conventional Martinez type stretcher and Öffner type stretcher, the stretcher based on concentric structure can eliminate the effect of higher-order dispersion induced by aberration due to the fact that the object is completely coincident with the image, and can further realize better pulse compression with double grating compressor.

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 12034020, 11774277), National Key Research and Development Project (国家重点研发计划项目, 2018YFB1107201), the Synergic Extreme Condition User Facility (综合极端条件实验装置)

作者简介: 杨浩 (1995 -), 甘肃平凉人, 研究生, 主要从事超快激光放大方面的研究。E-mail: hyang_3@stu.xidian.edu.cn

导师简介: 朱江峰 (1980 -), 河南平顶山人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事超快超强激光技术与应用方面的研究。

E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn

收稿日期: 2021-01-11; 修改日期: 2021-03-10

*通信作者。 E-mail: hteng@iphy.ac.cn

The concentric stretcher, which consists of a transmission grating pair and a concave mirror, has the advantage of compact structure. Replacing the original Martinez stretcher with the concentric stretcher, under the condition of 1 kHz repetition rate and 11.4 W pump power, the stretched chirped pulse is amplified by the ring-cavity Ti: Sapphire regenerative amplifier and then compressed by the grating pair compressor. The compression result with pulse duration of 47.5 fs is obtained, which is close to the Fourier transform limit of spectral bandwidth of 22.1 nm. The results show that the concentric stretcher based on transmission grating can achieve better compression result for femtosecond pulse.

Key words: laser techniques; femtosecond laser; chirped-pulse amplification; pulse stretcher; regenerative amplifier

0 引言

1985年, Strickland 和 Mourou^[1]发明的啁啾脉冲放大(CPA)技术打破了超快激光能量放大的瓶颈,自此超快超强激光技术进入飞速发展阶段。在过去三十多年间,CPA技术的出现和发展使得超快超强激光脉冲的产生成为可能,激光峰值功率达到太瓦(10^{12} W,简称TW),甚至拍瓦(10^{15} W,简称PW)量级的激光系统不断涌现^[2]。这种超快超强激光已经成为前沿学科的重要研究工具,比如探索原子、分子运动规律^[3]、实验室天体物理^[4]、激光加速器^[5]、自由电子激光器^[6]等研究领域。

钛宝石振荡器输出的脉冲重复频率一般为近百MHz,单脉冲能量为nJ量级,脉冲宽度为几十甚至几个fs。在CPA系统中,展宽器用于将飞秒量级的种子脉冲在时域上进行展宽,然后再注入到放大器中进行能量放大,最后由压缩器提供与展宽器相反的色散进行补偿以获得与种子脉冲相近的脉冲宽度。在早期的CPA实验中,采用基于材料色散的展宽器来展宽脉冲,如采用光纤的材料色散展宽脉冲^[7],并用Treacy型光栅对压缩脉冲宽度^[8],该展宽压缩方案易补偿二阶色散,却难以匹配三阶色散。同样基于材料色散的展宽器还有块材料展宽器^[9],比如使用高折射率的块状材料,以SF57玻璃为例,能够提供的二阶色散为 $223.58 \text{ fs}^2/\text{mm}$,通光长度为50cm的该材料能将10fs的脉冲展宽至31ps。相比于块状材料,光纤的优势在于通光长度的选择更加灵活,而块状材料的优势在于结构简单稳定,易于小型化。值得注意的是基于材料色散的展宽器提供的二阶色散和三阶色散均为正色散,这意味着设计压缩器时必须选择能同时提供负的二阶色散和三阶色散的结构。

随着超快超强激光技术的发展,基于材料色散的展宽器提供的色散量已经难以适应高功率、大能量的CPA系统。目前,应用较为广泛的时域展宽方案是基于镀金反射式衍射光栅的展宽器,如经典的Martinez型展宽器^[10]、Öffner型展宽器^[11]和棱栅对展宽器^[12]等。Martinez展宽器和Öffner展宽器的色散量都源于物光栅和像光栅的等效距离,在这两种展宽器中,其衍射光栅都放置在偏离球面镜的球心处,在偏离球心的位置产生一个与物光栅对应的像光栅。由于物点、像点在光轴上的分离,物光栅与像光栅之间存在不同程度的像差,色散项中必然含有球面镜成像带来的像差^[13]。放大后的脉冲一般采用光栅对进行压缩,光栅对压缩器可以提供负的二阶色散和正的三阶色散,通过调节两个光栅之间的距离和角度,可以实现对展宽器的二阶色散和放大器材料的二阶色散的完全补偿。由于残存冗余的高阶色散,所以CPA系统中要尽可能地消除或减少高阶色散。一方面,由于前述两种展宽器像差带来的色散难以补偿,会影响最终的压缩效果;另一方面,这类展宽器体积庞大,调节不方便,稳定性较差,常用于科研型超快激光放大器中,但在工业等大规模应用中很难得到推广。

基于上述分析,在前人关于同心展宽器的研究基础上^[14,15],本文研发了一种无像差的基于透射光栅的同心展宽器^[14,15]。在该结构中,物光栅与像光栅完全重合,不存在常规展宽器中像差带来的色散影响,可以和光栅对压缩器完全共轭,实现更好的压缩效果。

1 基于透射光栅同心展宽器设计

基于透射光栅同心展宽器的光路图如图 1 所示。由振荡器输出的 P 偏振种子光依次经过格兰棱镜 GP、法拉第旋光器 FR、半波片 HWP 进入展宽器,此时旋转半波片的角度使得偏振态仍为 P 偏振。光线以 γ 角入射光栅 G1,衍射角为 θ ,经 G1 衍射后的长条状光斑经光栅 G2 上方直接入射到宽带凹面反射镜 CM 上,且该凹面反射镜曲率中心与光线在光栅 G1 上的入射点重合,各个波长的光由凹面反射镜聚焦后的像点与物点完全重合,其物光栅亦即像光栅,因此不存在球差、慧差、场曲等不利于压缩的因素。球心发出的光线必然汇聚于球心,因此该结构的展宽器被称为同心展宽器。在光栅 G1 和凹面反射镜 CM 之间放置另一块平行于光栅 G1 且与光栅 G1 刻线密度相同的光栅 G2,微调凹面反射镜 CM,将沿水平方向入射凹面反射镜的光线反射至入射光线下方,使得尚未反射回球心的光线入射光栅 G2 并衍射,经凹面反射镜 CM 反射前后的入射光和反射光形成的夹角应尽量小,保持在 5° 以内。在凹面反射镜 CM 焦平面的位置放置宽带平面反射镜 BM 将光线反射并原路返回,再次通过展宽器,在光栅 G1 衍射点形成 $-1:1$ 成像。时域上展宽之后的种子光再次通过半波片和法拉第旋光器,返回光的偏振态变成 S 偏振并由格兰棱镜 GP 导出。常规的 Öffner 展宽器是在凹面反射镜焦平面的位置放置一块凸面反射镜折叠光路并经凹面反射镜成像,光线在像光栅发生衍射,而同心展宽器经凹面反射镜汇聚的光线直接被光栅 G2 衍射并准直,光栅 G2 的位置并不仅限于凹面反射镜的焦平面处,光栅 G2 与 G1 之间的垂直距离 (L) 决定了展宽色散量,可以通过调节 G2 的位置来调节该展宽器的展宽量。

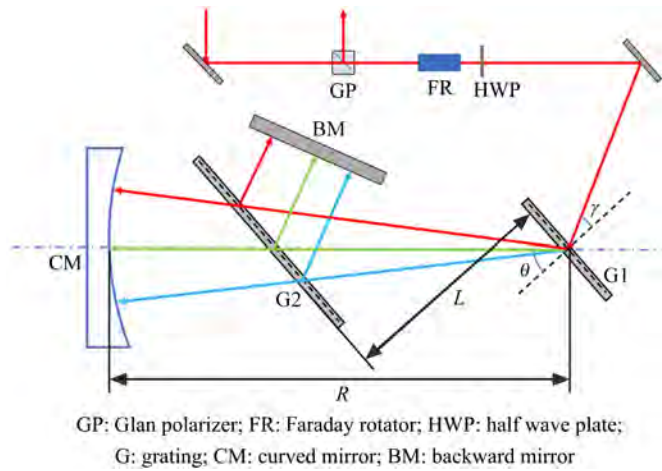


图 1 透射光栅同心展宽器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission grating concentric stretcher

由于不同的光谱成分在 G2 上的位置不同,长波部分在展宽器中经过的空间距离较短而出现于脉冲前沿,而短波部分出现于脉冲后沿,因此脉冲在时域上被展宽。按照图示不同波长光线的路径,几何路径相移完全来自两个光栅之间的间距,其与平行光栅对带来的负色散是完全共轭的,且色散量与光栅对垂直间距 L 成正比,与凹面反射镜曲率半径 R 无关。光线在同心展宽器中往返一次后产生的群延迟 $\varphi'(\omega)$ 、

群延迟色散 $\varphi''(\omega)$ (GDD)、三阶色散 $\varphi'''(\omega)$ (TOD) 表达式分别为

$$\begin{cases} \varphi'(\omega) = -\frac{2L}{c} \frac{1 + \cos(\gamma - \theta)}{\cos\theta} \\ \varphi''(\omega) = \frac{L\lambda^3}{\pi c^2 d^2} \frac{1}{\cos^3\theta} \\ \varphi'''(\omega) = -\frac{3L\lambda^4}{2\pi^2 c^3 d^2} \frac{1 + \sin\theta \sin\gamma}{\cos^5\theta} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\lambda=2\pi c/\omega$, ω 为光波角频率, λ 为波长, c 为光速, d 为光栅常数。

在钛宝石再生放大器中, 分别基于同心展宽器与传统的 Martinez 展宽器进行时域的上展宽, 最后采用光栅对进行色散补偿。图 2 为经过色散补偿后的剩余群延迟曲线, 在同等展宽量的条件下, 同心展宽器的群延迟误差明显优于 Martinez 型展宽器, 说明同心展宽器具有更易于采用光栅对压缩器补偿色散的优势。

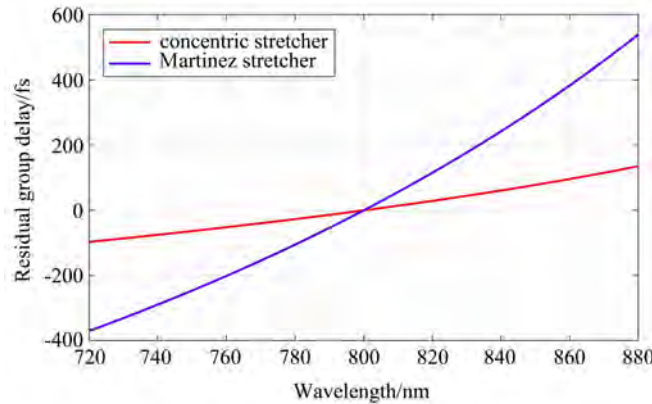


图 2 同心展宽器与 Martinez 展宽器经光栅对色散补偿后的剩余群延迟

Fig. 2 Comparison of residual group delay of the concentric stretcher and Martinez stretcher after dispersion compensated by grating pair

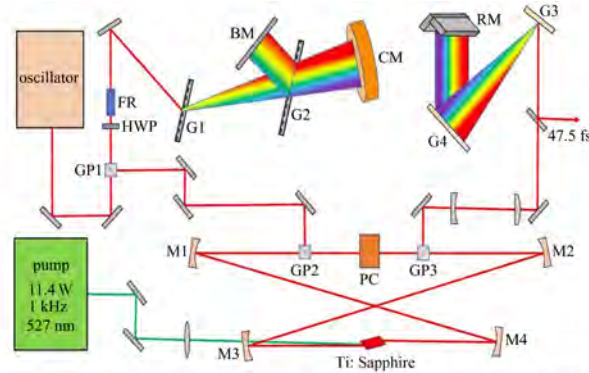
2 实验装置及实验结果

图 3 是基于透射光栅同心展宽器的 kHz 钛宝石放大器光路图, 整个光路由飞秒钛宝石振荡器、透射光栅同心展宽器、钛宝石环形腔再生放大器和光栅对压缩器组成。钛宝石振荡器采用啁啾镜对精确补偿色散^[16], 锁模后可稳定输出单脉冲能量 3 nJ、脉冲宽度小于 20 fs 的超短脉冲激光, 重复频率为 85 MHz, 光谱半高全宽约 100 nm, 脉冲光谱图如图 4 所示。

同心展宽器采用曲率半径为 400 mm、口径为 75 mm 的凹面反射镜 CM 和刻线密度均为 1400 lines/mm 的透射光栅 G1、G2, 对于波长为 (800 ± 20) nm 的光线单次衍射效率高于 94%。为提高光栅衍射效率, 以中心波长 800 nm 对应的 Littrow 角 (34.06°) 入射, 光栅对垂直距离 L 为 220 mm, BM 为宽带 0° 平面反射镜。代入 (1) 式计算得到该展宽器对中心波长提供的二阶色散量为 1.37×10^6 fs², 能将 20 fs 的超短脉冲展宽到 190 ps, 展宽倍率为 9.5×10^3 。由于凹面反射镜大小有限, 展宽后的光谱半高全宽为 75 nm, 如图 4 所示。切掉的部分光谱受限于放大过程中的增益窄化^[17] 和光学元件的带宽, 并不会被放大。

在同心展宽器中, 必须保持两个光栅表面严格平行以及每个光栅刻线的严格平行, 否则会引起严重的空间啁啾和光斑畸变^[18,19]。将展宽之后的光斑用透镜聚焦并用 CCD 采集远场光斑空间分布, 经过仔

细调节, 光斑空间分布基本维持高斯分布, 此时同心展宽器几乎没有空间啁啾, 表明经过展宽后的脉冲可以注入到放大器中进行放大。



M: mirror; G: grating; GP: Glan polarizer; FR: Faraday rotator; HWP: half wave plate;
CM: curved mirror; RM: roof mirror; PC: Pucker cell; BM: backward mirror

图3 基于透射光栅同心展宽器的 kHz 钛宝石放大器光路图

Fig. 3 Optical layout of the kHz Ti: Sapphire amplifier based on transmission grating concentric stretcher

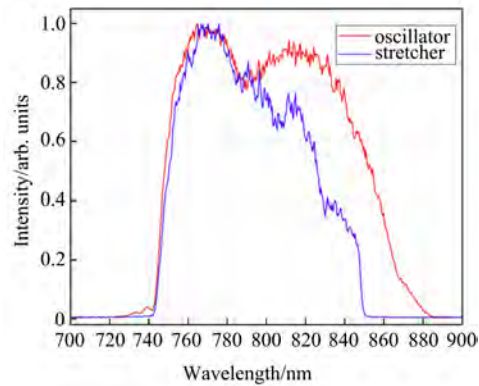


图4 经同心展宽器之后的光谱

Fig. 4 Spectrum by a concentric stretcher

本方案采用环形腔再生放大器进行脉冲能量的放大。相比于线形腔, 环形腔不仅腔长更长, 而且放大激光是单向传输, 可以降低自发辐射荧光 (ASE)^[20], 有利于对比度的提升。将展宽后的种子光导入环形腔钛宝石再生放大器中进行能量放大, 泵浦源采用 Spectra-Physics 公司的 Empower 激光器, 波长为 527 nm, 重复频率为 1 kHz。再生放大器由腔镜 M1~M4、钛宝石晶体 Ti: Sapphire、普克尔盒 PC 和格兰棱镜 GP2、GP3 组成, 其中 M1、M2 的曲率半径为 2 m, M3、M4 的曲率半径为 3 m, 整个环形腔的长度为 3.2 m。钛宝石晶体的长度为 20 mm, 端面以 Brewster 角切割, 对波长为 527 nm 的泵浦光吸收大于 90%。为减小热透镜效应^[21], 晶体采用真空腔室封装和 TEC 制冷, 控制温度为 -34°C 左右。泵浦功率为 11.4 W 时, 再生腔输出单脉冲能量为 2.3 mJ, 光光转化效率为 20.18%。

将再生放大之后的激光脉冲经过透镜组扩束之后导入光栅对压缩器进行压缩, 压缩器由两块刻线密度均为 1480 lines/mm 的反射式镀金光栅 G3、G4 和爬低镜 RM 组成。采用光线追迹法模拟了同心展宽器、再生放大器引入的各阶色散, 用光栅对压缩器对整个系统进行色散补偿, 压缩后系统的剩余二阶色散和三阶色散如图 5 所示, 在中心波长 800 nm 处均可以补偿至接近 0, 达到较好的补偿效果。通过计算,

光栅对压缩器的最佳入射角为 43.8° , 光栅对间的垂直间距为 241.3 mm, 对中心波长提供的二阶色散量为 $-1.45 \times 10^6 \text{ fs}^2$ 。

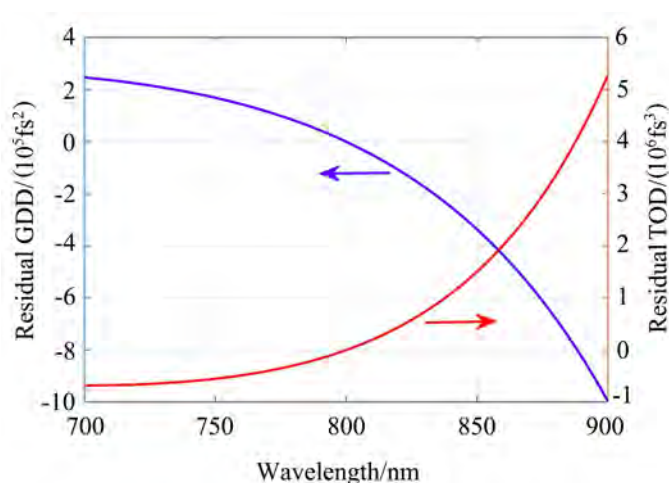


图5 系统剩余色散曲线

Fig. 5 Residual dispersion curve of the system

采用 SRSI 装置 (Wizzler, Fastlite Inc.) 采集了经平行光栅对压缩后的光谱相位及脉冲宽度数据, 如图 6 所示, 放大后光谱带宽窄化到 22.1 nm, 光谱变窄的主要原因来自于再生放大过程中的增益窄化效应。经过优化压缩器, 输出单脉冲能量为 1.5 mJ, 得到的最窄脉宽为 47.5 fs, 接近傅里叶变换极限脉冲宽度 40.7 fs。

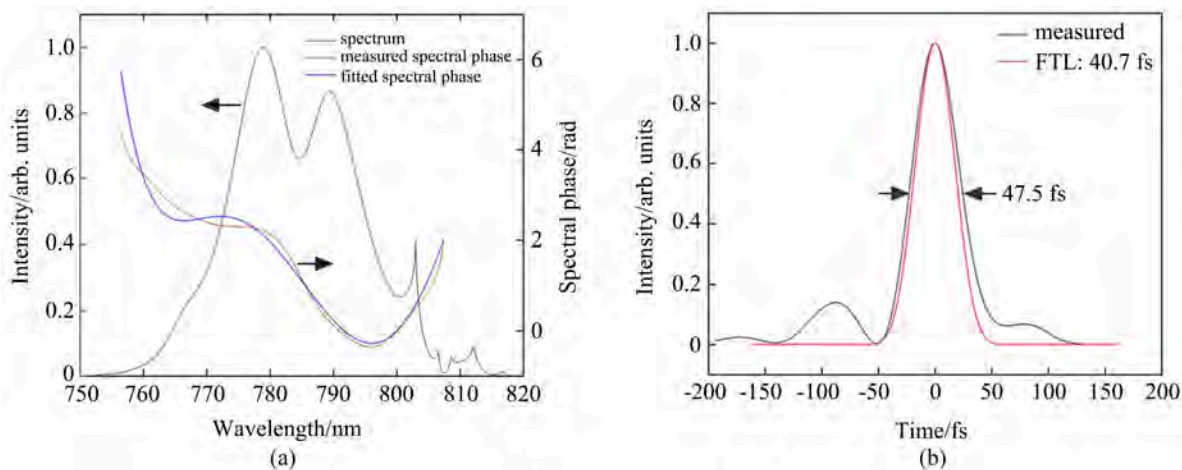


图6 基于同心展宽器的 CPA 系统压缩结果。(a) 光谱相位分布; (b) 压缩脉冲宽度

Fig. 6 Compression results of CPA system based on concentric stretcher. (a) Distribution of spectral phase; (b) Pulse duration of compressed pulses

为了比较, 组建了传统的 Martinez 型展宽器替代上述同心展宽器, 振荡器、钛宝石再生放大器和光栅对压缩器等都保持不变。在展宽量相近的情况下, 最终压缩得到的脉冲宽度为 57.8 fs, 如图 7 所示, 说明 Martinez 型展宽器存在的像差带来的高阶色散在压缩器中未能完全补偿。该对照实验进一步说明同心展宽器与光栅对压缩器色散共轭, 易于压缩得到更短的压缩脉冲。

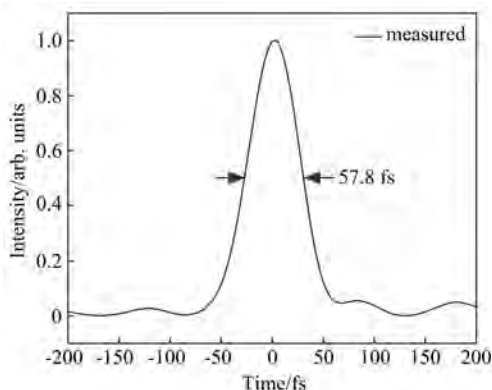


图7 基于 Martinez 展宽器的 CPA 系统输出脉冲宽度

Fig. 7 The output pulse duration of CPA system based on Martinez stretcher

3 结 论

研发了一种基于透射光栅的同心展宽器, 相比较传统的 Martinez 型和 Öffner 型展宽器, 同心展宽器由于没有像差, 有利于压缩获得高对比度的窄脉冲。在泵浦功率为 11.4 W、重复频率为 1 kHz 的泵浦条件下, 将采用透射光栅同心展宽器展宽后的啁啾脉冲经钛宝石环形腔再生放大器进行能量放大, 并采用光栅对压缩器补偿色散, 最终获得输出单脉冲能量为 1.5 mJ、脉冲宽度为 47.5 fs 的压缩结果, 接近傅里叶变换极限。透射光栅同心展宽器还具有结构紧凑的优点, 对飞秒激光放大器的小型化具有重要意义。

参考文献:

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [2] Yu T J, Lee S K, Sung J H, *et al.* Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti: Sapphire laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10807-10815.
- [3] Schultze M, Bothschafter E M, Sommer A, *et al.* Controlling dielectrics with the electric field of light [J]. *Nature*, 2013, 493(7430): 75-78.
- [4] Remington B A, Drake R P, Takabe H, *et al.* A review of astrophysics experiments on intense lasers [J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(5): 1641-1652.
- [5] Clark E L, Krushelnick K, Zepf M, *et al.* Energetic heavy-ion and proton generation from ultraintense laser-plasma interactions with solids [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(8): 1654-1657.
- [6] Murnane M M, Kapteyn H C, Rosen M D, *et al.* Ultrafast X-ray pulses from laser-produced plasmas [J]. *Science*, 1991, 251(4993): 531-536.
- [7] Grüner-Nielsen L, Jakobsen D, Jespersen K G, *et al.* A stretcher fiber for use in fs chirped pulse Yb amplifiers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3768-3773.
- [8] Imeshev G, Hartl I, Fermann M E. Chirped pulse amplification with a nonlinearly chirped fiber Bragg grating matched to the Treacy compressor [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(7): 679-681.
- [9] Hentschel M, Cheng Z, Krausz F, *et al.* Generation of 0.1 TW optical pulses with a single-stage Ti: Sapphire amplifier at a 1 kHz repetition rate [J]. *Applied Physics B*, 2000, 70(1): S161-S164.

- [10] Song Y R, Zhang Z G, Wang Q Y. Optimization of chirped-pulse amplification systems using Martinez stretcher [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(3): 581-586.
宋晏蓉, 张志刚, 王清月. 使用马丁内兹展宽器的啁啾脉冲放大器特性研究[J]. 物理学报, 2003, 52(3): 581-586.
- [11] Cheriaux G, Rousseau P, Salin F, *et al.* Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(6): 414-416.
- [12] Kane S, Squier J. Grism-pair stretcher-compressor system for simultaneous second-and third-order dispersion compensation in chirped-pulse amplification [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(3): 661-665.
- [13] Du D, Squier J, Kane S, *et al.* Terawatt Ti: Sapphire laser with a spherical reflective-optic pulse expander [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(20): 2114-2116.
- [14] Hu W Y, Wang E Y, Li W X, *et al.* Aberration-free stretcher based on concentric diffraction for sub 10 fs pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 181-186.
胡婉约, 王二玉, 李文雪, 等. 适用于亚 10 fs 的共心衍射无像差展宽器[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 181-186.
- [15] Tang Y X, Hooker C, Chekhlov O, *et al.* Transmission grating stretcher for contrast enhancement of high power lasers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29363-29374.
- [16] He H J, Jiang J W, Cheng M Y, *et al.* Sub 10 fs Ti: Sapphire oscillator pumped by picosecond laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(9): 0914002.
何会军, 蒋建旺, 程梦尧, 等. 皮秒激光泵浦的亚 10 fs 钛宝石激光器[J]. 光子学报, 2018, 47(9): 0914002.
- [17] Lu X Q, Fan D Y, Qian L J. Theory of high power Ti:Sapphire laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1059-1062.
卢兴强, 范滇元, 钱列加. 高功率钛宝石激光放大器理论研究[J]. 光学学报, 2002, 22(9): 1059-1062.
- [18] Tan S S, Wei X M, Wu J L, *et al.* Flexible pulse-stretching for a swept source at 2.0 μm using free-space angular-chirp-enhanced delay [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 102-105.
- [19] Akturk S, Kimmel M, O'Shea P, *et al.* Measuring spatial chirp in ultrashort pulses using single-shot frequency-resolved optical gating [J]. *Optics Express*, 2003, 11(1): 68-78.
- [20] Zimmer M A, Bao J, Capasso F, *et al.* Laser action in nanowires: Observation of the transition from amplified spontaneous emission to laser oscillation [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(5): 051101.
- [21] Xu B J, Lu X H, Xue D J, *et al.* The influence of laser output from the thermal-lens effect and the parameters of resonator [J]. *Optical Instruments*, 2002, 24(4-5): 47-51.
徐弼军, 陆璇辉, 薛大建, 等. 热透镜效应和谐振腔参数的选择对激光输出的影响[J]. 光学仪器, 2002, 24(4-5): 47-51.