

基于色散波的 1 μm 飞秒光纤啁啾脉冲放大系统

孙若愚, 谭方舟, 金东臣, 洪 畅, 王 璞

北京工业大学北京市激光应用技术工程技术研究中心, 激光工程研究院, 北京 100124

摘要 飞秒激光在工业加工、激光传感、军事国防、科学研究等领域有着重要的应用前景。报道了一个工作在 1 μm 波段的飞秒光纤啁啾脉冲放大(FCPA)系统。该系统主要包括一个 1.5 μm 全光纤被动锁模光源、一个 1 μm 波段非线性频率转换装置、两级掺镱光纤放大器及一个基于透射式衍射光栅对的脉冲压缩器。掺铒锁模光源中心波长为 1.55 μm 、3 dB 光谱带宽为 12.9 nm、重复频率为 17.5 MHz, 经功率放大后注入一段 9.5 cm 高非线性光纤中产生 1 μm 波段色散波, 其中心波长为 1070 nm、3 dB 光谱带宽为 33 nm。将此色散波脉冲作为种子源通过声光调制器选频后得到重复频率为 1.09 MHz 的脉冲输出。随后功率放大至 11.4 W, 压缩后得到平均功率为 7.7 W、10 dB 光谱宽度为 21.4 nm、脉冲宽度为 270 fs、峰值功率为 26 MW 的飞秒脉冲激光输出。

关键词 激光器; 光纤激光器; 超快激光; 被动锁模光源; 啁啾脉冲放大

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101001

1 μm Femtosecond Fiber Chirped Pulse Amplification System Based on Dispersion Wave

Sun Ruoyu, Tan Fangzhou, Jin Dongchen, Hong Chang, Wang Pu

*Beijing Engineering Research Center of Laser Applied Technology, Institute of Laser Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract Femtosecond laser has important applications in such fields as industrial processing, laser sensing, military defense, and scientific research. A femtosecond fiber chirped pulse amplification (FCPA) system operating at 1 μm is reported. This system consists of a 1.5 μm all-fiber passive mode-locked laser source, a 1 μm nonlinear frequency converter, a two-stage Yb-doped amplifier, and a transmission diffraction grating pulse compressor. The center wavelength of the erbium-doped mode light source is 1.55 μm , the spectral bandwidth of 3 dB is 12.9 nm and the repetition frequency is 17.5 MHz. After power amplification, a 9.5 cm high nonlinear fiber is injected to generate 1 μm band dispersion wave with center wavelength of 1070 nm and 3 dB spectral bandwidth of 33 nm. Moreover, using this dispersion wave pulse as the seed source, and the pulse output with repetition rate of 1.09 MHz is achieved by using a frequency selector of acousto-optic modulator. After that, the power is amplified to 11.4 W, and with the femtosecond pulse laser output with average power of 7.7 W, spectral bandwidth of 21.4 nm at 10 dB, pulse duration of 270 fs, and peak power of 26 MW is achieved after compression.

Key words lasers; fiber lasers; ultrafast lasers; passive mode-locked laser source; chirped pulse amplification

OCIS codes 140.4050; 060.3510; 320.7090; 320.1590

1 引 言

高功率超短脉冲激光器以其高平均功率、高功率峰值功率的特点,在精密加工、波导刻蚀、激光传感、阿秒科

收稿日期: 2017-06-12; 收到修改稿日期: 2017-07-11

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61527822)

作者简介: 孙若愚(1990—),男,博士研究生,主要从事超快光纤激光器、高功率光纤激光器、高功率光纤放大器等方面的研究。E-mail: sunruoyu999@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王 璞(1965—),男,博士,教授,主要从事新型光纤激光器及光纤功能性器件方面的研究。

E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

学等领域扮演着重要的角色^[1-3]。基于全光纤结构设计的超短脉冲激光器逐渐成为研究热点,因其具有结构紧凑、环境稳定性好、单程增益高、可柔性传输等优点,在众多领域拥有很好的应用前景^[4]。与晶体增益介质相比,光纤拥有大的比表面积和长的传输距离,展现出了杰出的光热特性;且光纤的波导特性使其拥有良好的光束质量;同时,由于光纤的作用距离较长,使得光纤的单通增益比固体激光器高得多。然而,同样受限于几何形状,与晶体增益介质相比,光纤的非线性效应阈值较低,虽然大模场面积光子晶体光纤的出现令光纤中的非线性效应阈值得到了明显提高,但为保证其单模传输特性及传输效率,光子晶体光纤的弯曲弧度受到极大限制,甚至不能弯曲,且信号光及抽运光均需使用空间耦合方式注入,大大减弱了光纤激光器紧凑型的优势。同时,峰值功率大于 4 MW 的激光在熔石英材料中传输时会产生自聚焦效应^[5],从而影响光束质量甚至损坏光纤波导。为获得高功率飞秒激光,并尽量发挥光纤激光器结构紧凑、柔性传输的特点,目前常用的手段是利用光纤啁啾脉冲放大(FCPA)技术,使用基于全光纤设计的种子源、展宽器、功率放大器及基于自由空间器件设计的脉冲压缩器^[6-7],通过抑制脉冲放大过程中的非线性效应,从而实现高平均功率、高峰值功率、高系统集成度的飞秒脉冲激光输出。

为获得飞秒脉冲压缩并尽量避免放大过程中时域和光谱的畸变问题,理想的啁啾脉冲种子源需要拥有宽光谱带宽、平滑光谱轮廓、线性啁啾等特点。在 1 μm 波段通过色散管理孤子锁模技术可以实现以上要求,但由于硅基光纤在 1 μm 波段通常表现为正色散特性,一些特种光纤器件虽可提供负色散但均需定制且价格较为昂贵,如啁啾光纤光栅(CFBG)^[8]、高阶模光纤(HOM)^[9]、实芯光子带隙光纤(SC-PBG)^[10]等。目前,使用非线性频率转换技术获得 1 μm 波段宽光谱光源的研究方案受到了广泛关注,通过使用 1.5 μm 波段飞秒激光抽运一段高非线性光纤令其产生频移可获得 1 μm 波段切伦科夫辐射,即色散波激光输出,此光源光谱范围宽、光谱轮廓平滑且拥有线性啁啾,将其作为啁啾脉冲放大(CPA)系统的种子源有利于获得高功率、窄脉宽飞秒激光输出^[11]。

近年来,基于色散波种子源的 FCPA 系统已取得了一系列的研究成果。2010 年俄罗斯科学院 Andrianov 等^[12]使用 10 cm 色散位移光纤,通过非线性频率转换技术将 1.56 μm 激光频移至 1 μm 波长范围,随后使用掺镱光纤放大器及衍射光栅压缩器获得了平均功率为 200 mW、脉冲宽度为 85 fs 的激光输出。同年,美国亚利桑那大学 Kieu 等^[13]利用 300 fs 掺铒激光抽运一段 4.5 cm 高非线性光纤产生超连续光谱,截取超连续光谱中 1 μm 色散波成分作为 CPA 系统种子源,进行功率放大及压缩后获得平均功率为 5.7 W、中心波长为 1040 nm、脉冲宽度为 135 fs 的激光输出。2015 年 Koptev 等^[14]利用色散波种子源结合反向抽运锥形掺镱光纤放大器进行 CPA,压缩后获得平均功率为 600 mW、中心波长为 1057 nm、脉冲宽度为 130 fs、峰值功率为 2.5 MW 的激光输出。为获得更高输出功率及单脉冲能量,2016 年 Fischer 等^[15]利用色散波种子源结合 Yb:YAG 碟片再生放大器及啁啾脉冲压缩技术实现了平均功率为 72 W、脉冲能量为 17 mJ、脉冲宽度为 615 fs 的激光输出。同年,本课题组结合色散波产生技术及啁啾体布拉格光栅(CVBG)压缩技术,在 1 μm 波段实现了高平均功率、大展宽压缩比的 FCPA 系统,获得平均功率为 107 W、脉冲宽度为 566 fs、峰值功率为 10.8 MW 的激光输出^[16],除压缩器外系统内所有器件均使用光纤熔接,实现了光路的全光纤化设计,大大提高了系统集成度。

为进一步获得更窄脉冲宽度、更高脉冲能量、更高峰值功率的飞秒脉冲激光输出,本文报道了一个工作在 1 μm 波段的飞秒 FCPA 系统。1 μm 啁啾脉冲种子源由色散波产生技术获得,并通过光纤展宽器、声光调制频率选择器(AOM)、两级包层抽运掺镱光纤放大器后得到平均功率为 11.4 W、中心波长为 1065.1 nm、重复频率为 1.09 MHz 的皮秒脉冲激光输出。最后使用透射式衍射光栅对作为脉冲压缩器,得到平均功率为 7.7 W、压缩效率为 68.5%、10 dB 光谱宽度为 21.4 nm、脉冲宽度为 270 fs、峰值功率为 26 MW 的飞秒脉冲输出。

2 实验装置

基于色散波产生的 1 μm 高功率飞秒 FCPA 系统的实验装置结构如图 1 所示。实验装置主要包括一个掺铒全光纤被动锁模光源、一个非线性频率转化装置、一个光纤展宽器、两级掺镱光纤放大器及一个基于透射式衍射光栅对的脉冲压缩器。

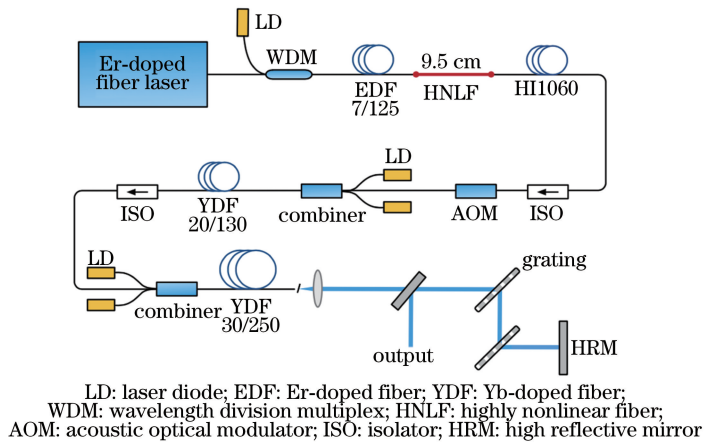


图 1 高功率飞秒 FCPA 系统实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup schematic of high-power femtosecond FCPA system

使用被动锁模技术搭建环形腔色散管理掺铒光纤激光器。其增益介质为 0.95 m 负色散单包层掺铒光纤(LIEKKI Er80),其纤芯及包层直径分别为 $8\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$,群速度色散(GVD)在 1550 nm 处为 $19.6\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为可饱和吸收体放置于环形腔内,用于产生锁模脉冲。谐振腔内环形器、波分复用器及分束器等元件尾纤均为 SMF28 光纤,其色散系数在 1550 nm 处为 $18.0\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。并使用 0.9 m 正色散传输光纤作为色散补偿器件进行色散管理,其色散系数在 1550 nm 处为 $146\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,总谐振腔长约 11.7 m,腔内净色散接近零。

将掺铒激光器产生的 $1.5\ \mu\text{m}$ 锁模激光注入一级掺铒光纤放大器中进行功率放大,放大器采用正向纤芯抽运模式,增益介质为 1 m 单包层掺铒光纤(Nufern SM-ESF-7/125),其纤芯及包层直径分别为 $7\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$ 。随后使用一段 9.5 cm 长的高非线性光纤(长飞 NL-1550-POS)作为非线性频率转化装置产生色散波,此光纤在 1550 nm 处模场直径为 $2.23\ \mu\text{m}$ 、色散系数为 $2.187\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。将频率变换后产生的 $1\ \mu\text{m}$ 波段色散波脉冲作为 CPA 系统种子源进行功率放大。使用 100 m HI1060-XP 正色散单模传输光纤作为脉冲展宽器,其色散系数在 1064 nm 时为 $-39.17\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。使用光纤耦合式声光调制器作为脉冲选择器以降低脉冲重复频率。将展宽后的脉冲注入两级掺铒光纤放大器中进行主振荡功率放大,两级放大器均采用正向包层抽运模式,使用 976 nm 激光二极管作为抽运源,预放大器中增益介质为 2 m Nufern LMA-YDF-20/130 光纤,其在 976 nm 处的吸收系数为 $10.8\ \text{dB}/\text{m}$,主放大器中增益介质为 1.7 m Liekki Yb1200-30/250DC 光纤,其在 976 nm 处的吸收系数为 $15.5\ \text{dB}/\text{m}$ 。系统各级间加入光纤隔离器,以防止放大过程中的后向散射光或自放大辐射对系统稳定性产生影响,且在功率放大后对光纤输出端使用 8° 角切割防止回光反射。输出光经透镜准直后由偏振无关透射式衍射光栅对(Ibsen)进行脉冲压缩,光栅分辨率为 $1379.3\ \text{line}/\text{mm}$ 。

实验中分别使用分辨率为 $0.02\ \text{nm}$ 的光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6370C)和带宽为 25 GHz 的实时高速示波器(Agilent, DSO-X92504A)对输出脉冲的光谱和时域进行探测,并使用 APE 自相关仪及 Femtochrome 自相关仪对超短脉冲的持续时间进行探测。

3 实验结果及分析

掺铒色散管理锁模激光谐振腔输出参数如图 2 所示。使用光谱分析仪测得中心波长为 $1555.5\ \text{nm}$ 、3 dB 光谱宽度为 $12.9\ \text{nm}$;使用带宽 25 GHz 高速示波器配合 25 GHz 光电探测器测得脉冲重复频率为 $17.5\ \text{MHz}$,此重复频率与激光器谐振腔长度吻合;使用 Femtochrome 自相关仪测得脉冲持续时间为 $500\ \text{fs}$,此时时间带宽积为 0.8。

将振荡器输出光注入掺铒光纤放大器后将平均功率放大至 $60\ \text{mW}$,此时脉冲出现非线性压缩效应,放大过程中产生的自相位调制效应在将光谱展宽的同时为脉冲提供了额外的正色散补偿,令脉冲持续时间

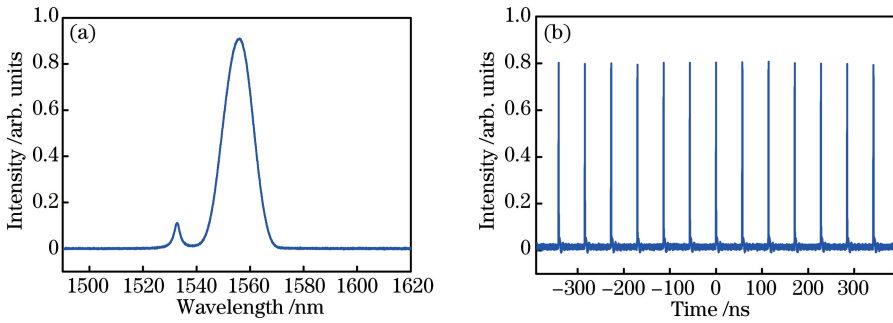


图 2 掺铒谐振腔输出参数。(a)光谱图;(b)输出激光脉冲序列

Fig. 2 Output parameters of the Er-doped oscillator. (a) Spectrogram; (b) pulse train of output laser

(τ_{Gauss})可进一步压缩至 50 fs,如图 3 所示。随后将其注入一段 9.5 cm 长的高非线性光纤中进行非线性频率转化,随着注入功率的增加在高非线性光纤中产生超连续光谱输出,调节注入功率可改变色散波的生成位置,在系统输出端通过在线测量压缩现象的方式,得到最优色散波位置,其光谱中心波长为 1070.1 nm,覆盖范围为 1040~1110 nm,3 dB 光谱宽度 33.2 nm,如图 4(a)所示。使用 Femtochrome 自相关仪测得 1070 nm 色散波激光脉冲持续时间(τ_{Gauss})为 1.4 ps,如图 4(b)所示。可见此 1 μm 波段色散波光源具有宽光谱带宽及平滑光谱轮廓,其衍射极限可达飞秒量级,截取此波段激光作为 CPA 系统种子源进行功率放大。

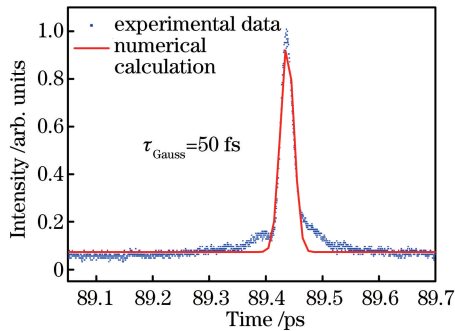


图 3 掺铒光纤放大器自相关轨迹图

Fig. 3 Autocorrelation trace of the Er-doped fiber amplifier

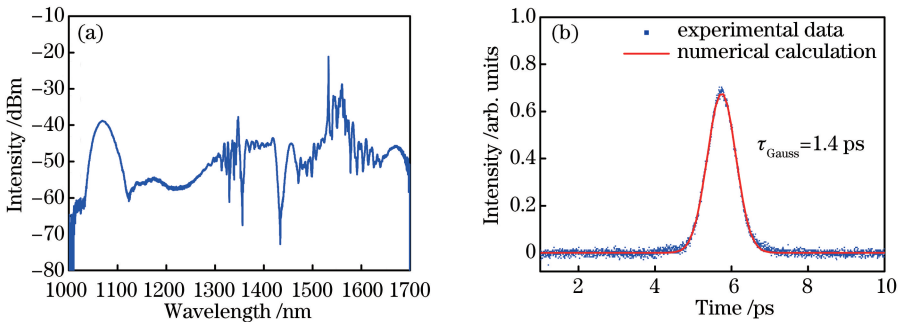


图 4 (a)高非线性光纤中生成的色散波光谱图;(b) 1 μm 波段色散波激光脉冲自相关轨迹图

Fig. 4 (a) Spectrum of the dispersive wave generated in the HNLF; (b) autocorrelation trace of the dispersive wave pulse at 1 μm waveband

随后,将高非线性光纤直接与单模光纤展宽器熔接,产生的 1 μm 波段色散波激光通过 100 m 正色散 HI1060-XP 光纤后,脉冲宽度展宽至 155 ps,如图 5(a)所示。为进一步提高激光单脉冲能量,使用基于光纤耦合的 AOM 脉冲选择器将脉冲重频降至 1.09 MHz,如图 5(b)所示,此时 1 μm 波段平均输出功率为 0.1 mW。

两级包层抽运掺铒光纤放大器用于提升平均功率。为尽量避免在放大过程中产生非线性效应,预放大级使用 20/130 μm 大芯径掺铒光纤作为增益介质,使用一支 9 W、976 nm 半导体激光二极管作为抽运源,抽运光通过 (2+1) \times 1 合束器耦合进入增益光纤,放大后脉冲平均功率提升至 10.5 mW,掺铒光纤中的增益滤

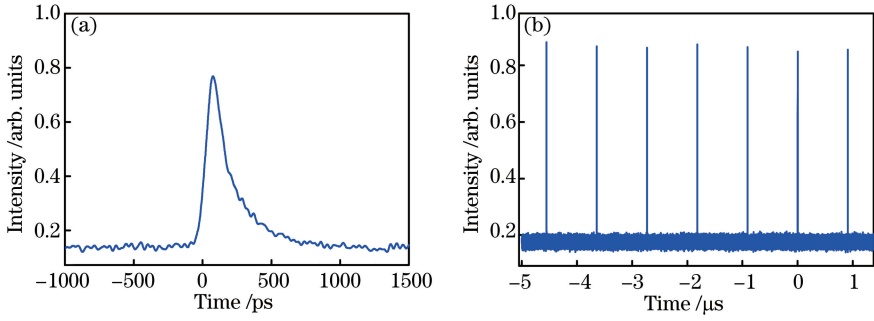


图 5 (a) 经光纤展宽器后的单脉冲轨迹图; (b) 经 AOM 选频后的脉冲序列图

Fig. 5 (a) Single pulse trace after fiber stretcher; (b) pulse train after frequency-selecting of AOM

波效应导致光谱中心波长移至 1053.6 nm, 如图 6(a) 所示。此时由于使用 20/130 μm 多模传输光纤进行探测, 光谱中出现干涉现象, 且 3 dB 处光谱较为平坦, 测量误差较大, 所以测得 10 dB 光谱宽度为 36.5 nm, 光谱中没有发现明显的自相位调制效应及增益窄化效应。

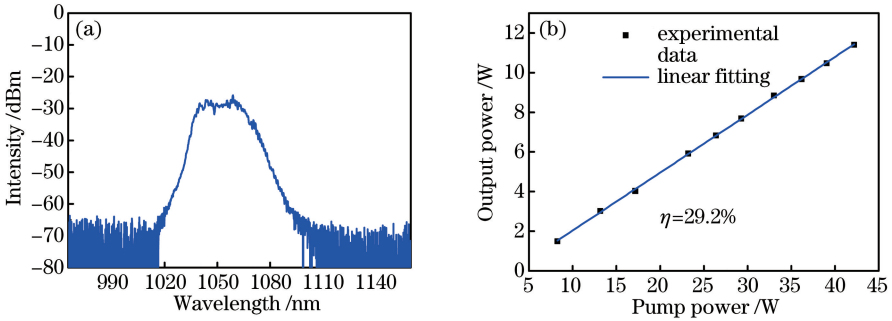


图 6 (a) 预放大级光谱图; (b) 主放大级平均输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 6 (a) Spectrum of the pre-amplifier; (b) average output power of the master amplifier with the change of pump power

主放大级使用 1.7 m 30/250 μm 多模掺镱光纤作为增益介质, 使用两支 50 W、976 nm 半导体激光二极管作为抽运源。当抽运功率达 42.2 W 时, 经二向色镜剥离抽运光后实现平均功率 11.4 W 的皮秒脉冲激光输出, 放大过程中未观察到自相位调制现象, 放大器斜效率 $\eta = 29.2\%$, 平均输出功率随抽运功率的变化曲线如图 6(b) 所示。放大效率较低的主要原因是入射光平均功率较低且激光重复频率较低、占空比较小。同时, 为提高光束质量 (M^2), 实验中对 30/250 大芯径多模光纤进行弯曲缠绕滤掉高阶模, 经测量输出激光光束质量约为 1.6, 如图 7 所示。

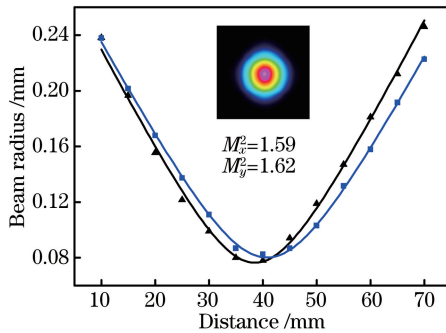


图 7 主放大级光束质量测试图

Fig. 7 M^2 measurements of the master amplifier

输出光经准直后使用线密度为 1379.3 line/mm 的偏振无关透射式衍射光栅对脉冲进行压缩, 压缩光路采用双通式设计, 光栅单次衍射效率约 92%, 双通压缩器压缩效率约 68%, 最终获得平均输出功率为 7.7 W、中心波长为 1065.1 nm、10 dB 光谱带宽为 21.4 nm、单脉冲能量为 7.1 μJ 的激光输出, 光谱图如图 8

(a)所示。优化光栅间距后使用 APE 自相关仪测量自相关轨迹,如图 8(b)所示,此时脉冲形状符合洛伦兹拟合,脉冲持续时间(τ_{Lorentz})为 270 fs,对应脉冲峰值功率为 26 MW,时间带宽积约 0.75。脉冲未压缩至衍射极限可能是由于脉冲中存在难以压缩的高阶色散,系统内所有光纤元件均会引入三阶色散,为实现更高功率、更窄脉宽的飞秒激光输出,下一步工作将通过多种方法抑制三阶色散积累,如使用高掺杂光纤减少增益光纤长度、使用啁啾光纤光栅展宽器代替长光纤展宽器、使用啁啾镜补偿三阶色散等方法。在全光纤设计下,若想进一步降低重复频率、提高输出单脉冲能量,最大的困难在于光纤内高峰值功率导致的高阶非线性效应的积累,放大过程中需要增大展宽压缩比,抑制不可压缩高阶非线性的产生。

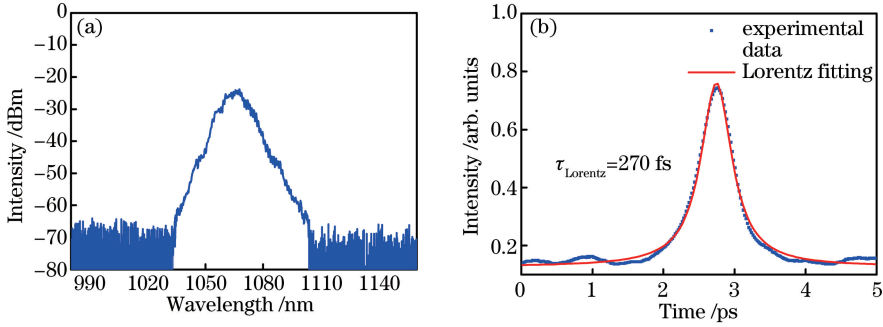


图 8 (a) 压缩器输出光谱图; (b) 压缩器输出脉冲自相关轨迹图

Fig. 8 (a) Output spectrum of the compressor; (b) output pulse autocorrelation trace of the compressor

4 结 论

报道了一种基于色散波种子源的飞秒 FCPA 系统。该系统首先利用非线性频率转化技术将 $1.5 \mu\text{m}$ 飞秒光源通过频移产生 $1 \mu\text{m}$ 波段色散波输出,获得宽光谱超短脉冲种子源。随后利用 CPA 技术搭建光纤展宽器、两级掺镱光纤放大器及一个基于透射式衍射光栅对的脉冲压缩器。经展宽放大后获得平均功率为 11.4 W 的皮秒脉冲激光输出,压缩后得到平均功率为 7.7 W、中心波长为 1065.1 nm、单脉冲能量为 $7.1 \mu\text{J}$ 、脉冲宽度为 270 fs、峰值功率为 26 MW 的飞秒脉冲激光输出。

参 考 文 献

- [1] Paul P M, Toma E S, Breger P, *et al.* Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation[J]. Science, 2001, 292(5522): 1689-1692.
- [2] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 219-225.
- [3] He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 595-622.
何飞, 程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿 [J]. 中国激光, 2007, 34(5): 595-622.
- [4] Liu Jiang, Liu Chen, Shi Hongxing, *et al.* 203 W all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(19): 122-127.
刘江, 刘晨, 师红星, 等. 203 W 全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光器 [J]. 物理学报, 2016, 65(19): 122-127.
- [5] Farrow R L, Kliner D A, Hadley G R, *et al.* Peak-power limits on fiber amplifiers imposed by self-focusing[J]. Optics Letters, 2006, 31(23): 3423-3425.
- [6] Limpert J, Clausnitzer T, Liem A, *et al.* High-average-power femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. Optics Letters, 2003, 28(20): 1984-1986.
- [7] Li Feng, Yang Zhi, Zhao Wei, *et al.* Hundred micro-joules level femtosecond fiber laser amplification system [J]. Chinese J Lasers, 2015, 45(12): 1202005.
李峰, 杨直, 赵卫, 等. 百微焦级飞秒光纤激光放大系统 [J]. 中国激光, 2015, 45(12): 1202005.
- [8] Galvanauskas A, Fermann M E, Harter D, *et al.* All-fiber femtosecond pulse amplification circuit using chirped Bragg gratings[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(9): 1053-1055.
- [9] Ramachandran S, Ghalmi S, Nicholson J W, *et al.* Anomalous dispersion in a solid, silica-based fiber [J]. Optics

Letters, 2006, 31(17): 2532-2534.

- [10] Liu X, Laegsgaard J, Turchinovich D. Self-stabilization of a mode-locked femtosecond fiber laser using a photonic bandgap fiber[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 913-915.
- [11] Freudiger C W, Yang W, Holtom G R, *et al.* Stimulated Raman scattering microscopy with a robust fibre laser source [J]. Nature Photonics, 2014, 8(2): 153-159.
- [12] Andrianov A, Anashkina E, Muravyev S, *et al.* All-fiber design of hybrid Er-doped laser/Yb-doped amplifier system for high-power ultrashort pulse generation[J]. Optics Letters, 2010, 35(22): 3805-3807.
- [13] Kieu K, Jones R J, Peyghambarian N. High power femtosecond source near 1 micron based on an all-fiber Er-doped mode-locked laser[J]. Optics Express, 2010, 18(20): 21350-21355.
- [14] Koptev M Y, Anashkina E A, Bobkov K K, *et al.* Fibre amplifier based on an ytterbium-doped active tapered fibre for the generation of megawatt peak power ultrashort optical pulses[J]. Quantum Electronics, 2015, 45(5): 443-450.
- [15] Fischer J, Heinrich A C, Maier S, *et al.* 615 fs pulses with 17 mJ energy generated by an Yb: thin-disk amplifier at 3 kHz repetition rate[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 246-249.
- [16] Sun R, Jin D, Tan F, *et al.* High-power all-fiber femtosecond chirped pulse amplification based on dispersive wave and chirped-volume Bragg grating[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22806-22812.