

# 基于光谱控制与色散优化的飞秒啾啾脉冲放大系统

牛佳<sup>1</sup>, 刘博文<sup>1\*</sup>, 宋寰宇<sup>1</sup>, 赵思聪<sup>1</sup>, 李少北<sup>2</sup>, 王铁男<sup>2</sup>, 顾新华<sup>2</sup>, 柴路<sup>1</sup>, 胡明列<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>天津凯普林激光科技有限公司, 天津 300300

**摘要** 飞秒激光在工业加工、精密测量、军事国防、科学研究等领域具有广阔的应用前景。报道了基于光谱控制与色散优化的高功率、高脉冲质量飞秒啾啾脉冲放大系统。利用与压缩器色散量相匹配的色散可调啾啾布拉格光纤光栅(CFBG)作为展宽器,通过微调 CFBG 色散量补偿系统的残余色散使整个系统的净色散趋于零;同时引入光谱滤波等手段,保证入射到主放大器之前的脉冲光谱形状不发生畸变,避免了放大过程中脉冲质量的劣化。最终获得了重复频率为 50 MHz、平均功率为 24 W、脉冲宽度为 198 fs 的高脉冲质量飞秒激光输出。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 啾啾光纤布拉格光栅; 飞秒激光; 啾啾脉冲放大

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0101006

## Femtosecond Chirped-Pulse Amplifier System Based on Spectrum Control and Dispersion Optimization

Niu Jia<sup>1</sup>, Liu Bowen<sup>1\*</sup>, Song Huanyu<sup>1</sup>, Zhao Sicong<sup>1</sup>, Li Shaobei<sup>2</sup>,  
Wang Tienan<sup>2</sup>, Gu Xinhua<sup>2</sup>, Chai Lu<sup>1</sup>, Hu Minglie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Tianjin BWT Laser Ltd., Tianjin 300300, China

**Abstract** Femtosecond laser has many potential applications in various fields, such as industrial processing, precision measurement, defense, and scientific research. A high-power and high-pulse-quality femtosecond chirped-pulse amplifier system based on spectrum control and dispersion optimization is reported. In the proposed system, the chirped fiber Bragg grating (CFBG) with tunable dispersion is designed to match the compressor and can be fine-tuned. Thus, the net dispersion of the system approaches zero by controlling the residual dispersion of CFBG dispersion compensation system. Furthermore, the degradation of the pulse quality in the amplification processing is avoided by controlling the spectral shape via spectral filtering before the main amplifier to prevent distortion. Finally, high-quality femtosecond laser pulses as short as 198 fs with an average power of 24 W at a repetition rate of 50 MHz are generated.

**Key words** lasers; fiber lasers; chirped fiber Bragg grating; femtosecond laser; chirped pulse amplification

**OCIS codes** 140.3510; 060.3510; 320.7090; 060.3735

## 1 引 言

高平均功率、高峰值功率飞秒激光在高次谐波产生<sup>[1]</sup>、阿秒科学<sup>[2-3]</sup>、激光精密加工<sup>[4-5]</sup>、超快光谱学<sup>[6]</sup>等方面发挥着巨大作用。与传统的固体飞秒激光器相比,光纤飞秒激光器因具有结构紧凑、散热性

能好、抗环境干扰能力强等特点而受到了科研人员的青睐。尤其是在工业精密加工领域,高功率光纤飞秒激光系统已成为一种重要的解决方案。但是与固体增益介质相比,光纤的芯径较小,而且脉冲在光纤中被放大时作用距离较长,自相位调制(SPM)、受激拉曼散射等非线性效应会阻碍脉冲获得高质量

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-09-16; 录用日期: 2019-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(U1730115,61535009,11527808)、强场激光物理国家重点实验室开放基金

\* E-mail: bwliu@tju.edu.cn

放大<sup>[7]</sup>。光纤啁啾脉冲放大(FCPA)技术是一种能有效避免放大过程中非线性效应从而获得高功率、高能量超短激光脉冲的关键技术<sup>[8]</sup>。目前,百瓦级高功率的 FCPA 系统基本上以光子晶体光纤(PCF)为增益介质<sup>[9-10]</sup>,但 PCF 特殊的空气孔结构导致其与普通光纤器件不易熔接,一般需要通过空间耦合的方式进行放大和输出,降低了系统的稳定性。而以双包层增益光纤(DCF)为增益介质的光纤飞秒激光系统,虽然难以达到百瓦级的高平均功率,但在中等功率的应用中却表现出全光纤化、结构紧凑、成本低、长期稳定性好等优势,因此,开发基于 DCF 的全光纤飞秒激光系统具有很大的技术价值。

FCPA 系统通常使用保偏单模光纤作为展宽器,光栅对作为压缩器,这样既保证了系统的全光纤特性,又能高效压缩光纤放大器输出的高功率飞秒激光脉冲。但是,展宽光纤与光栅对均会引入正的三阶色散(TOD),通过调节光栅对的间距只能保证二阶色散(GVD)匹配,而三阶色散会不断积累,致使放大后的脉冲质量劣化<sup>[11-12]</sup>。因此,保证 FCPA 系统中二阶、三阶甚至更高阶色散的补偿,是得到高质量、高功率飞秒脉冲输出的关键。为了实现这一目的,同时确保系统的全光纤化,通常采用额外加入一段负三阶色散光纤(NTF)<sup>[13-14]</sup>或者使用啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)<sup>[15]</sup>作为展宽器的方法,以提供负的三阶色散补偿,改善压缩后的脉冲质量。但是由于光纤系统的色散无法准确测量,这种预补偿系统三阶色散的方法很难实现系统色散量的精确控制。2017年,Bartulevicius等<sup>[16]</sup>提出了一种以色散可调的CFBG作为展宽器的FCPA系统,通过控制加在CFBG上的线性温度梯度来调节其色散量,实现系统内二阶色散的精确控制,但是该系统未能调节高阶色散,无法实现系统各阶色散的精确补偿。

在光纤飞秒激光放大系统中,光纤器件的有限带宽和透射窗口形状会导致脉冲光谱出现陡峭的前后沿,这样在加以大啁啾量展宽后脉冲时域上也会出现陡峭的两沿。在高功率放大过程中,陡峭的脉冲两沿会积累很难补偿的非线性啁啾,导致压缩后的脉冲质量劣化。此外,在放大链路中,器件本身会在脉冲中引入光谱调制,在放大过程中破坏脉冲的啁啾线性度,劣化压缩后的脉冲质量<sup>[17-18]</sup>。所以,控制 FCPA 系统中信号光的光谱形状,尽量避免光谱调制,是获得高质量脉冲放大的另一个关键因素。

本文报道了一个基于光谱控制和色散优化的高功率、高脉冲质量 FCPA 系统。实验中利用双折射

滤波片控制种子源输出脉冲的光谱形状,消除了CFBG有限带宽带来的光谱滤波作用。此外,采用经过结构优化的保偏合束器,避免了信号光经过合束器后产生光谱调制;以色散可调的CFBG作为展宽器,通过调节其二阶色散和三阶色散来优化系统整体色散量,使系统净色散量趋于零,最终获得了高脉冲质量的飞秒激光脉冲输出,激光脉冲的中心波长为1034 nm,重复频率为50 MHz,放大后输出的平均功率为27 W(压缩后平均功率为24 W),脉冲宽度为198 fs。

## 2 实验装置

系统主要由掺镱全光纤种子源、基于可调CFBG(Teraxion PowerSpectrum™ TPSR-T)的展宽器、两级掺镱光纤放大器和基于透射式衍射光栅对的脉冲压缩器组成,实验装置如图1所示。

种子源是利用可饱和吸收镜(SESAM)锁模技术搭建的全光纤锁模激光器,重复频率为50 MHz,中心波长为1033 nm,光谱宽度(半峰全宽FWHM)为18.6 nm,其光谱如图1(a)中实线所示。展宽器采用新型的色散可调CFBG,反射谱如图1(a)中虚线所示,其形状近似为超高斯型,两沿陡峭,中心波长为1030 nm,带宽为25 nm。为了避免CFBG的有限带宽引入光谱滤波作用,实验中采用12 nm双折射滤波片对种子源输出脉冲进行滤波。预放大器使用1.2 m掺镱保偏单模光纤(Nufern PM-YSF-HI-HP)作为增益光纤,纤芯直径为6 μm,包层直径为125 μm。泵浦源采用尾纤输出式半导体泵浦源,中心波长为976 nm,最高输出功率为470 mW。在主放大器中,信号光和泵浦光由一个保偏(6+1)×1光纤合束器耦合至增益光纤中,该合束器泵浦端单臂可承受的功率为30 W,信号端可承受的功率为1 W。在本实验中,采用两路最高输出功率分别为22 W和60 W的半导体激光器(中心波长为976 nm)作为泵浦源,增益光纤为保偏大模场面积双包层掺镱光纤(Nufern PLMA-YDF-25/250-VIII),纤芯直径为25 μm,内包层直径为250 μm,长度为1.9 m。为防止高功率激光对光纤端面造成损伤,在光纤输出端熔接端帽,以增大光斑在输出端面的尺寸,同时端帽上的增透膜可以有效防止激光在端面上形成反馈,降低放大器相关器件损坏的可能性。增益光纤以10 cm曲率半径盘绕,以增大高阶模的损耗,保证输出光斑模式。主放大器输出的脉冲由一对1600 line/mm双通式透射光栅对进行压缩。

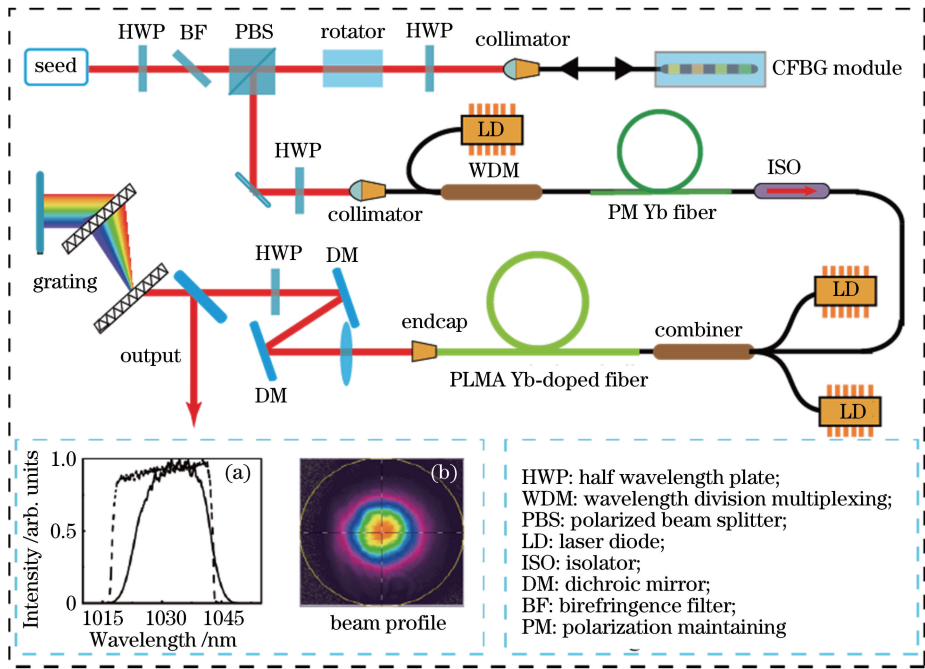


图 1 实验装置示意图,其中插图(a)为种子源输出脉冲光谱(实线)与 CFBG 反射谱(虚线),插图(b)为压缩后 24 W 输出功率下的光斑模式分布

Fig. 1 Schematic of experimental setup. Inset (a) shows spectrum of pulse from seed source (solid line) and reflection spectrum of CFBG (dash line), and inset (b) shows spot pattern distribution when output power after compression is 24 W

光栅单次衍射效率接近 97.4%,压缩器双通压缩效率约为 90%。

### 3 实验结果及分析

种子源输出脉冲平均功率为 80 mW,脉冲宽度为 3.32 ps,去啾啾后脉冲宽度为 202 fs。在本系统中,经过滤波后的啾啾脉冲入射至 CFBG 后被展宽到约 350 ps,再经过一级预放大器后平均功率提升至 150 mW,最后经过合束器耦合至主放大器中。在 46 W 的总泵浦功率下,信号光被放大到 27 W,主放大器斜效率  $\eta = 60.5\%$ 。采用 1600 line/mm 透射光栅对压缩主放大器之后的脉冲,最终获得了平均功率为 24 W 的激光脉冲输出。

为在高功率放大过程中获得高质量飞秒脉冲,并尽量避免脉冲和光谱的畸变问题,FCPA 系统种子源需要具有平滑的光谱形状。控制入射到主放大器中的信号光的光谱形状是本实验的一个关键。由于实验所用 CFBG 的反射谱近似为超高斯型,其带来的光谱滤波作用会使信号光光谱在长波方向上形成陡峭的边沿。本实验采用 12 nm 双折射滤波片对种子源的直接输出脉冲进行滤波,滤波后的光谱如图 2(a)中的虚线所示,中心波长为 1033 nm,光谱宽度为 12 nm。信号光经过预放大器之后的脉冲光谱如图 2

(a)中的实线所示,光谱形状基本维持不变,预放大过程维持线性放大。实验中的保偏光纤合束器是将信号光耦合至增益光纤的重要器件。但在保偏光纤合束器的控制过程中,保偏应力单元容易发生畸变而使合束器保偏特性被破坏,脉冲在光纤传输过程中的偏振态发生变化,从而产生周期性的光谱调制问题<sup>[19]</sup>。频域上的振幅调制表示时域上主脉冲周围存在子脉冲,在放大过程中由于非线性效应调制会被加强,导致主脉冲能量向子脉冲转移,降低脉冲峰值功率和对比度,劣化脉冲质量。为此,本实验采用经过结构优化的保偏(6+1)×1 光纤合束器,该光纤合束器通过泵浦光纤预拉锥技术控制而成,能防止控制过程中应力单元被破坏,从而避免了合束器带来的光谱调制问题。控制主放大器之前各位置的脉冲光谱形状不发生畸变后,信号光经严格保偏的合束器耦合至增益光纤中。主放大过程中不同输出功率下的脉冲光谱如图 2(b)所示。随着输出脉冲平均功率增大,脉冲光谱因增益窄化效应的影响而逐渐变窄,在 27 W 的输出功率下,光谱宽度为 7.65 nm。在 27 W 的输出功率下,光谱仍然平滑,没有出现光谱调制等光谱畸变问题。当输出功率进一步提高到 30 W 时,光谱开始出现微弱的调制现象,表明时域上开始出现子脉冲,这将会破坏系统输出脉冲的对比度,限制功率的进一步提升。

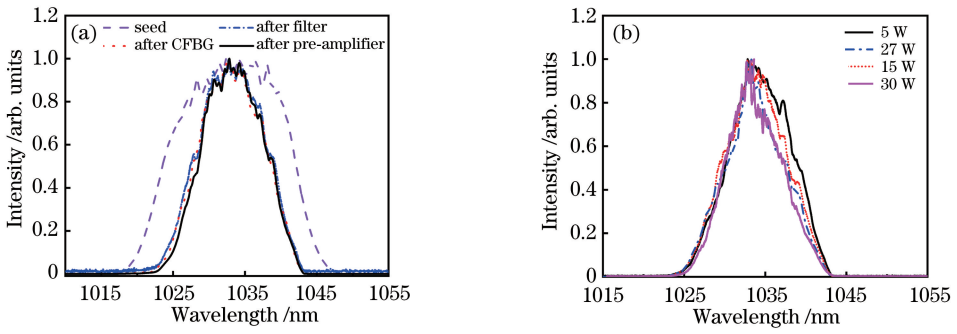


图 2 主放大器之前信号光在各位置的光谱。(a)种子源、滤波后、经过 CFBG 后以及经过预放大器后的光谱;(b)主放大过程不同输出功率下的光谱

Fig. 2 Spectra before main amplifier at different positions. (a) Spectrum of seed source and spectra after filter, CFBG, and pre-amplifier; (b) spectra in main amplification process at different output powers

FCPA 系统中的色散控制也是实现高质量脉冲输出的重要因素。实验所用 CFBG 在其带宽中心波长 1030 nm 附近的二阶色散为  $19.447 \text{ ps}^2$ , 三阶色散为  $-0.174 \text{ ps}^3$ , 对应以利特罗角入射的 1600 line/mm 双通式透射光栅对的间距为 35.7 cm。CFBG 与压缩光栅对的群时延(GD)以及净群时延(net GD)曲线如图 3 所示,可见二者群时延和波长呈相似的线性关系,只是符号相反,净群时延曲线上倾斜(补偿系统中的残余色散)。

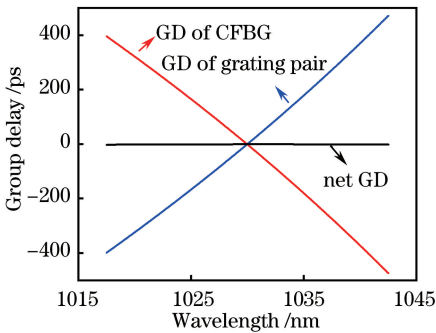


图 3 CFBG 与光栅对的群时延曲线以及净群时延曲线  
Fig. 3 Group delay and net group delay curves of CFBG and grating pair

实验所用的 CFBG 封装在一个温控模块中,可以通过上位机调节模块温度,从而调节 CFBG 的二阶色散与三阶色散,可调范围分别为  $0.582 \text{ ps}^2$  和  $0.0542 \text{ ps}^3$ 。实验时,由于系统中光栅对的间距不能精确调节,系统中会残余部分二阶色散,因此首先调节 CFBG 的二阶色散量补偿系统中残余的二阶色散。此时,在 27 W 输出功率下脉冲压缩后的自相关曲线如图 4(a)中的点线所示,脉冲宽度为 236 fs (假设脉冲为高斯型),由于脉冲中存在残余的三阶色散,自相关曲线存在明显的基底。通过上位机调节 CFBG 的色散量,优化系统内三阶色散得到最佳的脉冲质量,此过程中的调节量约为  $0.0012 \text{ ps}^3$ 。优化后脉冲的自相关曲线如图 4(a)中的实线所示 ( $t$  为脉冲宽度),脉冲宽度为 197 fs,与信号光压缩结果基本一致。伴随残余三阶色散得到补偿自相关曲线的基底明显变小,但主放大过程所积累的非线性啁啾对脉冲基底的影响不能完全消除。基于输出脉冲的光谱和自相关曲线,利用 PICASO 算法<sup>[20]</sup>还原出了优化与未优化系统三阶色散时的脉冲时域形状,如图 4(b)所示,其中虚线是针对优化系统三阶色散后输出的脉冲形状进行高斯拟合的结果。可

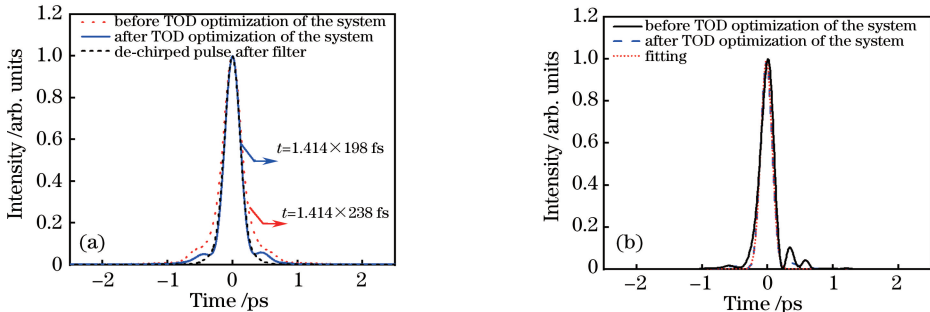


图 4 27 W 输出功率下的实验结果。(a)脉冲自相关(AC)曲线;(b) PICASO 算法还原的脉冲形状  
Fig. 4 Experimental results at output power of 27 W. (a) AC curves of pulses; (b) pulse profiles retrieved by PICASO algorithm

见,优化系统三阶色散后,脉冲拖尾消失,脉冲形状近似为高斯型,有微小旁瓣,主脉冲能量几乎占整个脉冲能量的95%。通过对比可知,采用色散可调的CFGB作为展宽器,可以精确地匹配系统内的各阶色散量,得到最佳的输出脉冲质量,对于获得高功率、高脉冲质量的光纤飞秒脉冲放大系统具有重要的参考价值。

在主放大器27 W的输出功率下,采用 $M^2$ 分析仪(Spiricon  $M^2$ -200s)测量压缩后系统输出脉冲的光斑质量,光斑的远场模式如图1(b)所示。通过捕捉从近场到远场不同位置的激光光斑,计算得到光斑质量参数 $M^2 \approx 1.21$ ,激光器在27 W高功率输出下仍保持基模运转。

## 4 结 论

通过实验研究了以新型色散可调CFBG作为展宽器和光栅对作为压缩器的高功率全光纤飞秒激光放大系统。利用CFBG色散量的可调节特性实现了系统内色散量的实时补偿,从而得到高功率、高质量飞秒激光脉冲输出。对比发现,通过微调CFBG的色散量可以获得更窄的脉冲宽度和更高的单脉冲能量。此外,通过控制主放大器之前各个位置信号光的光谱形状不发生畸变,使入射到主放大器中的信号光具有平滑的光谱形状,从而避免高功率放大过程中主脉冲能量向子脉冲转移、去啁啾脉冲形状发生畸变等问题,最终获得了压缩后输出平均功率为24 W、脉冲宽度为198 fs、主脉冲能量占总能量的95%、光斑质量参数 $M^2 = 1.21$ 的高质量飞秒激光输出,这一技术将在飞秒激光加工、非线性光学、生物成像等领域具有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] MacKlin J J, Kmetec J D, Gordon C L. High-order harmonic generation using intense femtosecond pulses [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70(6): 766-769.
- [2] 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.
- [3] Hall J L. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1279-1295.
- [4] Wu Y Z, Liu B W, Song Y J, et al. Micromachining system based on photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 1078-1082.
- [5] He F, Cheng Y. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(5): 595-622.
- [6] Berera R, van Grondelle R, Kennis J T M. Ultrafast transient absorption spectroscopy: principles and application to photosynthetic systems [J]. *Photosynthesis Research*, 2009, 101(2/3): 105-118.
- [7] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [8] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [9] Yang K W, Hao Q, Li W X, et al. High-power femtosecond pulses fiber laser system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1254-1256, 1262.
- [10] Röser F, Rothhard J, Ortac B, et al. 131 W 220 fs fiber laser system [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(20): 2754-2756.
- [11] Maine P, Strickland D, Bado P, et al. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(2): 398-403.
- [12] Stern M, Heritage J P, Chase E W. Grating compensation of third-order fiber dispersion [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(12): 2742-2748.
- [13] Hao J Y, Liu B W, Song H Y, et al. Femtosecond fiber amplification system based on third-order dispersion compensation technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051404.
- [14] Mortag D, Theeg T, Hausmann K, et al. Sub-200 fs microjoule pulses from a monolithic linear fiber CPA system [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(5): 706-709.
- [15] 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.

- [16] Bartulevicius T, Frankinas S, Michailovas A, et al. Compact fiber CPA system based on a CFBG stretcher and CVBG compressor with matched dispersion profile [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19856-19862.
- [17] Schimpf D N, Seise E, Limpert J, et al. The impact of spectral modulations on the contrast of pulses of nonlinear chirped-pulse amplification systems [J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10664-10674.
- [18] Didenko N V, Konyashchenko A V, Lutsenko A P, et al. Contrast degradation in a chirped-pulse amplifier due to generation of prepulses by postpulses [J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3178-3190.
- [19] Wen L, Liu B W, Song H Y, et al. All polarization-maintaining fiber amplification system to generate high-power and high-quality femtosecond laser pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201011.  
文亮, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率、高质量全保偏光纤飞秒激光放大系统 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201011.
- [20] Nicholson J W, Rudolph W. Noise sensitivity and accuracy of femtosecond pulse retrieval by phase and intensity from correlation and spectrum only (PICASO) [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(2): 330-339.