

# 高功率飞秒自相似光纤激光放大系统

贺明洋<sup>1</sup>, 李敏<sup>1\*</sup>, 袁帅<sup>1</sup>, 黄坤<sup>1</sup>, 郭政儒<sup>2</sup>, 张青山<sup>2</sup>, 夏宇<sup>1</sup>, 曾和平<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

<sup>2</sup>华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

**摘要** 基于自相似光纤激光放大技术,通过非线性光谱展宽突破光纤增益带宽的限制,结合高效色散补偿以获得高功率超短脉冲放大输出,最终得到中心波长 1030 nm、重复频率 40 MHz、平均功率 34 W、脉冲宽度 50 fs 的高质量脉冲输出,对应峰值功率 17 MW。该系统采用可饱和吸收体锁模,采用啁啾光纤布拉格光栅补偿腔内色散,相对于啁啾脉冲放大技术具有结构简单、集成度高等优点。实验结合光纤热管理技术和数字测控技术(FPGA),显著提升了系统的稳定性和鲁棒性,极大推动了高功率飞秒光纤激光在下游诸多科学与技术领域的应用。

**关键词** 激光光学; 光纤激光; 锁模; 光子晶体光纤; 自相似放大; 飞秒脉冲

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0308001

## High-Power Femtosecond Self-Similar Fiber Amplification System

He Mingyang<sup>1</sup>, Li Min<sup>1\*</sup>, Yuan Shuai<sup>1</sup>, Huang Kun<sup>1</sup>, Guo Zhengru<sup>2</sup>,  
Zhang Qingshan<sup>2</sup>, Xia Yu<sup>1</sup>, Zeng Heping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract** In this work, self-similar fiber laser amplification technology and nonlinear spectrum broadening are employed to overcome the gain limitation of the fiber. Using high-effectivity dispersion compensation, a high-quality pulse with the pulse width of 50 fs, average power of 30 W, central wavelength of 1030 nm, and repetition rate of 40 MHz, corresponding to a peak power of 17 MW, is realized. The system employs a saturable absorber for mode locking and chirped fiber Bragg grating for dispersion compensation in the cavity. In comparison with a chirped pulse amplification system, the proposed system has the advantages of simple and high integration. The stability and robustness of the proposed system are greatly improved through fiber thermal management technology and field programmable gate array (FPGA), which significantly promotes the applications of high-power femtosecond fiber lasers in many mainstream fields of sciences and technology.

**Key words** laser optics; fiber laser; mode locking; photonic crystal fiber; self-similar amplification; femtosecond pulse

**OCIS codes** 140.3280; 320.5520; 320.7090; 320.7140

## 1 引 言

飞秒脉冲的脉冲宽度为飞秒量级( $10^{-15}$  s),凭借着极短的脉冲时间和极高的峰值功率被广泛应用于许多科学前沿领域,如:太赫兹产生、光学频率梳研究、拉曼光谱分析、超快时间分辨研究等<sup>[1-5]</sup>。同时,高功率超短飞秒脉冲在工业加工领域也有着广

泛应用,飞秒脉冲极短的脉冲宽度可以有效降低热积累,不会对被加工材料造成损坏和变形。“冷”加工过程抑制了热效应,加工精度提高,是获得纳米尺度的加工分辨率的必要前提<sup>[6-7]</sup>。而飞秒激光在超快瞬态和超强现象等领域的研究,随着激光脉冲宽度的缩短和脉冲能量的不断增加得以发展。

高功率飞秒脉冲在光纤传输过程中不可避免地

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-10-05; 录用日期: 2019-10-14

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(11727812)

\* E-mail: minli\_1220@163.com

受到非线性相位累积及有限增益带宽的影响,易发生脉冲畸变,这极大地限制了输出功率的提高和脉冲宽度的进一步窄化<sup>[8-10]</sup>。常采用以下方法降低非线性相位累积的影响:采用在时域上预先展宽的脉冲,以降低脉冲峰值功率;使用大模场增益光纤,提高光纤非线性阈值。然而在放大过程中,较小的非线性积累下难以获得较宽的输出光谱,因此脉冲宽度很难达到百飞秒以下<sup>[11-13]</sup>。自相似放大技术的提出为获得亚百飞秒的脉冲输出带来了新的机会。1996年,Tamura等<sup>[14]</sup>发现脉冲在正色散光纤中传输时能保持抛物线形状不变且不发生光波分裂,因而自相似脉冲可以承受更高的非线性扰动,在放大过程中可主动利用非线性效应展宽光谱、突破增益带宽的限制,脉冲能量随传输距离呈指数增长,自相位调制和正色散同时作用于脉冲,使其具有较强的线性啁啾,同时脉冲可以被色散补偿光栅高质量的压缩,因此可在获得高平均功率的同时得到更窄的脉冲输出<sup>[15]</sup>。近年来,众多科研小组利用自相似放大技术实现了激光输出参数的进一步提升。2009年,Deng等<sup>[16]</sup>将固体飞秒激光器作为种子源,采用掺镱光纤放大器在抛物线脉冲区获得了平均功率18 W、脉冲宽度50 fs的超短脉冲输出。2014年,华东师范大学的Zhao等<sup>[17]</sup>证明了预啁啾管理在自相似放大过程中的关键作用,通过控制自相位调制和有限增益带宽之间的关系,在2 m长的大模场光子晶体光纤放大器中实现了自相似放大,最终得到80 W、38 fs的脉冲输出。2016年,同组的Liu等<sup>[18]</sup>通过优化三阶色散与群速度色散的比值将这一结果提高为93 W、33 fs。2015年,Liu等<sup>[19]</sup>演示了基于预啁啾管理的自相似放大激光系统,经透射光栅对压缩后脉冲宽度为60 fs,平均功率高达100 W。然而,上述实验研究多采用固体激光器或偏振旋转锁模激光器作为种子源,色散管理则是利用棱镜对与光栅对的结合实现窄脉冲输出,而空间型振荡器与棱镜对的较长工作距离易导致整个系统体积大、稳定性差、难以集成。且实验系统均工作在恒定的实验室环境下,无法应用于复杂的工业加工过程,这限制了高功率飞秒脉冲应用的拓展。随着飞秒激光在生物医学成像、化学探测、光纤通信方面的应用,研究与集成高稳定性光纤飞秒光源迫在眉睫;同时,鉴于光梳在光学频率精密测量、原子离子跃迁能级测量、远程信号时钟同步及卫星导航等领域的广泛应用,高度集成化的高功率飞秒光纤激光

系统也可可为高功率光梳的研制及其应用拓展提供有力的技术支撑。

本文采用全光纤化的可饱和吸收体锁模,利用啁啾光纤布拉格光栅补偿腔内色散,实现宽光谱种子光输出。为避免脉冲畸变,在放大过程中选用较短的大模场增益光纤,减小介质长度,降低脉冲峰值光强,有效抑制非线性相位累积。结合高效色散补偿,实现了脉冲自相似演化,进一步提升了脉冲峰值功率,实现了高功率超短飞秒脉冲输出。

## 2 实验装置

高功率飞秒自相似光纤激光放大系统的装置图如图1所示。

振荡器为全光纤结构,由激光二极管(LD)、可饱和吸收体(SESAM)、啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)、单模掺镱光纤(YSF)组成,CFBG用于补偿腔内色散以实现宽光谱种子光输出,全保偏光纤结构可使输出的种子光保持较好的偏振态。振荡器输出的种子光由保偏合束器(coupler)按95:5的比例分成两路,分别用于预放大和锁模状态监测。预放大分为两级:第一级采用单模掺镱光纤作为增益介质,泵浦源为单模976 nm LD,功率为400 mW,通过波分复用器(WDM)与种子光耦合;第二级增益介质为大模场保偏光子晶体光纤(PCF14/135, DC-135/14-PM-Yb, NKT),直接将其与保偏合束器(combiner)熔接,熔接机预估熔接损耗为0.2 dB,两个功率为9 W的LD为放大级提供泵浦能量。预放大后的光纤光束由光纤准直器(CM)转化到空间中传输,1250 lp/mm的空间光栅对(GR)用来补偿预放大过程中累积的色散,以达到预啁啾整形的目的。主放大采用后向泵浦方式,高功率泵浦光由聚焦透镜耦合进大模场光子晶体光纤(PCF40/200, DC-200/40-PZ-Yb, NKT)的内包层中。光子晶体光纤盘放在铝板的V形槽中以增大光纤的散热面积。通过控制光子晶体光纤的盘绕半径及应力轴方向,可有效抑制光纤中的高阶模式,获得更高光束质量的激光输出。对光纤两端进行塌缩并切8°角处理,防止放大过程中端面产生的自激振荡对光纤造成损伤,影响输出脉冲的信噪比。相邻两放大级之间通过隔离器(ISO)进行隔离,以防止回返光的反向传输。利用空间光栅对对放大后的高能量激光进行色散补偿,从而得到高功率的飞秒激光输出。

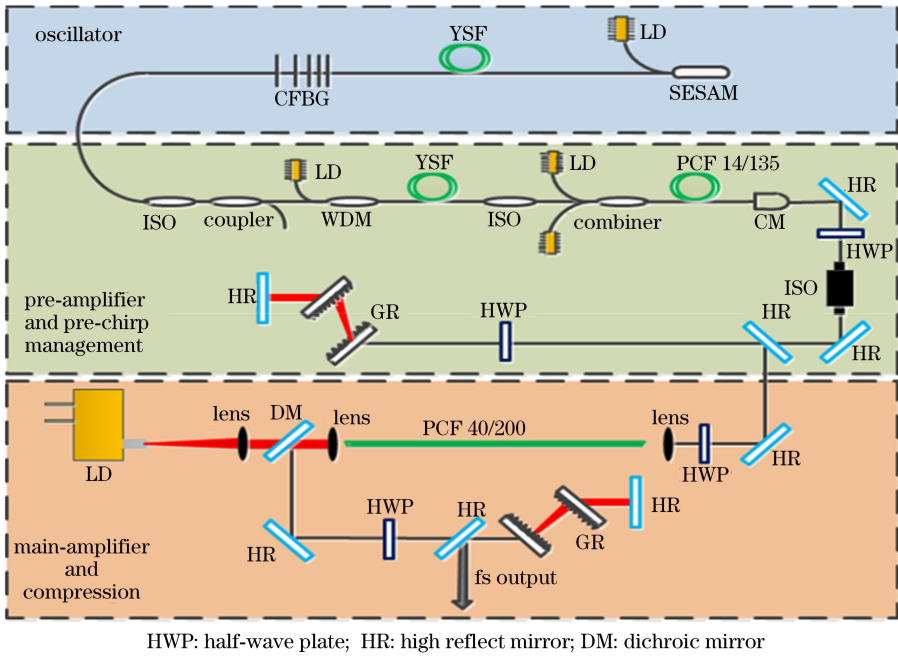


图 1 高功率飞秒自相似光纤激光放大系统装置图

Fig. 1 Experimental setup of high power femtosecond self-similar fiber amplification system

### 3 实验结果与讨论

振荡器输出重复频率 40 MHz、中心波长 1030 nm、功率 13 mW 的锁模脉冲，腔内光纤长度约为 2.57 m，啾啾光纤光栅可提供负色散用以补偿腔内累积的正色散，输出种子光的谱宽度为 6.8 nm，脉冲宽度为 1.26 ps，如图 2 所示。

振荡器输出的种子光经预放大后功率由 13.00 mW 提升到 3.74 W。在非线性效应影响下光谱被不断展宽，光谱范围覆盖 1018~1046 nm，且光谱形状近似矩形符合正色散光谱特性。因色散累积，脉冲宽度被逐渐拉伸为 3 ps，如图 3(a) 所示。预放大后的光纤光经光纤准直器转化为空间光传输，通过空间隔离器后功率为 3.41 W，透过率为

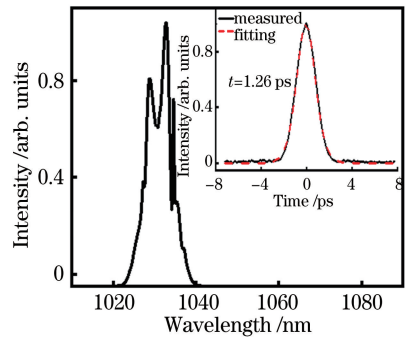


图 2 振荡器输出光谱(插图为振荡器输出脉冲)

Fig. 2 Output spectrum of oscillator  
(Illustration shows output pulse of oscillator)

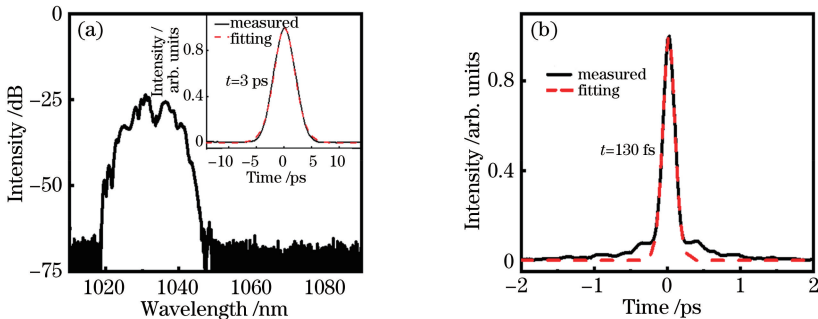


图 3 预放大及预啾啾管理后的脉冲参数。(a) 预放大后的输出光谱(插图为预放大后的脉冲)；(b) 预啾啾管理后的脉冲

Fig. 3 Pulse parameters after pre-amplification and pre-chirp management. (a) Output spectrum after pre-amplification (Illustration is output pulse after pre-amplification) ; (b) pulse after pre-chirp management

对后功率为 2.62 W,衍射效率为 77%。通过调节光栅对之间的间距改变光栅对提供的负色散总量,最终得到预啁啾脉冲的宽度为 130 fs,如图 3(b)所示。因为脉冲自相似演化与种子光脉冲能量和时间特性有关,在增益光纤参数与输入种子光脉冲能量一定的情况下,较窄的脉冲宽度可提供更高的脉冲峰值功率,有利于加速自相似演化的形成<sup>[20-21]</sup>。放大器与光栅对之间存在色散失配,导致放大过程中高阶色散累积且无法得到补偿,因此脉冲底部含有少许不能压缩的旁瓣。

为了在主放大过程中实现自相似演化,保证输出光功率,并避免放大过程中产生受激拉曼散射,本文对主放大器增益光纤中的脉冲演化进行了数值模拟,设置光纤长度为 1.8 m,预啁啾管理后种子光脉冲宽度为 130 fs,功率为 2.62 W,脉冲演化过程如图 4 所示。在脉冲演化第一阶段(0~0.6 m 阶段),由于种子光脉冲宽度较窄,相应的峰值功率较高,光纤

的非线性效应占主导,光谱急剧展宽,同时因色散影响较小,脉冲展宽速度较慢。在脉冲演化第二阶段(0.6~1.8 m 阶段),因为此时光谱较宽,光纤中的色散效应起主导作用,脉冲展宽剧烈;然而随着脉冲宽度的增加,脉冲峰值功率降低,导致第二阶段光谱基本保持不变,在演化过程中光谱峰值向脉冲边缘移动导致光谱呈不对称分布。图 5 为脉冲演化结果曲线,在非线性效应的影响下光谱展宽剧烈,宽度可达 80 nm,由时间带宽积公式  $T_{\text{bwp}} = \Delta\tau \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{c}{\lambda^2}$  可得其极限变换脉冲在亚百飞秒以下( $T_{\text{bwp}}$  为常数,与脉冲的形状有关,对于高斯脉冲, $T_{\text{bwp}}$  为 0.441; $\Delta\tau$  为最短的变换极限脉冲宽度; $\Delta\lambda$  为脉冲光谱宽度; $c$  为光速; $\lambda$  为脉冲的中心波长。)。在色散效应的作用下,脉冲宽度逐渐被拉伸,形状近似抛物线形,符合自相似演化特征,说明在 1.8 m 增益光纤中脉冲实现了自相似演化。

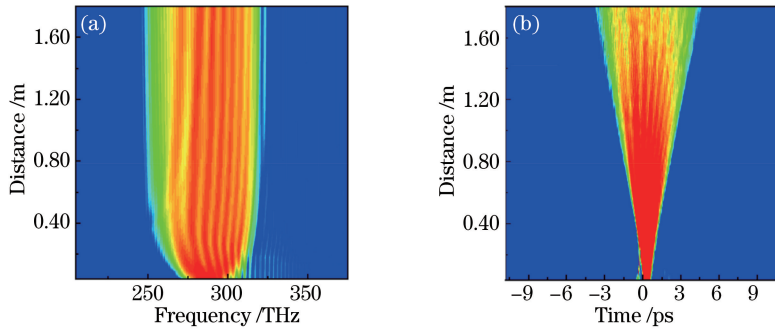


图 4 模拟脉冲演化过程的模场分布。(a)光谱演化;(b)脉冲演化

Fig. 4 Mode field distributions in the simulation of pulse evolution. (a) Spectral evolution; (b) pulse evolution

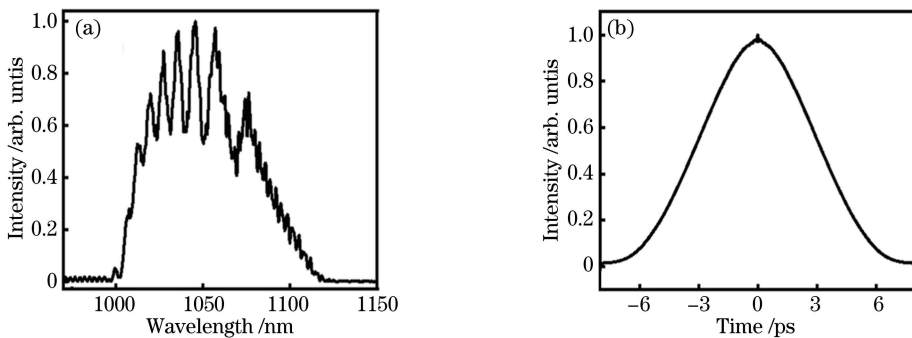


图 5 主放大器数值模拟结果。(a)输出光谱;(b)输出脉冲

Fig. 5 Results from numerical simulations from main amplifier. (a) Output spectrum; (b) output pulse

为验证模拟结果,将预啁啾管理后的种子光经由聚焦透镜耦合进光子晶体光纤纤芯中,泵浦光经准直后由聚焦透镜耦合到光纤内包层中。泵浦光在传输过程中反复穿过纤芯被种子光吸收,这极大地提高了光-光转化效率。如图 6(a)所示,在泵浦光功

率为 90 W 时经主放大后输出光功率为 52.3 W,对应线性放大效率为 56%,功率曲线呈线性增长,没有出现饱和现象,实线为放大后的直接输出功率,虚线为压缩后输出功率。随着泵浦光功率的增加,非线性效应的影响越来越明显,光谱被不断拓宽,且顶

部平滑,呈现自相似演化特征<sup>[17]</sup>。当输出功率超过 27.30 W 时因有限增益带宽的限制光谱展宽速度减慢,最终光谱覆盖范围为 998~1129 nm,信噪比为 40 dB,如图 6(b)所示。从图 6 中可看出,放大过程中没有受激拉曼峰的产生,在 976 nm 处未出现泵浦光谱线,说明放大过程中泵浦光功率完全被增益

光纤吸收,泵浦光未达到增益饱和状态。由于增益光纤掺杂不均匀及有限的增益带宽影响,光谱在长波长侧获得了更快的延伸,同时由于自吸收作用,短波长侧略微延伸,放大后的光谱呈现不对称展宽<sup>[18]</sup>,该现象与数值模拟结果相符,证明了在 1.8 m 增益光纤中脉冲实现了自相似演化。

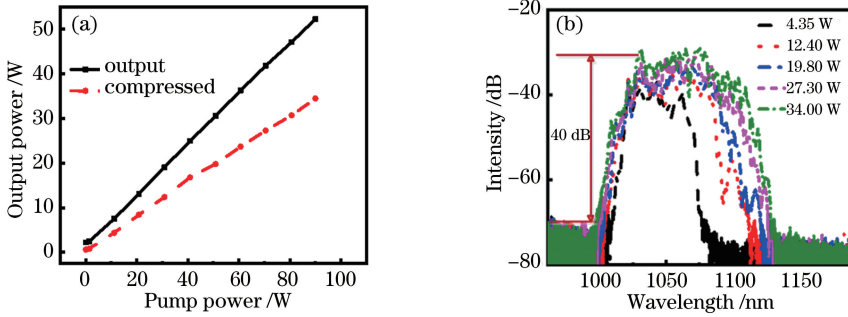


图 6 系统输出脉冲的功率及光谱变化。(a)压缩前后系统输出功率曲线;(b)不同输出功率下的光谱  
Fig. 6 Output power and spectral variation of system output pulse. (a) Output power of system before and after compression; (b) spectra under different output powers

经主放大后的激光脉冲经透镜准直后进入参数为 1250 lp/mm 的空间光栅对,进行色散补偿,如图 7 插图所示,随着主放大输出功率的提高,输出脉冲宽度不断窄化。在主放大泵浦功率不断增加的条件下,自相似演化逐步形成,脉冲在放大过程中累积的二阶非线性相移被空间光栅对有效压缩<sup>[22]</sup>,预啾啾种子脉冲中的残余高阶色散在自相似演化过程中逐渐被抵消,因此脉冲底部的旁瓣逐渐减小,脉冲能量逐渐聚集在脉冲中心处,最终得到脉宽为 50 fs 的高质量变换脉冲。光束两次经过光栅对的衍射效率为 67%。

为进一步拓展应用,将系统集成到整机中,实现小型化封装。通过半导体制冷片和电路反馈控制系统实现振荡器的温度控制,利用热管理技术解决放

大过程中增益光纤在高功率泵浦下产生的热量累积问题,提高整机长期稳定性。通过精密电压比较器对脉冲进行多路幅度鉴别处理,同时采用数字测控技术(FPGA)对每路鉴幅后的信号进行鉴频处理,大大提高锁模状态判别的效率,并通过指示灯指示锁模状态,实现开机自启动运行。同时,整机具备锁模保护,对于各种原因导致的振荡器失锁可及时反馈,自动切断后续光路,实现自保护。该系统最终得到功率 34 W、脉冲宽度 50 fs 的高功率飞秒脉冲输出,对应峰值功率 17 MW。对集成化系统进行功率稳定性监测,在 4 h 内集成化系统的输出功率抖动为 1.3%,系统稳定性较好,如图 7 所示。该激光系统具备高功率、窄脉宽、高集成度、稳定输出等优点,可广泛应用于工业加工及其他科学研究领域。

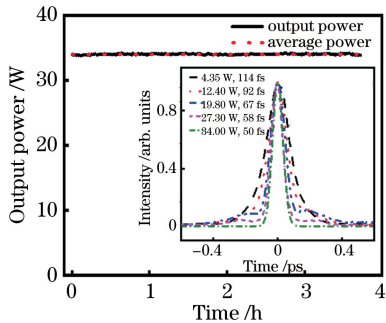


图 7 系统输出功率稳定性曲线  
(插图为不同输出功率下的压缩脉冲)

Fig. 7 System output power stability curve (Illustration is the compressed pulses under different output powers)

## 4 结 论

本文基于自相似放大技术研究了一种高功率飞秒脉冲激光系统,采用全光纤化的线形驻波腔获得锁模脉冲,通过预啾啾整形引入线性啾啾,并在大模场光子晶体光纤中实现了自相似放大,最终得到重频 40 MHz、平均功率 34 W、脉冲宽度 50 fs 的脉冲输出。在泵浦光功率最大时,没有发现增益饱和现象。因此,换用更高功率的泵浦源有望获得更高功率及更窄脉冲宽度的激光输出。通过对该系统进行改进,优化各模块尺寸,有望进一步减小该系统的体积,使该系统广泛应用于工业加工及其他科学研究领域。

## 参 考 文 献

- [1] Li M, Li W X, Shi Y, et al. Verification of the physical mechanism of THz generation by dual-color ultrashort laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(16): 161104.
- [2] Li X L, Reber M A R, Corder C, et al. High-power ultrafast Yb: fiber laser frequency combs using commercially available components and basic fiber tools[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(9): 093114.
- [3] Yang L, Shen X L, Yang K W, et al. Analysis and realization of adaptive dual-comb spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0514002.  
杨力, 沈旭玲, 杨康文, 等. 自适应双光梳光谱原理分析与实现[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0514002.
- [4] Hu H F, Wang X L, Guo W G, et al. Time-resolved optical diagnosis of intense femtosecond laser ablation of silica glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1): 017901.  
胡浩丰, 王晓雷, 郭文刚, 等. 强飞秒激光烧蚀石英玻璃的超快时间分辨光学诊断[J]. *物理学报*, 2011, 60(1): 017901.
- [5] 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.  
杨康文, 郝强, 李文雪, 等. 高功率飞秒脉冲光纤激光系统[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1254-1256, 1262.
- [6] Gu L, Sun H L, Yu K, et al. Research progress of micro-nanofabrication by femtosecond laser[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(1): 14-18.  
顾理, 孙会来, 于楷, 等. 飞秒激光微加工的研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(1): 14-18.
- [7] Hu X B, Hao Q, Guo Z R, et al. Dicing of sapphire wafer with all-fiber picosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102016.  
胡小豹, 郝强, 郭政儒, 等. 全光纤皮秒激光切割蓝宝石晶圆的实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102016.
- [8] Hua Y, Chang G, Kärtner F X, et al. Pre-chirp managed, core-pumped nonlinear PM fiber amplifier delivering sub-100-fs and high energy (10 nJ) pulses with low noise[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 6427-6438.
- [9] Zhao J S. Influences of finite gain bandwidth on evolution of self-similar pulse propagation in fiber amplifiers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0802006.  
赵佳生. 光纤放大器中有限增益带宽对自相似脉冲放大演化的数值研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802006.
- [10] Liu Y Z, Cui Y F, Zhang J, et al. 73 nJ, 109 fs Yb-doped fiber laser at 19 MHz repetition rate in amplifier similariton regime[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 248-251.
- [11] Wang Q Y, Hu M L, Song Y J, et al. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(12): 1603-1606.  
王清月, 胡明列, 宋有建, 等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, 34(12): 1603-1606.
- [12] Fu W, Tang Y X, McComb T S, et al. Limits of femtosecond fiber amplification by parabolic pre-shaping[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A37-A42.
- [13] Hao Q, Li W X, Zeng H P. High-power Yb-doped fiber amplification synchronized with a few-cycle Ti:sapphire laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5815-5821.
- [14] Tamura K, Nakazawa M. Pulse compression by nonlinear pulse evolution with reduced optical wave breaking in erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(1): 68-70.
- [15] Dudley J M, Finot C, Richardson D J, et al. Self-similarity in ultrafast nonlinear optics[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(9): 597-603.
- [16] Deng Y J, Chien C Y, Fidric B G, et al. Generation of sub-50 fs pulses from a high-power Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(22): 3469-3471.
- [17] Zhao J, Li W X, Wang C, et al. Pre-chirping management of a self-similar Yb-fiber amplifier towards 80 W average power with sub-40 fs pulse generation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 32214-32219.
- [18] Liu Y, Li W X, Luo D P, et al. Generation of 33 fs 935 W average power pulses from a third-order dispersion managed self-similar fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10939-10945.
- [19] Liu W, Schimpf D N, Eidam T, et al. Pre-chirp managed nonlinear amplification in fibers delivering 100 W, 60 fs pulses[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(2): 151-154.
- [20] Song H Y, Liu B W, Chen W, et al. Femtosecond laser pulse generation with self-similar amplification of picosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26411-26421.
- [21] Kruglov V I, Peacock A C, Harvey J D, et al. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(3): 461-469.
- [22] Fermann M E, Kruglov V I, Thomsen B C, et al. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(26): 6010-6013.