

百瓦级 PCFA/LBO 倍频绿光皮秒激光器

陈 晖^{1,2}, 白振旭^{1,2}, 王建才³, 张丙元³, 白振岍^{4,5*}

1. 河北工业大学 先进激光技术研究中心, 天津 300401;
2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;
3. 聊城大学 物理科学与信息工程学院 山东省光通信科学与
与技术重点实验室, 山东 聊城 252059;
4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
5. 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 102211)

摘要: 具有高平均功率的皮秒级脉冲激光在工业加工、空间探测等领域具有重要的应用。但是锁模产生的皮秒种子光因脉冲宽度窄、单脉冲能量低, 难以直接通过传统的行波放大实现功率的高效提升, 因此也限制了输出脉冲的非线性频率转换效率。文中通过光栅啁啾脉冲展宽器和狭缝, 将中心波长为 1030 nm、脉冲宽度 7 ps、重复频率 52 MHz 的光纤锁模种子光脉冲宽度展宽至 32 ps, 且将其光谱宽度控制在 1.1 nm, 利用两个空气包层光子晶体光纤放大器将功率放大至 190 W。最后通过温度相位匹配 LiB₃O₅ 晶体实现了平均功率为 103.1 W 的绿光皮秒脉冲输出, 光束质量因子 1.17, 二次谐波转换效率 54.3%。

关键词: 皮秒放大器; 光子晶体光纤; 光栅; 脉冲展宽; 二次谐波产生

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200522

Hundred-watt green picosecond laser based on LBO frequency-doubled photonic crystal fiber amplifier

Chen Hui^{1,2}, Bai Zhenxu^{1,2}, Wang Jiancai³, Zhang Bingyuan³, Bai Zhen'ao^{4,5*}

1. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China;
3. Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;
4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
5. Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: Picosecond pulse laser with high average power is critical to applications such as industry processing, space exploration, etc. However, due to the narrow pulse width and low single pulse energy, the mode-locked picosecond seed light is difficult to be amplified directly through the traditional traveling-wave amplification,

收稿日期: 2020-12-28; 修订日期: 2021-01-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB1104503); 广东省重点领域研发计划 (2018B090904003); 河北省自然科学基金 (F2019202337); 河北省引进留学人员资助项目 (C20190177)

作者简介: 陈晖, 男, 硕士生, 主要从事高功率固体激光技术及频率变换方面的研究。

导师简介: 白振旭, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率金刚石激光技术及全固态激光器方面的研究。

通讯作者: 白振岍, 男, 副研究员, 博士, 主要从事超短脉冲激光技术及放大方面的研究。

which limits the nonlinear frequency conversion efficiency. Here, by using grating chirped-pulse stretcher and slit, seed light pulses with a pulse duration of 7 ps and a central wavelength of 1 030 nm at the repetition rate of 52 MHz were stretched to 32 ps with the spectral width of 1.1 nm. Then the average power was amplified to 190 W by using two air-clad photonic crystal fiber amplifiers (PCFAs). Finally, via a temperature phase-matched LiB_3O_5 crystal, output power up to 103.1 W was obtained with the beam quality factor 1.17 and the second harmonic conversion efficiency of 54.3%.

Key words: picosecond amplifier; photonic crystal fiber; grating; pulse stretching; second harmonic generation

0 引言

高功率超短脉冲激光器广泛应用于工业加工、精密制造、波导刻蚀等领域^[1-5]。通常,用于打标、打孔的激光器主要为纳秒脉冲激光器,但纳秒脉冲的热效应和相对较低的分辨率已不能满足加工尺度更小、精度更高的质量要求。相比于纳秒 (10^{-9} s) 脉冲,脉冲持续时间更短的皮秒 (10^{-12} s) 脉冲具有更高的峰值功率,同时具有更小的热影响区,可以更有效地控制加工深度和精度,极大地提高加工质量,在诸如金属精密加工等方面都胜于纳秒激光;相对于飞秒 (10^{-15} s) 脉冲激光器而言,皮秒激光器通常更容易实现高功率的输出,且具有更高的稳定性^[3, 6-9]。在实现超短脉冲的同时,由于在工业加工中很多材料对可见光的吸收比红外光更为明显、在海洋和空间探测领域传输介质对绿光波段的吸收更小,因此绿光皮秒脉冲激光器的需求更为广泛。

目前,调 Q 与锁模技术是产生纳秒至飞秒量级超短脉冲的主要手段^[10-12]。在各种量级的激光脉宽之中,亚纳秒与皮秒脉冲以高光谱纯净度和易得到大能量输出在应用及非线性频率变换中显得尤为重要^[13-14]。但是调 Q 技术获得的脉冲宽度,受激光在腔长范围内的传输时间和 Q 开关的响应速度限制,很难达到纳秒量级以下;虽然锁模技术获得皮秒和飞秒量级脉冲已较为成熟,但由于输出单脉冲能量 (\sim nJ) 和平均功率 (\sim mW) 过低,使其应用范围受到了很大的限制^[15-16]。通常锁模激光器的重复频率高达百 MHz 量级,在有限泵浦功率下为了得到高效率的单脉冲激光放大一般采用再生放大技术,但再生放大器的系统设计复杂、成本较高,且对平均功率的提升效果不明显^[17-18]。光纤放大器可以提供极高的放大效率,采用多级光纤放大已获得高达 60 dB 的增益^[19]。但是受

限于光纤中的非线性效应(如受激拉曼散射、受激布里渊散射、自相位调制等)以及光纤固有的抗损伤阈值^[20],在脉冲重复频率低于 1 MHz 时,其输出的皮秒激光峰值功率难以提高。具有大模场面积的光子晶体光纤放大器 (photonic crystal fiber amplifier, PCFA) 在功率提升方面具有很大的优势,能够在减少非线性效应的同时还能保持光束的单模特性^[21]。此外,啁啾脉冲放大 (CPA) 技术是一种实现高功率超短脉冲激光输出的关键技术,其主要原理是将放大前的种子脉冲通过光栅器件,将其脉冲宽度展宽以降低峰值功率,在提高激光放大器效率的同时避免激光在放大过程中对光学元件的损伤,并减弱高功率下可能引起的各种非线性效应。结合 PCFA 的特点及 CPA 技术的优势,近年来以棒状 PCF 为增益介质的 CPA 系统在高功率超短激光输出方面受到广泛关注^[22-23]。

文中提出了以掺 Yb 的棒状 PCF 为增益介质的 CPA 结构,将重复频率 52 MHz 的百 mW 皮秒种子光展宽并放大至 190 W,并最终通过倍频转换获得平均功率 103.1 W 的近衍射极限绿光皮秒激光输出,最高谐波转换效率高达 65%。

1 实验原理及装置

PCFA/LBO 倍频绿光皮秒激光器的实验装置如图 1 所示,其主要包括脉冲展宽器、预放大器、主放大器和倍频转换器四个部分。锁模激光器 (EKSPLA, FFS200CHI) 提供中心波长 1030 nm、脉冲宽度 7 ps、重复频率 52 MHz 的种子光,其光束质量因子 $M^2 < 1.1$ (光斑分布和波形如插图所示)。种子光经过光隔离器后注入尺寸为 130 mm \times 20 mm 的 1 600 线/mm 的光栅 (Lighthysmyth, T-1600-1030s) 进行脉冲展宽。为了保证放大后的 1030 nm 基频光具有高的谐波转换效率,脉冲展宽器在靠近光栅的一侧插入光学狭缝,起到控

制光谱和脉冲宽度的作用。经展宽器展宽的种子光首先被聚焦到预放大器进行功率放大,然后通过隔离器进入主放大器。实验所采用的两级 PCFA (NKT, aero-GAIN-ROD) 的光纤直径为 85 μm , 泵浦光源为 DILAS 公司波长 (976 \pm 0.5) nm 的光纤耦合二极管, 最大泵浦功率分别为 100 W 和 300 W, 图中的小孔光阑 A 用来

实现对残余泵浦光的过滤。放大后的基频光通过透镜组被耦合到倍频转换器中, 倍频晶体为 3 mm \times 3 mm \times 15 mm 的温度相位匹配 LiB₃O₅ (LBO), 晶体的切割方向为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=0^\circ$, 且两端镀有对基频光 1030 nm 和倍频光 515 nm 的增透膜, 晶体被放置在温度设定为 (187 \pm 0.2) $^\circ\text{C}$ 恒温炉中。

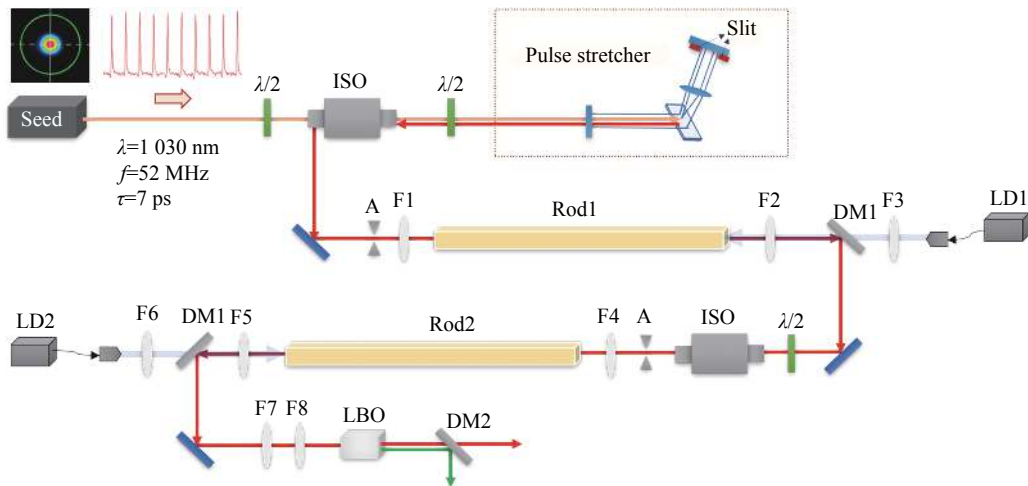


图 1 PCFA/LBO 倍频绿光皮秒脉冲激光器实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of the green picosecond laser based on LBO frequency-doubled PCFA

2 实验结果及分析

在未插入狭缝时, 种子光经过光栅脉冲展宽器后其脉冲宽度被展宽至 240 ps, 在狭缝的作用下, 利用自相关仪 (APE, PulseCheck SM 1600) 测得脉冲宽度为 31.9 ps, 如图 2(a) 所示; 此时, 利用光谱仪 (Ocean Optics, HR4000CG) 测得线宽为 1.1 nm, 如图 2(b) 所

示。经由光栅展宽器和光隔离器后输出激光平均功率为 13 mW, 对应的单脉冲能量约为 0.25 nJ。

展宽后的皮秒脉冲经过预放大器和主放大器后, 其脉冲宽度分别变为 31.3 ps 和 31.5 ps, 最高输出功率为 190 W, 此时光束质量因子 $M^2=1.15$ 。笔者通过调整不同参数透镜组来控制耦合到倍频晶体 LBO 中的泵浦束腰尺寸, 以实现最高的谐波转换效率。当采

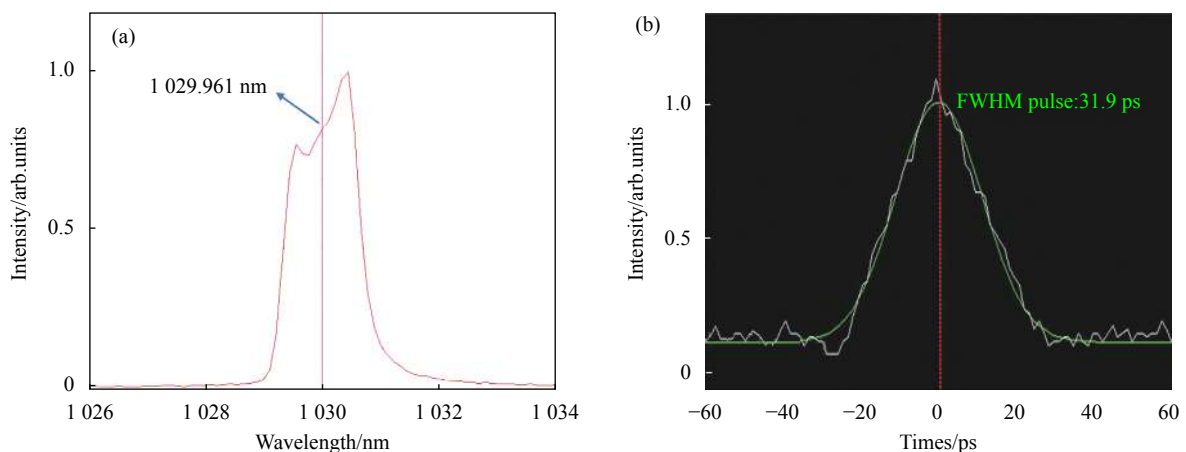


图 2 经光栅展宽后的脉冲 (a) 光谱图, (b) 自相关曲线

Fig.2 (a) Spectrum, and (b) autocorrelation curve of the pulses after grating stretching

用焦距 $f=200\text{ mm}$ 和 $f=150\text{ mm}$ 的透镜组且保持束腰半径在 $100\text{ }\mu\text{m}$ 左右时,可得到最大绿光输出功率为 103.1 W ,谐波转换效率达到 54.3% 。图 3(a) 为二次谐波 (SHG) 的输出功率随泵浦光功率的变化曲线,从图中可以看出:随着泵浦功率的提升,二次谐波的输出功率整体增加,但是最高的转换效率出现在泵浦功率为 140 W 时,转换效率高达 65% ,而随着功率的进一步提升,虽然输出功率有所提升,但效率有一定的下

降。这一方面是由于激光功率的提升导致基频光的光谱出现一定的展宽(约 0.1 nm),另一方面是放大后光束的发散角发生变化以及功率提升导致倍频晶体热效应增强所致。进一步调节狭缝尺寸,优化基频光耦合至 LBO 晶体的参数可以对谐波效率进行优化。实验测得了连续工作 200 min ,输出倍频绿光的功率波动情况(图 3(b)),其输出平均功率达到了 103.1 W ,对应峰值功率为 62 kW ,功率抖动 RMS 小于 1% 。

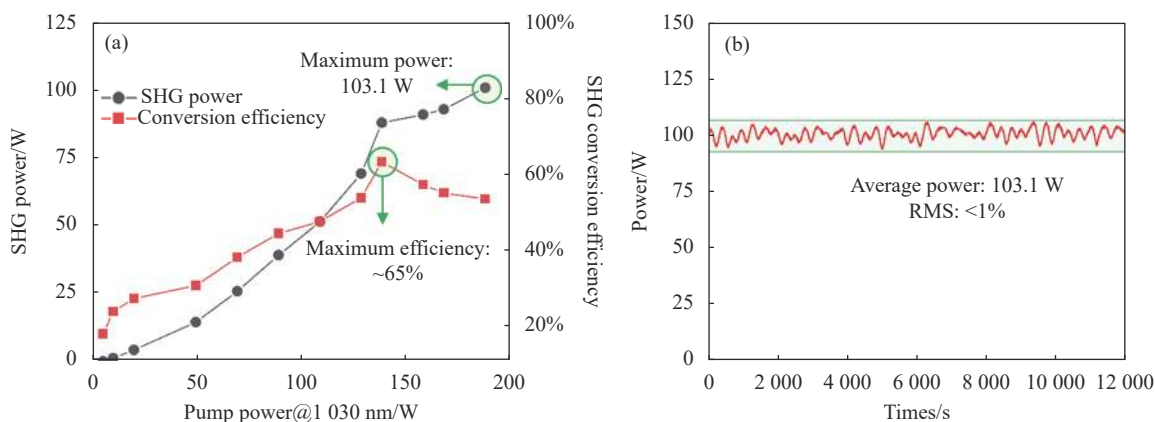


图 3 输出激光的功率特性。(a) 二次谐波功率随泵浦光功率的变化;(b) 输出功率稳定性

Fig.3 Power characteristics of the output laser. (a) SHG power changes with pump light power; (b) Stability of output power

图 4(a) 为测得的最终输出的激光光谱,其中心波长为 513.877 nm ;图 4(b) 为测量的最大输出功率下的光束空间分布及光束质量因子 ($M^2=1.17$)。结果表明:

即使在功率达到百瓦量级的情况下,产生的皮秒倍频光的光束质量依旧可以近乎保持与种子光 ($M^2<1.1$) 和放大后的基频光 ($M^2=1.15$) 相一致。

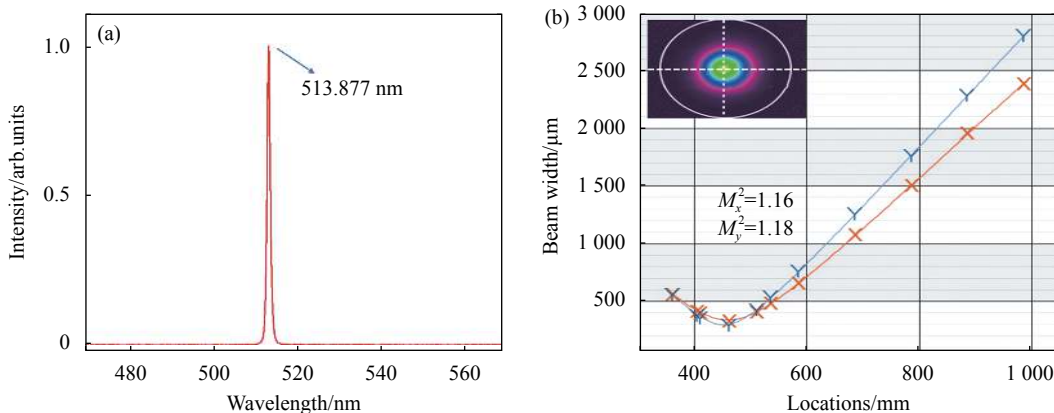


图 4 倍频后的光束特性。(a) 输出光谱;(b) 光束轮廓及 M^2

Fig.4 Beam characteristics after SHG. (a) Output spectrum; (b) Beam profile and M^2

3 结论

平均功率的有效提升及非线性频率的高效转换是超短脉冲激光器面临的一大挑战。文中实验通过

将光纤锁模激光器提供的脉冲宽度为 7 ps 的 1030 nm 种子光通过光栅结合狭缝的方式进行展宽,获得了脉冲宽度 32 ps 、光谱宽度为 1.1 nm 的脉冲序列,并经由两级 PCF 放大和倍频转换后,实现高达 65% 的最佳

谐波转换效率,其对应的绿光输出功率为 90 W,在基频光功率为 190 W 时,得到了高达 103.1 W 的二次谐波绿光输出,200 min 连续运转的功率抖动低于 1%,光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 。实验结果对未来实现高稳定、小型化的百瓦甚至千瓦级皮秒脉冲激光输出具有重要的参考意义,并有望推动超短脉冲激光在精密材料加工、高精度空间探测等领域的应用。

参考文献:

- [1] Dorman C, Schulze M. Picosecond micromachining update: Unique fiber-based laser technology delivers high pulse energy and average power [J]. *Laser Technik Journal*, 2010, 5(4): 44-47.
- [2] Muhammad N, Whitehead D, Boor A, et al. Picosecond laser micromachining of nitinol and platinum alloy for coronary stent applications [J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2012, 106(3): 607-617.
- [3] Neuenschwander B, Bucher G F, Nussbaum C, et al. Processing of metals and dielectric materials with ps-laser pulses: results, strategies, limitations and needs[C]//Proc of SPIE, 2010, 7584: 75840R.
- [4] Lu Shang, Lv Siqi, Chen Meng, et al. Realization of single-pulse energy 3 mJ, repetition frequency 1 kHz picosecond super-Gaussian beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1005012. (in Chinese)
- [5] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 219-225.
- [6] Gamaly E G, Madsen N R, Duering M, et al. Ablation of metals with picosecond laser pulses: Evidence of long-lived nonequilibrium conditions at the surface [J]. *Physical Review B*, 2005, 71: 174405.
- [7] Peng H, Yang C, Lu S, et al. All-solid-state picosecond radially polarized laser and its processing characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0106003. (in Chinese)
- [8] Bai Z N, Bai Z X, Sun X L, et al. A 33.2 W high beam quality chirped-pulse amplification-based femtosecond laser for industrial processing [J]. *Materials*, 2020, 13(12): 2841.
- [9] Wang Z, Fu W, Zhang R. Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0706002. (in Chinese)
- [10] Lin Y Y, Lee P, Xu J L, et al. High-pulse-energy topological insulator Bi_2Te_3 -based passive q-switched solid-state Laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(4): 1-10.
- [11] Liu S, Jung D, Norman J C, et al. 490 fs pulse generation from passively mode-locked single section quantum dot laser directly grown on on-axis GaP/Si [J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(7): 432-433.
- [12] Zheng Li, Wang Huibo, Tian Wenlong, et al. LD-pumped high-repetition-rate all-solid-state femtosecond lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201069. (in Chinese)
- [13] Bai Z, Yuan H, Liu Z, et al. Stimulated Brillouin scattering materials, experimental design and applications: A review [J]. *Optical Materials*, 2018, 75: 626-645.
- [14] Bai Z, Bai Z, Yang C, et al. High pulse energy, high repetition picosecond chirped-multi-pulse regenerative amplifier laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 46(1): 25-28.
- [15] Keller U, 'tHooft G W, Knox W H, et al. Femtosecond pulses from a continuously self-starting passively mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(13): 1022-1024.
- [16] Li Z, Dong N, Zhang Y, et al. Invited Article: Mode-locked waveguide lasers modulated by rhenium diselenide as a new saturable absorber [J]. *ACS Photonics*, 2018, 3(8): 080802.
- [17] Kleinbauer J, Knappe R, Wallenstein R. 13 W picosecond Nd:GdVO₄ regenerative amplifier with 200 kHz repetition rate [J]. *Applied Physics B, Lasers and Optics*, 2005, B81(2/3): 163-166.
- [18] Agnesi A, Carra L, Dallochio P, et al. 210 μJ picosecond pulses from a quasi-CW Nd:YVO₄ grazing-incidence two-stage slab amplifier package [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(10): 952-957.
- [19] Liu H, Gao C, Tao J, et al. Compact tunable high power picosecond source based on Yb-doped fiber amplification of gain switch laser diode [J]. *Optics Express*, 2008, 16(11): 7888-7893.
- [20] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [21] Liu B W, Hu M L, Fang X H, et al. High-power wavelength-tunable photonic-crystal-fiber-based oscillator-amplifier-frequency-shifter femtosecond laser system and its applications for material microprocessing [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 6(1): 44-48.
- [22] Manchee C P K, Möller J, Miller R J D. Highly stable, 100 W average power from fiber-based ultrafast laser system at 1030 nm based on single-pass photonic-crystal rod amplifier [J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 6-10.
- [23] Röser F, Schimpf D, Schmidt O, et al. 90 W average power 100 μJ energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. *Optics Letters*, 2007, 32: 2230-2232.