

高功率飞秒脉冲光纤激光系统

杨康文, 郝强, 李文雪, 曾和平

(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: 基础科学研究和超精细工业加工领域的发展迫切需要高重复频率、高功率的飞秒脉冲激光。采用啁啾脉冲放大技术, 以掺镱双包层光子晶体光纤作为增益介质, 搭建了高平均功率飞秒脉冲光纤激光系统。系统包括被动锁模振荡器、脉冲展宽器、单模光纤预放大器、光子晶体光纤功率放大器和脉冲压缩器5部分。实验上获得了重复频率40 MHz、平均功率150 W、脉冲宽度273 fs的超短脉冲输出。整个系统置于3 m×1.5 m的光学平台上, 通过模块化和集成化的改进, 该系统体积有望大幅度减小, 为科学研究和工业应用提供有力工具。

关键词: 高功率飞秒激光器; 光纤激光器; 双包层光纤

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)07-1254-03

High-power femtosecond pulses fiber laser system

Yang Kangwen, Hao Qiang, Li Wenxue, Zeng Heping

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: High-repetition-rate high-power femtosecond pulses are urgently needed for the development of both scientific research and hyperfine industrial processing. In this paper, chirped pulsed amplification method was used to generate high-repetition-rate high-power ultrashort pulses. Yb-doped large-mode-area double-clad photonic crystal fiber was employed as the gain medium due to the near diffraction limit beam quality as well as the excellent heat dissipation character. The system included passive mode-locked ultrashort pulse laser oscillator, diffraction grating based stretcher, single mode fiber pre-amplifier, double-clad fiber main-amplifier, and transmission grating based pulse compressor. A repetition rate of 40 MHz with pulse width of 273 fs and average power of 150 W was obtained from the fiber laser system, which was placed on the 3 m×1.5 m optical platform. By further improving, the volume of the system is expected to substantially reduce, and the system will become a powerful tool for scientific research and industrial applications.

Key words: high-power femtosecond laser; fiber laser; double-clad fiber

收稿日期: 2010-11-22; 修订日期: 2010-12-19

基金项目: 上海市自然科学基金(10ZR1409000)

作者简介: 杨康文(1987-), 男, 博士生, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究工作。Email: kangwenyang@yeah.net

导师简介: 曾和平(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光场精密控制及其在精密光谱学中应用方面的研究工作。

Email: hpzeng@phy.ecnu.edu.cn

0 引言

飞秒激光自诞生以来就引起了各国科研人员的广泛重视。以其作为研究工具,在前沿科学领域取得了许多进展,如:飞秒化学、时间分辨光谱技术、拉曼光谱分析、THz 的产生、激光全息投影等。同时,超短脉冲激光在工业加工领域也有着巨大的应用潜力,如:材料加工、半导体表面处理、激光焊接、激光切割等。近两年,随着光纤技术与超短脉冲技术的有机结合,将使飞秒激光真正地进入实用化和普及化阶段,并极大地拓展激光的应用领域。高功率飞秒光纤激光系统的研制可为高次谐波的研究、太赫兹的产生、周期量级相干控制提供有力的实验工具^[1-3]。通过采用全光精密同步技术,可进一步实现高功率光纤激光与高能钛宝石激光的同步相位锁定输出,同步

精度在飞秒量级,相位噪声控制在毫赫兹量级,这些技术将为高重复频率光学参量啁啾脉冲放大和紫外光学频率梳的研究提供有效的技术途径^[4-9]。

1 实验装置

高平均功率飞秒脉冲光纤激光系统的实验装置如图1所示。该系统由5部分组成:超短脉冲激光振荡器(Oscillator)、脉冲展宽器(Stretcher)、预放大器(Pre-amplifier)、主放大器(Main-amplifier)以及脉冲压缩器(Compressor)。整个系统固定在长3 m、宽1.5 m的光学平台上。由于高功率运转时增益光纤端面及透镜耦合系统会随温度的升高而变形,因此该激光系统采用特殊设计的水循环冷却装置对关键部件进行冷却,循环水温设定为16℃。

超短脉冲激光振荡器采用中心波长为976 nm的

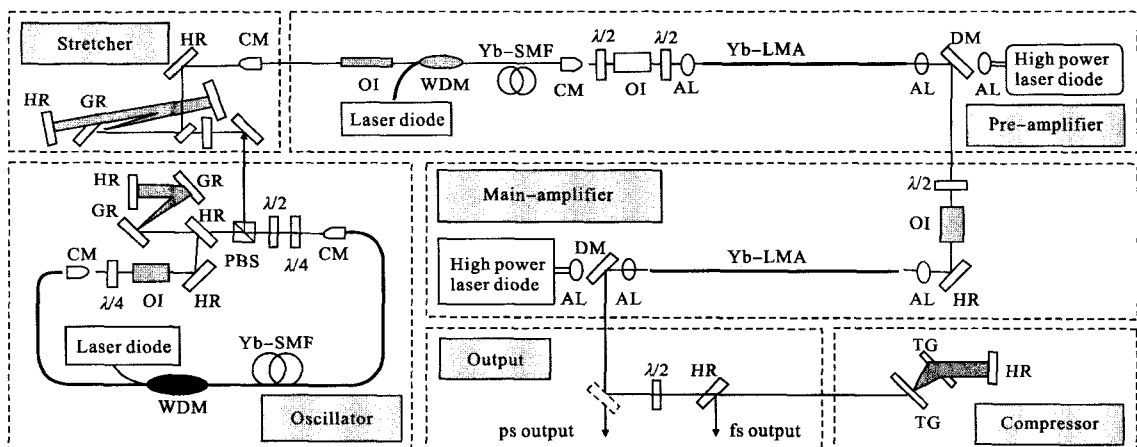


图1 平均功率为150 W的飞秒激光系统装置图

Fig.1 Schematic of high-power femtosecond laser system with average power of 150 W

半导体激光器作为泵浦激光,并经由WDM耦合进该环形腔内,增益光纤长度为0.7 m,腔内其余单模光纤长度约为4.6 m。采用准直器(CM)完成激光在光纤和空间的传输转换,由空间隔离器(OI)保证激光的单向运转。采用600 lines/mm($\beta_2 = -1.396 \text{ fs}^2/\text{mm}$)的光栅(GR)对单模光纤引入的二阶色散进行补偿。采用非线性偏振旋转实现锁模脉冲输出。该振荡器输出重复频率为40 MHz,平均功率为50 mW,相应单脉冲能量为1.25 nJ。

采用刻线数为1740 lines/mm的衍射光栅搭建Öffner型展宽器,可将振荡器输出的2 ps脉冲展宽

到500 ps,以减少后续级联放大过程中累积的非线性效应。展宽后的皮秒脉冲经过一级掺镱单模光纤放大器可由平均功率3 mW提升到200 mW。

后续两级高功率放大器均以掺镱大模场双包层保偏光子晶体光纤为增益介质,光纤长度均为1.5 m,纤芯的直径为40 μm ,数值孔径为0.03,内包层的直径为200 μm ,数值孔径为0.46,模场面积为650 μm^2 ,对976 nm泵浦光的吸收系数为10 dB/m。以尾纤式高功率半导体激光器为泵浦源,尾纤芯径为400 μm ,数值孔径为0.22,中心波长为976 nm,光谱宽度为3 nm。采用2.6:1的成像系统实现泵浦光与增益光纤的耦

合,耦合效率约为 75%,种子光的耦合效率约为 60%。相邻放大器间均由隔离器进行逆向光隔离,以避免后级放大过程自发辐射的影响。为了保护光子晶体光纤内部的微结构,并有效抑制自激振荡的出现,增益光纤两端均进行了塌缩处理,并切割为 8°倾角。

采用高损伤阈值的透射式光栅进行脉冲压缩,光栅参数为 1 250 lines/mm,整个压缩器的衍射效率约为 64%。

2 放大器输出性能及讨论

单模光纤放大器输出的 200 mW 脉冲可由第一级双包层光纤放大器放大到 20 W,并进一步由第二级双包层光纤放大器提升到高达 227 W。如图 2 所示,第二级双包层光纤放大器斜率效率为 74%,经透射式光栅压缩,得到平均功率为 150 W 的飞秒脉冲。图中泵浦功率在 50 W 以下时,主放大器输出斜率效率比较低,这是因为低功率运转时,泵浦激光器的工作波长为 968 nm,偏离了镱离子的吸收峰,造成增益光纤吸收系数下降,从而导致放大器斜率效率降低。

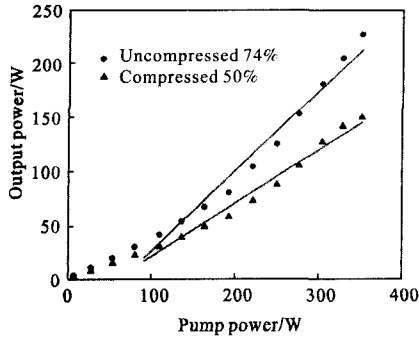


图 2 主放大器输出斜率效率曲线

Fig.2 Output characteristics of the main power amplifier

通过调整振荡器光栅间距,可获得最窄 67 fs 的脉冲信号,其自相关曲线如图 3(a)所示。脉冲时域图形有明显的左翼,说明腔内三阶色散较大,仅用光栅无法补偿。图 3(b)显示了预放大器输出功率为 20 W 时,脉冲去啁啾后的自相关曲线,相应脉冲宽度为 146 fs。该功率下脉冲形状未发生畸变,没有出现明显的两翼,说明该级放大过程中,脉冲功率密度较低,三阶色散及非线性效应对脉冲形状的影响较弱。实验中,为了防止前级过多的非线性相位累积对脉冲压缩造成的不利影响,将预放大器的输出功率设定为 10 W。图 3(c)显示了压缩后平均功率为 150 W

的飞秒脉冲自相关曲线,相比预放大器 10 W 输出功率时的曲线,脉冲在时域上产生了明显的两翼,说明在此输出功率下,非线性效应已经开始严重影响放大器的输出性能。由于振荡器、单模光纤预放大器及双包层光纤放大器累积了过多的三阶及高阶色散,造成输出脉冲基底很大,影响了最终压缩器所能输出脉冲的最窄宽度。通过进一步优化展宽器的设计,将种子脉冲展宽到纳秒量级,有望得到无基底的飞秒脉冲。

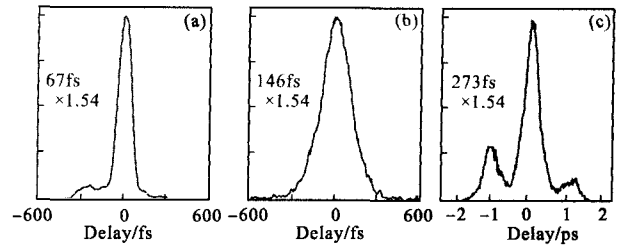


图 3 去啁啾脉冲自相关曲线

Fig.3 Autocorrelation trace of the dechirped pulses

3 结论

利用上述实验装置,获得了平均功率 150 W、重复频率 40 MHz、脉冲宽度 273 fs 的超短激光脉冲。在如此高的平均功率和飞秒量级的脉冲宽度条件下,非线性效应、尤其是自相位调制,已经成为影响放大器输出性能的主要因素,影响了脉冲的压缩质量。下一步的研究可考虑设计更高展宽比的展宽器,将脉冲展宽到纳秒量级,降低放大过程中非线性效应的不利影响。同时,通过对放大系统进行模块化和集成化的改进,有望大幅度减小该高功率飞秒激光系统的体积,以方便在科学研究和工业生产中的应用。

参考文献:

- [1] Boulet J, Zaouter Y, Limpert J, et al. High-order harmonic generation at a megahertz-level repetition rate directly driven by an ytterbium-doped-fiber chirped-pulse amplification system [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(9): 1489-1491.
- [2] Matthäus G, Ortaç B, Limpert J, et al. Intracavity terahertz generation inside a high-energy ultrafast soliton fiber laser [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(26): 261105.
- [3] Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, et al. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser*

件和阻抗更加匹配的耦合电路。文中阐述的频率叠加方法丰富了高重频高压皮秒脉冲的研究途径,为后续的研究提供了新的方向点。

参考文献:

- [1] Ruan Chi, Zhao Wei, Zhu Shaolan, et al. Characterization of photoconductive semiconductor switches under nonlinear mode condition [J]. *Microwave and Optical Technology Letter*, 2009, 51(1): 56-59.
- [2] Chai Jinhua, Wang Zhongya. New scheme and circuit implementation of countering multiple-source high-repetition frequency laser jammin[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 476-480. (in Chinese)
柴金华, 王中亚. 抗多源激光高重频干扰新方案及电路实现[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 476-480.
- [3] Benzel D M, Pocha M D. 1000-V, 300-ps pulse-generation circuit using silicon avalanche devices [J]. *Review of Scientific Instrument*, 1985, 56(7): 1456-1458.
- [4] Kalisz J, Poniciecki A, Rozyc K. A simple, precise, and low jitter delay/gate generator[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2003, 74(7): 3507-3509.
- [5] Bishop A I, Barker P F. Subnanosecond pockels cell switching using avalanche transistors[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2006, 77: 044701.
- [6] Liang Buge, Zhu Chang, Yuan Naichang, et al. Design of high-power nanosecond pulser based on microwave PCB and its application[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2004, 26(6): 38-43. (in Chinese)
梁步阁, 朱畅, 袁乃昌, 等. 高功率全固态微波纳秒级脉冲源的设计与应用[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(6): 38-43.
- [7] Li Xiaokun, Liu Baiyu, Ouyang Xian, et al. Intelligent control system design of glue dispenser based on FPGA and SRAM[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(7): 1378-1383. (in Chinese)
李晓坤, 刘白玉, 欧阳娴, 等. 基于 FPGA 和 SRAM 的智能点胶机控制系统设计 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1378-1383.
- [8] Xu Wenhai, Yang Mingwei, Zhu Wei, et al. Development of a laser diode driver based on FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 368-372. (in Chinese)
许文海, 杨明伟, 朱炜, 等. 基于 FPGA 技术的半导体激光器驱动电源的研制 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(3): 368-372.
- [9] Yuan Xuelin, Liang Buge, Lv Bo, et al. High-power and high-stability pulser for ground penetrating radar [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(10): 1689-1692. (in Chinese)
袁雪林, 梁步阁, 吕波, 等. 探地雷达高功率高稳定度脉冲源设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(10): 1689-1692.
- (上接第 1256 页)
- Engineering*, 2006, 35(2): 135-138. (in Chinese)
楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135-138.
- [4] Hartl I, Schibli T R, Marcinkevicius A, et al. Cavity-enhanced similariton Yb-fiber laser frequency comb: 3×10^{14} W/cm² peak intensity at 136 MHz [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(19): 2870-2872.
- [5] Yan Ming, Li Wenxue, Hao Qiang, et al. Square nanosecond Yb- and Er-doped fiber lasers passively synchronized to a Ti:sapphire laser based on cross-absorption modulation [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(13): 2018-2020.
- [6] Yan Ming, Li Wenxue, Hao Qiang, et al. High-power nanosecond ytterbium-doped fiber laser passively synchronized with a femtosecond Ti:sapphire laser [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3331-3333.
- [7] Hao Qiang, Li Wenxue, Zeng Heping. High-power Yb-doped fiber amplification system synchronized with a few-cycle Ti:sapphire laser[J]. *Opt Express*, 2009, 17(7): 5815-5821.
- [8] Li Wenxue, Hao Qiang, Zeng Heping. Tunable flat-top nanosecond fiber laser oscillator and 280 W average power nanosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2009, 17(12): 10113-10118.
- [9] Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Yang Dingzhong, et al. MOPA structured pulsed Yb fiber laser with high average power [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 456-459. (in Chinese)
汪园香, 姜培培, 杨丁中, 等. 基于 MOPA 结构的高功率线偏振脉冲 Yb 光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 456-459.