

百纳焦保偏掺镱光纤飞秒激光放大系统

杨 琬^{1,2} 牛富增¹ 姜通晓¹ 王爱民¹ 张志刚¹

¹(北京大学信息科学技术学院量子电子所 北京 100871)

²(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘 要 论文提出了一种百纳焦量级全保偏掺镱光纤放大器系统的设计方法,该系统利用掺镱光纤锁模激光器作为种子源,采用啁啾脉冲放大技术,通过两级掺镱光纤放大,并对放大输出光进行压缩。实验结果显示,压缩后可获得单脉冲能量 113 纳焦,脉冲宽度 221 飞秒的激光输出。

关键词 掺镱光纤; 飞秒激光; 啁啾脉冲放大; 偏振模色散

中图分类号 TG 156 **文献标志码** A

Hundred Nano-Joules Polarization-Maintaining Yb-Doped Fiber Femtosecond Laser Amplification System

YANG Wan^{1,2} NIU Fuzeng¹ JIANG Tongxiao¹ WANG Aimin¹ ZHANG Zhigang¹

¹(*Institute of Quantum Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China*)

²(*Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430079, China*)

Abstract A hundred nano-joules femtosecond (fs) laser amplification system based on the polarization-maintaining Yb³⁺ fibers was proposed in this paper. In the proposed system, a Yb-doped mode-locked laser oscillator was used as the light source. Using the chirped pulse amplification method, a two-stage polarization-maintaining Yb-doped fiber amplifier was adopted. Experimental results show that, with compression of the output light, the output pulse energy can reach 113 nJ and the pulse duration is measured as 221 fs.

Keywords Yb-doped fiber; femtosecond laser; chirped pulse amplification; polarization mode dispersion

1 引 言

飞秒激光因其特有的激光特性吸引了各领域的极大关注,如激光加工、生物成像、飞秒化学

反应动力学、时间光谱分析技术、激光全息投影等。如何获取高能量的飞秒激光脉冲放大一直是研究的热点。自 20 世纪 80 年代双包层光纤和包层泵浦技术的提出,同时伴随着大芯径的光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)的出现,飞

收稿日期: 2016-05-12 修回日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61475008、31327901)

作者简介: 杨琬, 本科生, 研究方向为光学; 牛富增, 博士, 研究方向为生物医学工程; 姜通晓, 博士, 研究方向为无线电物理; 王爱民(通讯作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为超快光纤激光器、频率梳、光谱精密测量及生物成像技术, E-mail: wangaimin@pku.edu.cn; 张志刚, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为超快激光物理。

秒脉冲的功率屡创新高，目前最高单脉冲能量达到 2.2 mJ^[1]。在此之前，国外 Wan 等^[2]通过掺镱大芯径单模 PCF 的放大在 1 μm 波段附近得到了单脉冲能量 0.85 mJ、重复频率 100 kHz、脉宽 705 fs 的激光脉冲；美国亚利桑大大学 Peng 等^[3]在光纤中经过啁啾脉冲放大 (Chirped Pulse Amplification, CPA) 得到平均功率 4.4 W、脉冲宽度小于 500 fs、单脉冲能量 913 μJ 的激光脉冲，预估系统输出峰值功率接近 1.9 GW；Kim 等^[4]首次实验证明了在 1.03 μm 通过全保偏啁啾脉冲放大系统，得到平均功率 25 W、脉冲宽度小于 400 fs、重复频率 400 kHz 的激光脉冲，对应单脉冲能量 62 μJ ；Zhao 等^[5]基于啁啾脉冲放大原理得到重复频率 1 MHz、平均功率 100 W、脉冲宽度 270 fs 的激光脉冲，单脉冲能量达到 100 μJ 。国内研究起步较晚，但也取得了一些令人瞩目的成绩。天津大学方晓惠等^[6]利用掺镱保偏大模场面积光子晶体光纤和七芯光子晶体光纤，搭建了飞秒激光二级放大系统，获得了平均功率 24 W、重复频率 1 MHz、压缩后脉冲宽度 110 fs、脉冲峰值功率 150 MW 的脉冲输出；中国科学院西安光学精密机械研究所的李峰等^[7]采用啁啾脉冲放大技术，经过多级单模和双包层光

纤预放和大模场掺镱光子晶体光纤放大，脉冲压缩后得到 124 μJ 、887 fs 的高能超短脉冲输出。

虽然大模场光子晶体光纤能有效减小光纤中的非线性效应，但需要对信号光和泵浦光进行空间耦合，百微米量级的芯径使其丧失了光纤本身结构小巧易于弯曲集成的天然优势。因此，本文旨在全部采用传统的双包层光纤设计放大系统，不依赖大模场光子晶体光纤，实现百纳焦量级的飞秒激光输出，使高功率的飞秒激光实现可集成化。此能量等级的飞秒脉冲已经能够完全满足大部分生物以及医疗方面的应用需求^[8]，比如双光子成像、相干拉曼成像、眼科屈光手术等众多的应用。本文从实验方法上，主要利用啁啾脉冲放大技术和保偏掺镱双包层光纤，实现了百纳焦量级 221 fs 的脉冲输出，详细研究了此系统放大过程中的光斑模式以及偏振等因素的影响，获得了良好的脉冲输出质量。

2 实验装置和设计

飞秒激光光纤放大系统如图 1 所示，系统由五部分组成：超短脉冲激光振荡级、保偏光纤脉冲展宽器、一级保偏光纤单模放大器、二级保偏

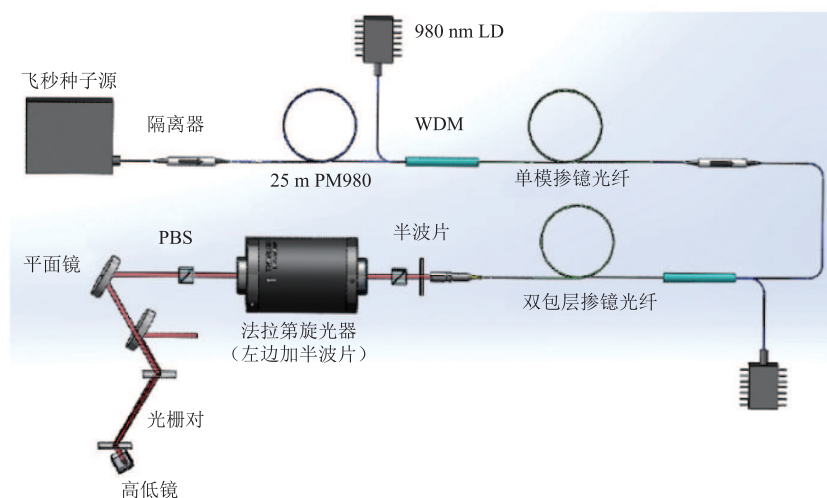


图 1 飞秒激光光纤放大系统示意图

Fig. 1 Schematic of the femtosecond laser amplification system

光纤双包层放大器和空间脉冲压缩器。其中, 超短脉冲激光振荡级为商用的飞秒种子源, 中心波长为 1 030 nm, 重复频率为 37 MHz(如图 2(a)所示), 平均功率为 1.9 mW, 脉冲宽度为 1.4 ps。振荡级的种子光经过保偏光纤隔离器后平均功率为 1.5 mW, 然后进入保偏光纤脉冲展宽器^[6,7](25 m 的 PM980), 引入 $7.5 \times 10^5 \text{ fs}^2$ 的二阶色散, 种子源脉宽被展宽至 12 ps, 以减少后续放大中积累的非线性效应。一级保偏光纤放大器采用 0.7 m 单模保偏掺镱光纤作为增益介质, 采用 400 mW、975 nm 的单模泵浦作为激励源, 将振荡级信号光放大至 180 mW, 光谱无明显变化(如图 2(b)所示)。一级保偏光纤放大输出光经过保偏光纤隔离器进入二级保偏光纤双包层放大器的平均功率为 150 mW。

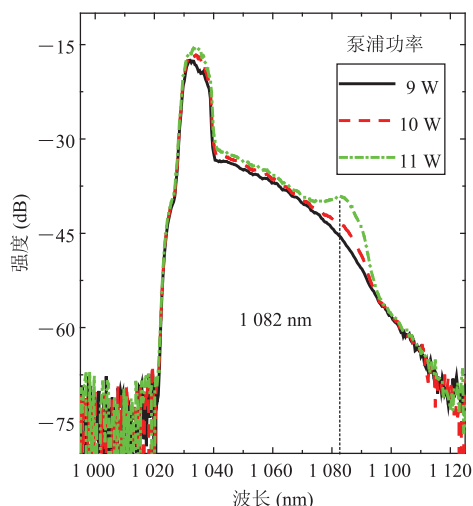
二级保偏光纤双包层放大器采用 2.5 m 双包层掺镱保偏光纤作为增益介质, 采用 975 nm 的多模泵浦作为激励源, 对一级保偏光纤单模放大器的输出光进行放大。二级保偏光纤双包层放大器输出光由准直器输出为空间光, 经过一个半波片、空间偏振隔离器(由两个偏振分束器

(Polarization Beam Splitter, PBS)和一个法拉第旋光器组成)后进入空间脉冲压缩器。空间脉冲压缩器采用高低镜两次通过透射式衍射光栅的方式对二级放大输出光进行压缩, 光栅参数为 1 000 线/mm 的透射式衍射光栅, 一级衍射的入射角为 31° , 在 1 030 nm 波长的衍射效率超过 95%。

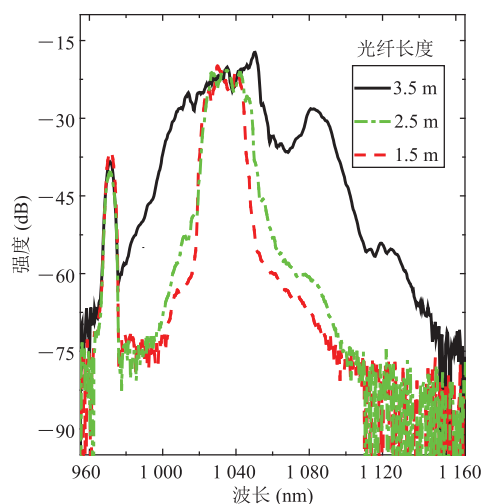
3 实验分析与讨论

为了得到高质量脉冲, 实验中需要考虑激光放大中的非线性效应的控制和色散管理, 表现为二级保偏光纤双包层放大器输出光在频域与超短脉冲激光振荡级信号光光谱相比无明显变化, 同时脉冲在时域上无较大基底。

影响光谱形状的主要因素是受激拉曼散射, 它与增益光纤的芯径大小和长度有关, 其阈值 $P_{th} \approx 16S_{core} / (g_R L_{eff})$, $L_{eff} = (G-1)L / \ln G$ 。其中, S_{core} 为纤芯的横截面积; g_R 为拉曼增益系数; G 为未饱和单通增益。当二级保偏光纤双包层放大器采用芯径为 10 μm 的双包层掺镱光纤,



(a) 975 nm 多模泵浦功率为 9 W、10 W、11 W 时输出光谱



(b) 975 nm 多模泵浦功率为 16 W, 二级放大器增益光纤长度为 3.5 m、2.5 m、1.5 m 时输出光谱

图 2 二级放大器优化过程光谱图

Fig. 2 Optical spectrums of the second stage amplifier during the optimization

975 nm 的多模泵浦的功率为 11 W 时, 二级保偏光纤双包层放大器输出光谱在 1 080 nm 左右出现峰值, 如图 2(a) 所示。光纤中的拉曼频移为 13.2 THz, 由此可得 1 030 nm 的光波在光纤中发生拉曼频移后中心波长移动 46 nm, 1 080 nm 左右出现的峰值即为拉曼效应所致, 此时二级保偏光纤双包层放大器光纤中的芯径的横截面积小导致拉曼散射阈值小。将增益光纤改为芯径为 20 μm 的双包层掺镱光纤后, 975 nm 的多模泵浦功率为 16 W 时, 输出光谱依旧形状良好(如图 2(a) 所示), 表明在二级保偏光纤双包层放大器放大过程中自相位调制等非线性效应相对较弱。

为讨论增益光纤长度对光谱形状的影响, 当 975 nm 多模泵浦功率为 16 W 时, 将增益光纤的长度选取为 1.5 m、2.5 m 和 3.5 m 进行实验。结果显示, 当增益光纤长度为 3.5 m 时, 二级光谱中观察到拉曼散射效应明显, 如图 2(b) 所示, 即由于增益光纤过长导致非线性变大; 当增益

光纤长度为 2.5 m 时, 光谱形状良好, 泵浦效率较高; 当增益光纤长度为 1.5 m 时, 其泵浦效率低, 输出功率相对较小。最终二级保偏光纤双包层放大器的 $S_{\text{core}}=314 \mu\text{m}^2$, $g_R=1 \times 10^{-13} \text{ m/W}$, $G=16$, $L=2.5 \text{ m}$, 拉曼散射阈值约为 3.7 kW。由此, 本实验中二级保偏光纤双包层放大器采用长度为 2.5 m、芯径为 20 μm 的双包层掺镱保偏光纤将一级保偏光纤单模放大器输出光放大至 5.96 W, 相应的单脉冲能量为 161 nJ。

本实验中, 一级保偏光纤单模放大器输出光纤为 PM980(芯径为 5.5 μm), 二级保偏光纤双包层放大器增益芯径为 20 μm 芯径, 存在芯径失配。未对芯径失配进行处理时, 一级保偏光纤单模放大器输出光经过保偏光纤隔离器后消光比为 72:1, 但经过二级保偏光纤双包层放大器放大后消光比下降为 2.13:1, 监测二级放大器输出光的脉宽(975 nm 多模泵浦功率为 10 W), 如图 3(a) 所示, 用自相关仪(PulseCheck, APE 公

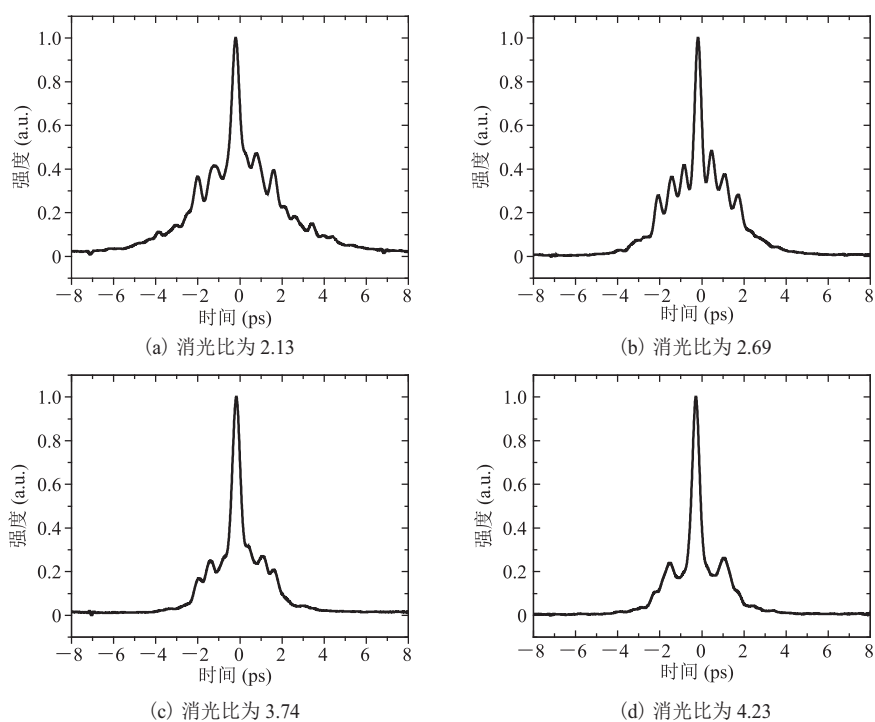


图 3 975 nm 多模泵浦功率为 10 W 时, 二级放大输出压缩后自相关图像

Fig. 3 Auto correlation curves of compressed output of the second stage amplifier when 975 nm multimode pump is 10 W

司)测得脉冲自相关曲线出现多峰结构, 基底大且有明显的旁瓣, 信噪比较低。在一级保偏光纤单模放大器与二级保偏光纤双包层放大器的焊点处分别焊接尾纤为 PM980 的准直器并进行空间耦合, 同时在两个 PM980 准直器间加入半波片, 实现对进入二级保偏光纤双包层放大器信号光的偏振角度的调节。当波片在正负 10° 范围内转动时, 随着二级放大输出光的消光比变化, 脉冲自相关曲线的基底和旁瓣会随之改变: 当消光比由 2.13 增加至 4.23 时, 自相关曲线基底先逐渐锐化为多个旁瓣, 之后旁瓣峰值下降, 在主脉冲左右各堆积成一个小旁瓣, 如图 3(b)、(c)、(d)所示。由此说明, 芯径不匹配时, 信号光模式恶化, 导致消光比下降, 自相关图像出现多峰结构。

当对芯径失配进行处理后, 一级保偏光纤单模放大器输出光经过保偏光纤隔离器后消光比为 72:1, 经过二级保偏光纤双包层放大器放大后消光比为 27.82:1, 与未处理芯径失配时相比, 提高了 11.2 dB, 二级放大器输出光脉冲的时域特性得到较大改善, 相应的脉冲自相关曲线如图 4 所示。

继续提高二级保偏光纤双包层放大器的

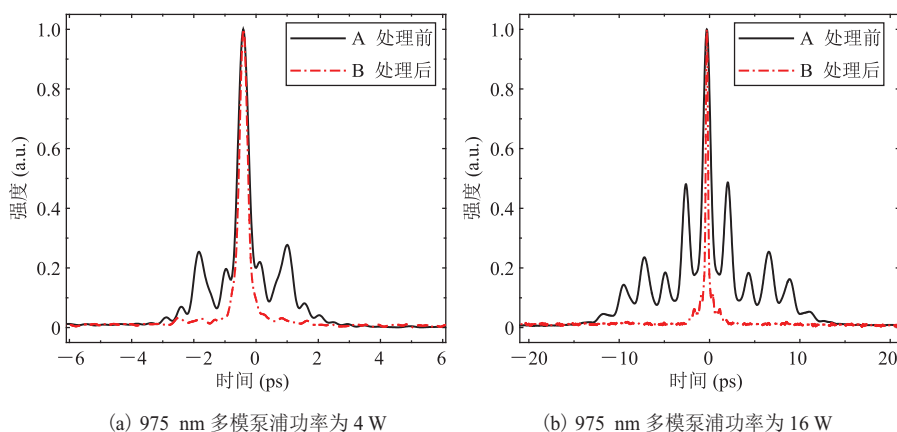


图 4 芯径失配处理前后, 二级放大器输出光压缩后自相关曲线

Fig. 4 Before and after matching the mode fields between two amplifiers, auto correlation curves of compressed output of the second stage amplifier

975 nm 多模泵浦功率, 同时调节空间压缩器透射式衍射光栅对的距离, 并使用自相关仪对压缩后的输出光进行脉宽监测, 如图 5 所示。随着输出功率逐渐增大, 二级保偏光纤双包层放大器内光纤非线性效应逐渐积累。当压缩后功率大于 4.18 W 时, 自相关图像中主峰腰变宽, 左右两个旁瓣峰值变大, 且渐渐与主峰半腰连成一片, 形成大面积基底, 因此将 975 nm 的多模泵浦功率

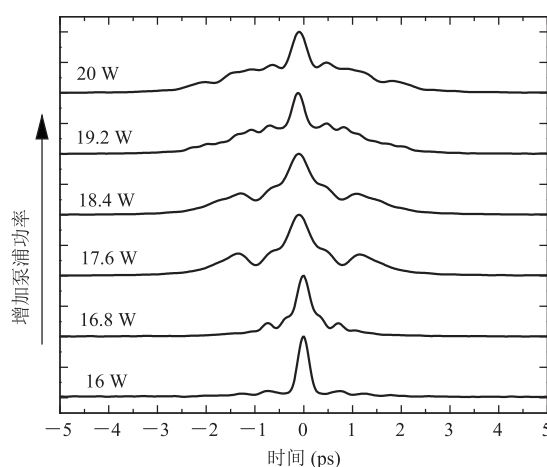


图 5 从下至上依次是 975 nm 多模泵浦功率从 16 W 增加至 20 W 时, 压缩后自相关图像

Fig. 5 Auto correlation curves of compressed output according to multimode pump power from 16 W to 20 W

限定为 16 W。在更高泵浦条件下，非线性效应会破坏脉冲质量，系统有待进一步提升，不过百纳焦的输出脉冲能量已经能够达到生物成像等应用条件下的激光器要求。

4 实验结果

本实验种子源重复频率为 37 MHz (如图 6(a))，梳齿整齐，锁模稳定；光谱如图 6(b) 中的曲线 B 所示，中心波长为 1 030 nm，谱宽约 12 nm，中心平坦。一级放大后光谱如图 6(b) 中曲线 A 所示，光谱形状基本不变，谱宽展宽至 20 nm，在 970 nm 附近出现峰值为少量未吸收的泵浦光成分，一级保偏光纤放大器输出功率 150 mW。

当二级放大的泵浦功率为 16 W 时，输出激光平均功率 5.96 W，经过透射式光栅对压缩后激光平均功率 4.18 W (空间压缩器效率为 70%)，二级保偏光纤双包层放大器的斜率效率为 68%，经过空间脉冲压缩器后斜率效率为 48%，如图 7(a) 所示。此时光谱继续宽展，970 nm 附近仍有峰值，有少量泵浦光，但形状依旧基本保持不变 (如图 7(b) 所示)，表明在二级保偏光纤双包层放

大器放大过程中自相位调制等非线性效应相对较弱。放大输出光谱傅里叶变换极限脉宽为 212 fs (如图 7(c) 所示)，相干自相关曲线如图 7(d) 所示，采用双曲正割函数方法拟合后为 221 fs，与傅里叶变换极限脉宽相近。

图 8 所示为系统连续运行 18 个小时的输出功率谱，平均功率为 4.184 W，功率抖动标准差仅为 0.006 W，输出功率稳定性良好，优于 Zhao 等^[5]的实验结果。图 8 内插图输出光斑轮廓，近似为圆形，无高阶模式，光束质量因子 $M^2=1.3$ ，光束质量良好。

虽然国外^[2-5]与国内^[6,7]通过掺镱大芯径单模光子晶体光纤实现的飞秒脉冲的功率的放大能有效减小光纤中的非线性效应，但需要对信号光和泵浦光进行空间耦合，百微米量级的芯径使其丧失了光纤本身结构小巧易于弯曲集成的天然优势。因此，本文旨在全部采用传统的双包层光纤设计放大系统，不依赖大芯径光子晶体光纤，实现百纳焦量级的飞秒激光输出，使高功率的飞秒激光实现可集成化。相比于中国科学院光电研究院^[9]在传统的双包层光纤设计放大系统实现的重复频率为 19.4 MHz、平均功率 1.2 W、脉冲宽度 183 fs 的激光脉冲，单脉冲能量为 62 nJ，本文

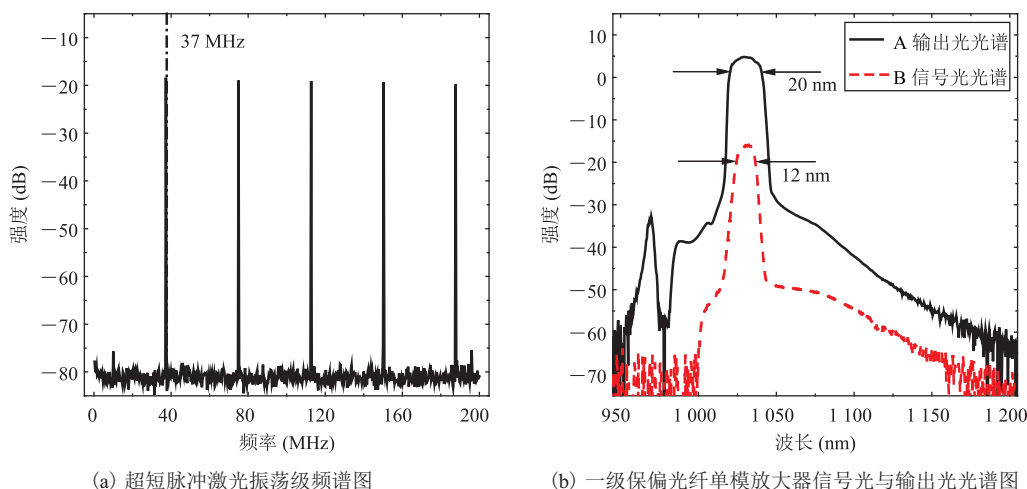
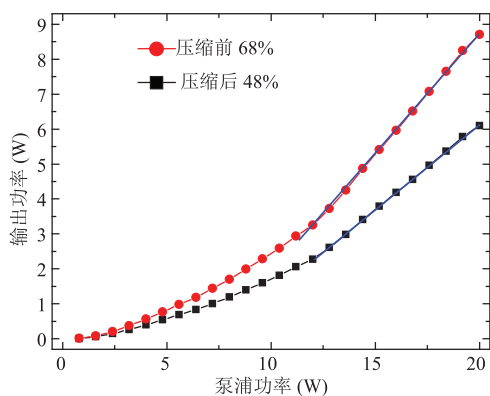
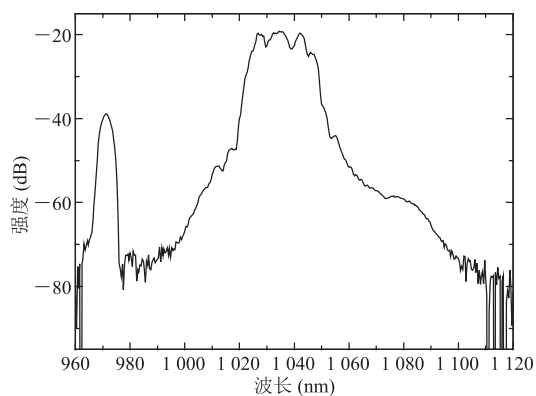


图 6 种子源频谱图和一级放大光谱图

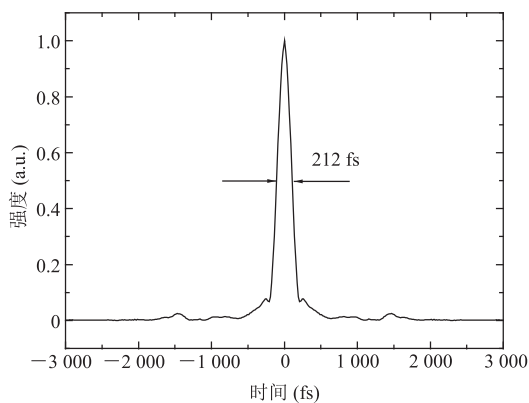
Fig. 6 Frequency spectrum of the seed and optical spectra of the first stage amplifier



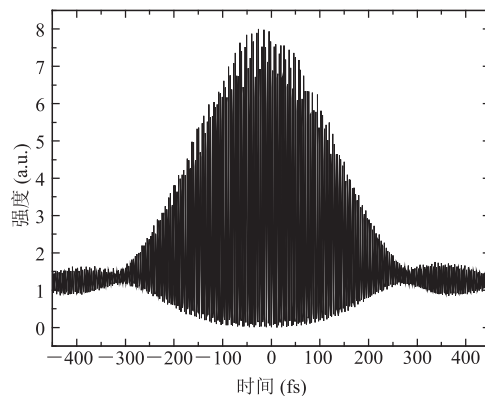
(a) 二级保偏光纤双包层放大器输出功率谱与压缩后功率谱



(b) 975 nm 多模泵浦功率为 16 W 时二级保偏光纤双包层放大器输出光谱



(c) 975 nm 多模泵浦功率为 16 W 时输出光谱傅里叶变换极限脉宽



(d) 975 nm 多模泵浦功率为 16 W 时压缩后脉宽

图 7 实验结果图

Fig. 7 Results of the experiment

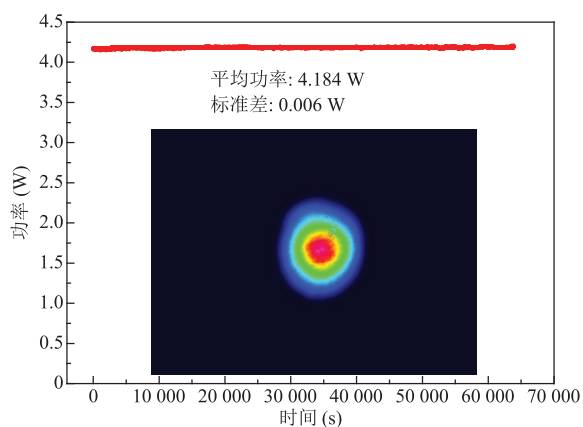


图 8 保偏系统功率稳定性及光束轮廓

Fig. 8 Power stability of the polarization-maintaining fiber chirped pulse amplification laser system and beam profile

获得了重复频率 37 MHz、平均功率 4.18 W、脉冲宽度 221 fs 的超短激光脉冲, 单脉冲能量达到 113 nJ, 此能量等级的飞秒脉冲已经能够完全满足大部分生物以及医疗方面的应用需求, 比如双光子成像、相干拉曼成像、眼科屈光手术等众多的应用。

5 结论

本文合理地设计了全保偏掺镜光纤放大系统, 获得了重复频率 37 MHz、平均功率 4.18 W、脉冲宽度 221 fs 的超短激光脉冲, 单脉冲能量达到 113 nJ。通过实验确定了放大系统增益光纤芯径及长度, 研究了由于两级放大间光纤模场不匹

配引入的偏振模色散对输出脉冲宽度的影响, 实现了不依赖大模场光子晶体光纤的百纳焦飞秒激光输出。

参 考 文 献

- [1] Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, et al. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power [J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 255-260.
- [2] Wan P, Yang LM, Liu J. All fiber-based Yb-doped high energy, high power femtosecond fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29854-29859.
- [3] Peng X, Kim K, Mielke M, et al. Monolithic fiber chirped pulse amplification system for millijoule femtosecond pulse generation at 1.55 μm [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 2459-2464.
- [4] Kim K, Peng X, Lee WK, et al. Monolithic polarization maintaining fiber chirped pulse amplification (CPA) system for high energy femtosecond pulse generation at 1.03 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4766-4770.
- [5] Zhao ZG, Kobayashi Y. Ytterbium fiber-based, 270 fs, 100 W chirped pulse amplification laser system with 1 MHz repetition rate [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(1): 012701.
- [6] 方晓惠, 胡明列, 刘博文, 等. 百兆瓦峰值功率的多芯光子晶体光纤飞秒激光放大系统 [J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2366-2370.
- [7] 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, 42(12): 28-33.
- [8] 王丽, 邱建荣. 飞秒激光在生物学领域的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(01): 10-22.
- [9] 连富强, 樊仲维, 白振岍, 等. 高稳定性、高质量脉冲压缩飞秒光纤激光系统研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(16): 277-283.