



·强激光物理与技术·研究快报·

国产掺镱锥形光纤实现百瓦毫焦级 窄线宽纳秒脉冲输出*

黄智蒙¹, 王苏钰², 张帆¹, 耿鹏程², 张慧嘉², 潘蓉², 曾安³, 夏汉定¹,
姚泽锋⁴, 蒋学君¹, 张锐¹, 冯斌¹, 衣永青², 李平¹

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900; 2. 中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220;
3. 绵阳科技城光子技术研究院, 四川绵阳 621000; 4. 电子科技大学信息与通信工程学院, 成都 611731)

摘要: 窄线宽大能量纳秒脉冲单模光纤放大器具有高效率、高光束质量和小体积等优点, 在激光探测、工业加工等应用领域中具有明显的竞争优势。近期中国工程物理研究院激光聚变研究中心基于国产锥形掺镱光纤和主振荡功率放大器(MOPA), 实现了平均功率 100 W、脉冲宽度 100 ns、单脉冲能量 1 mJ、峰值功率 10 kW 的窄线宽($\Delta\lambda_{3\text{dB}}=0.49$ nm)、线偏振(PER: 12.3 dB)、近单模($M^2=1.49$)全光纤结构 1 064 nm 激光输出。通过优化增益光纤和放大器设计, 可进一步提升放大器的输出能量、功率和光束质量。

关键词: 锥形掺镱光纤; 窄线宽; 光纤放大器; 纳秒脉冲

中图分类号: TN248

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202537.240437

Output of 100 W 1-mJ narrow linewidth nanosecond-pulsed fiber amplifier based on home-made Yb-doped tapered fiber

Huang Zhimeng¹, Wang Suyu², Zhang Fan¹, Geng Pengcheng², Zhang Huijia², Pan Rong², Zeng An³,
Xia Handing¹, Yao Zefeng⁴, Jiang Xuejun¹, Zhang Rui¹, Feng Bin¹, Yi Yongqing², Li Ping¹

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. The 46th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China;

3. Mianyang Sci-Tech City Institute of Photon Technology, Mianyang 621000, China;

4. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Thanks to the advantages of compact, high beam quality and high conversion efficiency, narrow linewidth high pulse energy single mode nanosecond-pulsed fiber amplifier is highly desired in laser detection and industry applications. Recently, an all-fiber amplifier with a home-made Yb-doped tapered fiber produces linearly polarized (12.3 dB PER) 100 ns, 1 mJ pulses with 0.49 nm linewidth, $M^2=1.49$, 100 W of average output power and 10 kW peak power at 1 064 nm. It is believed that the pulse energy, output power and beam quality can be further improved by optimizing the Yb-doped fiber and design of amplifier.

Key words: Yb-doped tapered fiber, narrow linewidth, fiber amplifier, nanosecond-pulse

窄线宽大能量纳秒脉冲单模光纤放大器具有电光效率高、光束质量好、结构紧凑、皮实耐用等优点, 在激光探测、非线性频率变换与工业加工等领域有着重要应用, 近年来成为激光技术领域的研究热点之一^[1-2]。为有效提升光纤放大器的输出功率、单脉冲能量与光束质量, 主要存在两方面的问题需要进一步研究。一是窄线宽纳秒脉冲光纤放大中的非线性效应, 包括 SRS、SBS 与 SPM 等^[3-5]; 二是纳秒脉冲光纤放大器的功率、能量提升与模式控制^[6]。目前基于常规商用光纤难以实现大能量、高功率、高光束质量和全光纤结构的窄线宽纳秒脉冲输出。纤芯直

* 收稿日期: 2024-12-21; 修订日期: 2025-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62075201)

联系方式: 黄智蒙, huangzhimeng@caep.cn;

王苏钰, wsy_960927@163.com。

通信作者: 衣永青, yiyongq@126.com;

李平, liping1984@caep.cn。

径沿光纤纵向变化的锥形光纤逐渐被用于高功率、大能量脉冲光纤激光器中,在抑制非线性效应、提升单脉冲能量和保持光束质量等方面展现出了优势。2018年,芬兰坦佩雷大学利用锥形光纤和MOPA系统,实现(中心波长1040 nm)平均功率28 W、重复频率1 MHz、单脉冲能量28 μ J、峰值功率292 kW、脉宽90 ps输出,光束质量 $M^2=1.09$ ^[7]。2021年,坦佩雷大学利用锥形光纤和MOPA系统,实现了(中心波长1064 nm)平均功率150 W、重复频率10 MHz、线宽142 pm、单脉冲能量15 μ J、峰值功率300 kW、脉宽50 ps输出,光束质量 $M^2=1.19$ ^[8]。同年,国防科技大学利用锥形光纤和MOPA放大,实现了(中心波长1064 nm)平均功率8.8 W、重复频率80 kHz、单脉冲能量110 μ J、峰值功率30 kW、脉宽3.8 ns的窄线宽(<283.8 MHz)线偏振单模纳秒脉冲输出^[9]。

最近,本课题组基于国产锥形掺镱光纤,通过抑制非线性效应和优化盘绕方式,实现了平均功率100 W、脉冲宽度100 ns、单脉冲能量1 mJ的窄线宽($\Delta\lambda_{3dB}=0.49$ nm)、线偏振(PER: 12.3 dB)、近单模($M^2=1.49$)全光纤结构1064 nm激光输出。图1为系统结构示意图,放大器采用主振荡功率放大(MOPA)结构,白噪声信号(WNS)通过电光相位调制器(EOPM)对单频连续光纤激光器(seed)进行调制,产生相位调制种子光,经过隔离器(ISO)和声光调制器(AOM1)后,形成重复频率200 kHz,脉冲宽度为100 ns的脉冲光,经过两级纤芯泵浦的单模保偏预放大器(amplifier1, amplifier2)、隔离滤波混合器(hybrid)以及声光调制器(AOM2)后,平均功率为30 mW,重复频率降为100 kHz。再经过两级包层泵浦的保偏预放大器(amplifier3, amplifier4),平均功率放大到2.4 W,经过泵浦集束器(TFB-taper fused fiber bundle)注入主放大器中。主放大器采用976 nm LD前向泵浦,增益光纤为中国电子科技集团第四十六研究所研制提供的保偏锥形掺镱光纤(PM-TYDF),光纤总长度为3 m,按纤芯包层直径可分为三个部分,包括1 m长的35 μ m/250 μ m部分,1 m长的56 μ m/400 μ m部分,1 m长的35 μ m/250 μ m渐变到56 μ m/400 μ m的锥区部分,纤芯与包层数值孔径分别为0.06和0.46。

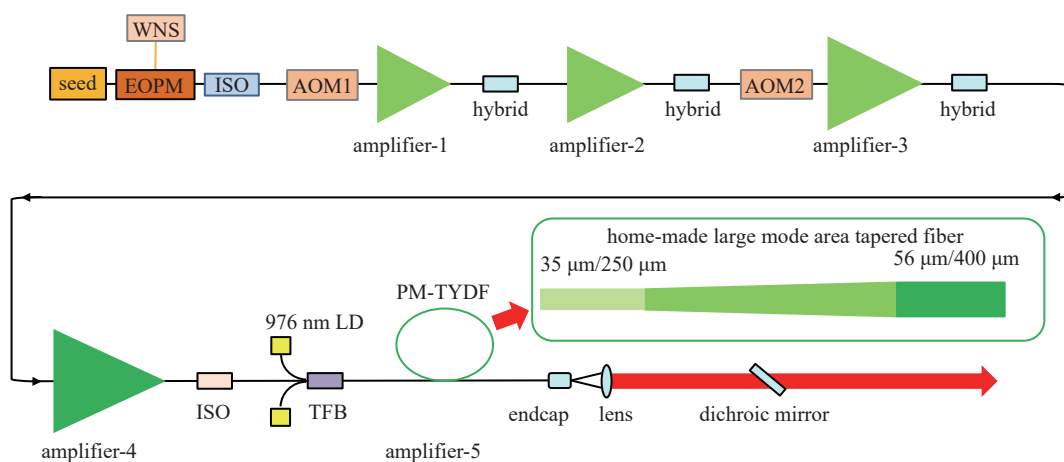
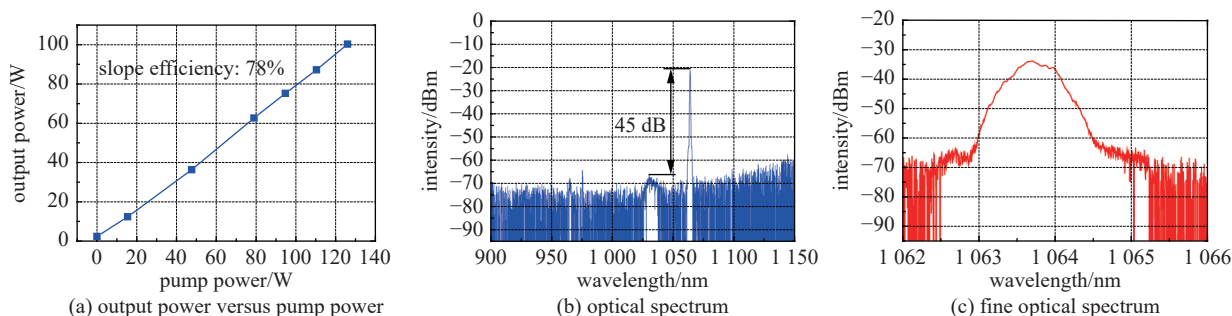


Fig. 1 Experimental setup of narrow linewidth Yb-doped nanosecond-pulsed fiber amplifier based on home-made tapered fiber

图1 基于国产锥形光纤的窄线宽掺镱纳秒脉冲光纤放大器的实验结构

激光经过准直透镜输出,并通过二色镜(dichroic mirror)滤除剩余泵浦光。不同泵浦功率下,输出功率曲线如图2(a)所示,放大器的斜效率为78%,当泵浦功率为126 W时,输出功率达到100.28 W,偏振消光比为12.3 dB。输出光谱如图2(b)、(c)所示,3 dB光谱宽度为0.49 nm。整形以后的单周期与多周期脉冲波形如图2(d)、(e)所示,脉冲宽度为100 ns,重复频率100 kHz,单脉冲能量为1 mJ。对应的光束质量为 $M^2=1.49$,图2(f)所示,实现了近单模线偏振输出。此外,在功率提升过程中,没有观察到SBS的产生。



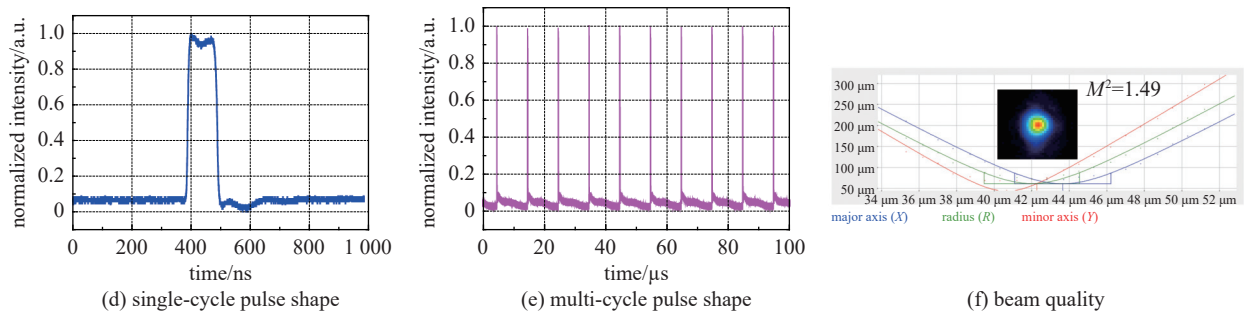


Fig. 2 Experimental results

图 2 实验结果

由于大模场锥形光纤存在一定的制备难度,且与无源器件之间存在匹配性差异,导致放大级输出激光光束质量存在一定的退化。下一步,将继续优化锥形增益光纤结构参数、制作工艺和无源器件,有望实现更高能量近单模纳秒脉冲窄线宽激光输出。

参考文献:

- [1] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [2] Brooks C D, Di Teodoro F. 1-mJ energy, 1-MW peak-power, 10-W average-power, spectrally narrow, diffraction-limited pulses from a photonic-crystal fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 8999-9002.
- [3] Anderson B M, Flores A, Dajani I. Filtered pseudo random modulated fiber amplifier with enhanced coherence and nonlinear suppression[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17671-17682.
- [4] Liu Wei, Ma Pengfei, Shi Chen, et al. Theoretical analysis of the SRS-induced mode distortion in large-mode area fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15793-15803.
- [5] Su Rongtao, Zhou Pu, Ma Pengfei, et al. High-peak-power, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, nanosecond all-fiber laser based on SPM compensation[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(30): 7331-7335.
- [6] Kalichevsky-Dong M T, Ge Wenping, Hawkins T W, et al. 4.8 mJ pulse energy directly from single-mode Q-switched ytterbium fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30384-30391.
- [7] Fedotov A, Noronen T, Gumenyuk R, et al. Ultra-large core birefringent Yb-doped tapered double clad fiber for high power amplifiers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6581-6592.
- [8] Petrov A, Mikhailovsky G, Gorbachev A, et al. High-power and pulse energy picosecond narrow linewidth laser system based on tapered fiber amplifier for second harmonic generation[C]//Proceedings of SPIE 11665, Fiber Lasers XVIII: Technology and Systems. 2021: 116651D.
- [9] Huang Long, Ma Pengfei, Su Rongtao, et al. Comprehensive investigation on the power scaling of a tapered Yb-doped fiber-based monolithic linearly polarized high-peak-power near-transform-limited nanosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 761-782.