

全光纤瓦级纳秒脉冲掺 Yb 放大器*

刘丰年^{1a}, 徐玲玲^{1a}, 范万德^{1b}, 黄榜才^{1a,2}, 姜明顺³, 刘波^{1a}, 开桂云^{1a}, 袁树忠^{1a}

(1 南开大学 a. 现代光学研究所 光电教育部重点实验室; b. 物理科学学院 光电信息科学系, 天津 300071)

(2 中国电子科技集团公司第 46 研究所, 天津 300220)

(3 山东大学 控制学院 光纤传感实验室, 济南 250061)

摘 要:采用单模放大和包层抽运放大的级联方式, 在主振荡功率放大系统中, 将平均功率 0.5 mW、脉宽 20 ns 以及重复频率为 50 kHz 的光脉冲安全放大到平均功率 0.6 W、峰值功率 600 W 的脉冲输出. 相应增益为 30.8 dB. 放大输出的脉冲信号信噪比为 30 dB, 脉冲形状基本没有发生畸变. 在前置放大结构中抽运光通过级联熔融拉锥型波分复用器耦合, 有效确保了抽运源 (976 nm) 的正常工作.

关键词:光纤放大器; 级联波分复用器; 脉冲放大; 隔离度; 信噪比; 信号增益

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3057-4

0 引言

高功率、短脉冲激光在工业加工、激光武器以及科学研究等领域有着广泛的应用, 从而使得脉冲激光器和放大器得到快速发展. 其中掺稀土光纤放大器因其效率高、阈值低、可调谐、紧凑小巧、以及散热性能好等优点而备受关注. 与其它稀土离子相比, 由于 Yb³⁺ 离子具有简单的能级结构(只包含两个多重态展开的能级²F_{5/2} 和²F_{7/2}) 和大的能级间隔(约 10 000 cm⁻¹) 使掺 Yb³⁺ 光纤激光器及放大器具有很高的转换效率. 因此, 为获得高功率的脉冲输出, 掺 Yb³⁺ 光纤就成为了脉冲放大器的首选增益介质^[1-10]. 对于脉冲掺 Yb³⁺ 放大器, 解决全光纤化问题和放大过程中后向的抽运光与信号光对整个系统的泵源造成的危害是目前研究的重要课题^[4-5, 8-10].

本文采用单模放大和包层抽运放大的级联方式, 实现了纳秒脉冲放大器的全光纤化. 同时利用两个波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 级联来耦合抽运光, 有效保护了泵源(976 nm). 在该主振荡功率放大(Main Oscillation Power Amplifying, MOPA) 系统中, 将平均功率 0.5 mW、峰值功率 0.5 W、脉宽 20 ns 以及重复频率为 50 kHz 的脉冲安全放大到平均功率 0.6 W、峰值功率 600 W 的脉冲输出. 相应增益为 30.8 dB, 信噪比为 30 dB. 在前置放大的隔离器和波分复用器

承受功率值允许的条件下, 可以级联多级单模放大系统, 从而得到更高的单脉冲能量.

1 实验装置

如图 1 为级联单模放大和包层抽运放大的主振荡功率放大系统实验结构. 所用的脉冲种子源(Pulsed seed laser) 为工作在 1 064 nm、带尾纤的商业化激光器模块. 该模块由 7.5 V 的直流驱动电压提供增益, 采用重复频率为 50 kHz、脉宽 20 ns、电压 2 V 的电脉冲信号触发, 输出平均功率 0.5 mW、重复频率 50 kHz、脉宽约为 20 ns 的光脉冲信号. 前置单模放大部分用 976 nm 的 LD 作抽运源. 抽运源最大输出功率为 300 mW. 增益光纤为 Nufern 公司生产的型号为 SM-YSF-HI 的单模掺镱光纤(Single Mode Ytterbium-Doped Fiber, SMYDF), 在 976 nm 波长处吸收系数为 250 dB/m, 纤芯直径 6 μm, 数值孔径 0.11. 980/1 060 nm WDM 最大隔离度为 20 dB. 本文基于文献[11]中所提到的级联两个拉锥形波分复用器来提高 980/1 060 nm 隔离度的方法, 有效地降低了后向抽运光与信号光对放大系统的泵源造成的危害. 所用隔离器(Isolator) 在工作波长 1 064 nm 处的最大隔离度为 49 dB. 回损为 57 dB. 在后级双包层放大系统中由工作在 915 nm、最大工作电流 8.5 A、最高输出功率为 6.5 W 以及带多模输出尾纤(105/125 μm) 的 LD 提供抽运源. 抽运光和信号光通过中电集团 46 研究所提供的抽运/信号合束器(Pump/Signal Combiner) 耦合进双包层光纤. 该合束器输出端的无源圆形双包层光纤与后面内包层为八角形的掺 Yb 双包层光纤(Double Clad Yb-Doped Fiber, DCYDF) 的数值孔径能很好匹配. 所用双包层掺 Yb 光纤也为 46 所拉制, 纤芯/内包

* 国家自然科学基金(10674074)、国家 973 计划项目(2003CB314906)和天津自然科学基金项目(06YFJZJC00300) 资助

Tel: 022-23509849 Email: lfnjx@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2008-09-25

修回日期: 2008-10-25

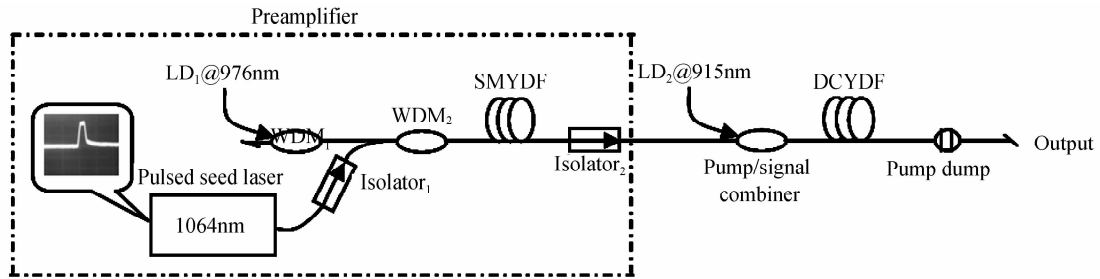


图1 级联单模放大和包层抽运放大的主振荡功率放大系统

Fig. 1 Experimental configuration of the master oscillator power amplifier system

层(10/125 μm)数值孔径为 0.14/0.46. 在 915 nm 波长处吸收系数约为 3 dB/m. 在 1040 nm~1070 nm 增益不平坦度小于 3 dB. 研究该双包层掺镱光纤的增益特性发现:当增益光纤长度大于 3 m 时, ASE 谱的峰值在 1070 nm~1080 nm 范围内. 因此为了提高在 1064 nm 波长处的增益水平, 利用 2 m 长度的双包层掺镱光纤提供增益. 并将尾纤处的涂敷层剥除, 涂上高折射率材料以滤除剩余抽运光(Pump Dump)^[12]. 整个放大系统通过特制斜头输出.

在进行掺 Yb 光纤激光器或放大器的实验中, 因抽运光(980 nm 左右)波长与激光/信号光波长(1060 nm 左右)相隔较近, 对于隔离度为 20 dB 左右的普通拉锥形 WDM 来说, 光路中不可避免的反饋很容易对 LD 造成伤害. 因此在实验中 LD 被烧毁的现象时有发生. 基于以上情况, 一种隔离度超过 50 dB 的膜片式 WDM 应运而生. 但这种隔离度较高的 WDM 由于膜片很难承受高功率, 在实际应用中膜片式 WDM 本身就很容易烧坏. 尤其是在脉冲放大实验中, 峰值功率达到几十 W 就能致使 WDM 受损. 综合以上因素考虑, 本文在实验中采用两个隔离度都在 20 dB 左右的拉锥形 WDM 级联, 因此对 980/1060 nm 隔离度可达 40 dB 以上. 完全能确保 LD 安全工作. 同时脉冲信号从第二个 WDM 输入. 实验研究发现:拉锥形的 WDM 与膜片式 WDM 相比, 尽管隔离度较低, 但承受的峰值功率值要高一些.

2 实验结果与讨论

在前置放大实验中, 出于对泵光吸收情况考虑, 选择了长度为 3 m 的增益纤(能充分吸收泵光). 选择 976 nm 泵源的最大输出功率为 200 mW, 确保尽可能得到较大的放大信号光功率和信噪比输出. 从前级放大输出的信号光功率约为 8 mW.

前置放大后的输出信号经后级包层抽运进一步放大. 为确保光谱仪在较高光功率情况下安全工作, 将斜头输出端通过法兰盘与另一单模跳线对接, 从而达到功率衰减的目的. 图 2 是单模掺 Yb 光纤和

双包层掺 Yb 光纤在两个泵源同时开启时经过功率衰减后的 ASE 以及整个 MOPA 放大系统的输出光谱比较. 从同一条件下监测到的 ASE 谱和整个 MOPA 系统输出的光谱可以得到:信号光放大后对 ASE 的抑制在 1040 波段达 18 dB 以上, 在 1060 nm 波段也达到了 10 dB. 经双包层放大后, 输出信号的信噪比为 30 dB. 与图 3 种子模块输出的信号光谱图相比, 仅下降了 6 dB, 因此保持了较好的信号质量. 当 915 nm LD 驱动电流为 7.5 A 时, 得到的放大信号输出功率约为 0.6 W. 如果在前置放大系统中级联多级单模放大, 那么从后级双包层放大输出的脉冲平均功率会更高.

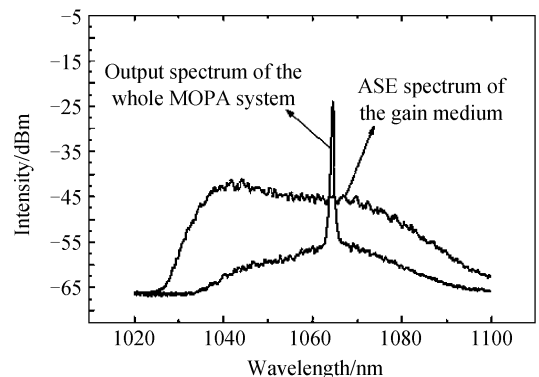


图2 单模掺 Yb 光纤和双包层掺 Yb 光纤在两个泵源同时开启时的 ASE 谱与整个 MOPA 放大系统的输出光谱比较

Fig. 2 Contrast spectra of amplified signal and ASE spectrum

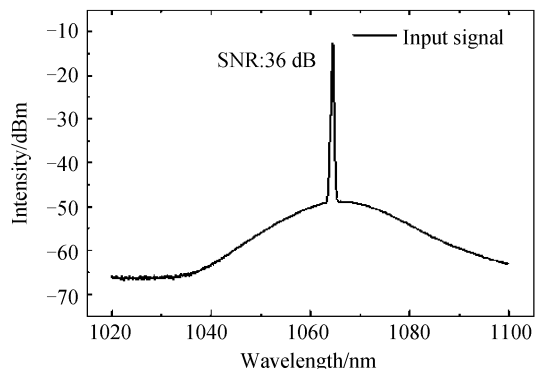


图3 脉冲种子模块输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of original signal

图 4 是放大前后的时域脉冲图. 图 4(a)是种子模块输出的脉冲形状, (b)是整个 MOPA 系统输出的脉冲形状. 对于脉宽为 ns 量级的脉冲, 形状基本没有发生畸变.

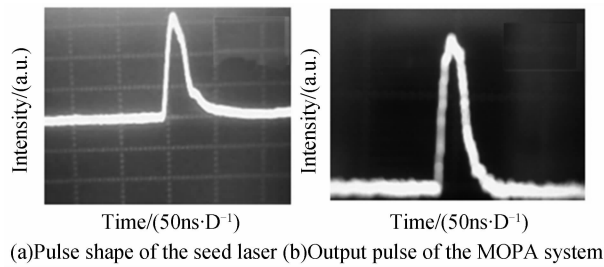


图 4 放大前后的脉冲形状比较

Fig. 4 Pulse shape contrast of the seed laser and the MOPA system

3 结论

基于主振荡功率放大系统(MOPA), 采用单模放大和包层抽运放大的级联方式, 将平均功率 0.5 mW、峰值功率 0.5 W、脉宽 20 ns 以及重复频率为 50 kHz 的脉冲安全放大到平均功率 0.6 W、峰值功率 600 W 的脉冲输出. 相应增益为 30.8 dB, 信噪比为 30 dB. 放大过程中脉冲形状基本没有发生畸变. 在前置单模放大结构中, 通过级联两个拉锥形波分复用器来提高 980/1 060 nm 隔离度, 该方案在前置放大的隔离器和波分复用器承受功率值允许的条件下, 可以级联多级单模放大系统, 从而得到更高的单脉冲能量. 这对于多级放大系统的研究具有重要指导意义.

致谢: 兰玉文同学所提供的帮助.

参考文献

- [1] LIMPERT J, HÖFER S, LIEM. A, *et al.* 100 W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Applied Physics B*, 2002, **75**:477-479.
- [2] TEODORO F D, BROOKS C D. 1.1 mW peak-power, 7W average-power, high-spectral-brightness, diffraction-limited pulses from a photonic crystal fiber amplifier [J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(20):2694-2696.
- [3] VU K T, MALINOWSKIA, RICHARDSON D J. Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system [J]. *Opt Express*, 2006, **14**(23):10996-11001.

- [4] HE F, PRICE J H V, VU K T, *et al.* Optimisation of cascaded Yb fiber amplifier chains using numerical-modelling [J]. *Opt Express*, 2006, **14**(26):12846-12858.
- [5] TEODORO F D, BROOKS C D. Multistage, Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses [J]. *Opt Letters*, 2005, **30**(24):3299-3301.
- [6] ADHIMOOLAM B, LINDSAY I D, LEE C J, *et al.* Spectral shaping of a 10W diode laser-Yb-fiber amplifier system [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**:093101-1-4.
- [7] FRANTZ L M, NODVIK J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier [J]. *J of Appl Phys*, 1963, **34**(8):2346-2349.
- [8] CHENG Ming-yuan, ChANG Yu-chung, GALVANAUSKAS A. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200- μm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(4):358-360.
- [9] KONG Ling-feng, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, *et al.* Frequency response and transient gain of Yb-doped double clad fiber amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1286-1289. 孔令峰, 楼祺洪, 周军, 等. 掺 Yb 双包层光纤放大器的瞬态增益和频率响应 [J]. 光子学报, 2004, **33**(11):1286-1289.
- [10] GUO Zhan-cheng, FU Shen-gui, JIA Xiu-jie, *et al.* Experimental study of large-mode-area fiber amplifier applied in coherent combination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9):1660-1663. 郭占城, 付圣贵, 贾秀杰, 等. 用于相干合成大模面积光纤放大器的实验研究 [J]. 光子学报, 2007, **36**(9):1660-1663.
- [11] ZHU Zong-jiu, XU Li-xin, MAO Qing-he, *et al.* Photodarkening in ytterbium-doped fiber with high doping concentration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1):26-29. 朱宗玖, 许立新, 毛庆和, 等. 高掺杂浓度掺镱光纤的光子暗化效应 [J]. 光子学报, 2007, **36**(1):26-29.
- [12] DUAN Yun-feng, HUANG Bang-cai, ZhANG Peng, *et al.* The experimental study of the all-fiber pulse fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(10):1379-1382. 段云锋, 黄榜才, 张鹏, 等. 全光纤结构脉冲光纤放大器的实验研究 [J]. 中国激光, 2007, **34**(10):1379-1382.

All-fiber Watt-level Nanosecond Pulsed Yb-doped Fiber Amplifier

LIU Feng-nian^{1a}, XU Ling-ling^{1a}, FAN Wan-de^{1b}, HUANG Bang-cai^{1a,2},

JIANG Ming-shun³, LIU Bo^{1a}, KAI Gui-yun^{1a}, YUAN Shu-zhong^{1a}

(1 a. Key Laboratory of Opto-electronic Information and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics;
b. Department of Optical-Electronic Information Science, Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

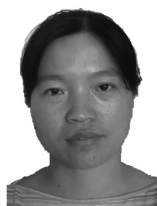
(2 Research Institutes 46th of Chinese Electronic Technology Group Company, Tianjin, 300220, China)

(3 Fiber Sensor Laboratory of Institute of Controlling, Shandong University, Jinan, 250061, China)

Received date: 2007-09-25

Abstract: The fiber-based amplification of a commercially packaged, fiber pigtailed pulsed diode laser operating at wavelength of 1 064 nm (bandwidth of 0.45 nm) was reported. The cascaded Yb-doped fiber amplifier could operate safely by using cascaded fused wavelength division multiplexing (WDM) in each single-mode amplification stage. The total isolation of cascaded WDM could protect the laser diodes from being destroyed by feedback of pump/signal power. At repetition rate of 50 kHz, pulse duration of 20 ns and average power of 0.5 mW, output power up to 0.6 W and peak power up to 600 W were obtained, with a high signal to noise ratio of 30 dB. The gain of the whole system is 30.8 dB and pulse distortion is not been observed.

Key words: Fiber amplifier; Cascaded wavelength division multiplexing; Pulse amplification; Isolation; Signal to noise ratio; Gain of signal



LIU Feng-nian was born in 1974. She is a Ph. D. degree candidate at Institute of Modern Optics, Nankai University. Her major research interests focus on fiber lasers, fiber amplifiers and coherent combination of lasers.