

高功率全光纤保偏主振荡功率放大大型光纤激光器的实验研究

董小林 肖虎 马阎星 周朴† 郭少锋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年6月8日收到; 2011年6月29日收到修改稿)

进行了全光纤保偏主振荡功率放大大型光纤激光器的实验研究. 采用两级级联放大的方式, 利用纤芯为 $5\ \mu\text{m}$ 的小芯径双包层保偏光纤, 在最大抽运功率为 $88\ \text{W}$ 时实现了 $67\ \text{W}$ 的 $1083\ \text{nm}$ 保偏激光输出, 纤芯内的激光功率密度约为 $3.4\ \text{W}/\mu\text{m}^2$, 光-光转换效率为 76% . 分析结果表明, 进一步提高抽运功率有望获得更高功率的激光输出.

关键词: 光纤激光器, 保偏, 全光纤

PACS: 42.55.Wd, 42.27.De

1 引言

高功率掺镱光纤激光具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑等优点, 在工业加工领域有着广泛的应用前景. 近年来, 随着大模场面积双包层掺杂光纤制造工艺与高亮度激光二极管 (LD) 抽运技术的发展, 单根双包层光纤激光器的输出功率迅速提高^[1-5]. 国内高功率光纤激光研究起步相对较晚, 但近年来也取得了突破性进展, 中国科学院上海光机所、西安光机所、清华大学、华北光电技术研究所、中国兵器装备研究院等多家单位已经成功实现千瓦级输出^[6-10]. 上述高功率光纤激光器的输出光束均为随机偏振态. 在一些特殊的应用领域, 如相干通信、相干型传感系统以及高功率光纤激光相干合成^[11]等场合, 对于光束的偏振态有一定的要求. 相比于随机偏振态的高功率光纤激光, 国内外对于保偏输出的光纤激光器的研究较少. 任广军等^[12,13]基于掺铒双包层保偏光纤实现了 $7.5\ \text{W}$, $1060\ \text{nm}$ 保偏光纤激光输出, 林伟欣等^[14]基于掺镱双包层保偏光子晶体光纤实现了 $5.4\ \text{W}$, $1040\ \text{nm}$ 保偏光纤激光输出. 上述光纤激光器都是基于空间结构实现, 相比之下, 全光纤结构的光纤激光器稳定性更好, 更利于向实用化发展. 最近, 刘

驰等^[15]利用掺镱双包层保偏光纤, 实现了全光纤结构的 $44.6\ \text{W}$ 高功率光纤激光输出, 其中光纤的纤芯为 $20\ \mu\text{m}$. 本文搭建了全光纤保偏主振荡功率放大大型 (master oscillator power amplifier, MOPA) 光纤激光器, 采用二级级联放大的方式, 利用纤芯为 $5\ \mu\text{m}$ 的小芯径双包层光纤实现了 $67\ \text{W}$ 的保偏激光输出, 光-光转换效率为 76% . 由于采用的双包层掺杂光纤的芯径为 $5\ \mu\text{m}$, 更易于和常规单模光纤熔接, 便于实际应用.

2 实验原理及装置

MOPA 技术, 就是将性能稳定的小功率激光器作为种子源, 注入单级或多级放大器系统, 实现高功率放大的激光输出. 功率放大级是 MOPA 系统的核心部分, 直接关系着输出激光的光束质量和功率特性. 双包层抽运 MOPA 光纤激光器的基本原理为: 抽运激光通过熔接耦合到双包层光纤的内包层, 每次通过纤芯时被掺杂离子吸收并形成粒子数反转以提供增益; 信号激光以相同方式注入至双包层光纤的纤芯中, 在整个传输过程中被有效放大, 实现高功率的激光输出. 影响 MOPA 光纤激光器输出的关键环节和技术难点主要在于放大方

† E-mail: zhoup203@163.com

案的选取、放大自发发射 (amplification stimulated emission, ASE) 和自激振荡抑制、非线性效应抑制以及热管理. 若种子信号光功率太低, 信号光被掺杂光纤完全吸收, 不仅无法实现高功率输出, 反而会导致 ASE 的产生. 如果种子信号光功率太高, 则无法发挥 MOPA 的优势. 由于能级分裂, 掺稀土增益介质一般有多个亚能级, 具有较宽的吸收和发射截面. 在高功率抽运下, 部分自发辐射光在前后两个方向被放大. 大量的前向 ASE 随着信号激光输出, 影响输出激光的信噪比, 同时 ASE 消耗反转粒子数, 降低激光输出. 大量的 ASE 还会因端面微小的反射形成腔内自激振荡, 破坏前级光学系统.

本文中全光纤保偏 MOPA 光纤激光器的结构如图 1(a) 所示, 其中包含一台种子源和两级光纤级联放大器. 所使用的种子源为自制的全保偏直腔型激光器, 其腔体结构如图 1(b) 所示. 该种子源由一台最大输出功率为 480 mW 的 976 nm 抽运源、一个保偏波分复用器 (WDM)、一段长度为 50 cm 的单包层保偏掺镱光纤 (SCF)、一个 2×2 耦合器和一个保偏光纤光栅组成. 单包层掺镱光纤在 976 nm 处吸收系数为 250 dB/m, 纤芯为 6 μm . 保偏光纤光栅的中心波长为 1083 nm, 3 dB 线宽为 0.3 nm, 反射率为 99.6%. 该直腔型激光器的输出功率最大约为 100 mW. 种子激光经过保偏隔离器后注入级联放大器. 级联放大器的第一级为种子预放, 所使用的增益光纤是长度为 8 m 的双包层保偏掺镱光纤, 纤芯和内包层直径分别为 5 μm 和 130 μm , 内

包层数值孔径为 0.46, 在 976 nm 附近的吸收系数约为 1.7 dB/m. 第一级预放的抽运源为 1 只最大输出功率为 9 W、中心波长为 975 nm 的尾纤输出激光二极管. 通过前向抽运方式可将种子激光的功率放大到 2.5 W 左右.

放大器的第二级为主放, 所使用的增益双包层光纤与一级预放相同, 仅 15 m 的光纤长度与前级不同. 放大器的抽运源为两个工作在 976 nm 附近、尾纤输出的 LD, 每个 LD 的输出功率约为 45 W. 经预放放大的种子激光和两个 LD 输出的抽运光通过一个 $(6+1) \times 1$ 的保偏抽运合束器注入双包层掺镱光纤. 两级级联放大器之间熔接最大承受功率为 3 W 的保偏隔离器, 避免后向的回光引起破坏. 合束器和隔离器的输入输出端均为纤芯和内包层直径分别为 5 μm 和 130 μm 的双包层保偏传输光纤. 整个激光放大器系统中除第二级放大器的 LD 采用 20 $^{\circ}\text{C}$ 水冷外, 其他器件均依靠空气对流散热.

3 结果与讨论

当种子激光器输出功率为 100 mW 时调节第一级放大器的抽运电流, 在抽运功率为 7.3 W 时, 可以将激光功率放大到 2.5 W, 激光功率与抽运功率的关系如图 2(a) 所示. 由于实验中采用的掺杂光纤长度过长, 导致放大后信号激光被掺镱光纤吸收, 所以光-光转换效率偏低.

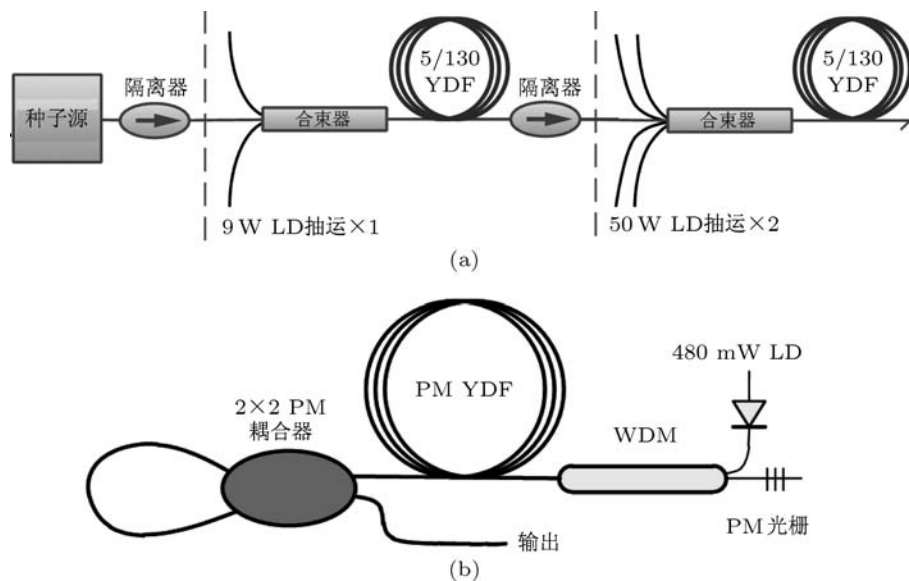


图 1 实验装置示意图 (a) 二级级联放大结构; (b) 直腔型种子激光器

当第一级放大器输出功率为 2.5 W 时, 逐步增加第二级放大器的抽运电流, 输出光功率与主放注入的抽运光功率的关系如图 2(b) 所示. 由于 $(6+1) \times 1$ 保偏抽运合束器插入损耗的因素, 实际测得最大抽运功率为 88 W. 从图 3 可以看出, 输出信号光功率随抽运光功率的增加而线性增大. 当最大抽运功率为 88 W 时, 获得了 67 W 的保偏激光输出, 光-光转换效率为 76%. 当激光器输出功率 67 W 时, 其光谱如图 3 所示. 可以看出抽运光已经被充分吸收.

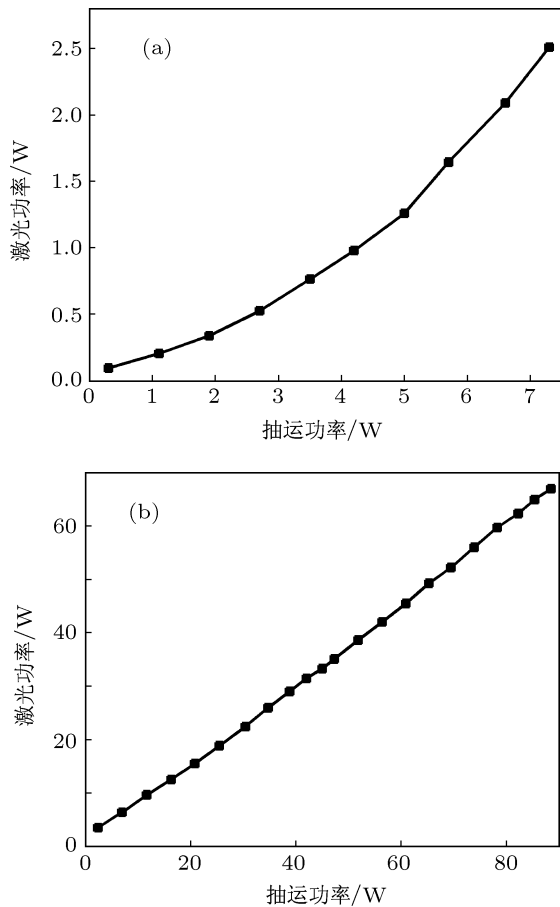


图 2 级联的两级输出功率与抽运的关系 (a) 一级放大输出; (b) 主放输出

在最大抽运功率下, 输出功率稳定在 67 W 左右, 未出现功率起伏等异常现象. 由于主放级采用

芯径为 $5 \mu\text{m}$ 的光纤, 此时计算得到纤芯内的激光功率密度约 $3.4 \text{ W}/\mu\text{m}^2$, 在文献 [16] 中给出的数据表明, 常规石英玻璃掺杂光纤的光损伤阈值一般大于 $10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$, 因此还有一定的功率提升空间. 实验中第二级放大器的抽运合束器共有 6 个抽运臂, 实际仅使用了其中两个. 而从图 3 中线性增长的功率曲线可以推断, 在抽运源充足的情形下, 进一步增加抽运功率有望获得更大功率的保偏激光输出, 例如 100 W. 此时纤芯的激光功率密度约为 $5 \text{ W}/\mu\text{m}^2$, 因而可以预测 $30 \mu\text{m}$ 芯径的双包层掺镱光纤能够支持 3500 W 激光输出. 除此以外, 实验中采用的双包层掺杂光纤的芯径仅为 $5 \mu\text{m}$, 易于和常规单模光纤熔接, 便于实际应用; 该光纤还可以作为后续更高功率大模场光纤放大器的高功率种子源激光器.

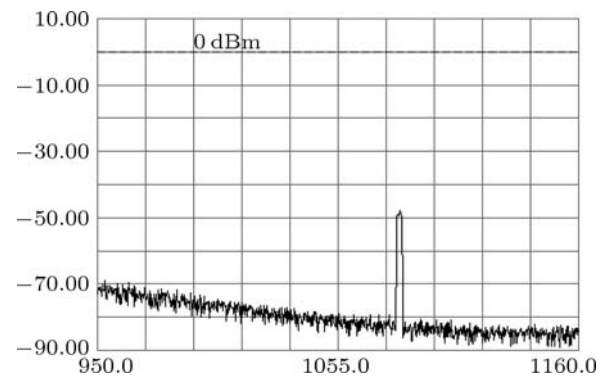


图 3 最大抽运功率下输出激光的光谱

4 结论

进行了全光纤保偏 MOPA 激光器的实验研究, 采用两级级联放大的方式, 利用 $5 \mu\text{m}$ 的小芯径双包层光纤, 在最大抽运功率为 88 W 时实现了 67 W 的保偏激光输出, 光-光转换效率为 76%. 激光器的输出功率与注入的抽运功率呈现良好的线性关系. 分析结果表明, 在抽运源充足的情形下, 进一步增加抽运功率可获得更大功率的保偏激光输出, 为常规大模场双包层光纤输出千瓦级激光提供一定的参考.

- [1] Limpert J, Liem A, Zellmer H, Tunnermann A 2003 *Electron. Lett.* **39** 645
 [2] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12**

6088

- [3] Fomin V, Mashkin A, Abramov M, Ferin A, Gapontsev V 2006 *Int. Symp. High-Power Fiber Lasers Appl.* St. Petersburg, Russia,

- June 26–30, 2006
- [4] Limpert J, Röser F, Klingebiel S, Schreiber T, Wirth C, Peschel T, Eberhardt R, Tunnermann A 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **13** 537
- [5] Gapontsev D 2008 *Solid State and Diode Laser Technology Review Albuquerque* New Mexico, USA, June 2–5, 2008
- [6] Zhou J, Lou Q H, Zhu J Q, He B, Dong J X, Wei Y R, Zhang F P, Li J Y, Li S Y, Zhao H M, Wang Z J 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1119 (in Chinese) [周军, 楼祺洪, 朱建强, 何兵, 董晶星, 魏运荣, 张芳沛, 李进延, 李诗愈, 赵宏明, 王之江 2006 光学学报 **26** 1119]
- [7] Li C, Yan P, Chen G, Gong M L 2006 *Chin. J. Lasers* **26** 738 (in Chinese) [李晨, 闫平, 陈刚, 巩马理 2006 中国激光 **26** 738]
- [8] Li W, Wu Z C, Chen X, Shi J F, Chen Z, Dai M, Dong H Y, Guo S G 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 890 (in Chinese) [李伟, 武子淳, 陈曦, 史俊锋, 陈颀, 戴明, 董海燕, 郭胜刚 2006 强激光与粒子束 **18** 890]
- [9] Lou Q H, He B, Xue Y H, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Wang W, Li Z, Qi Y F, Du S T, Zhao H M, Chen W B 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1277 (in Chinese) [楼祺洪, 何兵, 薛宇豪, 周军, 董晶星, 魏运荣, 汪炜, 李震, 漆云凤, 杜松涛, 赵宏明, 陈卫标 2009 中国激光 **36** 1277]
- [10] Zhao B Y, Duan K L, Zhao W, Li C, Wang Y S 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 404
- [11] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, Ma H T, Xu X J, Liu Z J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 024207-1 (in Chinese) [周朴, 马阎星, 王小林, 马浩统, 许晓军, 刘泽金 2010 中国物理 B **19** 024207-1]
- [12] Ren G J, Zhang Q, Wang P, Yao J Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3917 (in Chinese) [任广军, 张强, 王鹏, 姚建铨 2007 物理学报 **56** 3917]
- [13] Ren G J, Yao J Q, Wang P, Zhang Q 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 1208 (in Chinese) [任广军, 姚建铨, 王鹏, 张强 2007 中国激光 **34** 1208]
- [14] Lin W X, Ruan S C, Yan P G, Lü Y X 2009 *J. Shenzhen Univ. Sci. Eng.* **26** 20 (in Chinese) [林伟欣, 阮双琛, 闫培光, 吕玉祥 2009 深圳大学学报理工版 **26** 20]
- [15] Liu C, Qi Y F, Ding Y Q, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 031402-1
- [16] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, Shverdin M Y, Stappaerts E A, Sridharan A K, Pax P H, Heebner J E, Siders C W, Barty C P J 2008 *Opt. Express* **16** 13240

High power polarization-maintaining master oscillator power amplifier fiber laser in all-fiber format

Dong Xiao-Lin Xiao Hu Ma Yan-Xing Zhou Pu[†] Guo Shao-Feng

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 8 June 2011; revised manuscript received 29 June 2011)

Abstract

Experimental study on all-fiber polarization maintaining master oscillator power amplifier fiber laser is performed. A 5 μm small core diameter double clad polarization-maintaining Yb-doped fiber is employed in the experiment by means of two-level cascade amplification. A more than 67 W polarization maintaining laser is obtained under a maximal 88 W pump power. In this case, the laser density in the fiber core is about 3.4 $\text{W}/\mu\text{m}^2$, and the optical-to-optical efficiency is 76%. A higher power laser output can be realized as the pump power is further enhanced.

Keywords: fiber laser, polarization-maintaining, all-fiber format

PACS: 42.55.Wd, 42.27.De

[†] E-mail: zhoupu203@163.com