

## 后向同带泵浦光纤激光实现大于 8 千瓦高光束质量输出

李瑞显, 吴函烁, 肖虎\*, 冷进勇, 周朴\*\*

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 由于受激拉曼散射(SRS)和横模模式不稳定(TMI)效应的共同制约,实现高功率输出的同时保持高光束质量存在一定的困难。基于后向同带泵浦方案,在自研 30  $\mu\text{m}$ /250  $\mu\text{m}$  常规双包层掺镱光纤中实现了高功率(8.38 kW)、高光束质量(光束质量因子  $M^2$  为 1.8)的激光输出。SRS 和 TMI 得到了有效抑制,但功率的进一步提升受限于泵浦功率。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 同带泵浦; 后向泵浦; 受激拉曼散射; 横模模式不稳定

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1436001

## More Than 8 kW Fiber Laser Amplifier with High Beam Quality Enabled by Counter Tandem Pumping Scheme

Li Ruixian, Wu Hanshuo, Xiao Hu\*, Leng Jinyong, Zhou Pu\*\*

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

**Abstract** Achieving a high power fiber laser output while maintaining high beam quality is challenging due to the constraints of stimulated Raman scattering (SRS) and transverse mode instability (TMI). In this paper, based on a counter tandem pumping scheme, an output with a power of 8.38 kW and a high beam quality factor of  $M^2 = 1.8$  is achieved in a homemade and conventional double-clad 30  $\mu\text{m}$  /250  $\mu\text{m}$  Yb-doped fiber. The SRS and TMI effects are effectively suppressed, but the further power increase is restricted by the available pump power.

**Key words** lasers; fiber lasers; tandem pumping; counter pumping; stimulated Raman scattering; transverse mode instability

掺镱光纤激光器因其光电转换效率高、热管理方便、结构紧凑等优势,在工业加工等领域中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。使用 1018 nm 光纤激光对掺镱光纤进行同带泵浦是目前获得万瓦级高光束质量光纤激光的主要技术方案之一<sup>[3-5]</sup>。利用该方案,美国 IPG Photonics 公司于 2009 年研制出 10 kW 的单模掺镱光纤激光器<sup>[6]</sup>,但并未公布光纤参数、泵浦光耦合方式等技术细节。在常规双包层掺镱光纤中实现高功率、高光束质量的激光输出仍是国内外研究人员密切关注的研究热点。由于镱离子对 1018 nm 波段激光的吸收效率低,为保证吸收强度,同带泵浦光纤激光器使用的掺镱光纤较长,受激拉曼散射(SRS)成为功率提升的主要限制因素。受限于 SRS,早期采用常规掺镱双包层光纤的同带泵浦光纤激光器的输出功率仍停留在 5 kW 量级(光束质量因子  $M^2$  约为 2)<sup>[7-9]</sup>。具有更大芯径的大

模场光纤可以在保证吸收的同时抑制 SRS,但仍面临着横模模式不稳定(TMI)阈值降低、光束质量下降等问题。基于大芯径( $\sim 50 \mu\text{m}$ )光纤,中国工程物理研究院和中国科学院等单位课题组已实现万瓦级(以上)激光输出<sup>[10-15]</sup>,但输出光束质量仍有较大提升空间。

为兼顾 SRS 阈值和光束质量,新加坡 DSO 国家实验室于 2018 年将部分掺杂光纤应用于同带泵浦光纤激光器中。部分掺杂光纤的镱离子掺杂区域仅占纤芯的一部分,与基模重叠的因子高,能够使基模在大芯径光纤中保持增益竞争优势,实现抑制 SRS 的同时保持高光束质量。利用 42  $\mu\text{m}$ /250  $\mu\text{m}$  部分掺杂光纤(掺杂面积占纤芯面积的 75%),实现了 4.1 kW 的高光束质量( $M^2$  为 1.59)输出<sup>[16]</sup>。2021 年,国防科技大学课题组通过前向同带泵浦的芯径为 40  $\mu\text{m}$ (掺杂区域直径为 30  $\mu\text{m}$ )的双包层部分掺杂光纤,先后实现了

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-04-01; 录用日期: 2022-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(62035015)、湖南省创新研究群体(2019JJ1005)

通信作者: \*xhwise@163.com; \*\*zhoupu203@163.com

5.07 kW ( $M^2$  为 1.89)<sup>[17]</sup> 和 7.03 kW ( $M^2$  为 1.96)<sup>[18]</sup> 的高功率激光输出,但功率的进一步提升受限于 TMI。

鉴于后向泵浦和双向泵浦技术在 SRS 和 TMI 抑制方面的潜力<sup>[19-21]</sup>,国防科技大学课题组开展了后向/双向同带泵浦关键技术的研究。2021 年 5 月,课题组利用自研后向合束器和优化后的 1018 nm 泵浦源,首次在 25  $\mu\text{m}$ /250  $\mu\text{m}$  常规双包层掺镱光纤中实现了大于 5 kW 的激光输出, $M^2$  为 1.54,系统未出现 SRS 或 TMI 现象,功率的提升受限于当时可用的泵浦功率<sup>[22]</sup>。之后,研究者通过双向同带泵浦结构,基于常规双包层光纤实现了 6.22 kW 激光输出, $M^2$  为 1.53。该放大器使用的  $(2+1)\times 1$  后向泵浦/信号合束器仅有两根泵浦注入光纤,可注入的后向泵浦功率不足,导致最高功率下的拉曼抑制比仅为  $\sim 22$  dB,功率的进一步提升受限于 SRS<sup>[23]</sup>。

近期,国防科技大学课题组利用自主研发的  $(6+1)\times 1$  后向泵浦/信号合束器,基于自研的 30  $\mu\text{m}$ /250  $\mu\text{m}$  常规双包层掺镱光纤开展了实验,实现了大于 8 kW 的高功率高光束质量激光输出。系统结构如图 1 所示,1080 nm 单模种子激光通过模场适配器(MFA)进入放大器。泵浦源为 4 台 2.5 kW 级的 1018 nm 光纤激光器。泵浦光通过自研的  $(6+1)\times 1$

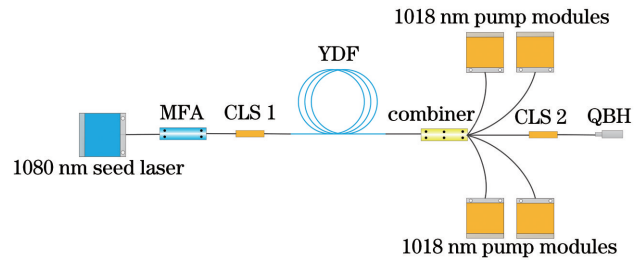


图 1 后向同带泵浦实验装置

Fig. 1 Experimental setup of counter tandem pumping

后向泵浦/信号合束器(combiner)注入到双包层掺镱光纤(YDF)中,掺镱光纤纤芯和包层的数值孔径分别为 0.06 和 0.46,长度约为 40 m。残余泵浦光被包层光滤波器(CLS 1)滤除。放大后的信号光经过包层光滤波器(CLS 2)和端帽(QBH)后输出。

放大器的功率变化如图 2(a)所示,输出功率随泵浦功率的增大而线性增加,当注入泵浦功率为 10377 W 时,输出功率达到 8380 W,对应的光光转换效率为 80.1%。激光器在最高输出功率下连续运转约 5 min,输出功率未出现明显波动。图 2(b)为种子激光放大前后的光谱图,3 dB 线宽由种子激光的 1.04 nm@70 W 展宽至 4.68 nm@8380 W。当最高功率为 8380 W 时,观察到微弱的拉曼光成分,但拉曼抑制比仍大于 40 dB。光谱积分结果表明,此时拉曼

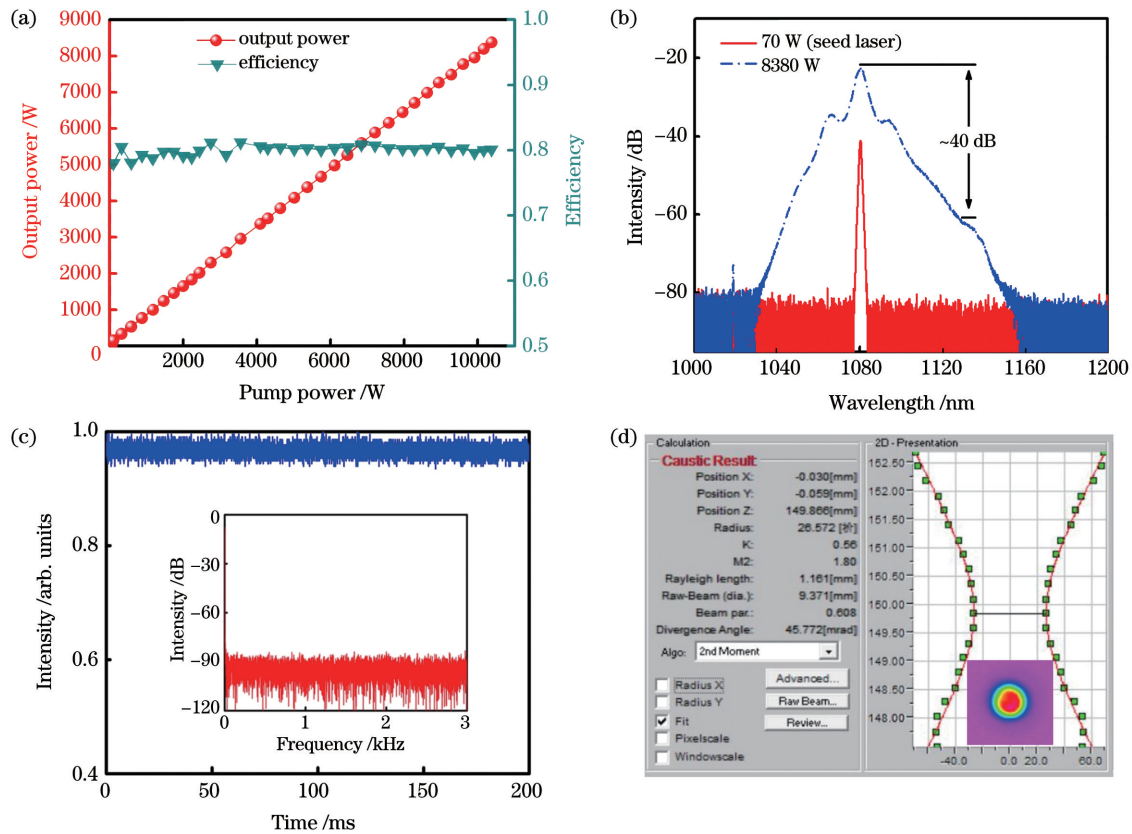


图 2 后向同带泵浦光纤放大器的实验结果。(a) 输出功率和效率随泵浦功率的变化曲线;(b) 功率为 70 W (种子激光) 和 8380 W 时的输出光谱;(c) 功率为 8380 W 时激光器的时序和对应频谱(插图);(d) 功率为 8380 W 时的输出光束质量  
Fig. 2 Experimental results of counter tandem pumping fiber amplifier. (a) Output power and efficiency versus pump power; (b) output spectra at powers of 70 W (seed laser) and 8380 W; (c) time sequence and corresponding spectrum (inset) of laser at power of 8380 W; (d) output beam quality at power of 8380 W

光功率占比为 $\sim 0.05\%$ 。图 2 (c)所示的激光器时序及频谱表明,系统未出现 TMI 现象。在最高功率下光束质量因子  $M^2$  为 1.8,如图 2(d)所示。据作者所知,本工作实现的 8.38 kW 激光输出为目前公开报道的高光束质量同带泵浦激光器的最高功率值。

目前,功率的进一步提升仅受限于泵浦功率。从功率增长趋势和光谱形态判断,在泵浦激光充足的情况下,输出功率可进一步提升。通过优化后向泵浦/信号合束器和掺杂光纤的参数设计,输出光束质量有望进一步提高。研究结果为利用常规双包层掺镱光纤实现万瓦级高光束质量输出提供了重要技术支撑。

**致谢** 感谢陈子伦、孙杨梅、肖亮、刘鹏等在实验过程中的支持和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] 周朴, 黄良金, 冷进勇, 等. 高功率双包层光纤激光器: 30 周年的发展历程[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(2): 123-135.  
Zhou P, Huang L J, Leng J Y, et al. High-power double-cladding fiber lasers: a 30-year overview [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, 50(2): 123-135.
- [2] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- [3] Zhou P, Xiao H, Leng J Y, et al. High-power fiber lasers based on tandem pumping [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): A29-A36.
- [4] 肖虎, 冷进勇, 周朴, 等. 高功率级联抽运掺镱光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201007.  
Xiao H, Leng J Y, Zhou P, et al. High power tandem-pumped Yb-doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201007.
- [5] 肖起榕, 田佳丁, 李丹, 等. 级联泵浦高功率掺镱光纤激光器: 进展与展望[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1501004.  
Xiao Q R, Tian J D, Li D, et al. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers: progress and opportunities [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1501004.
- [6] Stiles M E. New developments in IPG fiber laser technology [C]//Proceeding of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, September 30-October 1, 2009, Dresden, Germany. [S.l.: s.n.], 2009.
- [7] Ma P F, Xiao H, Meng D R, et al. High power all-fiberized and narrow-bandwidth MOPA system by tandem pumping strategy for thermally induced mode instability suppression [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e57.
- [8] Wang M, Wang Z F, Liu L, et al. Effective suppression of stimulated Raman scattering in half 10 kW tandem pumping fiber lasers using chirped and tilted fiber Bragg gratings [J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 167-171.
- [9] Wang Z H, Yu W L, Tian J D, et al. 5.1 kW tandem-pumped fiber amplifier seeded by random fiber laser with high suppression of stimulated Raman scattering [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2021, 57(2): 6800109.
- [10] 高聪, 代江云, 李峰云, 等. 自研万瓦级同带泵浦掺镱石英玻璃光纤[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0315001.  
Gao C, Dai J Y, Li F Y, et al. Homemade 10-kW ytterbium-doped aluminophosphosilicate fiber for tandem pumping [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0315001.
- [11] 张磊, 楼风光, 王孟, 等. 同带泵浦的万瓦级三包层掺镱光纤[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1315001.  
Zhang L, Lou F G, Wang M, et al. Yb-doped triple-clad fiber for nearly 10 kW level tandem-pumped output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1315001.
- [12] 林傲祥, 湛欢, 彭昆, 等. 国产复合功能光纤实现万瓦激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(6): 060101.  
Lin A X, Zhan H, Peng K, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(6): 060101.
- [13] 代江云, 刘念, 李峰云, 等. (1+1)型泵浦增益一体化光纤实现同带泵浦万瓦激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1816001.  
Dai J Y, Liu N, Li F Y, et al. (1+1) pump gain integrated fiber realizes the output of 10000 watts laser pumped in the same band [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1816001.
- [14] 林傲祥, 肖起榕, 倪力, 等. 国产 YDF 有源光纤实现单纤 20 kW 激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0916003.  
Lin A X, Xiao Q R, Ni L, et al. Single fiber 20 kW laser output of domestic YDF active fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0916003.
- [15] 李峰云, 黎玥, 宋华青, 等. 全国产光纤材料器件实现高 SRS 抑制比 20.88 kW 输出[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2116002.  
Li F Y, Li Y, Song H Q, et al. National optical fiber material devices achieve high SRS suppression ratio of 20.88 kW output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2116002.
- [16] Seah C P, Lim W Y W, Chua S L. A 4 kW fiber amplifier with good beam quality employing confined-doped gain fiber [C]//Laser Congress 2018 (ASSL), November 4-8, 2018, Boston, Massachusetts. Washington, D.C.: OSA, 2018: AM2A.2.
- [17] Wu H S, Li R X, Xiao H, et al. High-power tandem-pumped fiber amplifier with beam quality maintenance enabled by the confined-doped fiber [J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31337-31347.
- [18] 吴函烁, 安毅, 肖虎, 等. 国产部分掺杂光纤实现 7 kW 高光束质量激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2416002.  
Wu H S, An Y, Xiao H, et al. Domestic partially doped fiber realizes 7 kW high beam quality laser output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2416002.
- [19] Shi C, Su R T, Zhang H W, et al. Experimental study of output characteristics of bi-directional pumping high power fiber amplifier in different pumping schemes [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1502910.
- [20] Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. Theoretical study of pump power distribution on modal instabilities in high power fiber amplifiers [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(2): 025002.
- [21] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, et al. All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [22] Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. More than 5 kW counter tandem pumped fiber amplifier with near single-mode beam quality [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108204.
- [23] 李瑞显, 吴函烁, 肖虎, 等. 双向同带泵浦光纤激光实现大于 6 kW 的近单模输出 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210822.  
Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. Bidirectional co band pumped fiber laser to achieve near single-mode output greater than 6 kW [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20210822.