

# 高功率光纤激光器中反向抽运结构对模式不稳定的抑制

李泽标<sup>1,2</sup>, 郭超<sup>1</sup>, 赵鹏飞<sup>1</sup>, 黄志华<sup>1</sup>, 向小雨<sup>1</sup>, 梁小宝<sup>1</sup>, 李成钰<sup>1\*</sup>, 林宏奂<sup>1</sup>,  
王建军<sup>1</sup>, 景峰<sup>1</sup>, 徐善辉<sup>2</sup>, 杨中民<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>华南理工大学光通信材料研究所, 广东 广州 510640

**摘要** 模式不稳定效应会影响高功率激光输出的光束质量,成为高功率光纤激光器定标放大过程中获得近衍射极限光斑的主要限制因素。基于模式耦合理论建立描述模式不稳定现象的半解析模型。理论模型的计算结果表明与正向抽运结构相比,反向抽运和双向抽运结构具有更高的模式不稳定阈值。通过实验对理论结果进行验证,发现反向抽运光纤激光器的模式不稳定阈值至少比正向抽运结构高50%。实验中搭建反向抽运光纤激光器,实现了2 kW窄线宽高光束质量激光输出。

**关键词** 激光器; 模式不稳定性; 光纤放大器和振荡器; 热效应; 耦合模理论

**中图分类号** TN243

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0801010

## Mode Instability Mitigation by Counter-Pumped Scheme in High Power Fiber Laser

Li Zebiao<sup>1,2</sup>, Guo Chao<sup>1</sup>, Zhao Pengfei<sup>1</sup>, Huang Zhihua<sup>1</sup>, Xiang Xiaoyu<sup>1</sup>, Liang Xiaobao<sup>1</sup>,  
Li Chengyu<sup>1</sup>, Lin Honghuan<sup>1</sup>, Wang Jianjun<sup>1</sup>, Jing Feng<sup>1</sup>, Xu Shanhui<sup>2</sup>, Yang Zhongmin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>Institute of Optical Communication Materials, South China University of Technology, Guangzhou,  
Guangdong 510640, China

**Abstract** Mode instability has become the major limitation for power scaling of fiber lasers with nearly diffraction-limited beam quality. Based on mode coupling theory, we establish a semi-analytical model to simulate mode instability effect. Compared with co-pumped fiber laser, counter-pumped and bi-pumped fiber lasers reveal mode instability threshold enhancement in our theoretical model. Compared with that of the co-pumped scheme, the experimental mode instability threshold of the counter-pumped fiber laser is enhanced by at least 50%. Moreover, we demonstrate a 2 kW high power narrow-linewidth counter-pumped fiber laser with high beam quality.

**Key words** lasers; mode instability; fiber amplifiers and oscillators; thermal effect; mode coupling theory

**OCIS codes** 140.6810; 190.3100; 060.2320

**收稿日期:** 2017-03-01; **收到修改稿日期:** 2017-03-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(11404305, 11474257, 11674103, 61635004, 61535014, 51132004, 51302086)、国家重点研究和发展项目(2016YFB0402204)、国家杰出青年科学基金(61325024)

**作者简介:** 李泽标(1993—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器和模式不稳定方面的研究。

E-mail: zebiaolee@163.com

**导师简介:** 杨中民(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事多组分玻璃、单频光纤激光器和光纤传感方面的研究。

E-mail: yangzm@scut.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: lichengyu0903@163.com

## 1 引 言

高功率光纤激光器由于其高光电转换效率、结构紧凑、高光束质量等优点,在工业加工领域逐步取代传统的气体激光器和固体激光器。得益于大模场光纤的研制和高亮度二极管激光器的发展,高功率光纤激光器功率已突破数千瓦甚至万瓦<sup>[1-6]</sup>。目前,高功率光纤激光器的发展主要受限于非线性效应,如受激布里渊散射、受激拉曼散射等,增大光纤模场面积可以有效抑制非线性效应。大模场光纤不仅支持单模运转,还支持多模运转。通过有效手段可以在大模场光纤激光器中保持单模运转,如注入种子源为单模激光和采用光纤弯曲选模等方法。然而,当大模场光纤激光器中的激光放大功率达到一定阈值时,光束质量会突然劣化,由单模劣化为高阶模,这就是模式不稳定效应<sup>[7]</sup>。近几年,研究者们针对模式不稳定效应建立了多种模型进行理论研究,同时提出了多种抑制方法<sup>[8-10]</sup>,但大多数抑制方法仅适用于百瓦量级的光纤激光器,未能拓展到千瓦量级。

本文基于耦合模理论建立了描述模式不稳定现象的半解析模型,理论结果表明,反向抽运结构具有更高的模式不稳定阈值。实验对比了正向和反向抽运的高功率光纤激光器中的模式不稳定效应,实验结果表明,反向抽运的光纤激光器具有更高的阈值,与理论结果相符。此外,实验搭建了 2 kW 窄线宽反向抽运光纤激光器,实现了高光束质量激光的稳定输出。

## 2 理论模型

根据实验观察,模式不稳定现象主要出现在 LP<sub>01</sub> 模转变为 LP<sub>11</sub> 模的过程中。因此,模式不稳定效应可以看作一个二波耦合的过程。基于耦合模理论建立半解析模型,耦合波方程如为<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial P_1}{\partial z} = -\chi_g P_1 P_2 + \Gamma_1 g P_1 \\ \frac{\partial P_2}{\partial z} = \chi_g P_1 P_2 + \Gamma_2 g P_2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $P_1$  和  $P_2$  分别为 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的功率; $\chi$  为耦合系数,表征两个模式之间的耦合强度; $g$  为激光增益; $\Gamma_1$  和  $\Gamma_2$  分别为 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的功率重叠因子。

基于耦合模理论建立的半解析模型计算并对比正向、反向和双向抽运的光纤激光器的模式不稳定阈值,数据如表 1 所示。目前 Nufern 大模场光纤应用广泛,本文采用包层直径为 400  $\mu\text{m}$  的光纤。表 1 中对比了 20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 、25  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  和 30  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  的光纤激光器在正向、反向和双向抽运下的模式不稳定阈值,结果显示反向抽运的光纤激光器阈值较高,即对模式不稳定效应有抑制作用。抽运结构对模式不稳定效应的作用主要是改变增益饱和和效应的程度。反向抽运光纤激光器的增益饱和效应更强,因此 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的耦合系数减小,进一步提高了模式不稳定阈值。

表 1 模式不稳定阈值计算结果

Table 1 Calculation results of mode instability threshold

Fiber	Length /m	Co-pump /W	Counter-pump /W	Bi-pump /W
20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	15	1853	4716	3195
25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	12	1402	3285	2440
30 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$	8	1185	2356	1903

## 3 实验装置

实验中采用主振荡功率放大(MOPA)构型实现激光放大。如图 1(a)所示,半导体激光器由集束器注入 976 nm 抽运光到腔内。谐振腔由高反光栅和输出耦合光栅组成,光栅中心波长位于 1064 nm,增益光纤为 10  $\mu\text{m}/130 \mu\text{m}$  光纤,名义吸收系数在 976 nm 处为 5 dB/m,实验中采用的光纤长度为 4 m。采用 10  $\mu\text{m}/130 \mu\text{m}$  光纤,既可以保证较大功率输出,又可以仅支持单模运转,确保了种子光注入放大器的模式纯度。谐振腔后连接包层光剥离器,主要剥离未吸收的抽运光。为了与放大器光纤的模场相匹配,连接模场适配器,这就是振荡器的结构。

正向抽运放大器的结构为数十只半导体分别由集束器的 6 个抽运臂注入,抽运总功率可达 2.3 kW,中心波长位于 976 nm,如图 1(b)所示。集束器的输出信号纤连接 20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  掺镱光纤,其 976 nm 峰的吸收系数为 1.2 dB/m,掺镱光纤长度为 13 m。光纤纤芯和包层的数值孔径分别为 0.065 和 0.46。20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  大模场光纤同时支持 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模传输。未吸收的抽运光和泄漏到包层的信号光由实验室自主研发的包层光剥离器剥除,剥离功率最高可达 500 W。放大器末端接上镀膜的石英端帽,可有效防止高功率激光的端面反射,避免引起烧毁。

反向抽运放大器结构为正向抽运放大器结构的倒置,如图 1(c)所示。其中,DL 表示二极管激光器, MPC 表示集束器,HR 表示高反光栅,OC 表示输出耦合光栅,YDF 表示掺镱光纤,CPS 表示包层光剥离器,MFA 表示模场适配器,QBH 表示输出石英端帽。反向抽运放大器中,在石英端帽输出前加入一只包层光剥离器,可以剥离光纤包层中泄漏的信号光,保证输出激光的高光束质量。

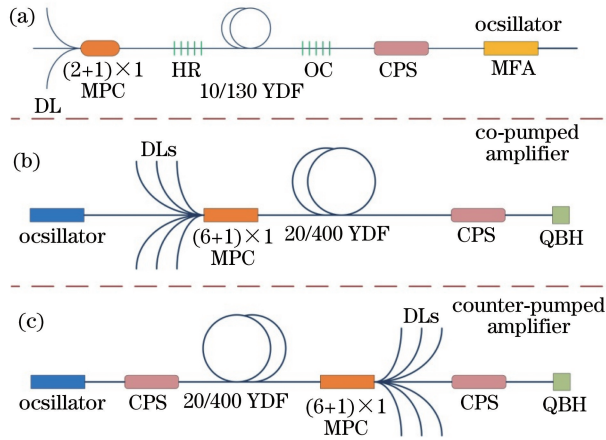


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup diagram

### 4 实验结果与分析

振荡器输出激光中心波长位于 1064 nm,半峰全宽为 0.05 nm,输出功率为 20 W。为了对比正向和反向抽运结构对模式不稳定效应的作用,实验中主要关注光束质量的变化。有多种方法可以测试模式不稳定现象,光束质量测量是其中一种简便有效的方法。当光束质量因子  $M^2$  出现陡变时,说明模式不稳定效应发生<sup>[7]</sup>。如图 2 所示,实验中测试了正向抽运和反向抽运下激光放大过程的光束质量。正向抽运情况下,放大功率较低,输出光斑为近衍射极限光斑,光束质量较好。当放大功率达到 1.3 kW 时,输出光斑出现跳变和劣化现象,光束质量因子  $M^2$  发生陡变,表明模式不稳定效应发生。反向抽运情况下,输出光斑一直保持单模运转,当放大功率达到 2 kW 时,光束质量依然较好,如图 2 中插图所示。20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  放大器中,相比正向抽运结构,反向抽运光纤激光器具有更高的模式不稳定阈值,这与理论结果相符。

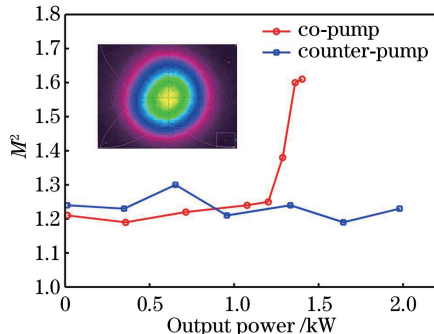


图 2 正向和反向抽运激光器的光束质量因子随功率的变化

Fig. 2  $M^2$  variation of co-pumped and counter-pumped lasers with output power

除了测试正向和反向抽运光纤激光器的光束质量,实验还测得输出激光光谱。图3所示为输出功率为2 kW时正向和反向抽运激光的光谱。激光中心波长均位于1064 nm,正向抽运激光器的激光光谱的半峰全宽为0.68 nm,反向抽运激光器的激光光谱的半峰全宽为0.12 nm。四波混频效应不仅引起主峰的光谱展宽,还会诱导主峰附近的峰增长。由图3可知,正向抽运下主峰附近有两级的峰,而反向抽运仅有一级的峰,而且反向抽运下的峰值更低。另外,正向抽运下,2 kW输出光谱的拉曼峰与主峰相差17 dB,而反向抽运下的拉曼抑制比可达37 dB。实验中,反向抽运光纤激光器的拉曼抑制比提高了20 dB。图3中正向和反向抽运下的激光光谱均没有放大自发辐射峰的出现。光强诱导折射率调制型非线性效应的非线性相移量正比于 $B$ 积分,而非弹性散射效应的斯托克斯光增益正比于 $\exp B$ 。由于非线性效应的强度与 $B$ 积分正相关,反向抽运下 $B$ 积分数值更小,非线性效应更弱。因此,与正向抽运结构相比,反向抽运结构可以有效抑制四波混频效应和受激拉曼散射效应。

反向抽运光纤激光器中,激光放大功率随抽运功率的变化如图4所示。由图4可知,激光的光-光转换效率达到86%。为了验证反向光纤激光器的稳定性工作,激光器在满功率时运行1 h,其功率随时间的变化如图4插图所示。结果表明,反向抽运光纤激光器能稳定运行,功率波动小于2%。功率的波动不仅与激光器自身相关,还与环境条件相关,如水冷板的水温变化。因此,此2 kW反向抽运光纤激光器可以长时间稳定运行。

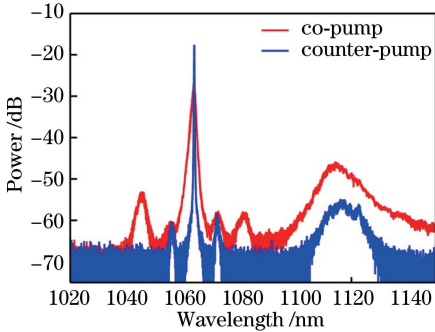


图3 输出功率为2 kW时正向和反向抽运激光器的光谱  
Fig. 3 Spectra of co-pumped and counter-pumped lasers with the output power of 2 kW

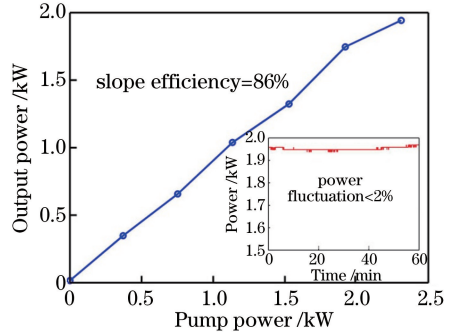


图4 反向抽运激光器激光放大功率与抽运功率的关系  
(插图为1 h内输出功率随时间的变化曲线)  
Fig. 4 Relationship between the laser amplification power and the pump power of the counter-pumped laser  
(the inset shows variation of output power with time within one hour)

## 5 结 论

基于耦合模理论,建立了描述模式不稳定现象的半解析模型。通过对比 Nufern 包层 400  $\mu\text{m}$  系列光纤在正向、反向和双向抽运下的模式不稳定阈值,发现反向和双向抽运的光纤激光器具有更高的阈值。实验中采用 20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  正向和反向抽运光纤激光器进行验证,结果表明,反向抽运光纤激光器的模式不稳定阈值至少比正向抽运结构高 50%,这与理论结果相符。实验结果进一步表明,反向抽运结构可抑制四波混频效应和受激拉曼散射效应,同时实现窄线宽激光输出。由于实验中抽运功率受限,2 kW 反向抽运光纤激光器的模式不稳定阈值依然有待验证,双向抽运结构对模式不稳定的抑制作用还有待评估。实验搭建了 2 kW 窄线宽高光束质量光纤激光器,实现了线宽 0.12 nm 的近衍射极限激光输出,激光器能够高效稳定运行,此反向抽运光纤激光器有望应用于光谱合束以实现更高功率的定标放大。

## 参 考 文 献

- [1] Xiao Q, Yan P, Li D, *et al.* Bidirectional pumped high power Raman fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6758-6768.
- [2] Yu H, Zhang H, Lü H, *et al.* 3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser[J].

- Applied Optics, 2015, 54(14): 4556-4560.
- [3] Huang Z, Liang X, Li C, *et al.* Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators[J]. Applied Optics, 2016, 55(2): 297-302.
- [4] Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology[C]. 5<sup>th</sup> International Workshop on Fiber Lasers, 2009.
- [5] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanqing, *et al.* 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0901009.  
马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901009.
- [6] Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Tao Rumao, *et al.* Laser diode pumped 4.1 kW all-fiber laser with master oscillator power amplification configuration[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0502002.  
王小林, 张汉伟, 陶汝茂, 等. LD 抽运主振荡功率放大结构 4.1 kW 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502002.
- [7] Tünnermann A, Jauregui C, Wirth C, *et al.* Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [8] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [9] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, *et al.* Thermally induced mode coupling in rare-earth doped fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2382-2384.
- [10] Jauregui C, Otto H, Stutzki F, *et al.* Passive mitigation strategies for mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 19375-19386.
- [11] Li Z B, Huang Z H, Lin H H, *et al.* Linear inner cladding fiber amplifier suppressing mode instability[C]. SPIE, 2016, 10016: 100160T.