

# 高功率全光纤结构主振荡功率放大器中模式不稳定现象的实验研究\*

陶汝茂 周朴 王小林<sup>†</sup> 司磊 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2013年9月22日收到; 2013年12月2日收到修改稿)

模式不稳定指高功率光纤激光随着输出功率提升发生的模式突变, 会导致光束质量下降, 限制了衍射极限光束质量光纤激光输出功率的提升. 本文研究了全光纤结构主振荡功率放大器中的模式不稳定现象. 结果表明, 全光纤结构主振荡功率放大器中的模式不稳定现象会导致放大器斜率效率下降; 理论计算表明, 对于20/400阶跃折射率大模场双包层掺镱光纤, 注入种子功率在百瓦左右时, 模式不稳定发生的阈值功率在1 kW左右; 热效应是模式不稳定现象发生的根源.

**关键词:** 模式不稳定, 光纤放大器, 量子亏损, 热效应

**PACS:** 52.35.Mw, 42.55.Wd, 42.55.Xi

**DOI:** 10.7498/aps.63.085202

## 1 引言

由于光纤的特殊波导结构, 光纤激光具有高亮度、高光束质量、热管理方便等优点. 近年来, 随着高亮度半导体抽运技术和双包层光纤制造工艺的快速发展, 光纤激光输出功率迅速提升, 单纤单模输出功率已达到万瓦量级<sup>[1-4]</sup>. 然而, 光纤的特殊波导结构使激光能量都被约束在微米级的光纤纤芯内, 随着光纤激光功率的不断提升, 纤芯内将形成极高的能量密度, 引起各种有害的非线性效应, 如受激布里渊散射 (stimulated brillion scattering, SBS)、受激拉曼散射 (stimulated raman scattering, SRS) 等. 增大光纤纤芯尺寸、降低纤芯内的功率密度是避免非线性效应产生的有效方法之一<sup>[5]</sup>. 但是, 增大光纤纤芯尺寸不可避免地会使光纤支持多个模式. 如果增益光纤支持多个模式, 在高功率输出时会产生另一种非线性效应——模式不稳定现象: 输出功率达到某个阈值功率后, 光纤激光的输出模式由稳定的基模变为基模和高阶模相对成分

随时间迅速变化的非稳态模式<sup>[5]</sup>. 模式不稳定会导致激光光束质量急剧退化, 严重限制单模光纤激光的应用, 已经成为衍射极限光束质量大模场面积掺镱光纤激光功率提升的最大限制因素之一, 近年来引起研究人员的广泛关注<sup>[5-35]</sup>.

自2010年德国耶拿大学的研究人员首次报道模式不稳定现象以来<sup>[8]</sup>, 各国研究人员开展了大量理论和实验研究, 包括德国耶拿大学、汉诺威激光中心、丹麦科技大学、美国密歇根大学、克莱姆森大学、美国空军实验室、Fibertek、Nufern、AS-Photonics公司等<sup>[9-35]</sup>, 研究主要集中于空间耦合结构主振荡功率放大器(MOPA)高功率光纤激光器. 然而空间耦合结构MOPA中抽运光注入和激光输出需由二色镜等分立光学元件实现, 存在体积庞大、热管理困难、抗干扰能力差等不足, 实际应用受到了极大的限制. 全光纤激光器以抽运合束器替代二色镜, 有效克服了空间耦合结构光纤激光器的不足, 使系统结构更加紧凑、转换效率更高、可靠性更好, 引起了国内外的广泛关注. 然而, 全光纤结

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11274386)、国防科技大学优秀研究生创新项目 (批准号: B120704) 和湖南省研究生科研创新项目 (批准号: CX2012B035) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: chinawxllin@163.com

构MOPA中的模式不稳定现象目前尚未有公开报道. 本文从实验上详细研究了全光纤结构MOPA中的模式不稳定现象, 并对模式不稳定现象产生的原因进行了初步探索, 并进行了一些理论分析.

## 2 实验结构

实验结构如图1所示, 种子激光和抽运激光经 $(6+1) \times 1$ 合束器后, 进入纤芯 $20 \mu\text{m}$ , 包层 $400 \mu\text{m}$ 的 $20 \text{ m}$ 大模场面积双包层掺镱光纤(纤芯数值孔径为 $0.072$ ), 放大后的激光经端帽后准直输出. 输出激光经高反镜后分成两部分: 反射光进入功率计, 用于测试放大器总功率; 透射部分经汇聚透镜聚焦到光电探测器靶面, 用于检测输出功率的时域特性. 模式不稳定引起的光斑变化在 $\text{kHz}$ 量级, 由于光斑分析仪帧频远低于 $\text{kHz}$ , 每一幅光斑图都是大量高速波动光斑的叠加平均, 无法通过对光斑数据的采集, 分析模式不稳定现象<sup>[9]</sup>, 而光电探测器响应速度快, 可以利用光电探测器采集信号, 研究模式不稳定现象. 实验中所用光纤 $V = \pi d_{\text{core}} NA / \lambda$ 为 $4.25$ , 纤芯除支持基模 $LP_{01}$ 外, 还支持 $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ 和 $LP_{02}$ 等高阶模式, 为了保

证单模输出, 采用弯曲缠绕法, 将光纤以直径 $8 \text{ cm}$ 盘绕, 使高阶模式激发到包层中, 通过包层模剥除器滤除. 因此, 全光纤MOPA中的包层模剥除器, 不仅可以将残余的抽运光滤除, 还可以将高阶模剥除, 获得高光束质量输出光束. 出现模式不稳定现象后, 能量会在基模和高阶模之间快速、往复转移: 当信号光能量从基模转移到高阶模时, 包层模剥除器会将高阶模信号光剥除, 从包层模剥除器处倾泻的功率增加, 激光器输出功率降低; 当信号光能量从高阶模转移到基模时, 基模信号光不会剥除, 从包层模剥除器处倾泻的功率不变, 激光器输出功率正常. 因此, 发生模式不稳定现象后, 从包层模剥除器处倾泻的光能量和放大器的输出功率会出现快速振荡, 利用光电探测器同时探测就可以探测到快速振荡的信号, 判断模式不稳定是否发生并研究模式不稳定现象的时域和频域特性. 实验中, 光电探测器1用于探测包层模剥除器倾泻的功率, 光电探测器2用于探测放大器的输出功率. 基于前述分析, 当模式不稳定现象发生后, 两个光电探测器会测到起伏的信号, 且起伏信号是反相的关系: 光电探测器1起伏最大时, 光电探测器2起伏最小; 光电探测器1起伏最小时, 光电探测器2起伏最大.

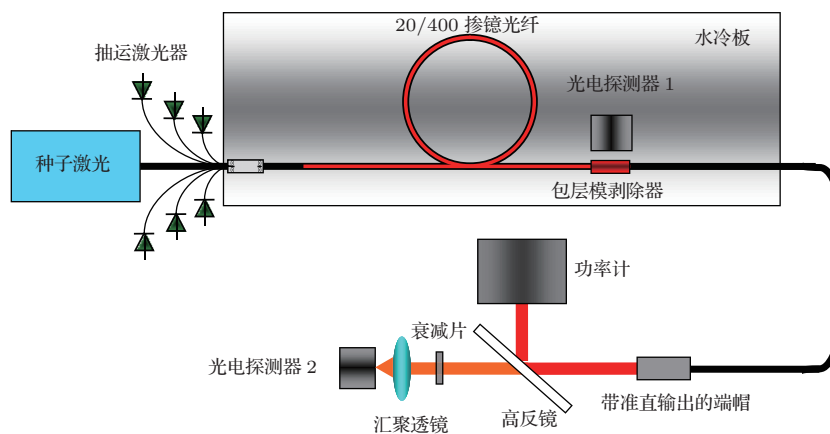


图1 实验结构图

## 3 实验结果与分析

当种子激光注入放大级的功率为 $91 \text{ W}$ 时, 放大器的输出功率曲线、探测器时域信号如图4所示. 由图2(a)看出, 当抽运光功率从 $921 \text{ W}$ 增加到 $980 \text{ W}$ 时, 放大器输出激光功率从 $737 \text{ W}$ 增加到 $746 \text{ W}$ , 斜率效率明显下降. 光电探测器探测的功

率信号如图2(b)所示. 由图2(b)可以看出, 包层模剥除器倾泻功率和输出功率出现起伏且起伏正好相反, 说明模式不稳定已经发生. 由于出现了模式不稳定现象, 输出激光能量在基模和高阶模之间不断往复转移, 虽然放大器放大效率不受模式不稳定影响, 但激光中的高阶模会被包层模剥除器倾泻, 由于功率计有一定的积分时间, 长时间平均的效果会使输出的激光功率小于信号光从放大器提

取的实际功率, 放大器斜率效率下降. 输出功率大于 685 W 后, 模式不稳定现象开始显现, 输出激光斜率效率开始下降, 另一方面, 随着输出功率不断增加, 更多、更高阶的高阶模开始出现, 输出激光斜率效率明显下降, 这时包层模剥除器会倾泻更多信号激光. 因此, 与空间结构中的模式不稳定现象不同, 全光纤结构 MOPA 中的模式不稳定现象会造成放大器斜率效率下降, 最高输出功率受限, 甚至对放大器结构造成破坏.

不同输出功率时, 输出激光功率的时域信号如

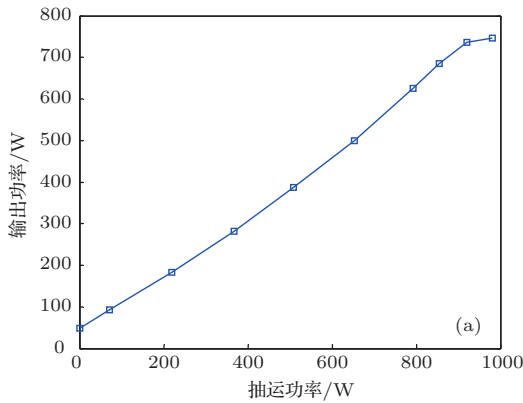


图 3 所示. 从图中可以看出, 输出功率有 ms 量级的起伏, 起伏的幅度和高频分量随着输出功率的增加而增大, 在输出 746 W 激光时, 起伏达到了 8%.

图 4 给出了不同输出功率时功率起伏的频率分布. 从图 4 中可以看出, 随着输出功率的增加, 功率起伏的高频分量不断增加. 大量研究表明模式不稳定现象与掺杂光纤中量子亏损引起的热过程有关, 因此存在频率上限:

$$v_{\text{lim}} = \frac{4\kappa}{C\rho D^2},$$

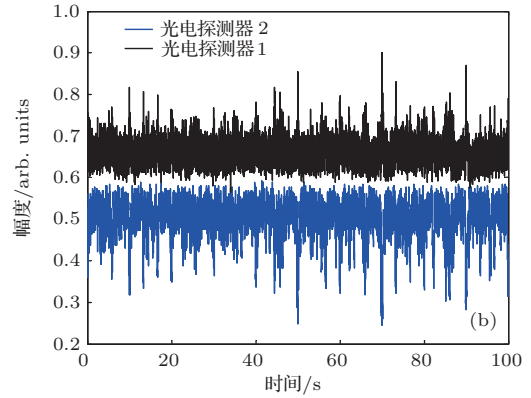


图 2 (网刊彩色) 全光纤结构 MOPA 激光中的模式不稳定现象 (a) 功率曲线; (b) 时域信号

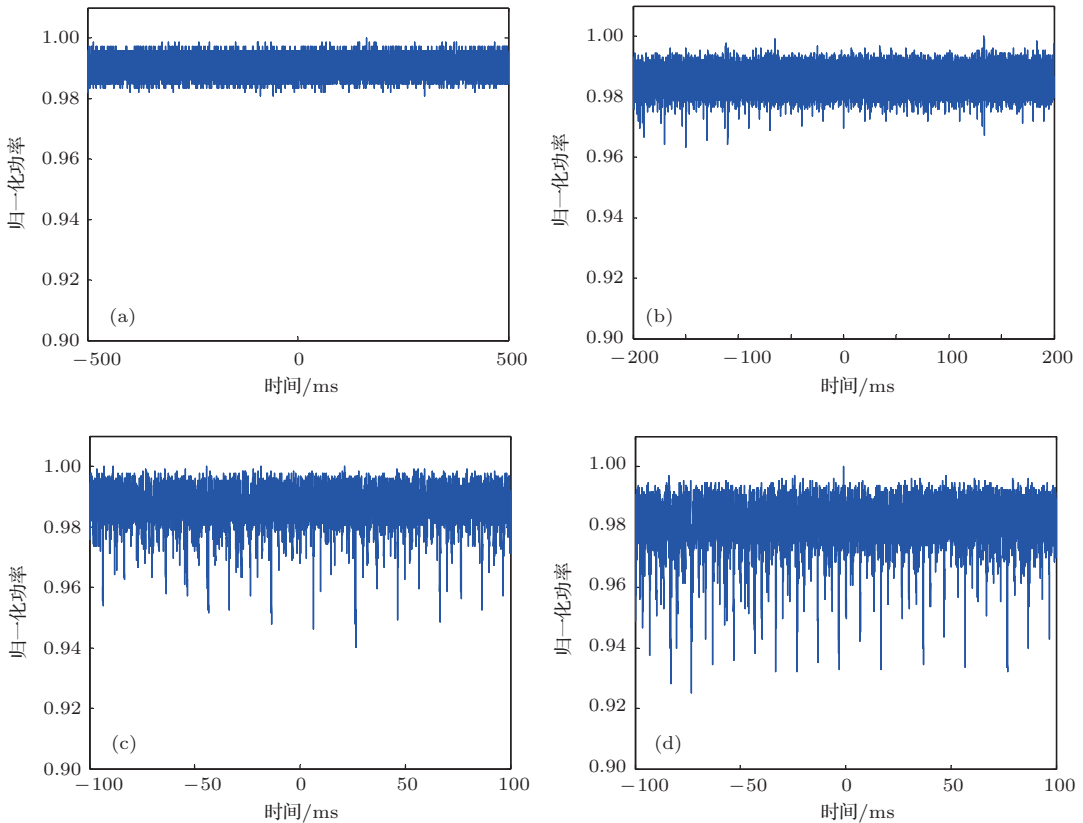


图 3 输出功率时域信号 (a) 694 W, 6.7 A; (b) 716 W, 6.9 A; (c) 737 W, 7.2 A; (d) 746 W, 7.5 A

其中  $\kappa$  为热导率,  $C$  为比热,  $\rho$  为密度,  $D$  为模场直径. 对于熔融石英,  $\kappa = 1.38 \text{ W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $C = 703 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\rho = 2201 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 则频率上限约为 11 kHz, 与实验测得数据符合, 可见热效应是出现模式不稳定现象的根源.

基于 Hansen 等 [20,21] 的理论模型, 计算了不同纤芯数值孔径时模式不稳定现象出现的阈值功率, 计算结果如图 5 所示. 计算表明, 采用小数值孔径的光纤可以获得更高的模式不稳定功率阈值, 同时, 对于目前的商用 20/400 大模场面积掺镜光纤, 种子功率百瓦左右时, 模式不稳定现象出现的阈值功率在 1 kW 左右.

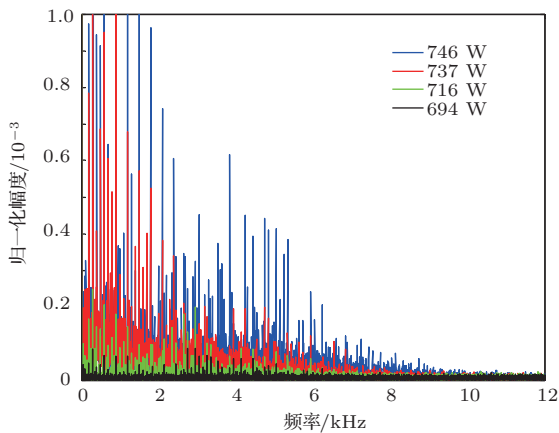


图4 (网刊彩色) 输出功率起伏的频率分布

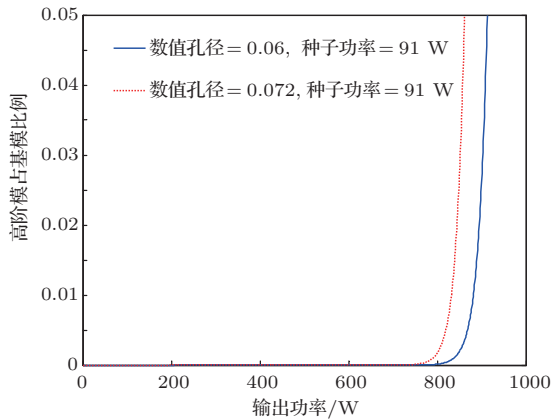


图5 高阶模成分随输出功率的变化

根据上述分析, 我们利用纤芯数值孔径为 0.06 的 20/400 掺杂光纤搭建放大器, 实验结果如图 6 所示, 其中种子功率为 78 W. 在抽运功率为 1136 W 时, 获得了 865 W 的输出功率, 没有观察到模式不稳定现象的发生. 可见纤芯数值孔径对模式不稳定现象出现的功率阈值有影响.

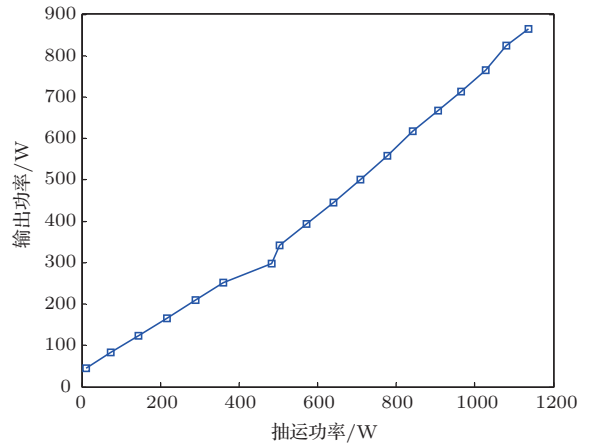


图6 全光纤结构 MOPA 激光中的模式不稳定性

## 4 结 论

模式不稳定现象已经成为限制高亮度、高功率光纤激光功率提升的最大限制因素之一. 本文研究了全光纤结构 MOPA 光纤激光中的模式不稳定现象. 实验研究表明, 与空间结构中的模式不稳定现象不同, 全光纤结构 MOPA 光纤激光中的模式不稳定现象会造成放大器斜率效率下降, 最高输出功率受限, 甚至对放大器结构造成破坏; 当注入种子功率在百瓦左右时, 目前商用的 20/400 光纤的模式不稳定现象出现的功率阈值在 1 kW 左右; 热效应是出现模式不稳定现象的根源; 减小掺杂光纤的纤芯数值孔径, 可以提高模式不稳定现象的功率阈值. 本文研究结果可以为高能光纤激光系统的设计提供一定的参考.

## 参考文献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** B63
- [2] Zhu J J, Du W B, Zhou P, et al. 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064209 (in Chinese)[朱家健, 杜文博, 周朴等 2012 物理学报 **61** 064209]
- [3] Yang W Q, Hou J, Song R, et al. 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 84210 (in Chinese)[杨未强, 侯静, 宋锐等 2011 物理学报 **60** 84210]
- [4] Xiao H, Wu W M, Xu J M, et al. 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114208
- [5] Jauregui C, Eidam T, Otto H J, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 12912
- [6] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. 2011 *Opt. Express* **19** 13218
- [7] Engin D, Lu W, Verdun H, Gupta S 2013 *Proc. of SPIE* **8733** 87330J
- [8] Eidam T, Hanf S, Seise E, et al. 2010 *Opt. Lett.* **35** 94

- [9] Stutzki F, Otto H J, Jansen F, et al. 2011 *Opt. Lett.* **36** 4572
- [10] Otto H-J, Jauregui C, Stutzki F 2013 *Opt. Express* **21** 17285
- [11] Laurila M, Jørgensen M M, Hansen K R, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 5742
- [12] Jansen F, Stutzki F, Otto H J, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 3997
- [13] Ward B, Robin C, Dajani I, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 11407
- [14] Otto H-J, Stutzki F, Jansen F, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 15710
- [15] Haarlammert N, Vries O, Liem A, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 13274
- [16] Jauregui C, Eidam T, Limpert J, et al. 2011 *Opt. Express* **19** 3258
- [17] Smith A V, Smith J J 2011 *Opt. Express* **19** 10180
- [18] Smith A V, Smith J J 2013 *Opt. Express* **21** 2606
- [19] Smith A V, Smith J J 2012 *Opt. Express* **20** 24545
- [20] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. 2012 *Opt. Lett.* **37** 2382
- [21] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. 2013 *Opt. Express* **21** 1944
- [22] Dong L 2013 *Opt. Express* **21** 2642
- [23] Hu I N, Zhu C, Zhang C, et al. 2013 *Proc. SPIE* **8601** 860109
- [24] Jauregui C, Otto H J, Jansen F, et al. 2013 *Proc. SPIE* **8601** 86010F
- [25] Jauregui C, Otto H J, Stutzki F, et al. 2013 *Opt. Express* **21** 19375
- [26] Ward B 2013 *Opt. Express* **21** 12053
- [27] Naderi S, Dajani I, Madden T, et al. 2013 *Opt. Express* **21** 16111
- [28] Wirth C, Schreiber T, Rekas M, et al. 2010 *Proc. SPIE* **7580** 75801H-6
- [29] Schmidt O, Rekas M, Wirth C, et al. 2011 *Opt. Express* **19** 4421
- [30] Eidam T, Hädrich S, Jansen F, et al. 2011 *Opt. Express* **19** 8656
- [31] Stutzki F, Jansen F, Eidam T, et al. 2011 *Opt. Lett.* **36** 689
- [32] Jørgensen M M, Laurila M, Noordegraaf D, et al. 2013 *Proc. SPIE* **8601** 86010U
- [33] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. 2011 *Opt. Lett.* **36** 3118
- [34] Jocher C, Eidam T, Hädrich S, et al. 2013 *Proc. SPIE* **8601** 86011F
- [35] Karow M, Tünnermann H, Neumann J, et al. 2012 *Opt. Lett.* **37** 4242

# Experimental study on mode instability in high power all-fiber master oscillator power amplifier fiber lasers\*

Tao Ru-Mao   Zhou Pu   Wang Xiao-Lin<sup>†</sup>   Si Lei   Liu Ze-Jin

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

( Received 22 September 2013; revised manuscript received 2 December 2013 )

## Abstract

Mode instability (MI) is an abrupt mode change when the average output power increases above a certain threshold power, which results in degrading beam quality and restricting the enhancement of power output for diffraction-limited high power fiber laser. The experimental study on MI in all-fiberized master oscillator power amplifier (MOPA) is presented in detail for the first time. It is revealed that MI in all-fiberized MOPA results in reducing the slope efficiency. The theoretical threshold power of MI for 20/400 step-index large-mode-area double-cladding Yb-doped fiber is about 1 kW and MI is rooted mainly from the thermal effect.

**Keywords:** mode instability, fiber amplifier, quantum defect, thermal effect

**PACS:** 52.35.Mw, 42.55.Wd, 42.55.Xi

**DOI:** [10.7498/aps.63.085202](https://doi.org/10.7498/aps.63.085202)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11274386), the Innovation Foundation for Excellent Graduates in National University of Defense Technology, China (Grant No. B120704), and the Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate, China (Grant No. CX2012B035).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [chinawxllin@163.com](mailto:chinawxllin@163.com)