

少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究

罗雪雪 陶汝茂 刘志巍 史尘 张汉伟 王小林 周朴 许晓军

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier

Luo Xue-Xue Tao Ru-Mao Liu Zhi-Wei Shi Chen Zhang Han-Wei Wang Xiao-Lin Zhou Pu Xu Xiao-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 144203 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180140

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180140>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[国产光纤实现同带抽运 3000 W 激光输出](#)

3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber

物理学报.2018, 67(2): 024205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171676>

[Nd³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤的发光与激光特性研究](#)

Stimulated emission and laser behaviors of Nd³⁺/Yb³⁺ Co-doped phosphate glass fiber

物理学报.2017, 66(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164204>

[单模热致超大模场掺镱光纤放大器的数值研究](#)

Modeling the single-mode thermally guiding very-large-mode-area Yb-doped fiber amplifier

物理学报.2017, 66(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064201>

[基于压电陶瓷与光纤电光调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究](#)

Experimental researches of laser phase lock with dual-servo feedbacks based on the piezoelectric transducer and fiber electrooptic phase modulator

物理学报.2016, 65(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234204>

[掺铒光纤环形激光器中饱和吸收光栅瞬态特性引发跳模的实验研究](#)

Experimental study on mode hopping triggered by transient characteristics of saturable absorber gratings in Er-doped fiber ring lasers

物理学报.2014, 63(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134206>

少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究*

罗雪雪¹⁾ 陶汝茂¹⁾²⁾³⁾ 刘志巍^{4)†} 史尘¹⁾²⁾³⁾ 张汉伟¹⁾²⁾³⁾
 王小林^{1)2)3)‡} 周朴¹⁾²⁾³⁾ 许晓军¹⁾²⁾³⁾

1) (国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

2) (国防科技大学, 高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

3) (大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 长沙 410073)

4) (中国电子科技集团有限公司第二十七研究所, 郑州 450047)

(2018年1月19日收到; 2018年3月14日收到修改稿)

模式不稳定发现于2010年, 是影响高功率光纤激光器功率提升的重要限制因素. 当前模式不稳定主要有两类, 一类是动态模式不稳定, 一类是准静态模式不稳定. 本文研究了纤芯/内包层直径为25 μm /400 μm 掺镜双包层光纤后向抽运放大器中的模式不稳定效应. 通过对功率、光束质量和时域数据的分析, 发现在该放大器中出现了准静态模式不稳定的现象, 随着抽运功率的增加, 放大器输出光束质量逐步退化, 而时域上没有发现明显的动态模式不稳定特性. 实验上对不同种子功率下放放大器的输出特性进行研究, 结果表明, 通过提高种子激光功率可以较为有效地提高模式不稳定阈值, 在种子功率为528 W时, 当输出功率大于3000 W, 输出激光效率没有明显下降.

关键词: 少模光纤, 模式不稳定, 光束质量, 准静态

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Jf, 52.35.Mw

DOI: 10.7498/aps.67.20180140

1 引言

自2010年以来, 模式不稳定效应(mode instability, MI)已经成为限制宽谱光纤激光器功率提升的重要因素之一^[1-4]. 在MI出现之前, 由于光纤中功率密度的不断增加, 进而引起如受激拉曼散射、受激布里渊散射等非线性效应^[5], 严重影响光纤激光器的功率提升和性能稳定性. 大模场直径光纤的出现一定程度上减轻了非线性效应的影响, 但模场直径越大, 光纤中支持的传导模式越多, 导致光纤中易于发生MI, 在不控制热负载的情况下减短光纤长度将进一步降低MI阈值功率^[6,7]. 实验表明, 当输出功率达到模式不稳定阈值时, 光束质量突然退化^[8-10], 采用包层光滤除手段后, 输

出效率降低, 也会造成一定程度的功率下降^[11-14], 在时域上由于模式间的动态能量交换还能观察到信号光的振幅起伏^[15], 严重阻碍了高功率光纤激光器功率的进一步提升.

对于MI产生的机理几乎都认为与长周期折射率光栅相关, 德国耶拿大学、克莱姆森大学等科研机构的研究人员在建立模式不稳定理论模型的过程中指出^[16-21], 光纤中的基模与激发的高阶模光场间相互干涉, 干涉光场对抽运光进行提取引起纤芯内温度的周期性分布, 进而由热光效应的影响产生折射率光栅, 光栅与干涉光场间存在某种原因导致的相移, 两者作用后能量将在基模与高阶模之间动态转换. 2016年, 美国空军实验室的Ward^[22]和丹麦科技大学的Lægsgaard^[23]分别理论预测了准静态的模式不稳定效应. 与动态MI不同的是, 准

* 国家自然科学基金(批准号: 61735007, 61505260)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzw1033@163.com

‡ 通信作者. E-mail: chinawxllin@163.com

静态MI在特定时间尺度上只有基模单向传递能量至高阶模,且在光束质量退化严重时时域上观测不到起伏^[10].他们认为,相移产生的原因是光纤中逐渐加强的光子暗化效应^[24],由于该效应,光纤中的热分布并不会随着光场强度的变化即时改变,这就导致能量耦合过程发生在分钟乃至小时的时间尺度上,表现出一种伪稳态传递现象.

2017年,本课题组^[25]在高功率双包层掺镱光纤振荡器的实验中观察到了准静态的模式不稳定效应.当输出功率超过1.64 kW时,输出功率增长变慢,在对光斑形态的监测中发现了由LP₀₁模向高阶模退化的现象,时域上也并未出现如动态MI的振荡起伏.对比而言,通常激光器采用的近单模光纤支持的模式数量少,输出的激光光束质量较好,而实验中采用的增益光纤纤芯为20 μm,即可允许少数高阶模传导,这是观察到准静态MI的原因之一.鉴于目前对大纤芯直径光纤中的模式不稳定效应实验研究较少,之前的报道未对光束质量等进行详细研究^[25],本文从纤芯直径为25 μm的少模光纤(支持4—5个模式)放大器出发,详细地从功率、时域、光束质量等方面对高功率光纤放大器中的准静态模式不稳定效应进行研究.

2 实验结构

实验结构如图1所示,整个实验系统采用非保偏主振荡功率放大结构.振荡器中,采用9 × 1的功率合束器将9个中心波长为976 nm的光纤耦合半导体激光器(laser diode, LD)合为一束注入到谐振腔中.谐振腔由高反光栅(high reflector fiber Bragg gratings, HR-FBG)、增益光

纤(large mode area ytterbium-doped fiber, LMA-YDF)和低反射的输出耦合光栅(output coupler fiber Bragg gratings, OC-FBG)构成.其中HR-FBG反射率为99%,OC-FBG反射率为10%,中心波长在1080 nm,增益光纤纤芯、包层直径分别为20和400 μm.振荡器输出激光经过两段纤芯直径分别为20和25 μm的传能光纤(GDF)制作的包层光滤除(cladding light stripper, CLS)后,注入放大器中.其中第二段CLS上的20—25 μm光纤熔接点,存在一定的纤芯尺寸失配.放大器采用后向抽运结构,通过(6 + 1) × 1的后向合束器分别将抽运光和信号光注入到双包层增益光纤中.双包层掺镱光纤的纤芯、内包层直径分别为25和400 μm,在976 nm处包层吸收系数约为1.28 dB/m,总长度约13 m.放大器中采用976 nm稳波长的LD,合束器单个抽运臂的注入功率大于600 W,总抽运功率可达3 kW以上.合束器信号输入尾纤纤芯/内包层直径为25 μm/400 μm的光纤,输出尾纤为纤芯/内包层直径25 μm/250 μm的光纤,抽运臂纤芯尺寸为220 μm,内包层尺寸为242 μm.在合束器输出端同样接入一段传能光纤进行包层光滤除,与光纤输入臂尺寸为25 μm/400 μm的端帽(QBH)相匹配,以保证高质量激光的输出.

在实验中,种子注入的输出功率可以在30—703 W范围内连续可调,光束质量在1.2左右.种子激光经过放大器后,由于包层光滤除的影响,使得实际输出功率小于种子初始功率,如在种子初始功率690 W时,输出功率528 W;而且,由于熔点失配,在没有抽运光注入时,放大器输出光束质量在1.5左右.

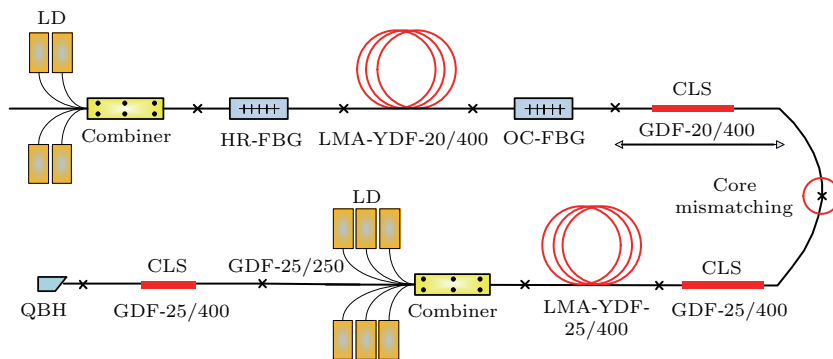


图1 后向抽运结构的少模光纤放大器

Fig. 1. Few-mode fiber amplifier using counter-pump configuration.

3 实验结果与分析

为了研究光纤放大器中的模式不稳定效应, 首先测量了在不同种子激光注入功率(86, 234, 381 W和528 W)下放大器输出激光的功率变化, 如图2所示. 未抽运经放大器输出的种子激光从86 W增加至528 W时, 放大器输出功率也呈线性增加, 如在抽运功率1093 W时, 86 W种子激光的输出功率为1030 W, 而528 W种子光对应的输出值为1340 W. 从图2中可以看到, 对于不同大小的种子光功率, 当抽运功率增加到某一定值时, 功率增长缓慢, 光-光效率下降. 比如, 在种子功率为86 W时, 当抽运功率大于2030 W, 输出效率开始明显下降, 由87%降至29%. 种子注入功率越高, 效率下降点对应的输出功率越高. 根据对全光纤模式不稳定的研究分析, 效率下降表示可能出现了较多的高阶模式^[12,15].

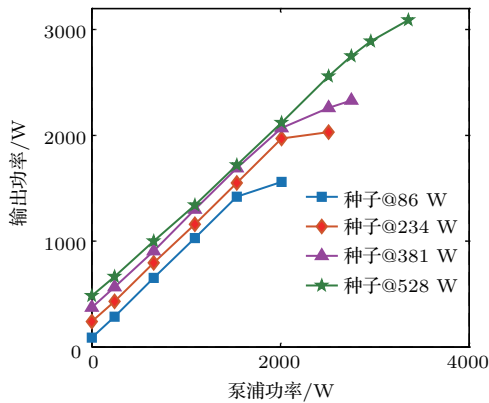


图2 不同种子光注入下的放大器输出

Fig. 2. Output power of the amplifier with different seed laser power.

进一步研究输出激光的 M^2 (光束质量) 特性, 实验中测量了不同种子功率时放大器输出激光光束质量和远场光斑演变情况, 结果如图3所示. 与图2中的输出功率对比, 可以发现, 当种子功率一

定时, 在输出效率下降点附近, 光束质量急速退化. 如在图3(a)中, 种子功率为86 W, 由于放大器增益光纤本身支持的模式数量较多, 在未注入抽运功率时, 光束质量为1.5左右. 随着输出功率的增加, 两方向的光束质量逐渐退化. 当输出功率达到1560 W时, 光束质量在 x 方向的值陡然从2变为2.7, y 方向从1.7变为2.3, 且两方向差距明显变大. 从光斑形态来看, 出现了明显的 LP_{11} 模成分. 类似地, 在不同种子功率情况下, 都存在一个光束质量恶化的突变点, 种子功率越高, 光束质量突变点对应的输出功率越高. 图3(d)中存在 x, y 两方向光束质量大小交替的现象, 这是由于种子功率为528 W时, 光束质量较低功率时已有明显下降, 种子信号光中已含有少量高阶模式, 再加上图1中熔点失配将激发一定量高阶模. 当种子信号光注入放大器中, 随着抽运功率的增加, 放大器内部的高阶模式被不同程度激发, 考虑到光纤本身布局等外部条件影响, x, y 两方向的传输模式将动态改变, 导致两方向上光束质量交替变化.

结合图2与图3的结果, 不同种子激光功率对应的光-光效率下降前后的输出情况如表1所列, x, y 两方向光束质量数据的平均值记为 M^2 . 由表1可见, 在注入其他种子功率的情况下也有相似结果, 光-光效率降低的输出功率点光束质量存在突变, 说明此时输出光束中已包含多个模式, 从图3中的光斑形态上也可以看出不再是近单模衍射光束. 根据模式不稳定特性, 认为此输出功率点处MI已经发生, 如对于86 W种子功率, MI阈值即为1560 W. 从表1中还可以看出, 在种子光功率为528 W时, 输出功率3090 W的效率下降情况相较于其他种子功率不是十分严重, 这是因为提高种子功率对模式不稳定效应具有一定的抑制作用^[26,27]. 在一定范围内提升种子功率, 将减少上能级反转粒子数, 进而增强增益饱和效应, 提高模式不稳定效应阈值.

表1 不同种子功率光-光效率下降前后的输出情况

Table 1. Output results under different seed power before/after the optical-to-optical efficiency dropped.

种子功率/W	输出功率/W		光束质量 M^2		光-光效率/%	
	下降前	下降后	下降前	下降后	下降前	下降后
86	1420	1560	1.9	2.5	87	29
234	1970	2030	2.2	2.8	86	32
381	2070	2260	1.9	2.4	85	38
528	2890	3090	2.2	2.8	83	50

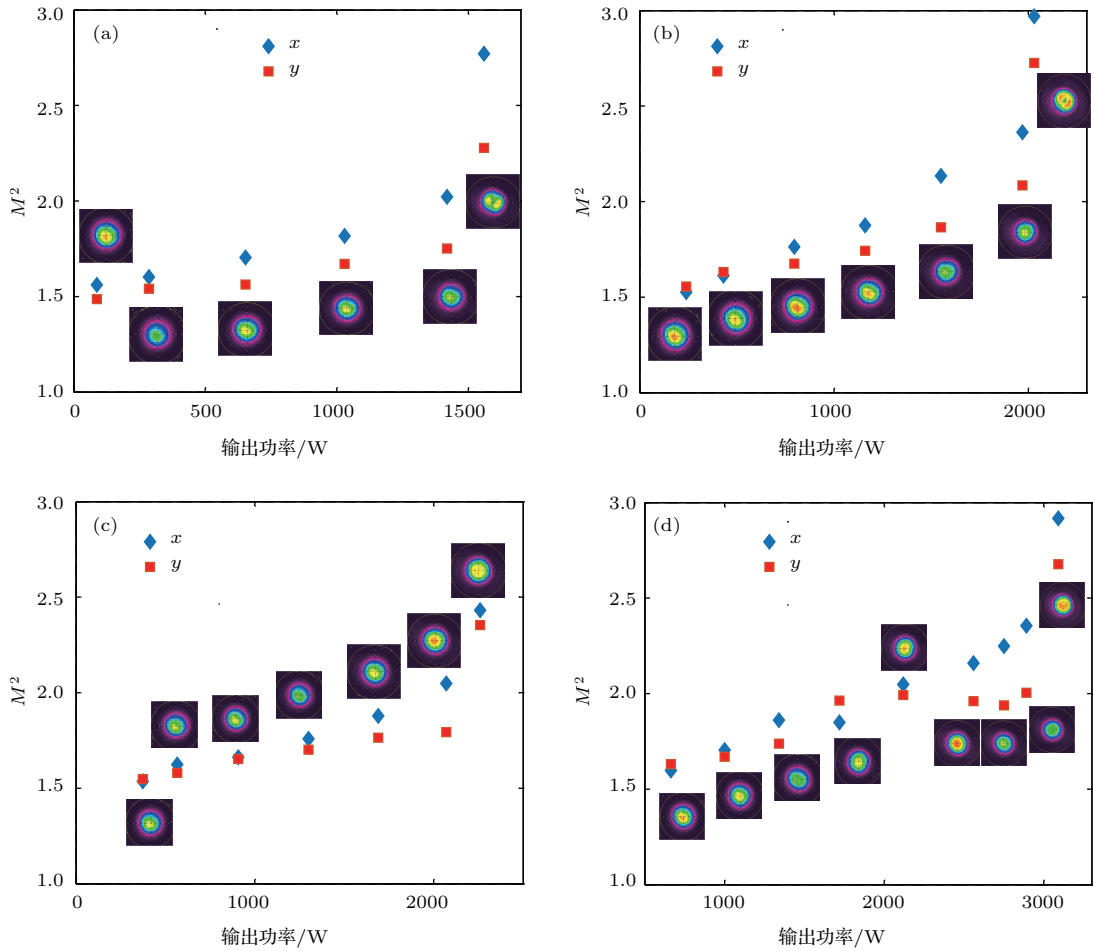


图3 不同种子功率下放大器的光束质量演化 (a) 86 W; (b) 234 W; (c) 381 W; (d) 528 W

Fig. 3. Developing process of the amplifier beam quality under different seed power: (a) 86 W; (b) 234 W; (c) 381 W; (d) 528 W.

确定模式不稳定发生后,为进一步分析激光模式是否出现动态耦合,利用光电探测器测量并记录输出激光的时域数据.研究表明^[28],当动态模式不稳定效应发生时,输出激光时域信号会随着基模与

高阶模之间的动态耦合关系起伏,对时域信息进行傅里叶变换后,得到的频域图像会出现其独有的特征频率尖峰.因此,根据探测器测得的数据即可判断模式不稳定的时域和频域特征.图4给出了在不

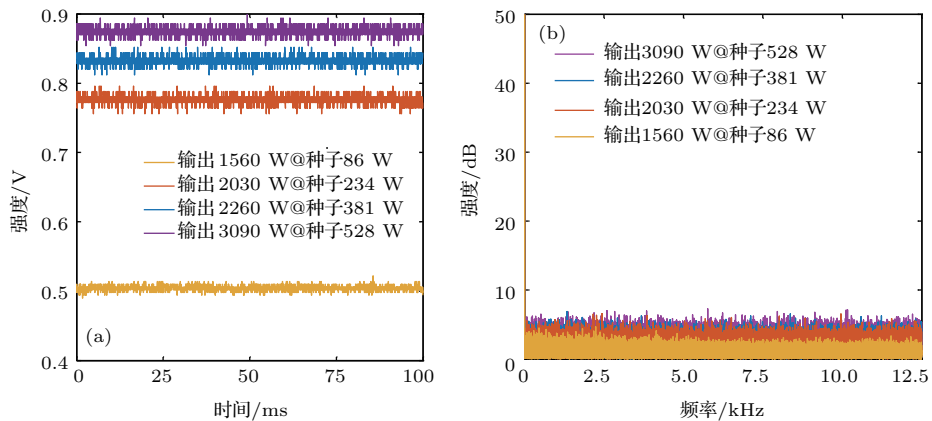


图4 不同种子功率下阈值处输出情况 (a) 时域图; (b) 频域图

Fig. 4. Output results of the MI threshold points with various seed power: (a) Time domain traces; (b) frequency domain traces.

同种子功率下, MI 阈值处输出光束的时/频域图. 在 100 ms 的时间范围内, 四次阈值处的时域信号在模式不稳定发生后没有明显起伏, 通过傅里叶变换后, 在频域也未有明显的特征频谱出现. 结果表明, 尽管输出激光的光束质量退化已经十分严重, 但在时/频域上仍观测不到动态模式不稳定特征. 可以认为, 在本实验支持部分高阶模传导的少模光纤放大器中, 高功率情况下出现的模式不稳定为准静态的模式不稳定效应, 特定时间范围内的能量耦合为单向传递, 不存在交替变化, 因而探测器在时域上无法表征其出现.

此处引入一种基于时域数据对动态模式不稳定是否出现的数值判定方法^[29], 可深入判断少模光纤中是否出现动态模式不稳定效应. σ 表示时域上信号光的偏移比, 表示为

$$\sigma = \left[\frac{\int_0^{15 \text{ kHz}} P(\nu) d\nu}{\int_{15 \text{ kHz}}^{30 \text{ kHz}} P(\nu) d\nu} - 1 \right] \times 100\%, \quad (1)$$

其中 $P(\nu)$ 表示频率 ν 处的功率密度. 当模式不稳定未出现时, σ 值很低, 表示在 0—30 kHz 范围内功率密度起伏不明显; 而模式不稳定的出现会在 0—15 kHz 内激发特征频率成分, 导致 σ 的增加. 根据定义, 认为当 σ 增加至 10% 时即可判定信号光起伏幅度较大, 动态模式不稳定出现. 以种子光功率 234 W 的放大器时域信号为例计算其在不同输出功率下的 σ 值, 结果如图 5 所示. 图中数据表明, 当输出功率达到 MI 阈值功率 2030 W, 对应图 2(b) 中光束质量为 2.8 时, σ 还未达到 5%, 进一步说明了时域上确实未能观测到信号光的动态起伏.

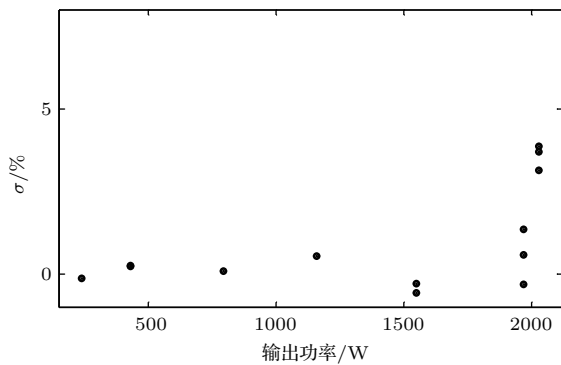


图 5 234 W 种子功率对应的放大器 σ 值

Fig. 5. Calculated σ of the amplifier at 234 W seed power.

4 结 论

本文研究了后向抽运少模光纤放大器中的模式不稳定效应, 从实验结果可以发现, 不同的种子功率下, 当抽运功率达到某一值时, 输出功率增长幅度减小, 光-光效率降低, 另一方面, 提高种子功率对于输出功率有一定提升作用, 当种子激光功率增加至 528 W 时, 输出功率在 MI 阈值 3090 W 处的效率下降幅度变缓; 测量放大器光束质量时不仅能观测到退化过程, 在效率降低点处还存在光束质量的突变, 输出不同于近单模光纤的光斑形态, 据此判断该功率处已发生模式不稳定; 进一步研究不同种子功率下模式不稳定阈值点的时域光信号时, 无论是示波器探测数据还是数值等式计算, 都没有明显起伏, 频域也没有特征频率尖峰出现, 这与动态模式不稳定的耦合特性有着显著差异. 结果表明, 由于少模光纤支持高阶模式的传导, 其模式不稳定效应为准静态过程, 在光-光效率下降和光束质量突变的同时, 发生从基模单向耦合能量至高阶模的伪稳态行为.

感谢张坤、徐小勇、刘思柳、陈林、宋涛的大力支持.

参考文献

- [1] Limpert J 2017 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition* Los Angeles, March 13–19, 2017 p1
- [2] Zervas M N 2017 *European Conference on Lasers and Electro-Optics European Quantum Electronics Conference* Munich, June 25–29, 2017 p1
- [3] Otto H, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2015 *SPIE* **9728** 1
- [4] Eidam T, Hanf S, Seise E, Andersen T V, Gabler T, Wirth C, Schreiber T, Limpert J, Tünnermann A 2010 *Opt. Lett.* **35** 94
- [5] Khitrov V, Farley K, Majid I, Christensen S, Samson B 2010 *SPIE* **7686** 78
- [6] Ward B G 2015 *Opt. Lett.* **40** 542
- [7] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y, Taunay T F 2016 *Opt. Lett.* **41** 5202
- [8] Otto H, Modsching N, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2015 *Opt. Express* **23** 15265
- [9] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, Stutzki F, Jansen F, Otto H, Schmidt O, Schreiber T, Limpert J, Tünnermann A 2011 *Opt. Express* **19** 13218
- [10] Otto H, Stutzki F, Modsching N, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2014 *Opt. Lett.* **39** 6446
- [11] Brar K, Savage-Leuchs M, Henrie J, Courtney S, Dilley C, Afzal R, Honea E 2014 *SPIE* **896** 1

- [12] Yang B L, Zhang H W, Shi C, Wang X L, Zhou P, Xu X J, Chen J B, Liu Z J, Lu Q S 2016 *Opt. Express* **24** 27828
- [13] Laurila M, Jørgensen M M, Lægsgaard J, Alkeskjold T T 2013 *Conference on Lasers and Electro-Optics International Quantum Electronics Conference Munich*, May 12–16, 2013 CJ_3_5
- [14] Puju P V, Zelenova M Z, Tyrtysnyy V A 2016 *International Conference Laser Optics*, St. Petersburg June 27–July 1, 2016 p1
- [15] Wang X L, Tao R M, Xiao H, Zhou P, Zhang C D, Xu X J 2013 *Advance Solid-State Laser* Paris, October 27–November 1, 2013 JTh2A. 44
- [16] Jauregui C, Eidam T, Otto H, Stutzki F, Jansen F, Limpert J, Tünnermann A 2012 *Opt. Express* **20** 12912
- [17] Jauregui C, Eidam T, Otto H, Stutzki F, Jansen F, Limpert J, Tünnermann A 2012 *Opt. Express* **20** 440
- [18] Smith A V, Smith J J 2011 *Opt. Express* **19** 10180
- [19] Smith A V, Smith J J 2013 *IEEE Photon. J.* **5** 7100807
- [20] Ward B, Robin C, Dajani I 2012 *Opt. Express* **20** 11407
- [21] Dong L 2013 *Opt. Express* **21** 2642
- [22] Ward B 2016 *Opt. Express* **24** 3488
- [23] Lægsgaard J 2016 *Opt. Express* **24** 13429
- [24] Gebavi H, Taccheo S, Lablonde L, Cadier B, Robin T, Mechin D, Tregoat D 2013 *Opt. Lett.* **38** 196
- [25] Wang X L, Zhang H W, Tao R M, Su R T, Ma P F, Zhou P, Xu X J 2017 *European Conference on Lasers and Electro-Optics European Quantum Electronics Conference Munich*, June 25–29, 2017 CJ_6_3
- [26] Otto H, Jauregui C, Stutzki F, Jansen F, Limpert J, Tünnermann A 2013 *Advanced Solid-State Lasers Congress* Paris, October 27–November 1, 2013 ATu3A.02
- [27] Tao R M, Wang X L, Zhou P, Liu Z 2017 *J. Opt.* **19** 065202
- [28] Tao R M, Zhou P, Wang X L, Si L, Liu Z J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085202 (in Chinese) [陶汝茂, 周朴, 王小林, 司磊, 刘泽金 2014 物理学报 **63** 085202]
- [29] Tao R M, Ma P F, Wang X L, Zhou P, Liu Z J 2016 *J. Opt.* **18** 65501

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier*

Luo Xue-Xue¹⁾ Tao Ru-Mao¹⁾²⁾³⁾ Liu Zhi-Wei^{4)†} Shi Chen¹⁾²⁾³⁾ Zhang Han-Wei¹⁾²⁾³⁾
Wang Xiao-Lin^{1)2)3)‡} Zhou Pu¹⁾²⁾³⁾ Xu Xiao-Jun¹⁾²⁾³⁾

1) (College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

3) (Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha 410073, China)

4) (China Electronics Technology Group Corporation Twenty-Seventh Research Institute, Zhengzhou 450047, China)

(Received 19 January 2018; revised manuscript received 14 March 2018)

Abstract

One of the most outstanding limitations in the evolution of the power scaling of fiber laser with near diffraction limited beam quality has been the mode instability since it was found in 2010. For a long time, researchers have focused on the dynamic mode instability (DMI) theoretically and experimentally, and it was not until 2016 that a new analytical model called quasi-static mode instability (QSMI) was proposed. Unlike DMI, because of the one-way energy transfer characteristic on a specific time scale, QSMI will show no apparent fluctuations with respect to the time domain traces. In this paper, based on a counter-pump few-mode fiber amplifier schematic system, the output power, beam quality and time traces of the amplifier under changing seed laser power are measured to investigate its mode instability effect. The ytterbium-doped fiber of the amplifier has a core diameter of 25 μm and inner cladding diameter of 400 μm , which can support 4–5 modes to be transmitted in the amplifier. The experimental results reveal that QSMI happens in the few-mode fiber amplifier. Taking 234 W seed power for example, it is found that when the output power reaches 2030 W, the optical-to-optical efficiency begins to fall from 86% to 32%, and at the same time the M^2 value has an abrupt degradation from 2.2 to 2.8, which indicates that MI happens. On the other hand, it can be seen from the time traces of the output laser that there exist no rapid fluctuations, and the Fourier analysis shows no sign of DMI characteristic frequency components either. Quoting the definition of drifting ratio σ , when the output power is 2030 W under 234 W seed power, it is only 4%, and thus verifying that it is QSMI instead of DMI. The experiment also indicates that increasing the seed power has an effective influence on enhancing the mode instability power. When the seed power is raised from 86 W to 528 W, the corresponding threshold power is increased from 1560 W to 3090 W. And for 528 W seed power, when the output laser surpasses 3000 W, the optical-to-optical efficiency does not decline as fast as other relatively low seed power. To sum up, the mode instability effect represents a kind of quasi-static property in these large core diameter few-mode fiber amplifiers, which needs further studying.

Keywords: few-mode fiber, mode instability, beam quality, quasi-static

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Jf, 52.35.Mw

DOI: 10.7498/aps.67.20180140

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61735007, 61505260).

† Corresponding author. E-mail: lzw1033@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: chinawxllin@163.com