

数值孔径对掺镱光纤振荡器模式不稳定阈值影响的实验研究

陈益沙 廖雷 李进延

Experimental study on influence of fiber numerical aperture on mode instability threshold of ytterbium fiber oscillator

Chen Yi-Sha Liao Lei Li Jin-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 114206 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182257

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182257>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180140>

超长腔碳纳米管锁模多波长掺镱光纤激光器

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes

物理学报. 2015, 64(20): 204205 <https://doi.org/10.7498/aps.64.204205>

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 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064201>

石墨烯被动锁模全正色散掺镱光纤激光器中的暗脉冲及其谐波

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb³⁺-doped fiber laser with all-normal dispersion cavity

物理学报. 2015, 64(19): 194205 <https://doi.org/10.7498/aps.64.194205>

滤波对8字腔掺铒光纤激光器锁模运转的影响

Influence of spectral filtering on mode-locking operation of figure-eight Er-doped fiber laser

物理学报. 2019, 68(6): 064206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182144>

基于增益光纤长度优化的双波长运转掺铒光纤锁模激光器

Dual-wavelength mode-locked Er-doped fiber laser based on optimizing gain fiber length

物理学报. 2017, 66(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134203>

数值孔径对掺镱光纤振荡器模式 不稳定阈值影响的实验研究*

陈益沙 廖雷 李进延†

(华中科技大学, 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

(2018年12月24日收到; 2019年2月22日收到修改稿)

模式不稳定效应已经成为高功率光纤激光器中限制输出功率和光束质量进一步提升的最大障碍. 用不同数值孔径的 20/400 阶跃折射率分布掺镱光纤搭建了光纤振荡器, 并测量了它们的光光效率和模式不稳定阈值. 实验结果表明, 在同等注入抽运功率和抽运波长为 976 nm 的前提下, 具有较低数值孔径的光纤尽管光光效率低于高数值孔径光纤的, 但却表现出更高的模式不稳定阈值. 这一结果表明数值孔径对光纤振荡器中的模式不稳定阈值有着显著的影响. 因此, 对于光纤振荡器的模式不稳定抑制而言, 适当地优化降低数值孔径是一个抑制模式不稳定效应, 进一步提升光纤振荡器模式不稳定阈值的方法, 对于进一步提升光纤振荡器的输出功率和光束质量, 有着明显的现实意义.

关键词: 模式不稳定, 光纤激光器, 掺镱光纤**PACS:** 42.81.Wg, 42.55. Wd, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.68.20182257

1 引言

在过去的几十年中, 光纤激光器作为一种新型的固体激光器, 获得了长足且迅速的发展. 相较于传统的固体激光器而言, 光纤激光器有着诸多的优点: 优秀的热管理性能、高的转换效率、结构紧凑并且几乎免维护. 而且随着诸如大模场双包层光纤拉制工艺的逐渐发展与成熟和高功率高亮度半导体激光器的出现, 高功率光纤激光器的输出功率水平在近年来得到了迅速发展^[1]. 对于连续激光器, 单纤输出功率水平已经达到 10 kW^[1,2]; 对于脉冲激光器而言, 超短脉冲激光器的输出也已经达到近 kW 的水平^[3]. 然而, 输出功率水平的继续增长受到了最近发现的新现象——模式不稳定效应 (mode instability, MI) 的限制. MI 是指输出激光功率超过某个特定的水平后, 光纤激光器的输出模

式会出现随时间明显有关的随机变化, 主要表现在光纤的激光器的输出模式成分的变化, 而且输出光的光束质量会大大恶化^[4]. MI 已成为高功率光纤激光器输出功率进一步提升及其应用的最大障碍, 近年来引起全世界各国学者的极大兴趣.

2010 年, 德国耶拿大学的研究人员 Eidam 等^[3]首次在光纤激光器中观察到了模式不稳定现象, 随后科学界对于模式不稳定现象进行了大量深入的理论和实验研究, 并对这一现象的认识取得了相当大的进展. 尽管模式不稳定现象准确的物理本质尚未完全解释清楚^[4], 但是光纤中热致折射率光栅的形成是高功率光纤激光器中模式不稳定的主要原因已基本成为科学界的共识^[5-7]. 对于模式不稳定的研究, 德国耶拿大学、美国空军实验室、丹麦科技大学和美国克莱姆森大学处于国际领先^[4-6,8-19], 我国的国防科技大学对模式不稳定现象进行了大量的研究, 处于国内领先地位^[20-29]. 文献^[6]指出,

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB1104400) 和国家自然科学基金 (批准号: 61735007) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lji@mail.hust.edu.cn

若要模式之间存在能量转移, 则干涉模式与热致折射率光栅之间必须存在一定的相位差, 并认为这一相位差的根源主要是因为干涉模式之间存在一定的频率差. 目前而言, 大部分的理论模型的建模均采用这一频率差假设. 2013年, 美国克莱姆森大学的研究人员 Dong^[19] 指出, 光纤中 MI 的物理本质是光纤中的受激热瑞利散射 (stimulated thermal Rayleigh scattering, STRS), 光纤材料的非线性响应与模间干涉之间存在一个相移, 而这一相移是 STRS 获得增益的原因所在. 2015年, 德国耶拿大学的研究人员 Otto 等^[30] 在实验中发现光子暗化对模式不稳定有着密切而重大的影响, 并提出尽管光子暗化尽管只导致少量的功率损耗, 但仍然会大幅降低模式不稳定阈值. 2016年, 美国空军实验室的研究人员 Ward^[31] 和丹麦科技大学的研究人员 Lægsgaard^[32] 分别从理论上预言了准静态模式不稳定 (quasi-static mode instability, QSMI) 的存在, 并指出光子暗化和多程放大是引起 QSMI 的原因. 国防科技大学对模式不稳定的影响因素进行了大量的实验和理论模拟研究, 表明优化抽运波长, 降低光纤芯包比, 优化光纤弯曲直径有利于抑制模式不稳定^[23,25,27]. 但是, 以上的理论和实验研究主要针对主振荡功率放大 (master oscillator power amplifier, MOPA) 结构的光纤激光器, 针对光纤振荡器中的模式不稳定研究较少有公开的文献发表, 研究光纤振荡器中的模式不稳定对于理解不同机理和条件下的模式不稳定有着重要的意义.

本文从实验上利用不同数值孔径 (numerical aperture, NA) 的国产有源光纤搭建了输出功率为 kW 量级的光纤振荡器并进行了 MI 的研究. 通过一定程度上降低有源光纤的 NA, 光纤振荡器的模式不稳定阈值得到了提升, 实验结果表明一定程度上优化降低有源光纤的 NA 有利于提升光纤振荡器的模式不稳定阈值, 对于进一步提升光纤振荡器的输出功率和拓展光纤振荡器的应用范围, 有着重要的现实意义.

2 实验装置

本实验采用的有源掺镱光纤为本课题组自行设计控制, 采用传统的改进的化学气相沉积法 (modified chemical vapor deposition, MCVD) 工

艺制成, 纤芯直径为 20 μm , 包层形状为八边形, 尺寸为 400 μm . 搭建好的光纤振荡器如图 1 所示, 采用 6 个输出波长为 976 nm 的高功率半导体激光器作为抽运源, 经过 $(6 + 1) \times 1$ 的合束器再注入高反布拉格光栅 (high reflective fiber bragg grating, HR FBG) 后注入有源掺镱光纤中经过输出耦合光栅 (output coupler fiber bragg grating, OC FBG) 后输出. 合束器信号臂光纤结构为双包层光纤, 其纤芯/包层直径和 NA 分别为 20/400 μm 和 0.065, HR FBG 和 OC FBG 采用的光纤均为双包层光纤, 光纤纤芯/包层直径均为 20/400 μm . HR FBG 在中心波长 1080 nm 处的反射率为 99% 左右, 其 3 dB 带宽约为 3 nm, 相对应的 OC FBG 在 1080 nm 处的反射率约为 10%, 其 3 dB 带宽也约为 3 nm. 所用光纤具体的参数见表 1.

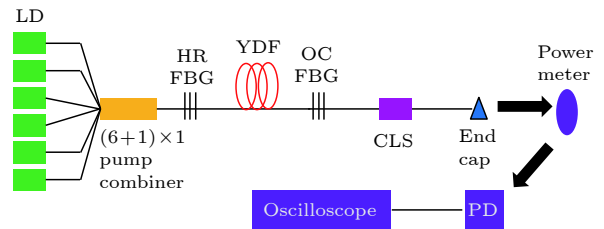


图 1 光纤振荡器结构图 (抽运源为 976 nm 波长的激光器)

Fig. 1. Experimental setup of fiber oscillator pumped by 976 nm LDs.

表 1 实验中使用掺镱光纤的参数

Table 1. Yb-doped fiber parameter applied in the experiment.

参数	光纤1	光纤2
光纤长度/m	20	20
NA(纤芯/包层)	0.064/0.460	0.059/0.460
主要掺杂元素	Yb/Al	Yb/Al
弯曲直径/cm	15	15
吸收系数@976 nm/(dB·m ⁻¹)	1.2	1.2
掺镱浓度/wt. %	0.65	0.65

OC FBG 后端接入包层光滤除器和端帽用于滤除包层中的激光和抑制端面反射, 包层光滤除器的尾纤和 OC FBG 完全匹配, 最终通过端帽输出的激光射入功率计中测量输出功率, 光电探测器测量功率计靶面反射出的散射光信号并将其转换为电信号输入示波器. 上述所有器件均置于水冷热沉上保证足够的散热, 以维持激光器持续稳定的输出.

3 实验结果与分析

当使用光纤 1 搭建的光纤振荡器测试时, 其输出功率-抽运功率曲线如图 2 所示. 在注入的抽运功率在 1400 W 时, 经过包层光滤除器后的输出功率为 1140 W, 对应的光光效率为 81.4%; 当继续增加注入抽运功率到 1500 W 时, 输出功率从 1140 W 下降到 1120 W, 此时对应的光光效率仅为 74.7%, 光光效率出现了大幅度的降低, 并伴随有一定程度的功率起伏, 在光光效率下降的同时, 光电探测器测得的散射光信号的标准差也出现了明显的增加,

说明模式不稳定现象已经出现. 为进一步分析光纤 1 中的 MI, 对光电探测器采集到的时域信号进行了处理, 如图 3 所示.

由图 3 可知, 当注入的抽运功率为 1400 W 时 (此时输出功率为 1140 W), 对应的光光效率为 81.4%, 时域输出信号基本保持稳定; 而当注入功率增至 1500 W 时 (此时输出功率为 1120 W), 对应的光光效率仅为 74.7%, 时域输出信号较之前发生明显的波动, 对应在图 2 中表示为明显的标准差值的增加, 证明此时模式不稳定已发生. 同时, 输出功率在注入抽运功率从 1400 W 增加到 1500 W

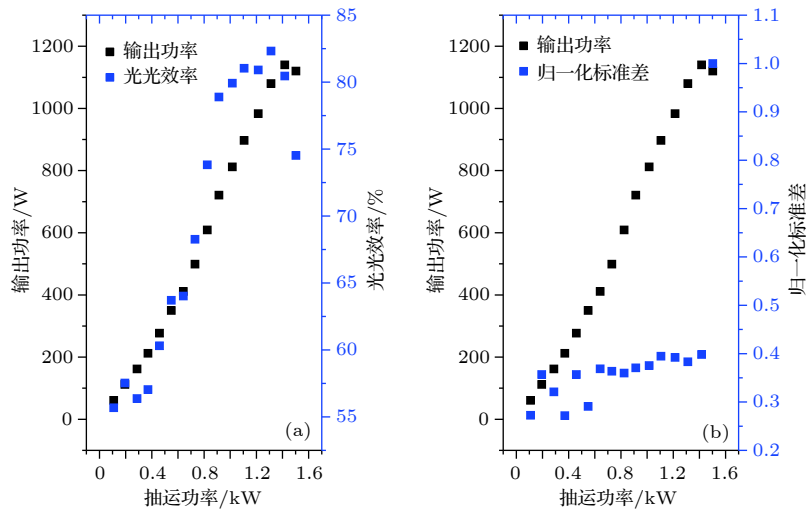


图 2 光纤 1 的输出功率-抽运功率曲线 (a) 输出功率/光光效率-抽运抽运功率关系; (b) 输出功率/归一化标准差-抽运功率关系

Fig. 2. Output power and pump power curve of fiber 1: (a) Correlation between output power/optical-optical efficiency and pump power; (b) output power/normalized standard deviation and pump power.

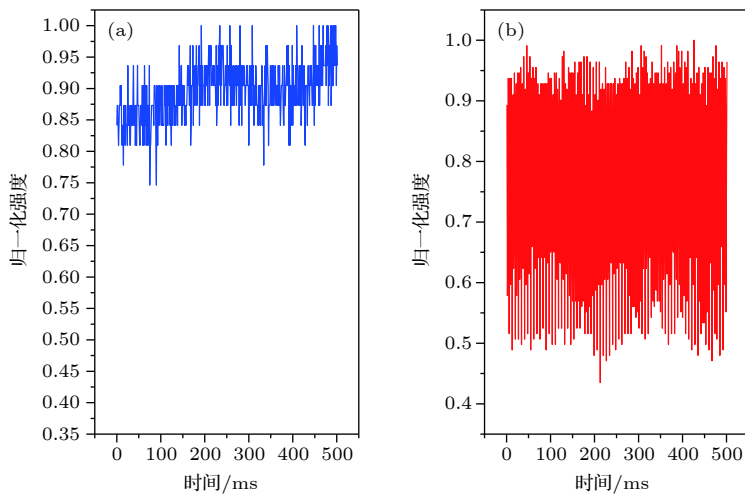


图 3 光纤 1 的输出功率时域信号 (a) 1400 W 抽运源; (b) 1500 W 抽运源

Fig. 3. Output time domain of different power of fiber 1: (a) 1400 W pump power; (b) 1500 W pump power.

时不升反降, 主要是由于发生模式不稳定时, 基模向高阶模耦合时因为弯曲泄露到包层之中被包层光滤波器滤掉, 在实验中观察到包层光滤波器在模式不稳定发生时温度显著升高也说明了这一点. 进一步对光纤 1 输出的时域信号做 Fourier 变换后, 得到的频域图如图 4 所示. 由图 4 可以清晰地看出, 在注入抽运功率为 1400 W 时, 频率信号除直流分量之外没有其他明显的频率成分; 而在增加注入抽运功率到 1500 W 时, 出现了一些直流分量之外的其他频率成分, 与 1400 W 注入功率时的频域信号大不相同. 根据以上分析, 我们认为光纤 1 在注入功率为 1500 W 时确实发生了模式不稳定.

为进一步研究光纤 NA 对激光振荡器中的模式不稳定的影响, 换用光纤 2 重新测量了其激光性能, 其输出功率-抽运功率如图 5 所示. 在注入功率

为 1500 W 时, 输出功率为 1140 W, 其对应的光光效率为 76.0%; 继续增加注入功率到 1600 W 时, 输出功率为 1210 W, 此时对应的光光效率为 75.6%, 光光效率较光纤 1 不发生模式不稳定时较低. 由光电探测器测量得到的标准差归一化值均在一个较小的范围之内波动, 如图 5 所示, 表征输出信号功率的波动较小, 无明显的剧烈波动, 而且在包层光滤波器上也未观察到明显的温度增加, 说明对于光纤 2 而言, 保持 1600 W 的注入功率未观察到明显的模式不稳定现象. 此时功率的进一步提升仅仅受限于抽运功率.

为进一步确认光纤 2 在 1600 W 注入功率的条件下未发生模式不稳定, 对光纤 2 的输出时域信号进行了处理, 结果如图 6 所示. 当注入抽运功率为 1500 W 时, 输出的时域信号基本保持稳定, 未

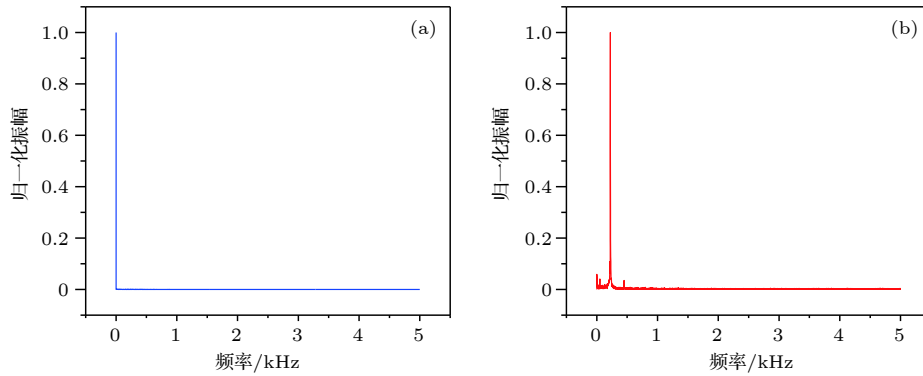


图 4 光纤 1 的输出功率频域信号 (a) 1400 W 抽运源; (b) 1500 W 抽运源

Fig. 4. Output frequency domain of different power of fiber 1: (a) 1400 W pump power; (b) 1500 W pump power.

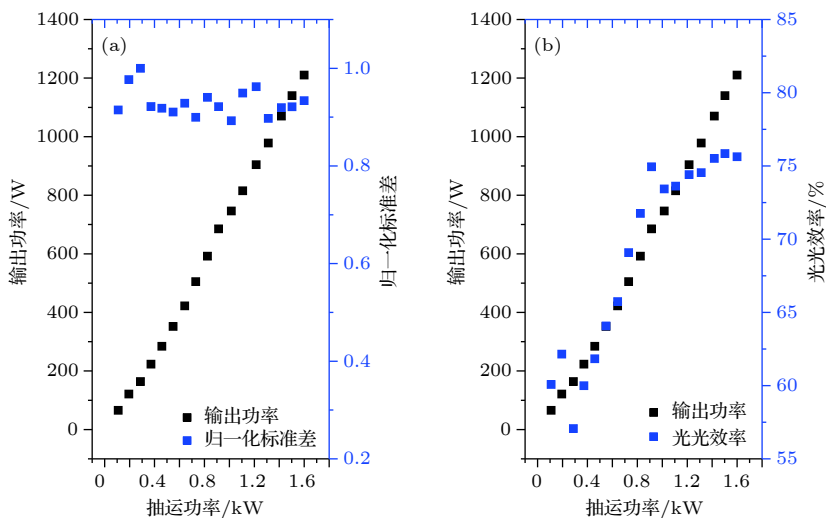


图 5 光纤 2 的输出功率-抽运功率曲线 (a) 输出功率/光光效率-抽运功率关系; (b) 输出功率/归一化标准差-抽运功率关系

Fig. 5. Output power and pump power curve of fiber 2: (a) Correlation between output power/optical-optical efficiency and pump power; (b) output power/normalized standard deviation and pump power.

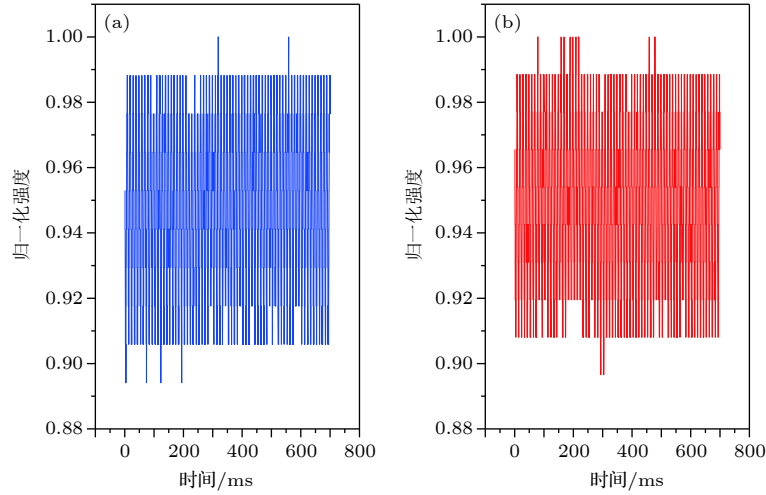


图 6 光纤 2 的输出功率时域信号 (a) 1500 W 抽运源; (b) 1600 W 抽运源

Fig. 6. Output time domain of different power of fiber 2: (a) 1500 W pump power; (b) 1600 W pump power.

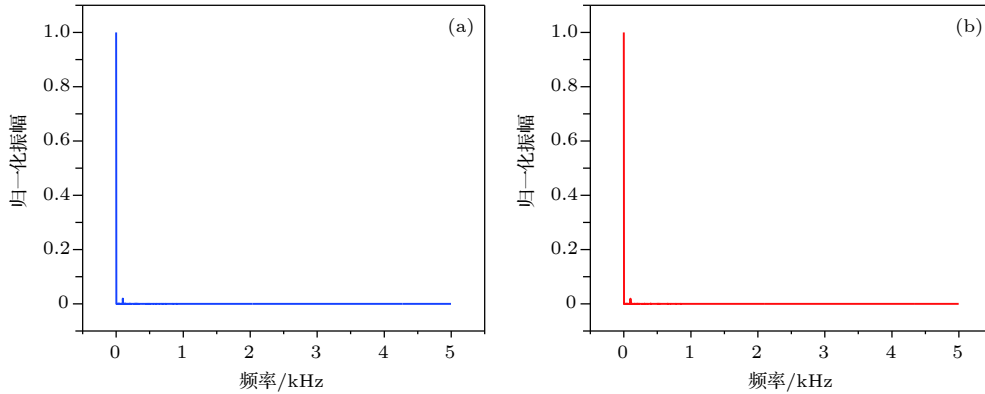


图 7 光纤 2 的输出功率频域信号 (a) 1500 W 抽运源; (b) 1600 W 抽运源

Fig. 7. Output frequency domain of different power of fiber 2: (a) 1500 W pump power; (b) 1600 W pump power.

见明显的波动, 仅有因噪声导致的小幅度变化, 当注入抽运功率达到 1600 W 时, 输出的时域信号与注入抽运功率为 1500 W 时相比无明显变化, 也基本保持稳定且无明显波动, 而且频域信号在注入抽运功率为 1500 W 和 1600 W 时几乎保持一致 (见图 7), 无明显高频分量出现, 因此结合以上判据, 确认光纤 2 在整个输出阶段均未发生模式不稳定.

以上实验结果表明, 尽管光纤 1 在未发生模式不稳定之前, 其光光效率 (81.4%) 较光纤 2 的光光效率 (75.6%) 高, 从转换效率而言光纤 1 的热负载较光纤 2 更低, 但光纤 2 却表现出更高的模式不稳定阈值, 主要是因为光纤 1 的 NA 较光纤 2 的 NA 更大. 一方面, NA 较大的光纤支持传输的模式越多; 另一方面, 较大的纤芯 NA 通常意味着较重的掺杂, 因此一般会有较大的吸收. 如图 8 所示, NA

的减小对基模在光纤中的分布相对影响较小, 而对 LP_{11} 模的影响较大 (图 8 中的 τ 表达了对应的模式在纤芯中功率的比例), 主要会使 LP_{11} 模更多地延伸进入光纤包层中, 从而减小了 LP_{11} 模的纤芯部分与光纤掺杂 (增益) 区的重叠, 因此 LP_{11} 模的增益会随着 NA 的减小而降低, 模式不稳定阈值相应地上升.

此外, LP_{11} 模的弯曲损耗对于光纤 NA 的变化极其敏感, 图 9 给出了在不同的光纤 NA 下光纤的弯曲损耗随着光纤的弯曲直径变化的关系. 由图 9 可知, 当 NA 减小时, 高阶模式的弯曲损耗会极大地增加, 这会导致更多的高阶模式由于光纤的弯曲泄露进入包层之中, 减少了高阶模式和光纤掺杂 (增益) 区的重叠, 从而导致 LP_{11} 模的增益会随着 NA 的减小而降低, 模式不稳定阈值相应地增加.

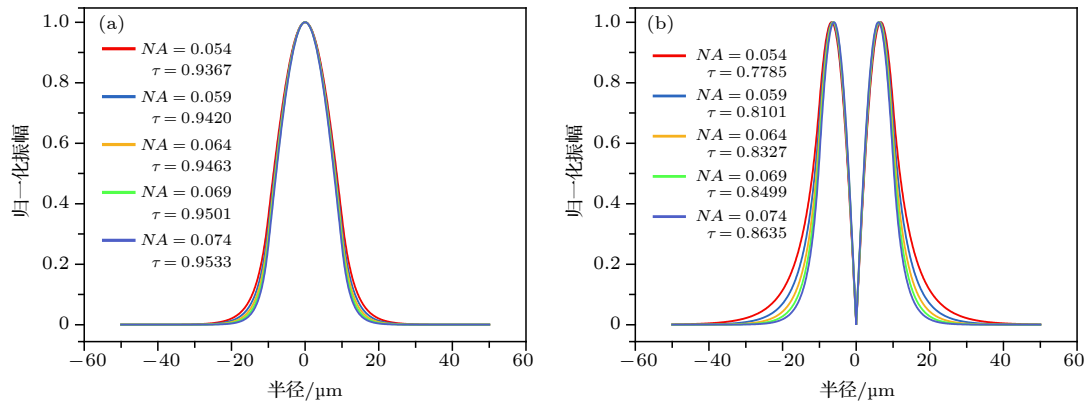


图 8 具有不同 NA 光纤中的 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式分布 (a) LP₀₁; (b) LP₁₁

Fig. 8. LP₀₁ and LP₁₁ mode profile in fiber at different NA: (a) LP₀₁; (b) LP₁₁.

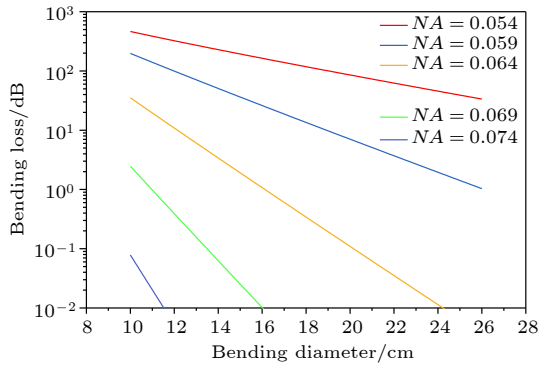


图 9 具有不同 NA 光纤的 LP₁₁ 弯曲损耗随弯曲直径变化曲线

Fig. 9. Bending loss of LP₁₁ versus bending radius at different fiber core NA.

4 结 论

本实验对不同 NA 的光纤搭建了激光振荡器并测试了它们的激光效率和模式不稳定阈值. 实验结果表明, 使用 NA 为 0.064 的光纤, 其模式不稳定阈值为 1140 W, 功率的进一步提升受到了 MI 的限制; 将光纤改为 NA 为 0.059 的光纤, 最大输出功率为 1210 W, 斜率效率正常, 无 MI 发生, 功率的进一步提升受到最大注入抽运功率的限制. 实验结果和数值模拟表明, 光纤的 NA 对光纤振荡器的模式不稳定阈值有显著影响, 一定程度上降低光纤的 NA 有利于提升光纤振荡器的模式不稳定阈值.

参考文献

[1] Gapontsev V, Fomin V, Ferin A, Abramov M 2001 *Proceedings Advanced Solid-State Photonics* Seattle, Washington, United

States, January 28, 2001 pAWA1

[2] Richardson D, Nilsson J, Clarkson W 2010 *JOSA B* **27** B63
 [3] Eidam T, Hanf S, Seise E, Andersen T V, Gabler T, Wirth C, Schreiber T, Limpert J, Tünnermann A 2010 *Opt. Lett.* **35** 94
 [4] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, Stutzki F, Jansen F, Otto H J, Schmidt O, Schreiber T, Limpert J, Tünnermann A 2011 *Opt. Express* **19** 13218
 [5] Jauregui C, Eidam T, Limpert J, Tünnermann A 2011 *Opt. Express* **19** 3258
 [6] Smith A V, Smith J J 2011 *Opt. Express* **19** 10180
 [7] Ward B, Robin C, Dajani I 2012 *Opt. Express* **20** 11407
 [8] Jauregui C, Eidam T, Otto H J, Stutzki F, Jansen F, Limpert J, Tünnermann A 2012 *Opt. Express* **20** 440
 [9] Jansen F, Stutzki F, Otto H J, Eidam T, Liem A, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2012 *Opt. Express* **20** 3997
 [10] Haarlamert N, Vries O D, Liem A, Kliner A, Peschel T, Schreiber T, Eberhardt R, Tünnermann A 2012 *Opt. Express* **20** 13274
 [11] Otto H J, Stutzki F, Jansen F, Eidam T, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2012 *Opt. Express* **20** 15710
 [12] Otto H, Stutzki F, Eidam T, Limpert J, Tünnermann A 2013 *Proc. SPIE 8601, Fiber Lasers X: Technology, Systems, and Applications* San Francisco, California, United State, February 2–7, 2013 p86010A
 [13] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, Lægsgaard J 2011 *Opt. Express* **19** 23965
 [14] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, Lægsgaard J 2012 *Opt. Letters* **37** 2382
 [15] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, Lægsgaard J 2013 *Opt. Express* **21** 1944
 [16] Smith A V, Smith J J 2012 *Opt. Express* **20** 24545
 [17] Smith A V, Smith J J 2013 *Opt. Express* **21** 2606
 [18] Smith A V, Smith J J 2013 *Opt. Express* **21** 15168
 [19] Dong L 2013 *Opt. Express* **21** 2642
 [20] Tao R M, Zhou P, Xiao H, Wang X L, Si L, Liu Z J 2014 *Laser & Optoelectronics Progress* **51** 020001 (in Chinese) [陶汝茂, 周朴, 肖虎, 王小林, 司磊, 刘泽金 2014 *激光与光电子学进展* **51** 020001]
 [21] Tao R M, Wang X L, Xiao H, Zhou P, Liu Z J 2014 *Acta Optica Sinica* **34** 0114002 (in Chinese) [陶汝茂, 王小林, 肖虎, 周朴, 刘泽金 2014 *光学学报* **34** 0114002]
 [22] Tao R, Ma P, Wang X, et al. 2014 *Fiber-Based Technologies and Applications* Wuhan, China, 18–21 June, 2014
 [23] Tao R, Ma P, Wang X, Zhou P 2015 *IEEE J. Quant. Electr.* **51** 1

- [24] Tao R, Ma P, Wang X, Zhou P, Liu Z 2015 *Laser Phys.* **26** 065103
- [25] Tao R, Ma P, Wang X, Zhou P, Liu Z 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** 085101
- [26] Yang B, Zhang H, Shi C, Wang X, Zhou P, Xu X, Chen J, Liu Z, Lu Q 2016 *Opt. Express* **24** 27828
- [27] Tao R, Su R, Ma P, Wang X, Zhou P 2017 *Laser Phys. Lett.* **14** 025101
- [28] Tao R, Wang X, Zhou P 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **24** 1
- [29] Tao R, Xiao H, Zhang H, Leng J, Wang X, Zhou P, Xu X 2018 *Opt. Express* **26** 25098
- [30] Otto H, Modsching N, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2015 *Opt. Express* **23** 15265
- [31] Ward B 2016 *Opt. Express* **24** 3488
- [32] Lægsgaard J 2016 *Opt. Express* **24** 13429

Experimental study on influence of fiber numerical aperture on mode instability threshold of ytterbium fiber oscillator*

Chen Yi-Sha Liao Lei Li Jin-Yan[†]

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 24 December 2018; revised manuscript received 22 February 2019)

Abstract

The phenomenon mode instability is the most limiting factor for further scaling the output power and beam quality in high power fiber lasers. Thus, it is meaningful and necessary to study the influencing factor of mode instability and finally find the approaches to mitigating its influence. Theoretical calculations reveal that the fiber V-parameter has a negative effect on fiber amplifier mode instability threshold. Nevertheless, the influence of fiber core numerical aperture (NA) on fiber oscillator mode instability threshold has rarely been investigated compared with that on the fiber amplifier. In this paper, we build a high-power all-fiber laser oscillator pumped by 976nm laser diodes and measure its laser efficiency and mode instability threshold of 20/400 step-index ytterbium doped fiber with different fiber core NA . Experimental result reveals that at the same 976 nm pump power, the fiber with relatively low core NA (~ 0.059) has a higher mode instability threshold power than that with relatively high core NA (~ 0.064), and that even a higher core NA (~ 0.064) fiber has a higher laser efficiency than lower core NA (~ 0.059) fiber. The fact shows that the fiber core NA has a significant influence on mode instability threshold, and a relatively high core NA results in a lower mode instability threshold. Also, numerical simulations explain the reason why the fiber core NA has a negative effect on mode instability threshold in fiber oscillator. First of all, the higher fiber core NA will support more propagating modes in fiber, and the lower fiber core NA will result in higher order mode (HOM) content leaking into fiber cladding and the overlap of HOM content and gain area is reduced, thus the gain of HOM is relatively reduced. Also, the bending loss of HOM is very sensitive to fiber core NA variation, and the increase of fiber core NA will reduce the bending loss of HOM dramatically. In conclusion, the fiber core NA has a significant negative effect on fiber oscillator mode instability threshold, and numerical simulations can explain the physical origin of the negative effect of fiber core NA on laser oscillator mode instability threshold. Thus, for the mode instability mitigation in high power laser oscillator, optimizing the NA of active fiber conduces to the increase of mode instability threshold, which is helpful and necessary for further scaling the output power and beam quality.

Keywords: mode instability, fiber laser, ytterbium-doped fiber

PACS: 42.81.Wg, 42.55. Wd, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.68.20182257

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFB1104400) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61735007).

[†] Corresponding author. E-mail: l jy@mail.hust.edu.cn