

## 高功率光纤激光器反常模式不稳定效应实验研究

曾令箴<sup>1</sup>, 文榆钧<sup>1</sup>, 王小林<sup>1,2,3\*</sup>, 王鹏<sup>1,2,3</sup>, 奚小明<sup>1,2,3</sup>, 杨保来<sup>1,2,3</sup>, 张汉伟<sup>1,2,3</sup>, 刁锋杰<sup>1,2,3</sup>, 韩凯<sup>1,2</sup>, 王泽锋<sup>1,2,3</sup>,  
许晓军<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>国防科技大学南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 模式不稳定是限制当前高功率光纤激光器功率提升的主要因素。在近单模光纤激光器中, 一般采用减小光纤弯曲直径的方法增加高阶模损耗、提升模式不稳定阈值; 然而, 少模光纤激光器中存在多个高阶模式, 会导致动态模式不稳定(TMI)阈值随着弯曲直径减小而降低的反常模式不稳定现象。基于纤芯/包层直径为 30/600  $\mu\text{m}$  的双包层掺镱光纤以及具有不同直径的光纤水冷柱, 设计了一台后向泵浦的高功率光纤放大器, 研究了该激光器中的反常模式不稳定现象。结果表明: 当采用中心波长为 976 nm 的稳波长激光二极管(LD)作为泵浦源时, 随着增益光纤弯曲直径由 13 cm 增加至 16 cm, 激光器的 TMI 阈值由 1650 W 提升至 3740 W, 提升幅度约为 1.27 倍, 输出激光的相对亮度提升了 87%。光纤弯曲直径的增加虽然会带来输出激光光束质量的轻微退化, 但输出激光的相对亮度能够大幅提升。最终, 结合光纤弯曲以及泵浦波长优化, 实现了 7.1 kW 高亮度光纤激光输出, 相对亮度为 1293。

**关键词** 光纤光学; 光纤放大器; 反常模式不稳定; 光纤弯曲; 泵浦波长优化

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230782

## 1 引言

得益于高效率、高光束质量、热管理方便、可柔性传输等优势, 光纤激光器在科研以及工业领域应用广泛。随着大模场面积光纤的广泛使用, 目前受激拉曼散射(SRS)和模式不稳定(TMI)已成为高功率、高亮度光纤激光器功率提升的主要限制因素<sup>[1-6]</sup>。SRS是早期制约光纤激光器功率提升的主要因素。由于发现较早, 目前关于其产生机理以及相应的抑制措施的理论 and 实验研究已经相当成熟<sup>[7-11]</sup>。与之相比, TMI首次出现至今仅 10 余年<sup>[12-16]</sup>。在光纤中, 热效应会导致长周期折射率光栅形成, 进而导致模式耦合, 这是 TMI 产生的原因, 而量子亏损、光子暗化以及背景损耗是光纤中热效应的主要来源<sup>[17-19]</sup>。

自 2010 年以来, 国内外围绕高功率光纤激光器中 TMI 的抑制开展了大量的理论与实验研究。一方面, 可以从光纤中的热效应出发, 减弱光纤中的热负载或者降低光纤中的热分布梯度, 以此抑制热致折射率光栅的形成。这方面的措施主要包括优化信号波长、优化泵浦波长、优化泵浦方式以及优化光纤材料等<sup>[20-27]</sup>。另一方面, TMI 总是与模式相关联, 一般认为光纤中高阶模的含量越高, TMI 阈值越低。所以, 可以通过

降低高阶模的增益或者增加高阶模的损耗来抑制 TMI。相关的措施包括减小光纤盘绕直径, 设计新型的掺杂掺杂光纤以及变纤芯直径光纤等<sup>[28-33]</sup>。

弯曲光纤是一种简单有效的模式控制方式。通过减小光纤的弯曲直径, 能够增加高阶模损耗, 因此弯曲光纤理论上能够提升激光器的 TMI 阈值, 该方法在实验上已经得到了成功应用。正常情况下, TMI 阈值与光纤的弯曲直径呈负相关关系。Su 等<sup>[34]</sup>通过缩小光纤盘绕直径的方式成功地将激光器的 TMI 阈值从 850 W 提升至 2.43 kW 以上。其他的多数与光纤弯曲相关的 TMI 研究也都通过减小弯曲直径来提升 TMI 阈值<sup>[22,31,35-36]</sup>。2015 年, 德国耶拿大学的研究人员在实验中首次观察到了 TMI 阈值随着光纤弯曲直径增加而增大的现象<sup>[37]</sup>。2019 年, 华中科技大学的 Zhang 等<sup>[38]</sup>进行了更加详细的对比实验。通过对比分析, 他们认为: 当激光器工作在近单模状态下时, TMI 阈值与弯曲直径呈负相关关系; 当激光器工作在少模状态下时, TMI 阈值与光纤的弯曲直径呈正相关关系(通常将这种不同于常规认知的 TMI 现象称为“反常 TMI 现象”)。随后, 2022 年, 本课题组的文榆钧等<sup>[39]</sup>在基于纤芯直径为 30  $\mu\text{m}$  的掺镱光纤的光纤放大器中也得到了 TMI 阈值随光纤弯曲直径增加而增大的结论。

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-05-20; 录用日期: 2023-06-30; 网络首发日期: 2023-07-15

基金项目: 国防基础科研计划、长沙市杰出创新青年培养计划(kq2206006)

通信作者: \*chinaphotonics@163.com

并且,他们通过增加光纤弯曲直径抑制 TMI 实现了 10 kW 光纤放大器<sup>[40]</sup>。与上述反常 TMI 现象类似,近年来研究人员也发现了 TMI 阈值随高阶模含量增加而增大的现象<sup>[41-42]</sup>。因此,高功率光纤激光器的 TMI 与光纤弯曲直径以及模式成分之间的关系尚待进一步深入研究。

笔者基于纤芯/包层直径为 30/600  $\mu\text{m}$  的双包层掺镱光纤(YDF),结合具有不同直径的圆柱状光纤槽的水冷柱,研究了高功率条件下的反常 TMI 现象。结果显示:在光纤长度为 20 m 以及采用中心波长为 976 nm 的稳波长激光二极管(LD)作为泵浦源条件下,随着光纤弯曲直径从 13 cm 增加至 16 cm,激光器的 TMI 阈值从 1650 W 增大至 3740 W,提升了 1.27 倍。在这个过程中,输出激光的相对亮度提升了 87%。在此基础上,结合泵浦波长优化,实现了 7100 W

高亮度激光输出,相对亮度为 1293。这是目前针对光纤激光器中反常 TMI 现象在高功率条件下的首次系统的实验研究。

## 2 实验设置

激光器的结构如图 1 所示,它是一个基于主振荡功率放大(MOPA)结构的光纤放大器。种子激光器的输出激光先经过一个纤芯/包层直径由 20/400  $\mu\text{m}$  过渡至 30/600  $\mu\text{m}$  的模场适配器(MFA),随后通过一个 30/600  $\mu\text{m}$  的包层光滤除器(CLS),之后注入到放大器的增益光纤中。激光器的放大级采用后向泵浦配置,其合束器为一个(6+1) $\times$ 1 后向泵浦/信号合束器,信号输入光纤的纤芯/包层直径为 30/600  $\mu\text{m}$ ,信号输出光纤的纤芯/包层直径为 30/250  $\mu\text{m}$ ,泵浦输入光纤的纤芯/包层直径为 220/242  $\mu\text{m}$ 。

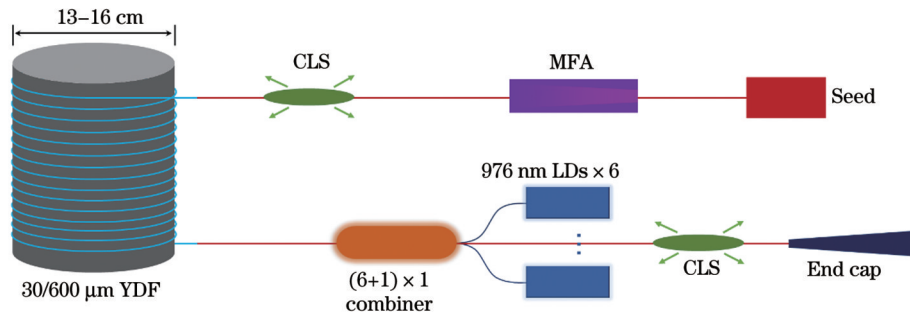


图 1 基于圆柱状水冷柱的光纤激光放大器结构示意图(Seed: 种子激光器;MFA: 模场适配器;CLS: 包层光滤除器;End cap: 光纤端帽)

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of a fiber laser amplifier based on a cylindrical water-cooled column (Seed: seed laser; MFA: mode field adapter; CLS: cladding light stripper; End cap: fiber end cap)

放大级的增益光纤采用纤芯/包层直径为 30/600  $\mu\text{m}$  的双包层掺镱光纤,该光纤的标称吸收系数为 0.40 dB/m@915 nm。光纤长度选择为 20 m。在实验中,使用了直径分别为 13、14、15、16 cm 的水冷柱,以对比不同光纤弯曲直径下激光器的输出特性。与常用的二维跑道形或者圆形光纤水冷板相比,将光纤盘绕在水冷柱上能够保证每一位置处光纤的弯曲直径都保持一致,更加有利于对比不同弯曲直径下激光器的输出特性。

种子激光器是一个基于 20/400  $\mu\text{m}$  掺镱光纤的光纤激光振荡器。激光器的中心波长  $\lambda_c$  为 1080 nm,最高输出功率可达约 80 W,在最高输出功率时其 3 dB 带宽约为 1.1 nm。为了评估后续放大过程中的光束质量,首先对经过 MFA 之后的种子激光的光束质量进行测量,结果如图 2(b)所示。根据之前的测试结果,该激光器直接输出激光的光束质量为  $M^2 \approx 1.16$ 。经过 MFA 后,激光出现了轻微的退化,光束质量为  $M^2 \approx 1.30$ 。实

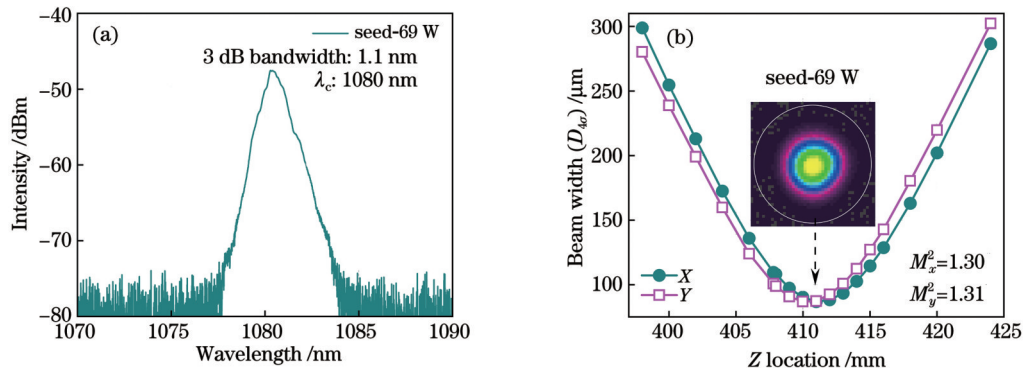


图 2 输出光谱和光束质量。(a) 种子激光器的输出光谱;(b) 经 MFA 输出后的激光的光束质量

Fig. 2 Output spectrum and beam quality. (a) Output spectrum of the seed laser; (b) beam quality of the laser output from the MFA

实际上,受大模场光纤切割、熔接,以及基于大模场面积光纤的光纤器件的影响,经过放大器系统后激光的光束质量还会出现进一步退化,这会在后面相应描述。

### 3 实验结果

#### 3.1 光纤激光器中的反常 TMI 效应

图 3 中显示了采用不同弯曲直径时的主要输出结果。从输出功率来看,受限于 TMI,当弯曲直径由

13 cm 逐渐过渡至 16 cm 时,激光器的最高输出功率分别为 2341、3367、4012、4609 W。在每一个弯曲直径下,激光器的最高斜率效率几乎保持不变。出现 TMI 后,激光器的效率都存在轻微下降。从光谱来看,由于激光器采用后向泵浦方式,光谱上不存在任何残留泵浦光。而且,得益于后向泵浦方式对非线性效应的良好抑制作用,光谱随着功率增加出现的展宽并不明显,没有出现 SRS。

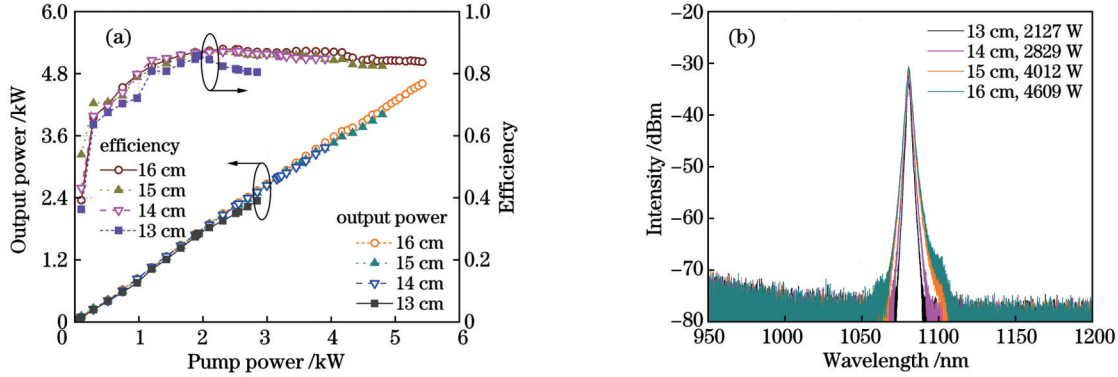


图 3 不同弯曲直径下激光器的主要输出结果。(a)不同泵浦功率下的输出功率及其对应的斜率效率;(b)不同弯曲直径下的典型输出光谱

Fig. 3 Main results of the lasers for different bending diameters. (a) Output power and corresponding slope efficiency at different pump powers; (b) typical output spectra for different bending diameters

不同弯曲直径下输出激光的光束质量随着输出功率的变化如图 4(a)所示。首先可以注意到,与图 2(b)相比较,种子激光经过系统后其光束质量出现了明显的退化(从约 1.30 退化至约 1.60~1.65),而且随着弯曲直径的增加变化不明显。可以判断激光器中的熔接以及后向泵浦/信号合束器等对光束质量的影响较大。随着输出功率增加,不同弯曲直径下输出激光的光束质量在输出功率达到一定值后都出现了较为迅速的退化,而且随着弯曲直径增加,光束质量退化时对应的输出功率明显逐渐增加。在实验中,采用带宽为 12 MHz 的光电探测器对输出激光的散射光进行测量,通过输出的时域信号及其对应的快速傅里叶变换(FFT)结果判断是否出现了 TMI。由于当前激光器的纤芯直径较大,可支持的模式数量较多,当 TMI 出现导致模式之间产生耦合时,大量的高阶模仍然能够从输出端输出,光电探测器探测到的时域信号的起伏并不明显。但是当 TMI 出现后,在时域信号的 FFT 结果中可以明显观察到 TMI 特征频谱,如图 4(b)、(c)所示。因此,在当前实验中,笔者通过时域信号的 FFT 结果来判断是否出现了 TMI。参考文献[43-44]给出了  $\sigma$  的定义,但考虑到当前激光器中 TMI 出现时频率成分基本在 5 kHz 以内,笔者定义

$$\sigma = \int_{0.1 \text{ kHz}}^{5.1 \text{ kHz}} p(\nu) d\nu / \int_{5.1 \text{ kHz}}^{10.1 \text{ kHz}} p(\nu) d\nu - 1, \quad (1)$$

式中: $p(\nu)$ 表示时域信号的 FFT 结果中不同频率成分的强度。由于 FFT 结果中直流成分的数值较大,因此

计算的起点选择为 0.1 kHz,这不会影响对 TMI 阈值的判断。当 TMI 没有出现时, $\sigma$ 的取值在 0 附近;TMI 出现后, $\sigma$ 迅速增加。图 4(d)中展示了不同弯曲直径下计算得到的不同输出功率下的  $\sigma$ 。对比可知: $\sigma$ 的变化趋势与图 4(a)中光束质量演化曲线保持着较高的一致性,并且 TMI 出现前后  $\sigma$  的计算值变化明显;在弯曲直径为 16 cm 的条件下,随着输出功率从 3708 W 增加至 4609 W, $\sigma$  的值从 0.048 增加至 3.02,涨幅超过 60 倍。将  $\sigma$  值增加至 0.2 时的输出功率定义为激光器的 TMI 阈值,可得到激光器在光纤弯曲直径由 13 cm 逐渐增大至 16 cm 时,激光器的 TMI 阈值分别为 1650、2839、3182、3740 W。由于实际的激光亮度计算较为复杂,通常可以利用输出功率和光束质量来等效评估激光的亮度。定义激光的相对亮度为  $B_R = P / (M^2 \lambda)^2$ ,其中功率  $P$  以瓦为单位,波长  $\lambda$  以微米为单位<sup>[1,45]</sup>。在不同弯曲直径下 TMI 阈值附近输出激光的相对亮度计算结果如图 4(e)所示。随着弯曲直径增加,尽管可能带来了光束质量的轻微退化,但激光器的 TMI 阈值显著增加,逐渐增加的最大输出功率带来了输出激光相对亮度的增加。

由上述结果可知,激光器的 TMI 阈值随着光纤弯曲直径的增加而逐渐增加,这是一种与报道较多的激光器 TMI 阈值随弯曲直径减小而增大的现象不一致的反常 TMI 现象。与常规的 TMI 现象相比,本文激光器输出激光在 TMI 出现前就已经呈现出明显的多模状态。根据文献[41-42]的解释,这可能是由于光纤

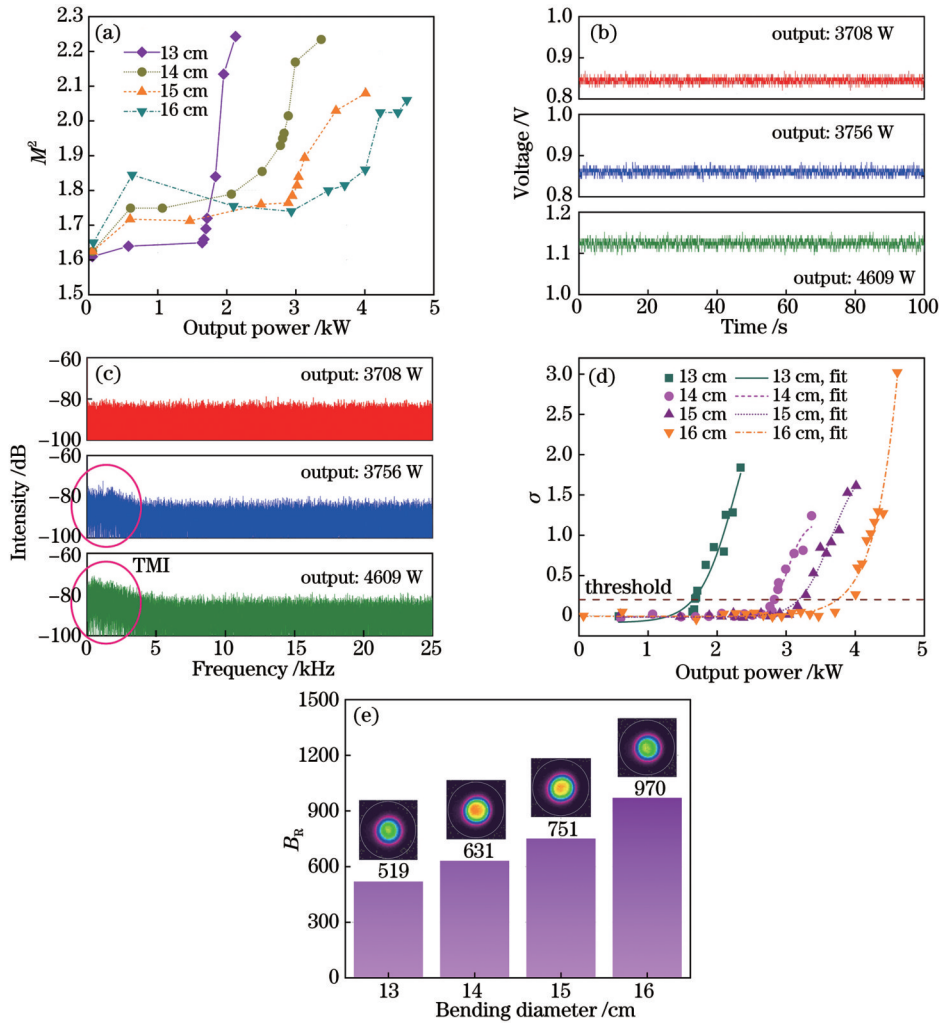


图4 不同弯曲直径下输出激光的性能参数。(a)输出激光的光束质量随输出功率的变化;(b)通过光电探测器探测到的TMI出现前后的输出激光的时域信号;(c)图(b)中时域信号对应的FFT结果;(d)通过时域信号的FFT结果计算得到的 $\sigma$ 值随输出功率的变化;(e)TMI阈值附近输出激光的相对亮度

Fig. 4 Performance parameters of the output laser for different bending diameters. (a) Variation of the beam quality of the output laser with the output power; (b) time-domain signals of the output laser before and after the occurrence of TMI detected by the photodetector; (c) FFT results corresponding to the time-domain signals in Fig. (b); (d) calculated  $\sigma$  by FFT results of time-domain signals as a function of the output power; (e) relative brightness of the output laser near the TMI threshold

中存在较多与基模非相干的高阶模,这些非相干高阶模的存在只会造成光束质量退化,而不会降低TMI阈值。此外,文翰钧等<sup>[40]</sup>成功地通过增加光纤的弯曲直径抑制了TMI,将激光器的输出功率从2500 W提升至10.53 kW。他们在文献[40]中的解释是针对支持模式较多的光纤进行的,他们认为较小的弯曲直径会导致各个模式的模场分布产生更多的畸变,模场之间的交叠增加,模式之间更容易发生耦合,从而降低了TMI阈值。总而言之,通过增加光纤的弯曲直径可以抑制光纤激光器中的TMI,在牺牲部分光束质量的前提下获得非常显著的功率提升,同时带来了输出激光亮度的提升。

### 3.2 结合泵浦波长优化和反常TMI抑制实现7 kW高亮度光纤放大器

由3.1节的结果可知,在采用直径为16 cm的水冷

柱以及中心波长为976 nm的LD作为泵浦源时,激光器的TMI阈值为3740 W,输出功率可以持续增加至4 kW以上。根据已报道的泵浦波长对TMI影响的实验研究可知,通过优化泵浦波长可以实现7 kW以上没有TMI的激光输出。因此,考虑采用中心波长为981 nm的LD继续提升激光器的输出功率以及输出激光的亮度。改进后的激光器结构如图5所示。为了保证足够的泵浦吸收,将增益光纤的长度增加至45 m。同时将后向泵浦/信号合束器更换成一个(18+1)×1的后向泵浦/信号合束器,其中的11个泵浦臂与11组输出功率约为900 W的中心波长981 nm LD熔接,6个泵浦臂与6组输出功率约为900 W的中心波长976 nm LD熔接。需要注意的是,在实验中虽然同时将中心波长为976 nm和981 nm的LD接入激光器的放大级中,但是在测试时没有同时使用,整个实验过程都严格对比

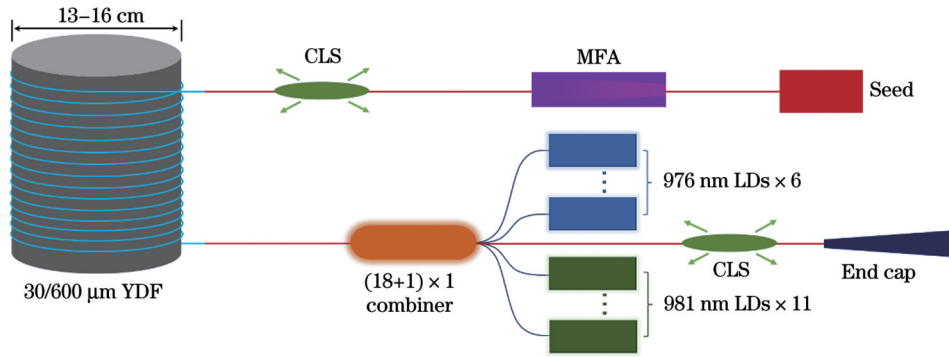


图 5 泵浦波长优化后的激光器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the laser after pump wavelength optimization

相同泵浦波长条件下激光器的输出特性。激光器的其余部分结构保持不变。

首先,对比了同样在中心波长为 976 nm 的 LD 泵

浦条件下激光器的 TMI 阈值,如图 6(a)所示。在同样的计算方式下,当光纤的弯曲直径为 13 cm 和 15 cm 时,增加光纤长度后激光器的 TMI 阈值几乎保持不

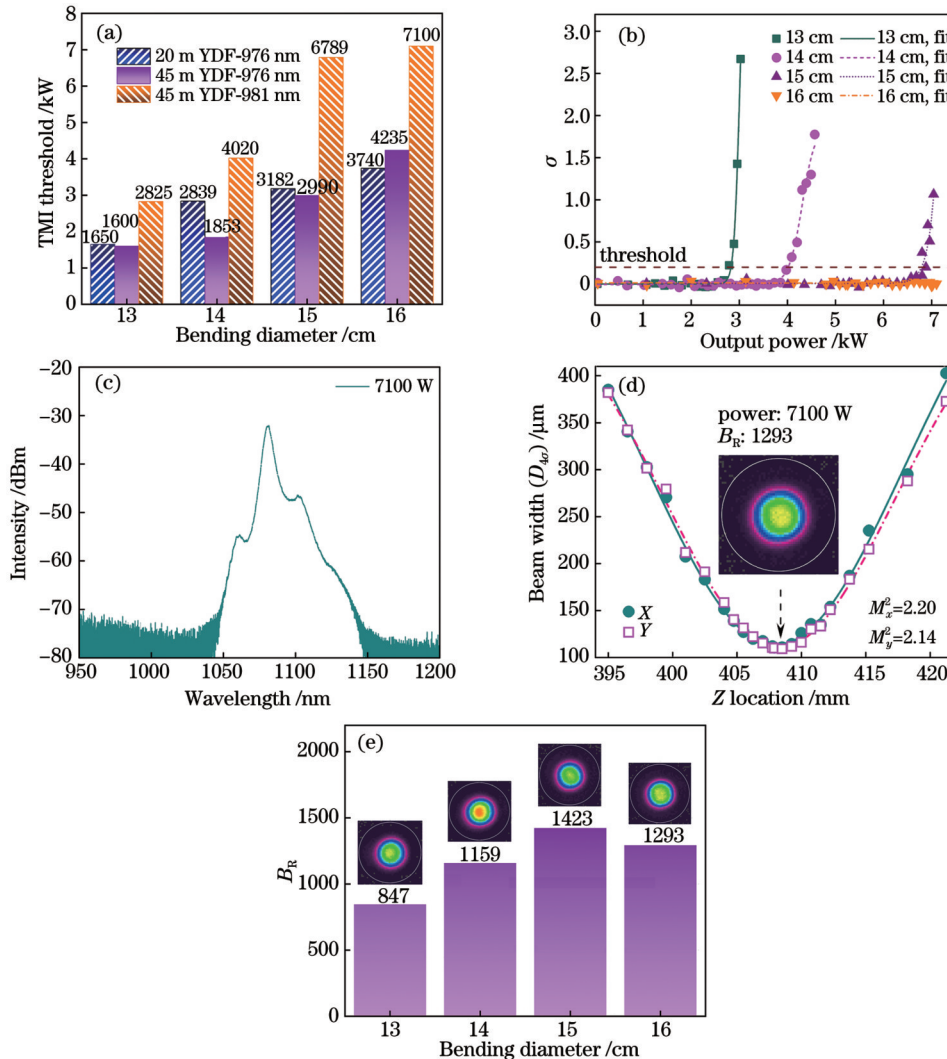


图 6 泵浦波长和光纤长度优化后的实验结果。(a)优化前后的 TMI 阈值对比;(b)通过时域信号的 FFT 结果计算得到的  $\sigma$  值随输出功率的变化;(c)最高功率(7100 W)时的输出光谱;(d)最高输出功率时的光束质量以及相对亮度;(e)采用中心波长为 981 nm 的 LD 泵浦时,不同弯曲直径下 TMI 阈值附近输出激光的相对亮度

Fig. 6 Experimental results after optimizing the pump wavelength and fiber length. (a) Comparison of TMI thresholds before and after optimization; (b) calculated  $\sigma$  using FFT results of time-domain signals as a function of the output power; (c) output spectrum at maximum power (7100 W); (d) beam quality and relative brightness at maximum output power; (e) relative brightness of the output laser near the TMI threshold under different bending diameters when the LD with a central wavelength of 981 nm is pumped

变,而弯曲直径为 14 cm 和 16 cm 时 TMI 阈值均有 500 W 以上的变化。笔者判断这是因为熔接状态差异导致了 TMI 阈值的变化。优化后,在 TMI 阈值附近输出激光的光束质量均存在轻微退化,其原因是更换后的后向泵浦/信号合束器对光束质量的保持能力不好。图 6(b)展示了采用中心波长为 981 nm 的 LD 作为泵浦源时计算得到的  $\sigma$  随输出功率的变化,可知:当弯曲直径分别为 13、14、15、16 cm 时,激光器的 TMI 阈值分别为 2825、4020、6789、7100 W。在同样的弯曲直径下,采用中心波长为 981 nm 的 LD 泵浦时,TMI 阈值约为采用中心波长为 976 nm 的 LD 泵浦时的 2 倍。受限于总泵浦功率以及增益光纤对泵浦光吸收不充分的影响,激光器的效率较低(约为 70.1%),最高输出功率为 7100 W,没有出现 TMI。输出光谱和光束质量如图 6(c)和图 6(d)所示,没有出现 SRS,光束质量为  $M^2 \approx 2.17$ 。经计算,最大功率时输出激光的相对亮度为 1293。图 6(e)给出了采用中心波长为 981 nm 的 LD 泵浦时不同弯曲直径下 TMI 阈值附近(弯曲直径为 16 cm 时为最高输出功率)的输出激光的相对亮度。可见:随着弯曲直径增加,激光器的相对亮度逐渐增大;当弯曲直径为 16 cm 时,输出功率因受限于泵浦功率而未能进一步提升,因而输出激光的亮度受限。在泵浦功率足够的条件下,激光器能够在保持光束质量的同时进一步提升输出功率,同时带来亮度的提升。

## 4 结 论

笔者基于纤芯/包层直径为 30/600  $\mu\text{m}$  的双包层掺镱光纤以及具有不同直径的光纤水冷柱设计了一台高功率光纤激光放大器。基于此,开展了反常模式不稳定效应的实验研究。结果表明,在光纤中可支持模式数量较多的情况下,可以通过增加光纤的弯曲直径提升激光器的 TMI 阈值,同时提升输出激光的亮度。实验中,当采用中心波长为 976 nm 的 LD 泵浦时,随着弯曲直径由 13 cm 增加至 16 cm,激光器的 TMI 阈值由 1650 W 提升至 3740 W,提升幅度约 1.27 倍,输出激光的相对亮度由 519 提升至 970,提升了 87%。增大光纤弯曲直径虽然会导致输出激光的光束质量发生轻微退化,但 TMI 阈值的显著提升能够显著增加激光器的最高输出功率,从而提升输出激光的亮度。最后,通过增大光纤的弯曲直径以及优化泵浦波长,成功抑制了 TMI,并实现了 7100 W 高亮度激光输出,相对亮度为 1293,是相同条件下弯曲直径为 13 cm 时输出激光相对亮度的 1.53 倍。本文可为抑制高功率光纤激光器中的反常模式不稳定效应以及提升激光器的输出功率和亮度提供指导。

## 参 考 文 献

- 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.
- Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- Zuo J X, Lin X C. High-power laser systems[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(5): 2100741.
- Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability[J]. Advances in Optics and Photonics, 2020, 12(2): 429-484.
- Zervas M N. Transverse mode instability, thermal lensing and power scaling in Yb<sup>3+</sup>-doped high-power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 19019-19041.
- Dong L, Ballato J, Kolis J. Power scaling limits of diffraction-limited fiber amplifiers considering transverse mode instability[J]. Optics Express, 2023, 31(4): 6690-6703.
- Ye Y, Yang B L, Wang X L, et al. Experimental study of SRS threshold dependence on the bandwidths of fiber Bragg gratings in co-pumped and counter-pumped fiber laser oscillator[J]. Journal of Optics, 2019, 21(2): 025801.
- Li T L, Ke W W, Ma Y, et al. Suppression of stimulated Raman scattering in a high-power fiber amplifier by inserting long transmission fibers in a seed laser[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(6): 1457-1465.
- Wang M, Zhang Y J, Wang Z F, et al. Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings and suppression of stimulated Raman scattering in fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1529-1534.
- Nodop D, Jauregui C, Jansen F, et al. Suppression of stimulated Raman scattering employing long period gratings in double-clad fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2982-2984.
- 李昊,王蒙,武柏屹,等. 飞秒级联啁啾倾斜光纤光栅用于拉曼滤除[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1036001.
- Li H, Wang M, Wu B Y, et al. Femtosecond cascade chirped and tilted fiber Bragg gratings for Raman filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 1036001.
- Eidam T, Hanf S, Seise E, et al. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power[J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 94-96.
- Stutzki F, Otto H J, Jansen F, et al. High-speed modal decomposition of mode instabilities in high-power fiber lasers[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4572-4574.
- Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- Jauregui C, Eidam T, Limpert J, et al. The impact of modal interference on the beam quality of high-power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3258-3271.
- Eidam T, Wirth C, Jauregui 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.
- Jauregui C, Eidam T, Otto H J, et al. Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 12912-12925.
- Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11407-11422.
- Jansen F, Stutzki F, Otto H J, et al. Thermally induced waveguide changes in active fibers[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 3997-4008.
- Naderi S, Dajani I, Grosek J, et al. Theoretical analysis of effect of pump and signal wavelengths on modal instabilities in Yb-doped fiber amplifiers[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8964: 89641W.
- Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. Study of wavelength dependence of mode instability based on a semi-analytical model[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 51(8): 1600106.
- Hejaz K, Norouzey A, Poozesh R, et al. Controlling mode instability in a 500 W ytterbium-doped fiber laser[J]. Laser Physics, 2014, 24(2): 025102.
- 万颖超,杨保来,奚小明,等. 不同泵浦波长光纤激光器模式不稳定效应对比[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 20210256.

- Wan Y C, Yang B L, Xi X M, et al. Transverse mode instability effect of fiber lasers with different pump wavelengths[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 20210256.
- [24] Wan Y C, Xi X M, Yang B L, et al. Enhancement of TMI threshold in Yb-doped fiber laser by optimizing pump wavelength [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(13): 656-659.
- [25] Roohforouz A, Chenar R E, Azizi S, et al. Effect of pumping configuration on the transverse mode instability power threshold in a 3.02 kW fiber laser oscillator[C]//*Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS & C)*, September 29-October 3, 2019, Vienna, Austria. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2019: JM5A.29.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Huang Z M, Shu Q A, Luo Y, et al. 3.5 kW narrow-linewidth monolithic fiber amplifier at 1064 nm by employing a confined doping fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(10): 2945-2952.
- [29] Zhang F F, Wang Y B, Lin X F, et al. Gain-tailored Yb/Ce codoped aluminosilicate fiber for laser stability improvement at high output power[J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20824-20836.
- [30] Zhang Z L, Lin X F, Zhang X, et al. Low-numerical aperture confined-doped long-tapered Yb-doped silica fiber for a single-mode high-power fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32333-32346.
- [31] Tao R M, Su R T, Ma P F, et al. Suppressing mode instabilities by optimizing the fiber coiling methods[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(2): 025101.
- [32] 王小林, 文榆钧, 张汉伟, 等. 变纤芯直径掺镱光纤激光器: 现状与趋势[J]. *中国激光*, 2022, 49(21): 2100001.  
Wang X L, Wen Y J, Zhang H W, et al. Yb-doped fiber laser with variable core diameter: present situation and trend[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(21): 2100001.
- [33] 张志伦, 林贤峰, 李文臻, 等. 低数值孔径部分掺杂纺锤形光纤实现 4 kW 近衍射极限激光输出[J]. *中国激光*, 2022, 49(13): 1315002.  
Zhang Z L, Lin X F, Li W Z, et al. Realization of 4 kW near diffraction limit laser output with low numerical aperture partially doped spindle fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(13): 1315002.
- [34] Su R T, Tao R M, Wang X L, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(8): 085102.
- [35] Beier F, Hupel C, Nold J, et al. Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [36] Wang J M, Yan D P, Xiong S S, et al. Mode instability in high power all-fiber amplifier with large-mode-area gain fiber[J]. *Optics Communications*, 2017, 396: 123-126.
- [37] Haarlammert N, Sattler B, Liem A, et al. Optimizing mode instability in low-NA fibers by passive strategies[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2317-2320.
- [38] Zhang F F, Xu H Z, Xing Y B, et al. Bending diameter dependence of mode instabilities in multimode fiber amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(3): 035104.
- [39] Wen Y J, Wang P, Shi C, et al. Experimental study on transverse mode instability characteristics of few-mode fiber laser amplifier under different bending conditions[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 1539106.
- [40] 文榆钧, 王鹏, 奚小明, 等. 激光二极管直接后向泵浦的高光束质量万瓦光纤激光器[J]. *物理学报*, 2022, 71(24): 244202.  
Wen Y J, Wang P, Xi X M, et al. High beam quality 10,000-watt fiber laser directly pumped by laser diode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(24): 244202.
- [41] Chu Q H, Tao R M, Li C Y, et al. Experimental study of the influence of mode excitation on mode instability in high power fiber amplifier[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9396.
- [42] Wu H S, Li H B, An Y, et al. Transverse mode instability mitigation in a high-power confined-doped fiber amplifier with good beam quality through seed laser control[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10(6): e44.
- [43] Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. Comparison of the threshold of thermal-induced mode instabilities in polarization-maintaining and non-polarization-maintaining active fibers[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6): 065501.
- [44] Chu Q H, Shu Q A, Chen Z, et al. Experimental study of mode distortion induced by stimulated Raman scattering in high-power fiber amplifiers[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(4): 595-600.
- [45] Beyer E, Mahrle A, Lütke M, et al. Innovations in high power fiber laser applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8237: 823717.

## Experimental Research on Abnormal Transverse Mode Instability in High-Power Fiber Lasers

Zeng Lingfa<sup>1</sup>, Wen Yujun<sup>1</sup>, Wang Xiaolin<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Peng<sup>1,2,3</sup>, Xi Xiaoming<sup>1,2,3</sup>, Yang Baolai<sup>1,2,3</sup>, Zhang Hanwei<sup>1,2,3</sup>, Xi Fengjie<sup>1,2,3</sup>, Han Kai<sup>1,2</sup>, Wang Zefeng<sup>1,2,3</sup>, Xu Xiaojun<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

<sup>2</sup>Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

<sup>3</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

### Abstract

**Objective** Since its first report in 2010, transverse mode instability (TMI) remains one of the primary limiting factors in the power scaling of high-power fiber lasers. Fiber bending presents a straightforward and effective TMI suppression technique based on mode control. Typically, a negative correlation exists between the TMI threshold and fiber bending diameter. This implies that decreasing

the bending diameter increases the TMI threshold. In near-single-mode fiber laser systems, the laser's output power usually increases by reducing the bending diameter to suppress TMI. However, to counteract nonlinear effects exemplified by the SRS and enhance the pumping capacity, fibers with larger mode fields and cladding diameters gain widespread use in high-power fiber lasers. Throughout this transition, an unusual TMI phenomenon is observed where the threshold power increases with the fiber bending diameter's increase. In this scenario, the beam quality of the output laser can be sacrificed to a certain extent in favor of power enhancement, thereby boosting brightness. In this study, an experimental investigation is conducted on the abnormal TMI effect in high-power fiber lasers with respect to varying fiber bending diameters. It is expected that these findings will pave new paths for the evolution of high-brightness fiber lasers.

**Methods** In this study, we designed a high-power fiber laser amplifier based on a double cladding ytterbium doped fiber with a core/cladding diameter of 30/600  $\mu\text{m}$ , combined with water-cooled columns with cylindrical fiber grooves of different diameters. The nominal absorption coefficient of this fiber was 0.40 dB/m@915 nm. In the experiment, we used water-cooled columns with diameters of 13, 14, 15, and 16 cm to compare the output characteristics of the lasers with different fiber bending diameters. First, under the condition of a fiber length of 20 m, the TMI threshold of the laser with different bending diameters was examined using a wavelength-stabilized 976 nm LDs as the pump source, and the abnormal TMI phenomenon was examined. Subsequently, the fiber length was increased to 45 m by combining the pump wavelength optimization and abnormal TMI suppression to realize a high-brightness fiber laser amplifier.

**Results and Discussions** When the fiber length is 20 m and wavelength stabilized 976 nm LDs serve as the pump source, the TMI thresholds of the laser are 1650, 2839, 3182, and 3740 W as the fiber bending diameter gradually increases from 13 to 16 cm (Fig. 4). The corresponding calculated relative brightness values of the output laser are 519, 631, 751, and 970, respectively (Fig. 4). As the fiber bending diameter increases, even though this might lead to a slight degradation in the beam quality, the TMI threshold of the laser significantly rises, and the progressively increasing maximum output power results in an increase in the relative brightness of the output laser. After optimizing the fiber length and pump wavelength, as the bending diameter gradually increases from 13 to 15 cm, the TMI thresholds of the laser are 2825, 4020, and 6789 W (Fig. 6). When the bending diameter increases to 16 cm, the maximum output power reaches 7100 W without TMI and SRS. The beam quality ( $M^2$ ) at this power is about 2.17, and the relative brightness is 1293 (Fig. 6). As the fiber bending diameter increases, the relative brightness of the laser also gradually increases. At a bending diameter of 16 cm, the maximum output power obtains limited from the pump power, leading to no further advancements in the output power or brightness.

**Conclusions** In this study, a design for a high-power fiber laser amplifier is presented based on a double cladding ytterbium doped fiber with a core/cladding diameter of 30/600  $\mu\text{m}$  and water-cooled columns of different diameters. Based on this, experiments are conducted on abnormal TMI effects. The results indicate that when the fiber supports many modes, increasing the bending diameter can raise the TMI threshold of the laser and also enhance the brightness of the output laser. In the experiment, using a wavelength-stabilized 976 nm LDs, as the bending diameter increases from 13 cm to 16 cm, the TMI threshold of the laser rises from 1650 W to 3740 W, showing an increase of approximately 1.27 times. The relative brightness of the output laser rises from 519 to 970, marking an increment of 0.87 times. Although increasing the fiber bending diameter might slightly degrade the beam quality of the output laser, the notable rise in the TMI threshold significantly augments the laser's maximum output power, thereby elevating the brightness of the output laser. Ultimately, by expanding the fiber bending diameter and optimizing the pump wavelength, TMI is successfully suppressed, achieving a 7100 W high-brightness laser output with a relative brightness of 1293. This is 1.53 times the relative brightness of the output laser under identical conditions when the bending diameter is 13 cm. The findings from this study offer guidance for TMI suppression and enhancements in the output power and brightness of high-power fiber lasers.

**Key words** fiber optics; fiber amplifier; abnormal transverse mode instability; fiber bending; pump wavelength optimization