

# 掺镱全光纤激光振荡器横向模式不稳定与受激拉曼散射的关系

王小林<sup>1,2,3,\*</sup>, 陶汝茂<sup>1,2,3</sup>, 杨保来<sup>1,2,3</sup>, 史尘<sup>1,2,3</sup>, 张汉伟<sup>1,2,3</sup>, 周朴<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>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 湖南 长沙 410073

**摘要** 研究了掺镱全光纤激光振荡器中横向模式不稳定效应与受激拉曼散射之间的关系。在纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$  的单端抽运 1.5 kW 级全光纤激光振荡器中, 当受激拉曼散射达到一定阈值时, 横向模式不稳定效应突然出现, 激光器输出功率突然减小, 减小的输出功率由包层光滤波器倾泻到谐振腔外。实验发现: 受激拉曼散射光谱增强、输出功率减小与包层光滤波器温度上升存在一定的关联; 通过缩短光纤长度抑制受激拉曼散射, 可以将单端抽运激光振荡器的横向模式不稳定阈值增大到 2 kW 以上。对纤芯直径为 25  $\mu\text{m}$  的双端抽运激光振荡器进行研究, 同样通过抑制受激拉曼散射增大了横向模式不稳定阈值, 获得了大于 5 kW 的激光功率输出。实验结果初步验证了在非线性的情况下, 受激拉曼散射是导致横向模式不稳定的原因, 通过抑制受激拉曼散射可以增大横向模式不稳定阈值。

**关键词** 激光光学; 光纤激光; 光纤激光振荡器; 横向模式不稳定; 受激拉曼散射; 非线性效应

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801008

## Relationship Between Transverse Mode Instability and Stimulated Raman Scattering in Ytterbium Doped All-Fiber Laser Oscillator

Wang Xiaolin<sup>1,2,3,\*</sup>, Tao Rumao<sup>1,2,3</sup>, Yang Baolai<sup>1,2,3</sup>, Shi Chen<sup>1,2,3</sup>,  
Zhang Hanwei<sup>1,2,3</sup>, Zhou Pu<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, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>3</sup>Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** The relationship between transverse mode instability effect and stimulated Raman scattering (SRS) in Ytterbium doped all-fiber laser oscillator is studied. In the single-end pumped 1.5 kW class all-fiber laser oscillator with core diameter of 20  $\mu\text{m}$ , when the stimulated Raman scattering reaches to a certain value, the transverse mode instability effect appears, in this case, the power in the laser oscillator decreases. The decreased power is stripped out of the laser oscillator by the cladding light stripper. It is found in the experiment that the enhancement of the stimulated Raman scattering spectrum, the decrease of the fiber laser power, and the increase of the temperature of the cladding light stripper have an inherence relationship. By shortening the fiber in the laser to mitigate the stimulated Raman scattering, we can increase the transverse mode instability threshold in the single-end pumped laser oscillator up to 2 kW. Similar results by increasing transverse mode instability threshold employing suppression the stimulated Raman scattering are also validated in the double-side pumped all-fiber laser oscillator with fiber core diameter of 25  $\mu\text{m}$ , and laser output greater than 5 kW is demonstrated. The experimental results validates that when the nonlinear effect is somewhat strong, the stimulated Raman scattering is the reason for the transverse mode instability. By mitigating the stimulated Raman scattering effect, we can also increase the

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-04-08; 录用日期: 2018-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61735007, 61505260)

\* E-mail: chinaphotonics@163.com

transverse mode instability threshold.

**Key words** laser optics; fiber laser; fiber laser oscillator; transverse mode instability; stimulated Raman scattering; nonlinear effect

**OCIS codes** 140.3410; 140.3510; 140.3615

## 1 引 言

大功率光纤激光在工业领域有广泛的应用,获得大功率、高光束质量光纤激光输出一直是各应用领域的迫切需求。长期以来,非线性效应、抽运亮度、热透镜效应被认为是大功率光纤激光功率增大的主要限制因素<sup>[1-3]</sup>。在实际的宽谱大功率光纤激光器中,受激拉曼散射(SRS)被认为是阈值最低的影响激光功率增大的首要物理限制因素<sup>[1-3]</sup>。然而,自2010年横向模式不稳定(TMI)效应<sup>[4-5]</sup>被发现以来,其成为近单模高光束质量光纤激光器功率增大的重要限制因素<sup>[5-7]</sup>。在大模场光纤激光器实验中,TMI阈值甚至远小于SRS阈值<sup>[8-9]</sup>,成为这类激光器功率增大的首要限制因素<sup>[10]</sup>。2010年以来,国际上大致有20余家单位对TMI的产生机理、抑制方法进行了深入理论和实验研究<sup>[11-22]</sup>,提出了诸如增加种子功率<sup>[23]</sup>、优化抽运波长<sup>[24]</sup>、优化抽运方式<sup>[17]</sup>、弯曲增益光纤抑制高阶模式<sup>[25]</sup>、降低光子暗化<sup>[11]</sup>、设计新型光纤<sup>[26-27]</sup>、抽运调制<sup>[28]</sup>等许多抑制TMI、增大光纤激光器输出功率的方法。

一般而言,TMI主要由增益光纤内的热效应引起,以德国耶拿大学为主的诸多研究单位将其归结为一类热效应,认为其与非线性效应之间没有必然联系<sup>[26]</sup>。然而,早在2015年,韩国原子能研究所对单频放大器中的TMI阈值进行研究后发现:TMI阈值与SRS阈值基本一致<sup>[29]</sup>。2017年,伊朗科技大学研究人员在大功率全光纤放大器实验中也发现TMI与SRS之间存在一定的关系:当输出激光中SRS功率达到一定比例时,放大器出现明显的TMI效应,通过抑制SRS能够有效提升TMI阈值<sup>[30]</sup>。在全光纤激光振荡器中TMI与SRS之间是否存在一定的关系,目前尚未见任何相关报道。光纤激光振荡器具有结构简单、成本低廉的特点<sup>[31-32]</sup>,在工业

应用中具有更好的稳定性和可靠性。本文详细研究了掺镱全光纤激光振荡器中TMI与SRS之间的关系;实验发现在单端抽运的1.5 kW级光纤激光振荡器中(纤芯/内包层直径为20 μm/400 μm),当SRS达到一定阈值时,TMI效应出现,谐振腔输出功率突然减小,通过缩短光纤长度抑制SRS,可以增大TMI阈值。

## 2 实 验

1.5 kW掺镱全光纤激光振荡器采用单端抽运的方式,该振荡器的结构如图1所示。激光谐振腔由高反射光纤光栅(HRFBG,中心波长为1080 nm,3 dB带宽为3 nm,反射率>99.9%)和输出耦合光纤光栅(OCFBG,中心波长为1080 nm,3 dB带宽为1 nm,反射率≈10%)共同组成。抽运源为中心波长是915 nm的160 W光纤耦合半导体激光器(LD),耦合输出光纤的纤芯/包层直径为105 μm/125 μm。抽运光经19×1的抽运合束器(PC)后进入HRFBG,合束器的抽运注入和输出光纤纤芯/内包层直径分别与LD尾纤和增益光纤尺寸匹配,图中F<sub>1</sub>~F<sub>4</sub>为熔接点。实验中,掺杂光纤在915 nm的吸收系数为0.42 dB/m,光纤总长度为42 m。谐振腔产生的激光由OCFBG输出,然后经过多段包层光滤除器(CLS1、CLS2、CLS3、CLS4),以消除抽运光和高阶模式,之后由商用光纤端帽(end cap)输出。为了进行包层光滤除,在光纤光栅后接了一段长度为1.5 m的传能光纤(纤芯/内包层直径为20 μm/400 μm)。为了满足工业加工的要求,使用总长度为18.5 m、纤芯直径为50 μm的光纤激光光缆(QBH)尾纤与20 μm/400 μm传能光纤连接。CLS1是掺镱光纤(YDF)与OCFBG熔点处的包层光滤除器,CLS2是OCFBG与20 μm/400 μm传能光纤熔点处的包层光滤除器,CLS3是20 μm/

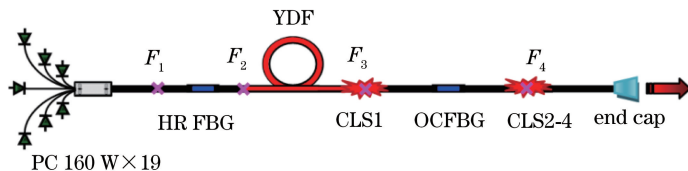


图1 单端抽运全光纤激光振荡器的结构

Fig. 1 Structure of single-end pumped all-fiber laser oscillator

400  $\mu\text{m}$  传能光纤中段的包层光滤除器, CLS4 是 20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  传能光纤与 QBH 尾纤熔接点处的包层光滤除器; CLS1、CLS2、CLS3、CLS4 均在实验过程采用高折射率胶现场制作完成。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 单端抽运激光振荡器中 SRS 与 TMI 的关系

首先测试单端抽运激光振荡器输出功率与抽运功率之间的关系, 结果如图 2 所示。由图 2 可知: 当抽运功率小于 1.85 kW 时, 随着抽运功率增大, 振荡器输出功率基本呈线性增长; 当抽运功率为 1.845 kW 时, 输出功率为 1.27 kW; 当输出功率增大到 1.85 kW 时, 发生明显的 TMI 效应, 包层光滤除器滤除了 TMI 产生的高阶模式, 使得输出激光功率突然减小到 1 kW 左右。

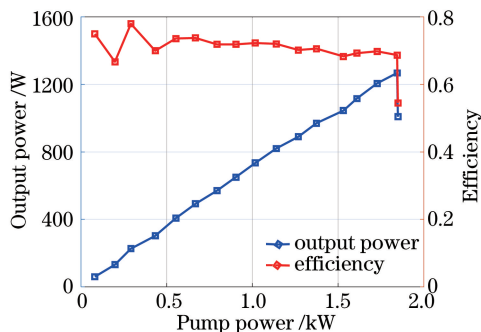


图 2 单端抽运激光振荡器输出功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Relationship between output power and pump power of single-end pumped laser oscillator

对出现明显 TMI 前后的功率点进行研究。首先测试 TMI 出现前后包层光滤除器的温度特性, 典型结果如图 3 所示。由图 3 可知, 当抽运功率为 1.845 kW 时, 没有出现明显的 TMI, 最高温度点集中在距离 OCFBG 最近的包层光滤除器部分, 即图中的 CLS1, 最高温度在 57  $^{\circ}\text{C}$  左右, 后面 3 段包层光滤除器的温度都低于 41  $^{\circ}\text{C}$ , 在最后一断包层光滤除器 (CLS4) 上基本看不到明显的温度变化; 随着抽运功率增大, TMI 出现后, 第 2~第 4 段包层光滤除器都出现了明显的温度升高, 最高温度达到了 73.5  $^{\circ}\text{C}$ 。结果表明, 较多包层光被滤除使得激光输出功率急速减小, 这与文献[8]中放大器的实验结果类似。

然后测试 TMI 出现前后单端抽运激光振荡器的输出光谱特性, 典型结果如图 4 所示。由图 4 可知: 当抽运功率为 1.845 kW 时, 由于振荡器的增益光纤和谐振腔外的传能光纤都较长, 因此激光器光

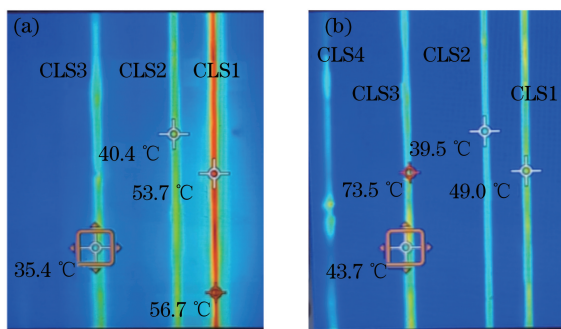


图 3 TMI 出现前后包层光滤除器的温度特性。(a) 抽运功率为 1.845 kW, 无 TMI; (b) 抽运功率为 1.85 kW, 出现 TMI

Fig. 3 Temperature characteristic of CLS with and without TMI. (a) Pump power of 1.845 kW without TMI; (b) pump power of 1.85 kW with TMI

谱中存在较多 SRS 成分, 拉曼光谱 (1135 nm) 峰值为激光光谱 (1080 nm) 峰值的 1/10 左右, 如图 4 中实线所示; 继续增大抽运功率到 1.85 kW 左右, TMI 出现, 此时腔内产生了较多的高阶模式, 纤芯中的激光功率迅速减小, 使得 SRS 也急剧降低, 导致测试到的激光光谱中的 SRS 比信号光谱低 30 dB 左右, 如图 4 中的虚线所示。

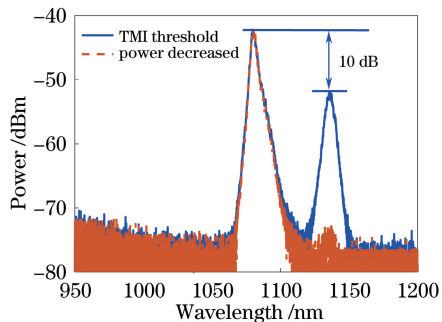


图 4 TMI 出现前后单端抽运激光振荡器的输出光谱特性

Fig. 4 Output spectrum characteristic of single-end pumped laser oscillator with and without TMI

如果增益光纤和传能光纤的长度能控制在一定范围内, 原则上, 当输出功率小于 1.5 kW 时不会出现 TMI<sup>[33]</sup>。由此推测 TMI 阈值较小的原因可能与 SRS 有关。为了验证该推测, 考虑通过缩短传能光纤和增益光纤来研究 SRS 是否对 TMI 阈值有明显的影响。实验中, 首先缩短传能光纤, 将纤芯/内包层直径为 20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  的传能光纤去掉, 并将纤芯/内包层直径为 50  $\mu\text{m}/360 \mu\text{m}$  的 QBH 尾纤从 18.5 m 分别缩短到 13 m 和 9 m。测试 TMI 阈值与传能光纤长度的关系, 典型结果如图 5 所示。

将不同实验条件下功率明显减小点作为 TMI 阈值点, 结果如表 1 所示。由表 1 可知: 随着传能光

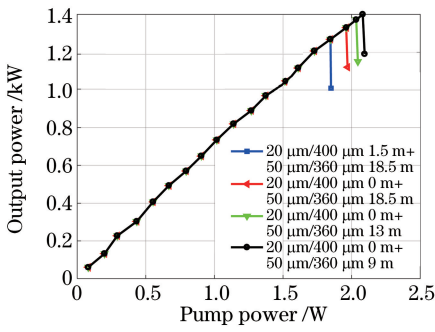


图 5 不同光纤长度下单端抽运激光振荡器的输出功率特性  
Fig. 5 Output power characteristic of single-end pumped laser oscillator with different fiber lengths

表 1 不同传能光纤长度下出现 TMI 的抽运阈值

Table 1 TMI pump threshold with different passive fiber lengths

Fiber length for CLS /m	QBH fiber length /m	Pump threshold /kW	Output power /kW
1.5	18.5	1.845	1.268
0	18.5	1.961	1.330
0	13.0	2.033	1.372
0	9.0	2.081	1.400

纤长度缩短, SRS 和 TMI 阈值都明显提升; 当传能光纤长度为 9 m 时, TMI 抽运阈值为 2.081 kW, 输出功率为 1.400 kW, 比最初的输出功率 1.268 kW 增大了 130 W 左右。在整个实验过程中, 由于增益光纤长度不变, 因此激光器的效率没有明显变化。

在保持传能光纤为 9 m 的情况下, 将增益光纤长度缩短为 37.5 m, 可以有效地将 SRS 抑制在信号光 20 dB 以下, 获得 1.57 kW 的激光功率输出, 输出功率效率曲线如图 6(a) 所示。进一步将增益光纤缩短至 27 m, 能够获得大于 2 kW 的功率输出, 典型的激光功率和光谱如图 6(b)、(c) 所示。由图 6(c) 可知: 当输出功率为 2.04 kW 时, 在激光输出光谱中, SRS 比信号光低了 27.2 dB。结果表明: 通过缩短增益光纤, SRS 得到了更有效的抑制, TMI 阈值也得到了较大幅度的提升; 但是由于增益光纤缩短后, 总的抽运吸收有所降低, 因此激光器光光效率较之前有所偏低。

此外, 在实验中测量了 2 kW 振荡器的光束质量, 由于采用了弯曲等方法来抑制高阶模式, 因此光束质量  $M^2$  为 1.2 左右。

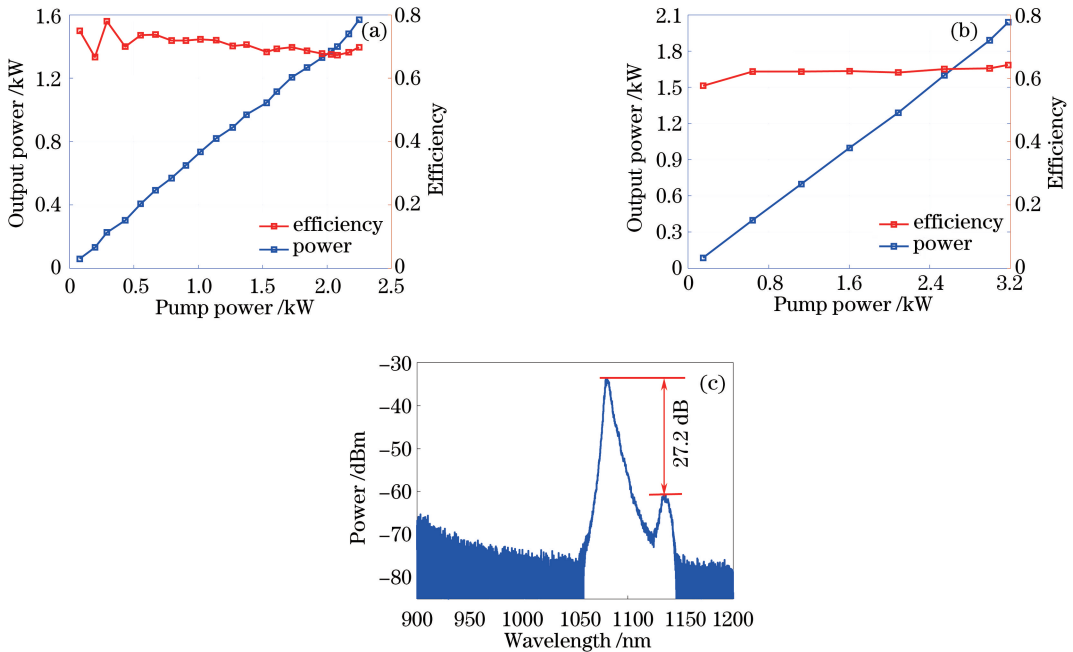


图 6 缩短增益光纤长度后的功率与光谱。(a)增益光纤为 37.5 m 时的功率;  
(b)增益光纤为 27 m 时的功率;(c)增益光纤为 27 m 时的光谱

Fig. 6 Power and spectrum after reducing active fiber lengths. (a) Power with active fiber length of 37.5 m;  
(b) power with active fiber length of 27 m; (c) spectrum with active fiber length of 27 m

对实验结果进行分析后认为, 在该振荡器中, SRS 是导致 TMI 产生的主要因素。当 SRS 较强时, SRS 和信号光之间的功率相互转换使得增益

光纤上能级粒子数产生相应变化, 导致出现了类似电致伸缩的 TMI 效应<sup>[20,34]</sup>。TMI 产生后, 高阶模式随即被激发, 光纤本身只支持 2 个模式, 弯曲

的光纤使得高阶模式被泄露到包层中,而包层光滤除器刚好将这些高阶模式滤除,使得包层光滤除器的温度上升,导致从光纤端帽输出的激光功率减小。同时,高阶模式的产生导致光纤纤芯内部单模激光功率减小,使得 SRS 也下降。此外,在 TMI 出现后,由于包层光滤除器温度过高,因此激光器稳定性较差,难以长时间稳定工作。

### 3.2 双端抽运激光振荡器中的 SRS 抑制与 TMI 阈值增大

为了进一步研究 SRS 与 TMI 的关系,对图 7 所示的纤芯/内包层直径为  $25\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$  的双端

抽运全光纤振荡器进行实验研究,利用大模场掺镱光纤(LMA-YDF)作为激光器增益介质。HRFBG、OCFBG 和 YDF 构成谐振腔。增益光纤的纤芯/内包层直径为  $25\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 。 $7\times 1$  前向 PC 将 6 组 800 W 的 915 nm LD 合为一束注入谐振腔中。后向抽运采用  $(6+1)\times 1$  的合束器(PSC)将与前向同等功率的抽运光注入到增益光纤中,同时将放大器的信号光输出。为了减小输出光栅的抽运功率,将后向合束器置于谐振腔内。谐振腔输出的激光经过严格的包层光滤除器后,经由商用光纤端帽(end cap)输出。

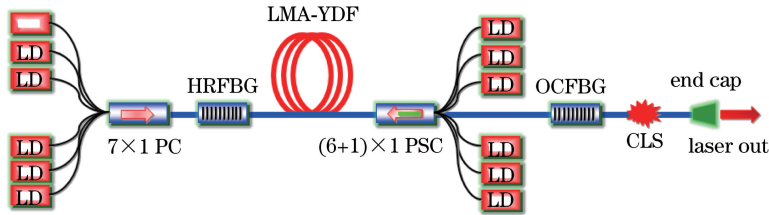


图 7 纤芯/内包层直径为  $25\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$  的双端抽运全光纤振荡器结构示意图

Fig. 7 Scheme of double-side pumped all-fiber laser oscillator with core/inner cladding diameter of  $25\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$

实验中,首先使用长度分别为 32 m 和 8.5 m 的增益光纤和传能光纤,结果如图 8(a) 所示。在 7.9 kW(前向抽运 3.16 kW,后向抽运 4.74 kW)时,

最大输出功率为 4.92 kW,拉曼光谱的强度比信号光光谱低 12 dB 左右。在 4.92 kW 时测试激光器的时域特性,如图 8(b) 所示,从时域和对应的频谱特

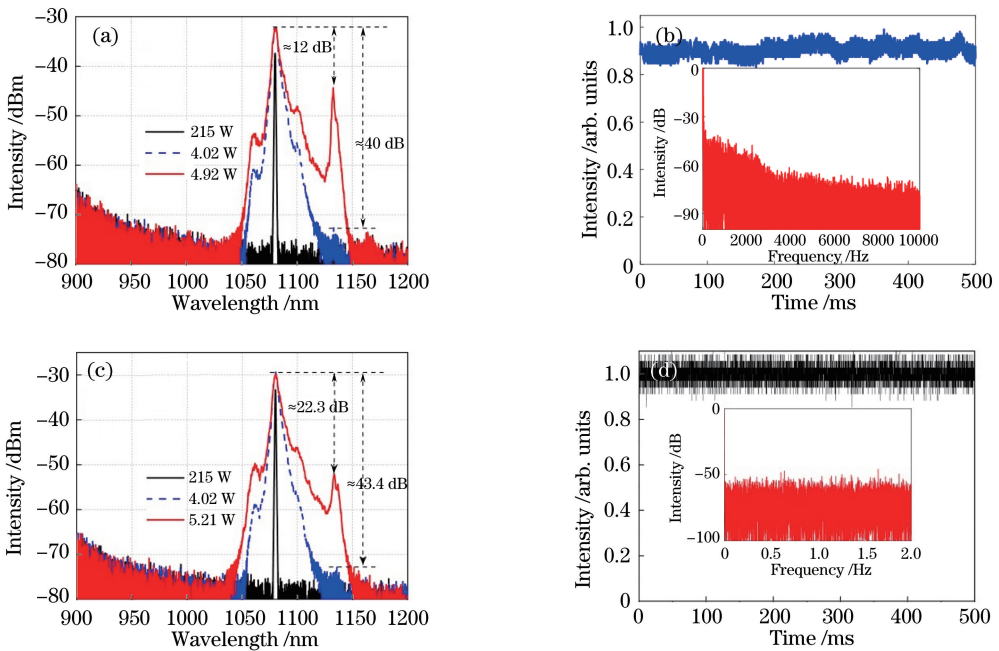


图 8 双端抽运全光纤激光振荡器实验结果。(a)缩短光纤前的激光输出光谱;(b)缩短光纤前的激光时域频域;  
(c)缩短光纤后的激光输出光谱;(d)缩短光纤后的激光时域频域

Fig. 8 Experimental results of double-side pumped all-fiber laser oscillator. (a) Spectra of the laser before shortening the fiber length; (b) time and frequency domain of the laser before shortening the fiber length; (c) spectra of the laser after shortening the fiber length; (d) time and frequency domain of the laser after shortening the fiber length

性来看,出现了明显的动态横向模式不稳定(DTMI),进一步增大激光功率会对激光器带来风险。根据前述单端抽运振荡器的实验结果,这里同样通过抑制 SRS 的方法来减小 TMI 阈值。因此,将增益光纤缩短 1 m,传能光纤缩短 1.5 m,在总抽运功率为 8.3 kW 时,获得的功率输出为 5.21 kW, SRS 光谱峰值比信号光谱峰值低 22 dB 左右,如图 8(c)所示。相比于缩短增益光纤前,拉曼强度得到了明显的降低。从图 8(d)所示的时域和频域特性来看,当输出功率为 5.21 kW 时,没有出现 DTMI 效应。结果表明,通过缩短光纤抑制 SRS 能够有效增大 TMI 阈值。实验同时测量了该振荡器的光束质量,在最大功率为 5.21 kW 时,光束质量  $M^2$  约为 2.2。

## 4 结 论

对掺镱全光纤振荡器中 TMI 与 SRS 之间的关系进行了深入的实验研究,结果表明:与光纤放大器类似,单端和双端抽运振荡器中 SRS 的出现会减小 TMI 阈值;同时,TMI 出现后,高阶模式的产生使得 SRS 的功率水平也会降低。通过缩短光纤抑制 SRS,可以增大 TMI 的阈值,并增大激光器的输出功率。通过缩短单端抽运振荡器的增益光纤抑制 SRS,可以将 TMI 的输出功率阈值从 1.27 kW 增大到大于 2 kW;通过缩短双端抽运振荡器的光纤长度抑制 SRS,可以使 TMI 阈值增大到大于 5.21 kW。目前,对于 SRS 与 TMI 的关系尚缺乏明确的理论研究。分析认为,SRS 与信号光之间的转换使得增益光纤上能级粒子数产生相应的变化,导致了类似电致伸缩 TMI 效应的产生。事实上,国际上尚无掺镱全光纤振荡器 TMI 模型报道。初步研究表明,全光纤振荡器的 TMI 模型比放大器的 TMI 模型复杂得多,考虑非线性效应后的 TMI 模型则更加复杂,这将是下一步重点研究的内容。

**致谢** 感谢徐小勇、张坤、刘思柳、宋涛、刘金伟、杨德权、戴启彪等对本实验的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [3] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, *et al.* Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [4] Wirth C, Schreiber T, Rekas M, *et al.* High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 75801H.
- [5] 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.
- [6] Leidner J P, Marcianite J R. The impact of thermal mode instability on core diameter scaling in high-power fiber amplifiers [C] // *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics*, June 5-10, 2016, San Jose, California. New York: Optical Society of America, 2016: SM4Q.2.
- [7] 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.
- [8] Wang X L, Tao R M, Xiao H, *et al.* Experimental studies of mode instability and thermal induced effects in all-fiber amplifier [C] // *Proceedings of Conference on Advanced Solid-State Lasers Congress*, October 27-November 1, 2013, Paris, France. New York: Optical Society of America, 2013: JTh2A.44.
- [9] Ran Y, Tao R M, Ma P F, *et al.* 560 W all fiber and polarization-maintaining amplifier with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7258-7263.
- [10] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 861-867.
- [11] Otto H, Modsching N, Jauregui C, *et al.* Impact of photodarkening on the mode instability threshold [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15265-15277.
- [12] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [13] Ward B G. Modeling of transient modal instability in fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12053-12067.
- [14] Lægsgaard J. Static thermo-optic instability in double-pass fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13429-13443.
- [15] Tao R, Ma P, Wang X, *et al.* 1.3 kW monolithic linearly polarized single-mode master oscillator power amplifier and strategies for mitigating mode

- instabilities[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 86-93.
- [16] 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.
- [17] 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*, 2016, 14(2): 025002.
- [18] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* Influence of core NA on thermal-induced mode instabilities in high power fiber amplifiers [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(8): 085101.
- [19] 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.
- [20] Shi C, Tao R M, Wang X L, *et al.* New progress and phenomena of modal instability in fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201004.  
史尘, 陶汝茂, 王小林, 等. 光纤激光模式不稳定的新现象与新进展 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201004.
- [21] Tao R M, Wang X L, Xiao H, *et al.* Theoretical study of the threshold power of mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0114002.  
陶汝茂, 王小林, 肖虎, 等. 高功率光纤放大器中模式不稳定阈值功率的理论研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0114002.
- [22] Tao R M, Zhou P, Xiao H, *et al.* Progress of study on mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020001.  
陶汝茂, 周朴, 肖虎, 等. 高功率光纤激光中模式不稳定性现象研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020001.
- [23] Tao R M, Wang X L, Zhou P, *et al.* Seed power dependence of mode instabilities in high-power fiber amplifiers [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(6): 065202.
- [24] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* Mitigating of modal instabilities in linearly-polarized fiber amplifiers by shifting pump wavelength[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(4): 045504.
- [25] 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.
- [26] Beier F, Hupel C, Kuhn S, *et al.* Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14892-14899.
- [27] Jauregui C, Otto H J, Bretkopf S, *et al.* Optimizing high-power Yb-doped fiber amplifier systems in the presence of transverse mode instabilities[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 7879-7892.
- [28] Stihler C, Jauregui C, Otto H, *et al.* Controlling mode instabilities at 628 W average output power in an Yb-doped rod-type fiber amplifier by active modulation of the pump power [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10083: 100830P.
- [29] Lee K H, Lee K, Kim Y, *et al.* Transverse mode instability induced by stimulated Brillouin scattering in a pulsed single-frequency large-core fiber amplifier [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(2): 189-194.
- [30] Hejaz K, Shayganmanesh M, Rezaei-Nasirabad R, *et al.* Modal instability induced by stimulated Raman scattering in high-power Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5274-5277.
- [31] Zhang H W, Wang X L, Yang B L, *et al.* All-fiber laser oscillator with output power break through 3 kW[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0415001.  
张汉伟, 王小林, 杨保来, 等. 输出功率突破 3 kW 的全光纤激光振荡器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0415001.
- [32] Zhang H W, Wang X L, Yang B L, *et al.* All-fiber laser oscillator realized 2.5 kW power and single mode output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1115002.  
张汉伟, 王小林, 杨保来, 等. 全光纤振荡器实现 2.5 kW 单模输出 [J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1115002.
- [33] Yu H L, Wang X L, Tao R M, *et al.* 1.5 kW, near-diffraction-limited, high-efficiency, single-end-pumped all-fiber-integrated laser oscillator [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(34): 8055-8059.
- [34] Kuznetsov M S, Antipov O L, Fotiadi A A, *et al.* Electronic and thermal refractive index changes in Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22374-22388.