

光学学报

5 kW 近单模光纤激光振荡器的光子暗化效应

王鹏^{1,2,3,4}, 杨保来^{1,2,3}, 张汉伟^{1,2,3*}, 奚小明^{1,2,3}, 史尘^{1,2,3}, 王小林^{1,2,3**}, 许晓军^{1,2,3}, 吕品^{4***}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073;

⁴中国科学院自动化研究所, 北京 100190

摘要 为研究掺镱光纤(YDF)光子暗化效应对高功率高亮度光纤激光器的影响,利用25/400 μm大模场YDF和915 nm半导体泵浦源搭建了光纤激光振荡器,输出功率可达5 kW,输出激光为近单模。对该光纤激光振荡器进行满功率率机时出现了光子暗化现象,激光器输出功率急剧下降,输出激光时域中呈现出强烈的横向模式不稳定性(TMI)现象。经过多次测试后发现:后向泵浦时该光纤激光振荡器的TMI效应对应的泵浦功率阈值和输出功率阈值均出现一定程度的下降(约为14%),与传统理论相符;前向泵浦时TMI效应对应的泵浦功率阈值和输出功率阈值出现一定程度的上升(约为15%),这与传统理论不相符,需进一步开展研究。最终,该光纤激光振荡器输出功率受到光子暗化效应的影响无法维持在5 kW功率水平。

关键词 光纤光学; 掺镱光纤; 光子暗化; 光纤激光振荡器; 横向模式不稳定

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2306001

Photodarkening Effect of 5 kW Near-Single-Mode Fiber Laser Oscillator

Wang Peng^{1,2,3,4}, Yang Baolai^{1,2,3}, Zhang Hanwei^{1,2,3*}, Xi Xiaoming^{1,2,3}, Shi Chen^{1,2,3},
Wang Xiaolin^{1,2,3**}, Xu Xiaojun^{1,2,3}, Lü Pin^{4***}

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

²State Key Laboratory of Pulsed Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

⁴Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract In order to investigate the influence of the photodarkening effect of ytterbium-doped fiber (YDF) on high-power and high-brightness fiber lasers, a fiber laser oscillator is established by using 25/400 μm large-mode-area YDF and 915 nm laser diodes. The maximum output power is up to 5 kW, and the output laser is near single mode. When the fiber laser oscillator is operated at full power, the photodarkening effect appears. The output power of the oscillator drops sharply, and strong transverse mode instability (TMI) occurs in the time domain of the output laser. After many tests, it is found that the pump power and output power thresholds corresponding to the TMI effect of the oscillator under the backward pump has a certain decline (about 14%), which is consistent with the traditional theory. However, the pump power and output power thresholds corresponding to the TMI effect of the oscillator under the forward pump shows a certain increase (about 15%), which is inconsistent with the traditional theory. Therefore, further investigation is required. Finally, the output power of the fiber laser oscillator fails to be maintained at 5 kW due to the photodarkening effect.

Key words fiber optics; ytterbium-doped fiber; photodarkening; fiber laser oscillator; transverse mode instability

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-15; 录用日期: 2022-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(62005315)、长沙市杰出创新青年培养计划(kq2009004)

通信作者: *zhanghanwei100@163.com; **chinaphotonics@163.com; ***pin.lv@ia.ac.cn

1 引言

光纤激光器作为第三代激光技术的代表,与传统的固体激光器相比其亮度、功率、单色性和稳定性均更高,并具有小型化、集约化、高电光效率和适应恶劣工作环境等优点,进而受到了广泛关注,得到了飞速发展,在材料加工与制造、激光打标、激光雕刻、光电对抗和医疗器械精密切割等诸多领域中得到了广泛应用^[1-3]。近年来,随着高亮度半导体泵浦源、端面泵浦技术和无源光纤器件的发展,掺镱光纤激光器的输出功率水平也在不断提升。目前,国际上 IPG 公司研发的单模掺镱光纤激光器的最高输出功率已经达到了 20 kW 量级^[4],多模掺镱光纤激光器的输出功率则达到了 500 kW 量级。在实际应用中,光纤激光器除了需要满足功率、光束质量等方面的要求外,还必须具备良好的功率稳定性和较长的使用寿命。然而,掺镱光纤激光器在长时间工作后会出现输出功率下降、模式不稳定、阈值降低、转换效率降低和稳定性变差等现象,即光子暗化现象^[5-6],该现象严重制约了光纤激光器的进一步发展及其在更多领域中的广泛应用。

国外关于光纤激光器中光子暗化的研究开展得较早,相关研究成果也较多。早在 1989 年, Wouterghem 等^[7]就对 $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ 掺杂的玻璃棒在激光辐照下的性能退变进行了详细地分析和研究,发现光子暗化效应会导致不可逆的相位共轭效率和荧光效率下降,并且激光功率越高,光子暗化进程越快。掺镱光纤中的光子暗化现象最早是由 Paschotta 等^[8]在利用不同波长泵浦源泵浦掺镱光纤时发现的,之后得到了深入地研究。2010 年, Jelger 等^[9]发现光子暗化现象会使得掺镱光纤在近红外波段中的背景损耗大幅增加,从而导致泵浦功率和输出功率大幅下降。此外,2015 年, Otto 等^[10]从理论和实验上详细研究了光子暗化现象对光纤激光器横向模式不稳定性(TMI)阈值的影响,发现除了量子损耗外,光子暗化效应也是光纤中的热源之一,很微弱的光子暗化效应就可以极大地降低光纤激光器的 TMI 阈值。国内学术界对光纤激光器中光子暗化的研究相对较少,目前仅有中国科学院安徽光学精密机械研究所、华中科技大学和国防科技大学等相关单位有过研究报道^[11-15]。此外,目前掺镱光纤的光子暗化研究大部分都采用附加损耗的方式或者利用低功率百毫瓦级半导体泵浦源进行研究,这些方法无法对高功率光纤激光器中的光子暗化效应进行实际评估,难以量化光子暗化效应对高功率光纤激光器各方面性能的具体影响。虽有部分文章对高功率掺镱光纤激光器的光子暗化效应开展了相关研究,但均在千瓦级功率水平,鲜有更高功率水平下的相关研究报道,故难以对高功率光纤激光器的发展起到指导作用。另外,随着掺镱光纤和相关光纤器件的发展,万瓦级乃至更高功率的掺镱光纤激光器已被商用并实现了较高的普及率,在工业加工中发挥了重要的作用。然而,通过查找相关资料包括网页产品介绍和文献调研发现,万瓦级光

纤激光器均未直接说明长时间工作后是否会出现光子暗化现象及其影响程度或者是否采取了抑制光子暗化现象的相关技术手段,相关资料较为缺乏。因此,为深入研究光子暗化效应对高功率高亮度光纤激光器性能的影响程度,本文利用 25/400 μm 大模场双包层掺镱光纤搭建了近单模全光纤激光振荡器,输出功率达到了 5 kW,光束质量因子 M^2 小于 1.5。在对激光器进行满功率拷机时发现,一定的工作时长后激光器的前后向 TMI 阈值和总输出功率发生了截然不同的变化,认为该现象是高功率泵浦条件下掺镱光纤中出现的光子暗化现象引起的。此外,还详细记录了发生光子暗化前后光纤激光器的时域特性和光束质量方面的变化,期望能为高功率高亮度掺镱光纤激光器的设计和优化提供指导。

2 实验结构

5 kW 近单模光纤激光振荡器的结构如图 1 所示,整个激光谐振腔由高反光栅(HR FBG)、前向泵浦/信号合束器(FPSC)、增益光纤(LMA YDF)、后向泵浦/信号合束器(BPSC)和低反光栅(OC FBG)构成。高反光栅和低反光栅的反射带宽分别为 3 nm 和 1 nm,反射率分别为 99% 和 10%,中心波长均为 1080 nm。2 支尺寸为 $(18+1)\times 1$ 的泵浦/信号合束器构成双端泵浦机制,各将 18 支功率为 250 W 的 915 nm 半导体激光器(LD)输出从两端注入到增益光纤中。实验所用增益光纤为美国 Nufern 公司生产的 25/400 μm 大模场双包层掺镱光纤,其在 915 nm 泵浦波长处的吸收系数约为 0.5 dB/m。为了保证泵浦光能够被掺镱光纤充分吸收,将掺镱光纤长度设定为 30 m,总吸收系数为 15 dB。为了获得近单模激光输出,实验采用了与参考文献[16-17]完全一致的掺镱光纤盘绕方式,以实现高阶模的抑制和 TMI 阈值的提升。为了增强散热效果,将导热胶水涂覆于掺镱光纤水冷盘上,所有无源光纤器件也均放置于水冷盘上,水冷温度设置为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。高反光栅和低反光栅的空闲臂均与包层光滤波器(CLS)相熔接,用于滤除剩余的包层泵浦光。前向激光采用 1 支 3 m 长的 25/400 μm 光纤端帽(QBH)进行输出,之后利用测量设备对输出激光特性进行测量。后向回光经 QBH 输出后注入到废光收集桶中。

3 实验结果与讨论

在实验中,首先测试了前向泵浦下该光纤激光振荡器的输出特性,结果如图 2 所示。当泵浦功率逐渐增大至 2.312 kW 时,输出激光功率也随之线性增大至 1.644 kW,光光转换效率保持在 72% 左右,如图 2(a)中 P_1 标志点所示。当泵浦功率继续增大至 2.434 kW 时,输出激光功率增长至 1.705 kW,但光光转换效率却降低至 70%,如图 2(a)中 P_2 标志点所示。当继续增大泵浦功率至 2.566 kW 时,输出激光功率不升反降,出现了显著的 TMI 现象,表明该光纤激光振荡器在前向泵浦下的 TMI 效应对应的泵浦功率阈值低于

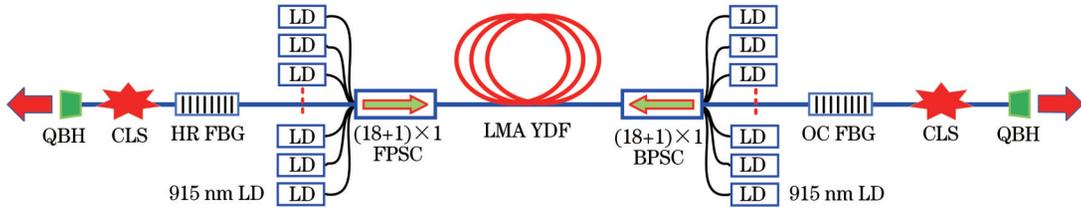


图 1 5 kW 近单模光纤激光振荡器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of 5 kW near-single-mode fiber laser oscillator

2.566 kW。为确定 P_1 点和 P_2 点处是否出现 TMI 现象,利用光电探测器(PD)对两个功率点处的时域信号进行了采样,采样结果及其傅里叶变换频域谱如图 2 (c)、(d)所示。可以看出, P_1 功率点处输出激光时域十分稳定,没有显著波动,对应的频域谱中也没有出现特征峰,而 P_2 功率点处输出激光时域呈现出明显的脉冲形态,对应的频域谱中在数百赫兹位置处出现了多个特征峰。以上测试结果表明, P_1 功率点处光纤激光振

荡器没有出现 TMI 现象而在 P_2 功率点处出现了显著的 TMI 现象,这也说明前向泵浦下该光纤激光振荡器的 TMI 效应对应的泵浦功率阈值约为 2.3 kW,对应的输出功率阈值约为 1.6 kW。前向泵浦下最大输出功率为 1.644 kW 时的激光光谱如图 2(b)所示,中心波长为 1080 nm,半峰全宽(FWHM)为 4.13 nm,受激拉曼(SRS)抑制比大于 40 dB。

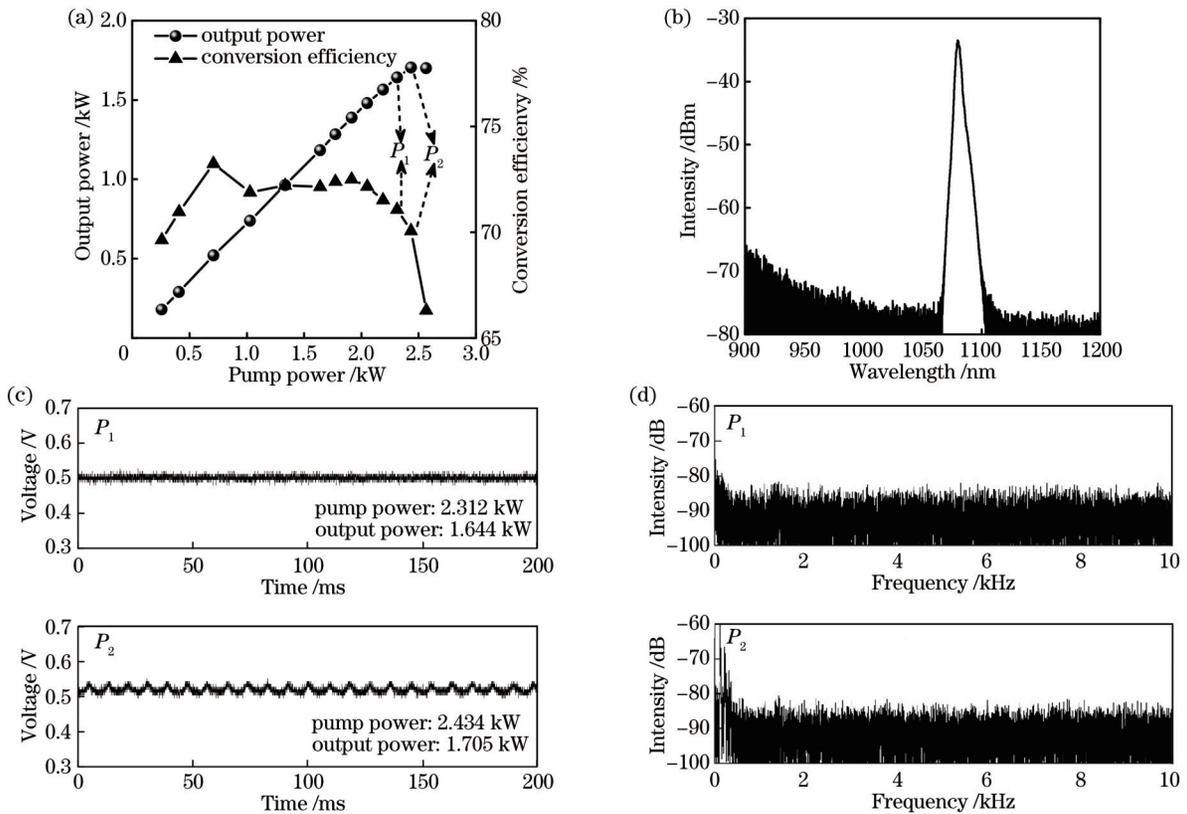


图 2 光纤激光振荡器前向泵浦输出特性。(a)输出激光功率和光光转换效率与泵浦功率间的关系;(b)输出功率为 1.644 kW 时测得的激光光谱;(c)光电探测器测得的 P_1 点和 P_2 点处的时域信号;(d) P_1 点和 P_2 点处时域信号对应的傅里叶变换频域谱

Fig. 2 Output characteristics of fiber laser oscillator under forward pump condition. (a) Output power and optical-to-optical conversion efficiency varying with pump power; (b) optical spectrum at pump power of 1.644 kW; (c) time-domain signals recorded by photoelectric detector at P_1 and P_2 ; (d) Fourier spectra in frequency domain corresponding to time-domain signals at P_1 and P_2

然后,测试了后向泵浦下该光纤激光振荡器的输出特性,结果如图 3 所示。输出激光功率与泵浦功率间基本为线性关系,如图 3(a)所示,当泵浦功率为 5.18 kW 时,输出激光功率达到 4 kW,光光转换效率为 77%。在输出激光功率增大的过程中,光光转换效

率基本保持不变,稳定在 77% 左右,表明全程均没有出现 TMI 现象。后向泵浦下的光光转换效率要显著高于前向泵浦下的测试结果,主要原因是前向泵浦合束器性能要稍劣于后向泵浦合束器,其泵浦耦合效率偏低。实验时发现当泵浦功率增加至 5.18 kW 时,后

向合束器的泵浦臂与掺镱光纤熔接点附近的裸纤表面温度达到了 75 °C,推测是 915 nm 泵浦源的亮度较低导致的。因此,考虑到实验系统的安全稳定性,未再继续增大泵浦功率。输出功率为 4 kW 时测得的激光光谱如图 3(b) 所示,中心波长为 1080 nm,FWHM 约为 4 nm,SRS 抑制比大于 40 dB。输出功率为 4 kW 时测得的激光时域信号及其傅里叶变换频域信号如图 3(c) 所示。可以看出,激光时域信号十分稳定,没有明显的起伏波动,频域信号中也没有出现明显的特征频

率峰,表明此功率水平下仍未出现 TMI 现象,即在后向泵浦条件下该光纤激光振荡器的 TMI 效应对应的泵浦功率阈值不小于 5.18 kW,输出功率阈值不小于 4 kW。后向泵浦下该光纤激光振荡器的 TMI 效应阈值要显著高于前向泵浦下的测试结果,该现象已经在诸多文献中得到了实验验证和理论研究^[18-20],其主要原因是对于输出激光即前向传输的信号光而言,后向泵浦时比前向泵浦时具有更强的增益饱和和效应,而增益饱和效应能够显著提升 TMI 效应阈值。

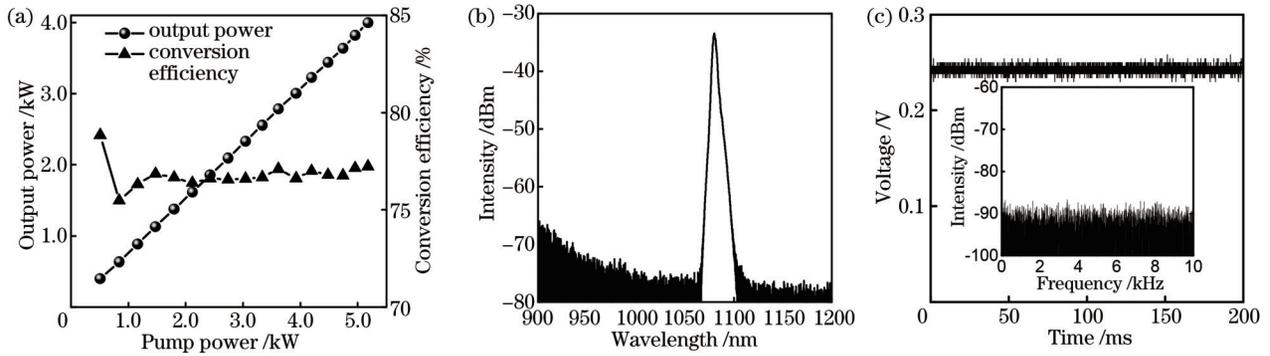


图 3 光纤激光振荡器后向泵浦输出特性。(a)输出激光功率和光光转换效率与泵浦功率间的关系;(b)输出功率为 4 kW 时测得的激光光谱;(c)输出功率为 4 kW 时光电探测器测得的时域信号及其对应的傅里叶变换频域谱

Fig. 3 Output characteristics of fiber laser oscillator under backward pump condition. (a) Output power and optical-to-optical conversion efficiency varying with pump power; (b) optical spectrum at pump power of 4 kW; (c) time-domain signal recorded by photoelectric detector and corresponding Fourier spectrum in frequency domain at pump power of 4 kW

接着,对双向泵浦下该光纤激光振荡器的输出特性进行了测试,结果如图 4 所示。为了抑制 SRS 效应,实验中对前向和后向泵浦功率进行了合理配比,最终当前向泵浦功率为 1.444 kW、后向泵浦功率为 5.112 kW、总泵浦功率为 6.556 kW 时,输出激光功率达到 5.030 kW,光光转换效率为 76.72%。从图 4(a) 可以看出,输出激光功率随着泵浦功率的增大一直保持着线性增长态势,光光转换效率一直稳定在 76% 左右,经计算得到斜率效率(η)约为 76.8%,整个过程没有出现功率滞涨或下降的情况,表明未发生 TMI 效

应。图 4(b) 为输出功率为 5 kW 时测得的激光光谱,中心波长为 1080 nm,FWHM 约为 5.1 nm,在 1130 nm 波长位置处出现了明显的 SRS 峰,其与主峰的强度差约为 28 dB,处于较为安全的水平。输出功率为 5 kW 时测得的激光时域信号及其对应的傅里叶变换频域信号如图 4(c) 所示,其中时域信号十分稳定,没有表现出明显的起伏波动,频域信号中也没有出现明显的特征频率峰,同样表明输出功率为 5 kW 时激光器中没有出现 TMI 现象。

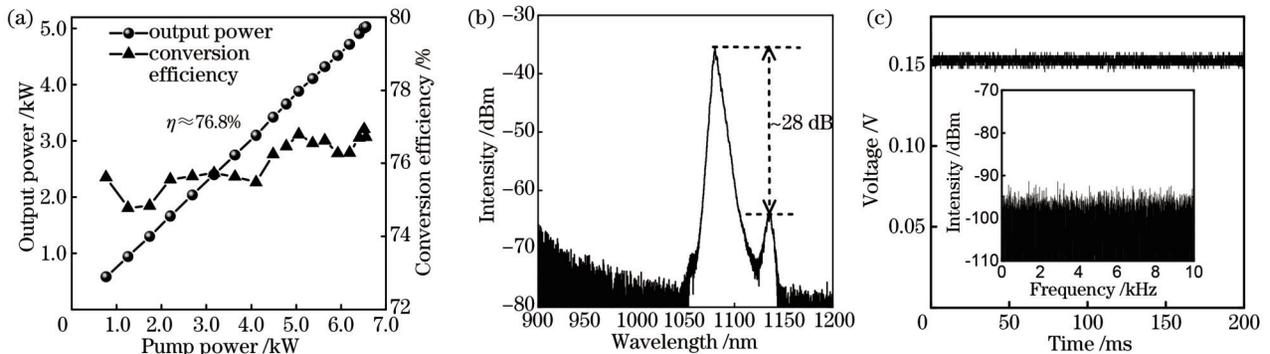


图 4 光纤激光振荡器双向泵浦输出特性。(a)输出激光功率和光光转换效率与泵浦功率间的关系;(b)输出功率为 5 kW 时测得的激光光谱;(c)输出功率为 5 kW 时光电探测器测得的时域信号及其对应的傅里叶变换频域谱

Fig. 4 Output characteristics of fiber laser oscillator under bidirectional pump condition. (a) Output power and optical-to-optical conversion efficiency varying with pump power; (b) optical spectrum at pump power of 5 kW; (c) time-domain signal recorded by photoelectric detector and corresponding Fourier spectrum in frequency domain at pump power of 5 kW

采用 Ophir 公司的 BeamSquared 光束质量分析仪测量了双向泵浦时输出激光在不同功率水平下的光束质量 M^2 , 结果如图 5 所示。可以看出, 在所有功率水平下, 输出激光 X 方向和 Y 方向的 M^2 测试结果均维持在 1.4~1.5 范围内, 没有发生显著波动, 进一步表明

该光纤激光振荡器在实现 5 kW 功率输出时仍未出现 TMI 现象, 光束质量没有发生退化。图 5 中插图 of 各个数据点对应的 M^2 测试结果中焦点处的光斑形态, 均呈现出近单模能量分布, 表明该光纤激光振荡器实现了 5 kW 功率水平的近单模高亮度激光输出。

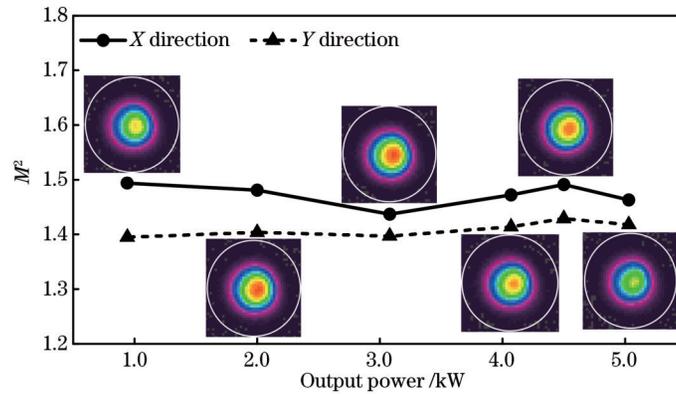


图 5 双向泵浦时不同功率水平输出激光的光束质量测量结果

Fig. 5 Measurement result of beam quality of output laser with different powers under bidirectional pump condition

考虑到该光纤激光振荡器可以实现 5 kW 近单模激光输出, SRS 抑制比可接受且没有出现 TMI 效应, 故计划对其进行满功率拷机以检验其长期工作性能的

稳定性, 拷机结果如图 6 所示。整个拷机过程可以分为三个阶段, 分别命名为阶段 I、阶段 II 和阶段 III。阶段 I 为稳定期, 对应时间段为 0~26.5 min, 激光振荡

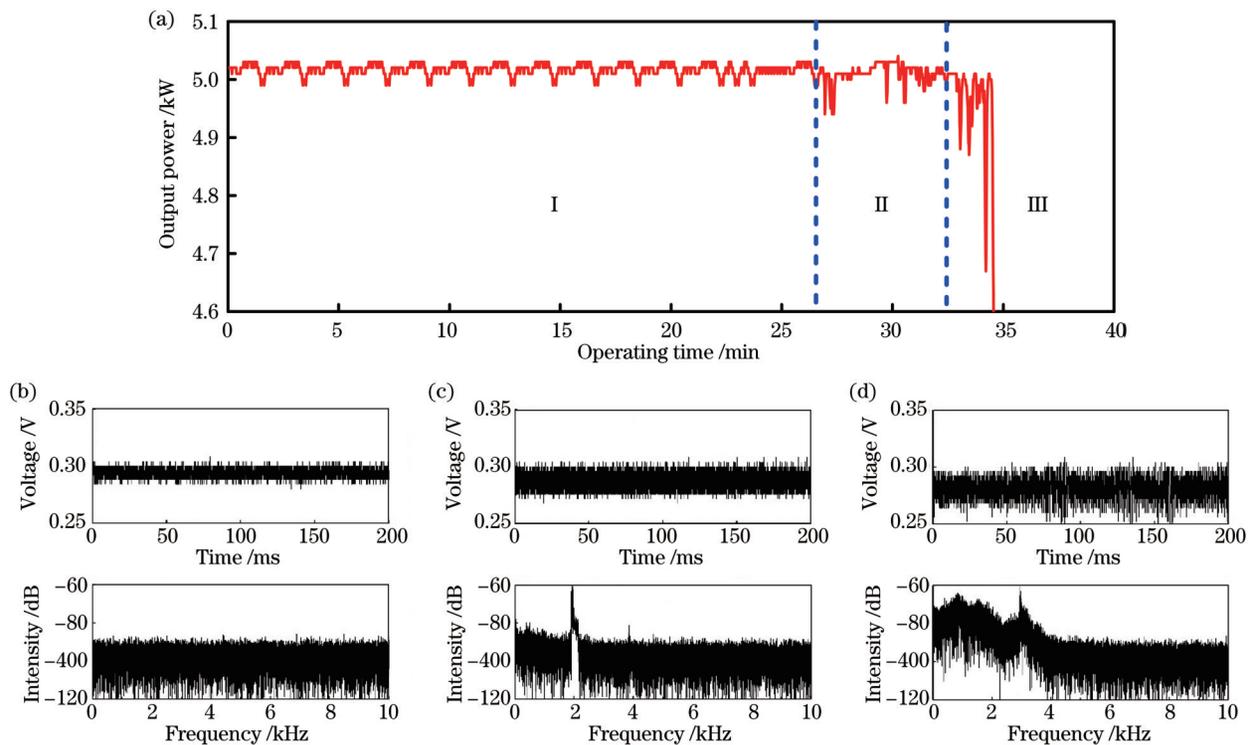


图 6 光纤激光振荡器满功率拷机输出特性。(a) 光纤激光振荡器满功率拷机时的输出功率随时间的变化曲线; (b) 阶段 I 下光电探测器测得的输出激光时域信号及其对应的傅里叶变换频域谱; (c) 阶段 II 下光电探测器测得的输出激光时域信号及其对应的傅里叶变换频域谱; (d) 阶段 III 下光电探测器测得的输出激光时域信号及其对应的傅里叶变换频域谱

Fig. 6 Output characteristics of fiber laser oscillator under full power working. (a) Output power of fiber laser oscillator varying with operating time under full power working; (b) time-domain signal recorded by photoelectric detector and corresponding Fourier spectrum in frequency domain at stage I; (c) time-domain signal recorded by photoelectric detector and corresponding Fourier spectrum in frequency domain at stage II; (d) time-domain signal recorded by photoelectric detector and corresponding Fourier spectrum in frequency domain at stage III

器输出功率在 4.990~5.030 kW 间反复波动,波动周期约为 2 min,产生该波动的主要原因是水冷机周期性制冷导致 LD 波长发生周期性变化,从而引起输出功率随 LD 波长的变化而产生周期性变化,该波动是正常现象,并不代表光纤激光振荡器性能出现了问题。图 6(b)为阶段 I 中测得的输出激光时域特性,十分稳定,且没有出现频域特征峰,表明此时光纤激光振荡器中没有出现 TMI 现象。阶段 II 为波动期,对应时间段为 26.5~32.5 min,激光器输出功率开始出现不规则波动,最低降至约 4.940 kW,后又回升至 5.030 kW,功率降低时间较短而回升时间较长。该阶段中测得的输出激光时域特性如图 6(c)所示,可以看出,此时输出激光光强波动比阶段 I 显著增大,傅里叶变换频谱中在 2 kHz 位置处出现了明显的特征峰,表明 TMI 效应已出现,且其对输出激光功率和时域产生了很大的影响。阶段 III 为失能期,对应时间段为 32.5~34.5 min,输出激光功率出现大幅度波动,最低功率由 4.880 kW 降低至 4.870 kW,最后更掉落至 4.670 kW,功率降低时间较阶段 II 显著延长而回升时

间显著缩短,此时光纤激光振荡器已无法正常工作,故在输出功率掉落至 4.670 kW 后关机并停止测试。阶段 III 中测得的输出激光时域特性如图 6(d)所示,可以看出,其时域稳定性进一步恶化,傅里叶变换频谱中特征频率出现明显展宽并连在一起,表明此时 TMI 效应已极其严重,激光器内部的模式耦合进入了混沌期^[21-22]。

在无源光纤器件和泵浦 LD 没有出现损伤的情况下,造成该光纤激光振荡器在拷机过程中出现功率突然下降和显著 TMI 最可能的原因是掺镱光纤中出现了光子暗化现象。若不对暗化后的光纤进行漂白处理,则其性能的降低将不可逆,无法自行恢复。因此,为验证光子暗化效应对该振荡器的输出特性造成了不可逆的影响,对该振荡器的双向泵浦输出特性再一次进行了测试,结果如图 7 所示。为了进行对比,将拷机前的输出特性同样绘制于图 7 中。从图 7(a)可以看出,拷机前后振荡器的输出功率曲线和光光转换效率曲线基本重合,没有显著差异,表明泵浦 LD 和无源光纤器件没有出现异常。然而,当总泵浦功率达到

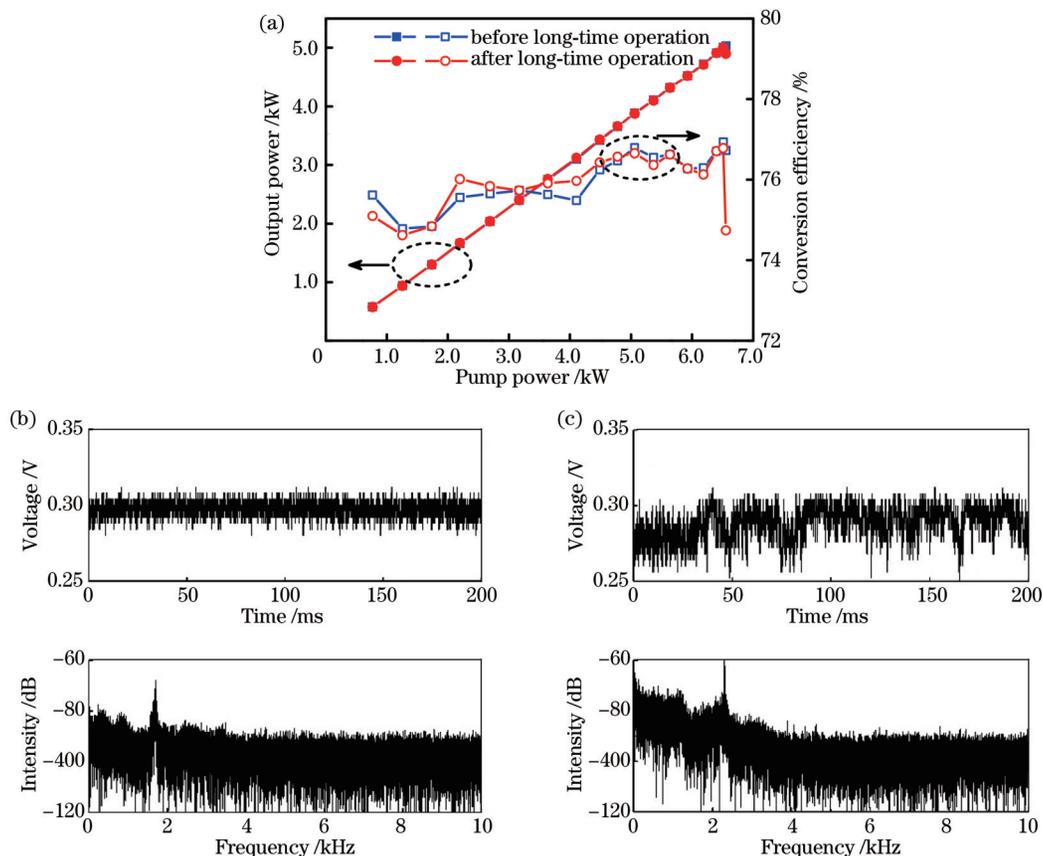


图 7 长时间满功率拷机前后光纤激光振荡器输出特性对比。(a)拷机前后输出功率和光光转换效率与泵浦功率的关系;(b) 6.512 kW 泵浦功率下光电探测器记录的输出激光时域信号及其对应的傅里叶变换频域谱;(c) 6.556 kW 泵浦功率下光电探测器记录的输出激光时域信号及其对应的傅里叶变换频域谱

Fig. 7 Comparison of output characteristics of fiber laser oscillator before and after long-time full power working. (a) Output power varying with optical-to-optical conversion efficiency varying with pump power before and after long-time working; (b) time-domain signal recorded by photoelectric detector and corresponding Fourier spectrum in frequency domain at pump power of 6.512 kW; (c) time-domain signal recorded by photoelectric detector and corresponding Fourier spectrum in frequency domain at pump power of 6.556 kW

6.512 kW, 输出功率达到 5 kW 时, 测得的输出激光时域信号如图 7(b) 所示, 对应的傅里叶变换频谱中在 2 kHz 位置处出现了特征频率峰, 表明此时振荡器内已有 TMI 产生。此外, 在实验中发现该泵浦功率下 TMI 现象时有发生, 存在不稳定性, 且光光转换效率没有出现显著降低, 说明此时振荡器处于 TMI 阈值状态, 对应的前向和后向泵浦功率分别为 1.444 kW 和 5.068 kW, 而拷机前测得的后向 TMI 泵浦功率阈值约为 5.18 kW, 说明在掺镱光纤中出现光子暗化效应后, 后向 TMI 阈值已出现降低。进一步增大后向泵浦功率, 使双向总泵浦功率达到 6.556 kW, 此时输出功率降低至 4.9 kW, 光光转换效率掉落至 74.7%, 输出激光时域信号中出现强烈波动和展宽后的特征峰, 如图 7(c) 所示, 表明此时振荡器内部出现了强烈的 TMI 现象且已进入混沌期。在完全一致的泵浦功率和前后向功率配比下, 拷机前能够实现 5 kW 稳定输出而拷机后仅能实现 4.9 kW 非稳定输出, 进一步验证了光子暗化效应会对高功率光纤激光振荡器输出功率产生影响。

以上实验结果表明, 经过约 35 min 拷机后该振荡器的掺镱光纤中出现了光子暗化效应, 导致其 TMI 阈值有所降低, 但降低幅度较小。为进一步研究光子暗

化效应对高功率光纤激光器性能的影响, 对前后向泵浦功率配比进行了调整, 调整后的输出功率和转换效率特性如图 8(a) 所示。最终, 当前向泵浦功率为 1.715 kW、后向泵浦功率为 4.944 kW、总泵浦功率为 6.659 kW 时, 输出激光功率可达到 5.030 kW, 光光转换效率为 75.54%。从图 8(a) 可以看出, 输出激光功率保持着线性增长态势, 光光转换效率一直稳定在 76% 左右, 斜率效率约为 76.4%, 整个过程中没有出现功率停止增长或下降的情况, 表明 TMI 效应未发生。图 8(b) 为输出功率为 5 kW 时测得的激光光谱图, 中心波长为 1080 nm, FWHM 约为 5.1 nm, 在 1130 nm 位置处出现了明显的 SRS 峰, 其与主峰的高度差约为 27 dB。5 kW 输出功率下激光的时域信号及其对应的傅里叶变换频域信号如图 8(c) 所示, 时域信号十分稳定, 没表现出明显的起伏波动, 频域信号中也没有出现明显的特征频率峰, 同样表明输出功率为 5 kW 时激光器中没有出现 TMI 现象。由于光纤盘绕参数未发生改变, 因此该状态下输出激光的光束质量与图 5 一致, 不再进行赘述。以上测试结果表明, 提高前向泵浦功率并降低后向泵浦功率可以使该振荡器重新实现 5 kW 稳定激光输出。

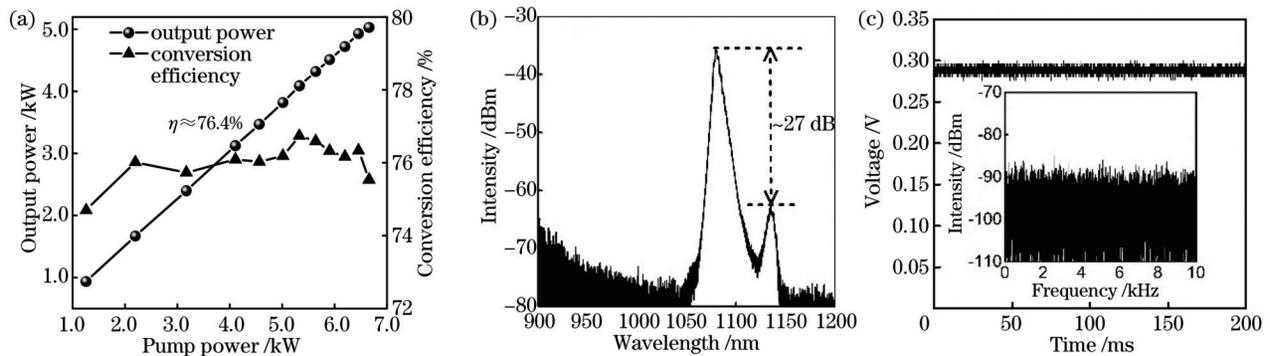


图 8 前后向泵浦功率配比调整后光纤激光振荡器双向泵浦输出特性。(a) 输出激光功率和光光转换效率与泵浦功率间的关系; (b) 输出功率为 5 kW 时测得的激光光谱; (c) 输出功率为 5 kW 时光电探测器测得的时域信号及其对应的傅里叶变换频域谱
Fig. 8 Output characteristics of fiber laser oscillator under bidirectional pump condition after adjusting forward and backward pump power ratio. (a) Output power and optical-to-optical conversion efficiency varying with pump power; (b) optical spectrum at pump power of 5 kW; (c) time-domain signal recorded by photoelectric detector and corresponding Fourier spectrum in frequency domain at pump power of 5 kW

再次对该光纤激光振荡器进行满功率拷机以确定光子暗化效应是否会使激光器 TMI 阈值继续劣化, 拷机结果如图 9 所示。可以看出: 当拷机时长仅为 70 s 时, 激光器输出功率就出现了不规律波动, 最低降至 4.860 kW, 测得的激光实时时域信号中也呈现出显著的 TMI 现象, 功率波动的持续时长约为 180 s; 当拷机时长达到 250 s 时, 输出功率重新变得稳定, 维持在 5 kW 附近, 最大功率波动约为 20 W; 输出功率达到稳定期后仅持续了约 480 s, 即当拷机时长达到 730 s 时, 输出功率再一次出现不规律波动, 波动幅度比第一次大很多, 最低降至 4.730 kW, 测得的激光实时时域信号中呈现出严重的处于混沌期的 TMI 现象。为了防止输出功率降低时泄漏到包层中的过多激光对光纤器件

造成损伤, 当输出功率再一次降低至 4.7 kW 附近时将激光器关闭, 不再进行拷机测试。将本次测试结果与第一次测试结果相比可以发现, 虽然通过调整前后向泵浦功率可以使得该振荡器输出功率恢复至 5 kW 水平, 但是无法实现长时间稳定运行, 功率稳定期时长比第一次缩短了超过 60%, 且即使在稳定期, 其功率波动也大于第一次测试结果。以上结果表明经过第二次拷机测试后, 该振荡器的 TMI 阈值发生了进一步降低, 掺镱光纤的光子暗化效应进一步增强。因此, 可以推断, 在掺镱光纤出现光子暗化效应后, 再次注入同等功率水平的泵浦光会使得光子暗化效应增强, 掺镱光纤的性能发生进一步劣化。

为了定量分析经过两次拷机测试后掺镱光纤的性

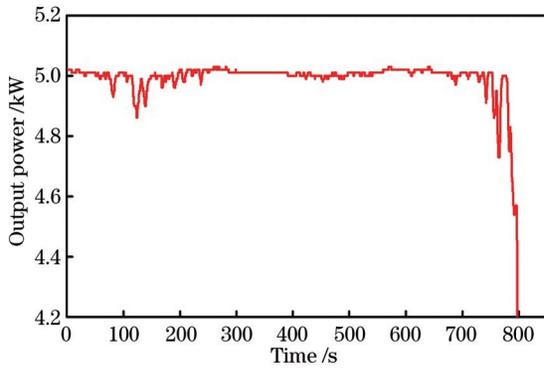


图 9 光纤激光振荡器第二次满功率拷机时的输出功率随时间的变化曲线

Fig. 9 Output power of fiber laser oscillator varying with operating time under second full power working

能劣化程度,再次对该光纤激光振荡器的前向输出功率、后向输出功率和光光转换效率特性进行了测试,结果如图 10 所示。从图 10(a)可以看出,在前向泵浦下,未出现 TMI 时振荡器输出功率和转换效率的数值大小和变化趋势在光子暗化效应出现前后基本保持一致,但光子暗化效应出现后激光器 TMI 阈值点出现得更晚。对光子暗化效应出现后功率曲线上的 Q_1 点和 Q_2 点的时频特性进行了分析,如图 10(b)、(c) 所示。可以发现, Q_1 点处未出现 TMI 效应而 Q_2 点处已出现较强 TMI 效应,即出现光子暗化效应后,后向泵浦对应的 TMI 效应泵浦功率阈值约为 2.658 kW,输出功率阈值约为 1.840 kW,输出功

率阈值约为 1.840 kW。与图 2 给出的测试结果相比,出现光子暗化效应后,前向泵浦下 TMI 效应泵浦功率阈值和输出功率阈值分别由初始的 2.312 kW 和 1.644 kW 增长至 2.658 kW 和 1.840 kW,涨幅约为 15% 和 12%。根据现有文献资料,在掺镱光纤出现光子暗化效应后,激光器的 TMI 阈值功率会出现显著下降^[10],但本实验中前向泵浦下的测试结果与现有结论完全相反,不降反增。该现象的具体成因还有待通过开展进一步的实验验证及理论分析来揭示。从图 10(d)可以看出,在后向泵浦下,未出现 TMI 时振荡器输出功率和转换效率的数值大小和变化趋势在光子暗化效应出现前后同样基本保持一致,但光子暗化效应出现后激光器 TMI 阈值点提早出现。对光子暗化效应出现后功率曲线上的 Q_3 点和 Q_4 点的时频特性进行了分析,如图 10(e)、(f) 所示。可以发现, Q_3 点处未出现 TMI 效应而 Q_4 点处已出现较强的 TMI 效应,即出现光子暗化效应后,后向泵浦对应的 TMI 效应泵浦功率阈值约为 4.482 kW,输出功率阈值约为 3.423 kW。与图 3 给出的测试结果相比,在出现光子暗化效应后,后向泵浦下 TMI 效应泵浦功率阈值和输出功率阈值分别由初始的不小于 5.18 kW 和 4 kW 降低至 4.482 kW 和 3.423 kW,跌幅约为 13.5% 和 14.4%,后向泵浦下光子暗化效应对振荡器 TMI 阈值的影响是与现有文献资料结论相一致的。以上测试结果表明,经过总共约 45 min 的满功率拷机后,该光纤激光振荡器的输出性能受光子暗化效应影响发生了极大的改变。后续计划将采用主动抑制方法如对掺镱光纤进行载

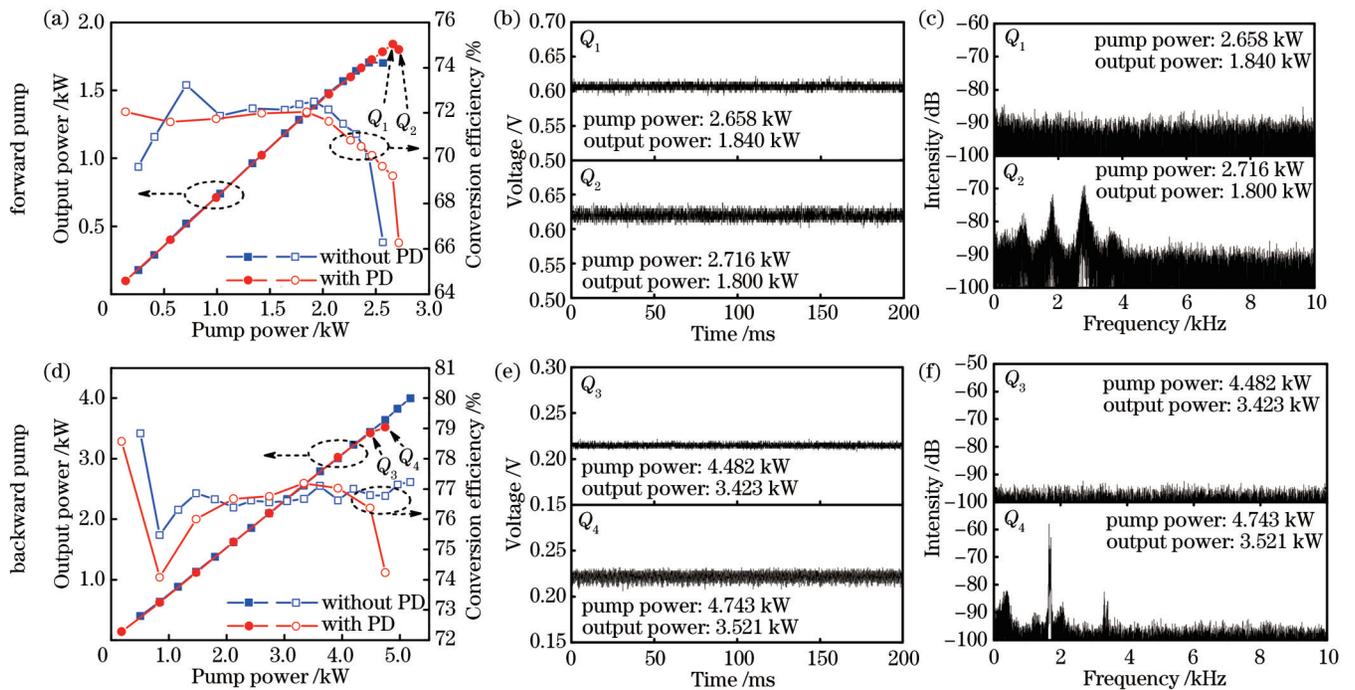


图 10 光纤激光振荡器出现光子暗化效应前后输出功率及转换效率对比。(a)(d) 输出激光功率和光光转换效率与泵浦功率间的关系;(b)(e) 时域信号;(c)(f) 时域信号对应的傅里叶变换频域谱

Fig. 10 Comparison of output power and conversion efficiency of fiber laser oscillator before and after photodarkening. (a)(d) Output power and optical-to-optical conversion efficiency varying with pump power; (b)(e) time-domain signals; (c)(f) Fourier spectra in frequency domain corresponding to time-domain signals

H_2 ^[23]以研究其能否在 5 kW 功率水平下实现对光子暗化效应的抑制,并采用被动抑制方法如光漂白^[14]对暗化后的掺镱光纤进行处理以研究其性能是否能够恢复。

4 结 论

首先,利用 25/400 μm 大模场双包层掺镱光纤和 915 nm 半导体泵浦源搭建了全光纤激光振荡器,对振荡器的前向、后向和双向输出特性包括功率、转换效率、时域特性和光束质量等进行了详细测试,并通过对前后向泵浦功率的合理配比,实现了双端泵浦 5 kW 近单模激光输出。在随后的满功率拷机实验中,激光器输出功率先后经历了稳定期、波动期和失能期三个阶段,由无 TMI 效应的稳定输出演变为有显著 TMI 效应的强烈波动输出,出现该现象的原因是掺镱光纤中出现了光子暗化现象,这会使得激光器 TMI 阈值功率降低。然后,通过调整前后向泵浦功率配比使激光器输出功率重新恢复至 5 kW,但在更短的满功率拷机时间后输出激光中再一次出现强烈的 TMI 现象,输出功率显著降低,这表明掺镱光纤的光子暗化效应进一步变严重。最后,对发生光子暗化效应后激光器的单向 TMI 阈值进行了重新标定。结果发现:前向泵浦下激光器 TMI 阈值出现了升高,与传统理论不相符,需要进一步深入研究;后向泵浦下激光器 TMI 阈值出现了降低,与传统理论相符。

对 5 kW 级高亮度光纤激光振荡器的光子暗化现象进行了分析研究,发现了与传统理论不符的现象,为掺镱光纤光子暗化现象的相关研究提供了参考,也为高功率高亮度光纤激光振荡器的设计与发展提供了思路。下一步工作将主要集中于:1)对前向泵浦下 TMI 阈值升高的现象开展进一步分析研究,确定其产生原因;2)利用主动抑制方法和被动抑制方法对掺镱光纤进行处理以研究其对光子暗化效应的抑制效果。

致谢 感谢实验室张坤、宋涛、钟鹏飞和徐小勇技术人员在测试过程中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [2] Nilsson J, Payne D N. High-power fiber lasers[J]. *Science*, 2011, 332(6032): 921-922.
- [3] 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.
- [4] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//CLEO: Applications and Technology 2013, June 9-14, 2013, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2013: AF2J.1.
- [5] Zervas M N, Ghiringhelli F, Durkin M K, et al. Distribution of photodarkening-induced loss in Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914:

- 129-136.
- [6] Park J S, Kim T H, Oh Y J, et al. Investigation of photodarkening in tandem-pumped Yb-doped fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27316-27323.
- [7] van Wonterghem B, Saltiel S M, Dutton T E, et al. Photodarkening effects in semiconductor-doped glasses [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(10): 4935-4940.
- [8] Paschotta R, Nilsson J, Barber P R, et al. Lifetime quenching in Yb-doped fibres[J]. *Optics Communications*, 1997, 136(5/6): 375-378.
- [9] Jelger P, Engholm M, Norin L, et al. Degradation-resistant lasing at 980 nm in a Yb/Ce/Al-doped silica fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(2): 338-342.
- [10] Otto H J, Modsching N, Jauregui C, et al. Impact of photodarkening on the mode instability threshold[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15265-15277.
- [11] 张汉伟, 王小林, 唐峰, 等. γ 射线导致的光子暗化对掺镱光纤激光器效率的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 011406.
Zhang H W, Wang X L, Tang F, et al. Influence of γ ray induced photo darkening on efficiency of ytterbium-doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 011406.
- [12] 李森. 高功率光纤中光子暗化效应的抑制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018: 63-74.
Li M. The study on the suppression of photodarkening in high power fiber[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 63-74.
- [13] 朱宗玖, 许立新, 毛庆和, 等. 高掺杂浓度掺镱光纤的光子暗化效应[J]. *光子学报*, 2007, 36(1): 26-29.
Zhu Z J, Xu L X, Mao Q H, et al. Photodarkening in ytterbium-doped fiber with high doping concentration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(1): 26-29.
- [14] 赵楠. 高功率掺镱光纤激光器中光子暗化效应研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 38-51.
Zhao N. The study on photo-darkening effect in ytterbium doped high power fiber lasers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 38-51.
- [15] 王一礴, 李进延. 高功率掺镱光纤的现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201009.
Wang Y B, Li J Y. Status and development tendency of high power ytterbium doped fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201009.
- [16] Yang B L, Wang P, Zhang H W, et al. 6 kW single mode monolithic fiber laser enabled by effective mitigation of the transverse mode instability[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26366-26373.
- [17] 王鹏, 杨保来, 张汉伟, 等. 单模全光纤激光器实现 6 kW 稳定运行[J]. *中国激光*, 2021, 48(24): 2416001.
Wang P, Yang B L, Zhang H W, et al. 6 kW single mode stable-operated fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(24): 2416001.
- [18] Li Z B, Huang Z H, Xiang X Y, et al. Experimental demonstration of transverse mode instability enhancement by a counter-pumped scheme in a 2 kW all-

- fiberized laser[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): 77-81.
- [19] 杨保来. 大功率高亮度全光纤掺镱光纤激光振荡器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018: 64-83.
Yang B L. Study of high power high brightness monolithic ytterbium-doped fiber laser oscillator[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 64-83.
- [20] 王鹏, 张汉伟, 奚小明, 等. LD 直接泵浦的 8 kW 高光束质量全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2021, 48(23): 2316004.
Wang P, Zhang H W, Xi X M, et al. 8 kW high-beam-quality all-fiberized fiber laser directly pumped by LDs[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(23): 2316004.
- [21] Haarlammert N, de Vries O, Liem A, et al. Build up and decay of mode instability in a high power fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13274-13283.
- [22] Otto H J, Stutzki F, Jansen F, et al. Temporal dynamics of mode instabilities in high-power fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15710-15722.
- [23] Cao R T, Chen G, Chen Y S, et al. Effective suppression of the photodarkening effect in high-power Yb-doped fiber amplifiers by H₂ loading[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 288-295.