

基于 20/400 μm 增益光纤的 3 kW 近单模全光纤放大器及其长时工作特性

罗雪雪¹, 奚小明^{1,2,3*}, 史尘^{1,2,3}, 王小林^{1,2,3**}, 张汉伟^{1,2,3}, 陶汝茂^{1,2,3},
韩凯^{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, 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

摘要 利用波长为 976 nm 的抽运源对基于纤芯/内包层直径为 20/400 μm 的增益光纤放大器进行双向抽运, 通过优化光纤弯曲半径, 合理选择抽运方式并优化抽运功率配比, 可有效抑制横向模式不稳定效应和受激拉曼散射, 获得了输出功率大于 3 kW 的近单模全光纤放大器。光纤放大器的光-光转换效率约为 73%, 受激拉曼散射抑制比为 20 dB, 光束质量因子小于 1.7, 时/频域上没有出现模式不稳定现象。对该放大器进行 10 h 的连续测试, 结果表明, 该激光器性能稳定, 有望用于工业加工等领域。

关键词 光纤光学; 光纤放大器; 模式不稳定; 非线性效应

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0201004

3 kW Near-Single-Mode All-Fiber Amplifier Based on 20/400 μm Gain Fiber and Its Long Time Operation Characteristics

Luo Xuexue¹, Xi Xiaoming^{1,2,3*}, Shi Chen^{1,2,3}, Wang Xiaolin^{1,2,3**}, Zhang Hanwei^{1,2,3},
Tao Rumao^{1,2,3}, Han Kai^{1,2,3}, Zhou Pu^{1,2,3}, Xu Xiaojun^{1,2,3}

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

²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

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

Abstract The 976 nm laser diodes are utilized to provide the bi-directional pumping sources for the fiber amplifier based on 20/400 μm gain fiber. The transverse mode instability and the stimulated Raman scattering (SRS) effects are effectively suppressed under the operation of optimizing the coiling bending of gain fiber, pumping method, and pumping power distribution. A 3 kW level all-fiber amplifier with near-single-mode output is finally achieved. The optical-to-optical efficiency is around 73%, the SRS rejection ratio is 20 dB, and the beam quality factor is below 1.7. There are no mode instability characteristics detected in the time/frequency domain. A continuous 10 h test of this amplifier is carried out and the results show that the amplifier is stable, and is possible for its application in areas such as industrial processes.

Key words fiber optics; fiber amplifier; mode instability; nonlinear effects

OCIS codes 140.3280; 140.3615; 140.3550

收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2018-10-29; 录用日期: 2018-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61505260, 61735007)

* E-mail: exixiaoming@163.com; ** E-mail: chinawxllin@163.com

1 引言

光纤激光器具有转换效率高、输出光束质量好、结构紧凑等优点,在航空航天、工业加工、生物医疗等领域得到了广泛的应用^[1-4]。随着应用领域的拓展及深入,人们对高功率光纤激光器提出了更高的要求,比如更高的功率、长时间稳定运行以及近衍射极限的光束质量。近年来,受激拉曼散射(SRS)、抽运源亮度、热透镜效应等光纤中的非线性效应一直是限制高功率光纤激光器发展的重要因素^[5-8]。2010年,Eidam等^[9]发现了横向模式不稳定效应(TMI),该效应是限制高功率单模近衍射极限光纤激光功率提升的主要原因。当激光器的功率达到TMI阈值后,输出激光的光束质量急剧退化^[10-12],同时输出功率也出现明显波动,功率稳定性下降。而由于光纤盘绕等原因,TMI产生的高阶模激光将泄漏到包层中,从而导致输出功率滞涨,甚至出现功率下降的现象^[13-16]。因此,TMI不仅限制了激光器功率的提升,还使激光器处于不安全的工作状态。

为了抑制TMI效应的产生,国内外学者在理论和实验方面都进行了广泛研究。德国耶拿大学、美国克莱姆森大学等机构的研究人员认为,增益光纤中的热效应引起光纤纵向周期性折射率调制,导致激光器中基模与高阶模的功率耦合,从而产生TMI效应^[17-21]。根据这一理论,人们发现可以从降低热负荷、抑制高阶模和长周期光栅等方面来提高激光器的模式不稳定阈值。具体来说,可以通过采用低吸收系数泵源^[22]、改变抽运方式^[23-24]、设计特殊光纤^[25-27]、增益饱和和效应^[28-30]等方法提高TMI阈值功率。

由于SRS效应以及抽运源亮度等因素的限制,目前输出功率大于3 kW的激光器主要是基于纤芯直径为25 μm ^[31]和30 μm ^[32-33]的大模场双包层增益光纤。然而,纤芯直径大于25 μm 的增益光纤内支持的模式较多,很难实现准单模激光输出。如果不对光纤结构进行精心设计,此类大模场增益光纤的多模输出特性将导致其TMI阈值普遍较低,很难实现高稳定、高可靠及高功率的准单模激光输出。在实际的工业生产应用中,则需要同时保证激光器的功率、光束质量和输出稳定性。目前,鲜有如何抑制TMI以获得长时间稳定可靠的激光输出的报道。由于大模场面积光纤结构设计具有特殊性与复杂性,而纤芯直径为20 μm 的商用光纤输出近单模激光,其模式不稳定抑制相对容易,若进行批量生产,可以较好地保证其工艺一致性。因此,基于纤芯直

径为20 μm 的商用双包层光纤研制3 kW级高稳定、高可靠的激光器是较为明智的选择。但是,由于该光纤的纤芯直径较小,光纤中的高能量密度将导致非线性效应的产生。如何在抑制TMI的同时兼顾SRS的抑制^[34],也是需要考虑的问题。

基于此,本文对纤芯/内包层直径为20/400 μm 的掺镱光纤放大器进行研究,通过优化激光器的结构和参数,实现准单模3 kW激光输出。采用弯曲盘绕增益光纤的方式^[33,35-36]实现TMI阈值的提升;通过优化抽运方式和抽运功率配比^[23,37-38],综合抑制TMI和SRS效应,成功实现了可长时间稳定工作的3 kW近单模激光输出,输出激光SRS抑制比约为20 dB。在长时间(10 h)高功率运行过程中,时/频域上并未监测到模式不稳定效应,为实现高功率光纤激光器以及3 kW级光纤激光器的工业设计提供可靠参考。

2 实验结构

本实验系统采用全光纤非保偏主振荡功率放大结构,放大器的结构如图1所示。种子激光为一台自主搭建的基于20/400 μm 增益光纤的振荡器,输出功率在0~100 W内连续可调,输出信号光的中心波长为1080 nm,输出传能光纤(GDF)的纤芯/内包层直径为20/400 μm 。为了保持对比实验中种子功率的一致性,种子激光的输出功率设定为80 W。经过一段包层光滤除(CLS)后,种子光通过前向合束器的信号臂注入放大器内,CLS被用于滤除包层中的后向抽运光和高阶模激光,以提高种子振荡器的光束质量。为了对比不同抽运方式的特点以及优化前后向抽运光比例,实验中将放大器设计为双向抽运结构,通过(6+1) \times 1的前/后向合束器分别将抽运光和信号光注入到增益光纤中。放大器的抽运源由976 nm稳波长光纤耦合半导体激光器(LD)组成,7个LD为一组,经过功率合束器后接入合束器抽运臂,总抽运功率约为5.4 kW。增益光纤采用美国Nufern公司生产的纤芯/包层直径为20/400 μm 的大模场面积掺镱光纤(LMA-YDF),纤芯数值孔径为0.061,光纤长度为18 m。两个抽运合束器各含两根空置抽运臂,利用以色列Ophir公司生产的5 kW热电偶功率探头(PM)监测未吸收抽运光和在大功率中激发并放大的高阶模式。后向合束器输出尾纤尺寸为20/250 μm ,与瑞典OPTOSKAND公司生产的输入臂尺寸为25/400 μm 的商用光纤端帽(end cap)相连,并在端帽的尾纤上制作一段长度

为 18 cm 的 CLS 对包层信号光和抽运光进行滤除。最后,采用功率计对依次通过准直器和高反镜的高功率激光的绝大部分能量进行测量。同时,利用日本横河公司生产的 AQ6370D 型光谱仪和美国 Tektronix 公司生产的 TDS3052C 型数字示波器分别对 PM 靶面的散射光进行光谱分析和时域特性探

测。基于美国 Spiricon 公司生产的 M2-200s-Fw 测试仪搭建了空间光路光束质量测试系统,将输出激光经过高反镜(HR mirror)的透射光射入其中,对放大器的输出激光光束质量(M^2)进行监测。实验中,所有光纤都放置在特别定制的水冷板上进行制冷,并根据测试结果对每次实验结构进行相应调整。

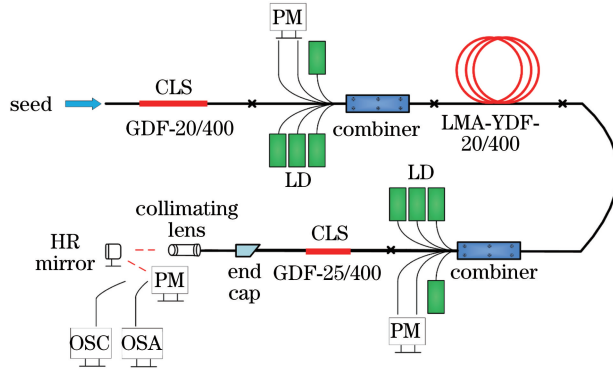


图 1 双向抽运结构的全光纤放大器示意图

Fig. 1 Schematic of all-fiber amplifier with bi-directional pumping configuration

3 实验结果与分析

3.1 弯曲选模抑制 TMI 效果研究

基于图 1 中的光纤放大器结构,研究了不同弯曲半径对放大器 TMI 阈值的影响。实验中设计了 A、B 两款水冷光纤盘, A 和 B 的内/外圈直径分别为 20/40 cm 和 10/15 cm。利用 SeeFiberTool 软件计算可知,在弯曲直径大于 20 cm 的情况下,增益光纤中的线偏振传输光场模式 LP_{11} 模由于弯曲光纤对其从纤芯泄漏至包层的损耗仅为 0.2 dB/m;而当弯曲直径减小为 10 cm 时, LP_{11} 模的弯曲损耗将增大到 142 dB/m。因此,理论上通过弯曲增益光纤的

方法可增大高阶模的损耗,从而实现 TMI 的抑制。实验中,首先,利用光纤盘 A 盘绕增益光纤,研究单端抽运条件下的模式不稳定阈值。在前向抽运和后向抽运方式下,放大器的输出功率如图 2 所示。前向抽运时,放大器在输出功率为 1250 W 时出现了由模式不稳定效应导致的功率下降。后向抽运时,放大器在输出功率为 1470 W 时,探测器在低频范围内监测到频域尖峰,表明放大器此时已经略微出现 TMI 迹象。由此可以看出,在不采取弯曲盘绕对高阶模进行抑制时,前向抽运和后向抽运方式的输出功率均受到不稳定模式的影响,模式不稳定阈值均较低。

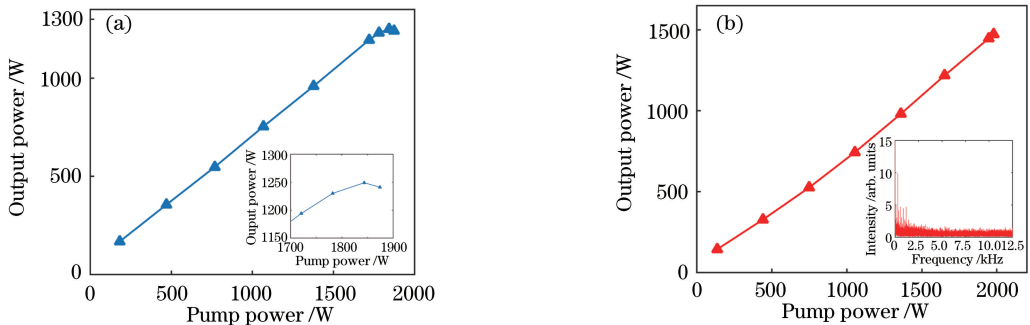


图 2 未进行 TMI 抑制时单向抽运结构的全光纤放大器输出功率曲线。(a)前向抽运输出功率及功率下降处细节图; (b)后向抽运输出功率及阈值处的频域信号

Fig. 2 Output power curves of all-fiber amplifier with single-directional pumping configuration before suppression of TMI. (a) Output power for forward pumping and detailed figure when output power drops; (b) output power for backward pumping and frequency domain signal at threshold

为了提高放大器 TMI 的阈值,在不改变系统结构的情况下,利用光纤盘 B 进行光纤盘绕,将增益光纤的最小弯曲直径减小为 10 cm,并再一次进行前向和后向单独抽运实验,结果如图 3 所示。在前向抽运条件下,能够实现功率大于 1390 W 的激光输出,此时斜率效率为 67%,且输出功率能够持续线性增长,未出现功率滞涨的情况。另一方面,利用后向抽运,能够实现最高输出功率大于 1800 W 的激光输出,斜率效率为 80%,同样也未出现功率滞涨等 TMI 现象。因此,无论是前向抽运还是后向抽运,小直径盘绕光纤的方法都能有效抑制 TMI 效应,提高 TMI 的阈

值。考虑到前后向合束器的承受能力以及单向抽运能力的不足,本实验未继续增加抽运功率。

从图 3 所示的光谱可以看出:前向抽运情况下,当输出功率为 1390 W 时,1143 nm 附近出现了抑制比为 42 dB 的 SRS 峰;但后向抽运情况下,当输出功率为 1810 W 时,在输出激光的光谱上还未观察到 SRS 散射光的成分。因此,实验结果也表明利用后向抽运可以提高 SRS 阈值^[39]。但考虑到后向合束器的功率承受能力,为兼顾合束器的安全和系统的稳定性,需要通过前后抽运功率优化来实现 SRS 的抑制。

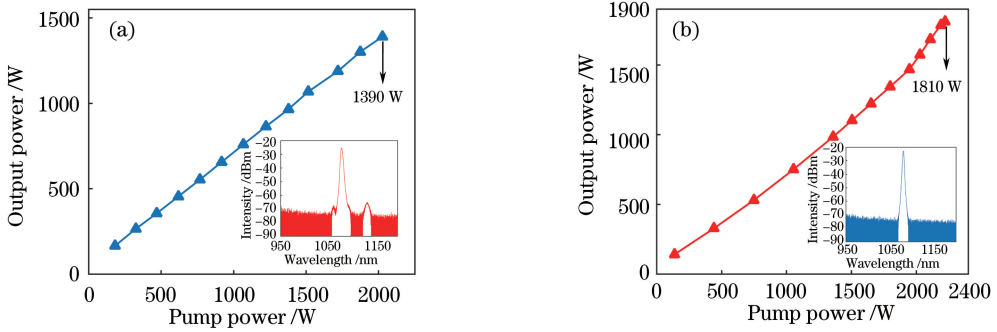


图 3 TMI 抑制后单向抽运结构的全光纤放大器的输出功率和输出光谱。

(a)前向抽运输出功率及 1390 W 处光谱;(b)后向抽运输出功率及 1810 W 处光谱

Fig. 3 Output power and spectra of all-fiber amplifier with single-directional pumping configuration after suppression of TMI.

(a) Output power and spectrum at 1390 W for forward pumping; (b) output power and spectrum at 1810 W for backward pumping

3.2 采取双端抽运和弯曲选模,综合抑制 TMI 和 SRS

利用减小弯曲半径的方法能够很好地抑制 TMI 效应,而且后向抽运方式的热分布较为均匀,能够实现更高的 TMI 阈值以及 SRS 阈值。但是由于单向抽运源功率的限制,前/后向单独抽运都无法实现抽运功率为 3 kW 的激光输出。因此必须采取双端抽运的方式,才有可能实现 3 kW 激光输出。

2017 年,国防科技大学的陶汝茂课题组^[23]基于不同尺寸的光纤放大器,对双向抽运下不同功率配比的 TMI 阈值进行了理论计算,发现对 20/400 μm 增益光纤来说,当后向抽运光比例达到总抽运功率的 75%时,可得到最高的阈值功率输出。2018 年, Li 等^[38]在 25/400 μm 增益光纤级联放大器的实验中发现,后向抽运光比例为 70%时可得到最高 TMI 阈值输出。考虑到如图 3 所示单端抽运下的阈值情况,本实验结合以往研究和具体情况对抽运功率选择及配比进行实时调整。当前/后向抽运功率分别为 1820 W 和 2240 W 时,放大器实现了 3003 W 激光输出。但是如图 4(a)所示,由于前向抽运功率占

比较高(45%),SRS 抑制比仅为 10 dB。根据单端抽运的实验结果,后向抽运方式能够有效地提高 SRS 的阈值。为了抑制放大器中的 SRS,当抽运源功率较高、输出功率接近 3 kW 时,适当降低前向抽运功率的比例,经过数次在高功率处的调整优化后,得到较好的 SRS 抑制结果。当前/后向抽运功率分别为 1750 W 和 2320 W 时,输出功率达到 3011 W。如图 4(b)所示,此时放大器的 SRS 抑制比提高到了 24 dB。对输出功率为 1 kW($P_1 = 1026$ W)、2 kW ($P_2 = 2065$ W)和 3 kW($P_3 = 3026$ W)的光束质量(M^2)进行了测量,结果如图 4(c)所示。种子激光的光束质量约为 1.45,随着功率的提升,激光器的光束质量出现了轻微的恶化,当输出功率刚超过 3000 W 时, M^2 值低于 1.6,此时激光器输出光斑的形态良好,可以认为激光器还是输出近单模的激光。

对空置抽运臂激光的监测中,由于输出光方向的影响,后向激光增长幅度远大于前向激光,当输出功率达到 3 kW 时,两个剩余臂处监测到的功率约为 70 W 的后向激光输出,利用光谱仪可以发现,这主要是泄漏至包层中的高阶模信号光。图 4(d)中

的前向合束器激光经历了增至最大值 23 W 后下降到 4 W 的过程,这是主要是因为抽运源的中心波长逐步增大到增益光纤的最优吸收波长。由图 4(e)可知,当输出功率小于 2928 W 时,斜率效率接近 75%,当超过该功率点时,输出功率不再保持线性增长趋势,说明此时在光纤内激发产生并通过包层光滤除的高阶模激光成分增多。而从光-光转换效率的曲线也可以发现,随着输出功率的增加,效率从起始点的 52% 逐渐上涨到 70% 以上。这是由于实验中使用的是稳波长的 LD(在第 2 节中已对 LD 进行

说明),但是在电流较低时,LD 的波长稳定性较差,未能达到增益光纤的最优吸收峰 976 nm 范围,导致吸收效果较差,激光器效率较低;当抽运功率增加时,由于 LD 的电流增加,波长稳定性增强,LD 输出光谱的中心波长与增益光纤的最优吸收峰 976 nm 匹配较好,放大器的效率明显提升。当输出功率超过 2928 W 时,由于光纤中高阶模比例在高功率输出下相对变大,被 CLS 剥除的功率也相应增多,导致图 4(e)所示的功率后期增长小幅下降,进而导致图 4(f)所示的光-光转换效率曲线出现非线性增长。

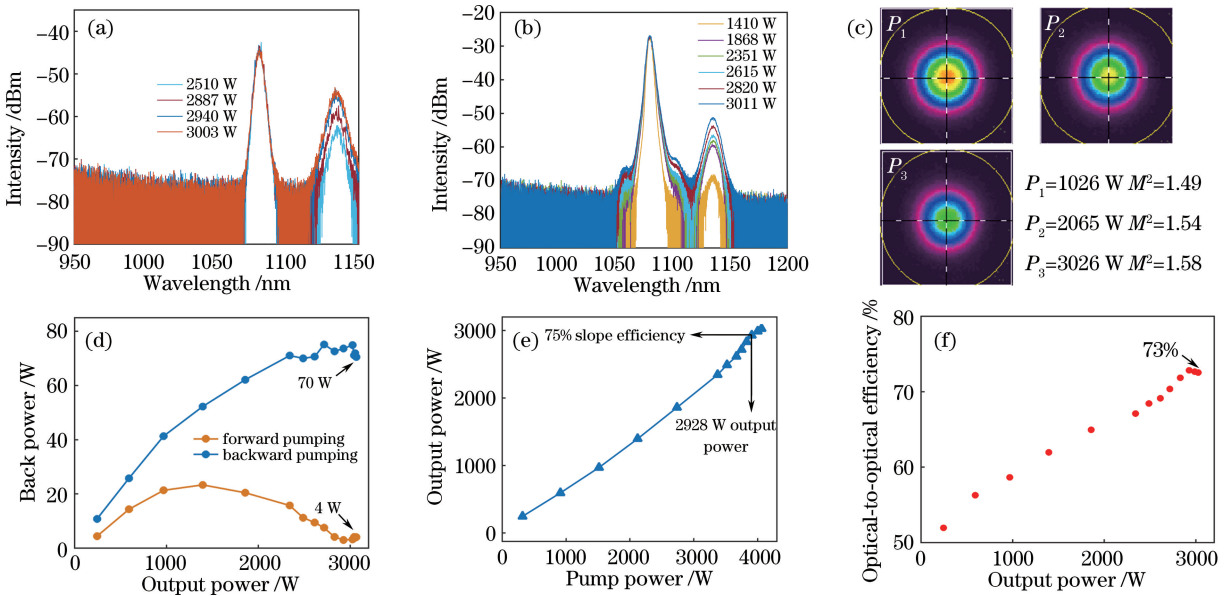


图 4 3 kW 近单模光纤输出过程。(a)优化前不同输出功率下的光谱;(b)优化后不同输出功率下的光谱;

(c) 1, 2, 3 kW 下的光斑图及光束质量;(d)空置抽运臂激光;(e)输出功率随抽运功率的变化曲线;(f)光-光转换效率

Fig. 4 Output process of 3 kW near single-mode laser. (a) Spectra before optimization under different output powers; (b) spectra after optimization under different output powers; (c) beam spots and beam qualities at 1, 2, 3 kW; (d) output power of idle pumping port; (e) output power versus pump power; (f) optical-to-optical efficiency

3.3 3 kW 放大器长时工作特性研究

考虑到工业加工等应用领域对激光器长时间工作的稳定性和可靠性的要求,对所设计的 3 kW 放大器进行高功率连续测试实验。实验的时间为 10 h,运行功率为 3 kW,并对激光器的功率、光谱、光束质量和时域特性进行不间断监测。图 5 所示为 10 h 内 3 kW 激光器的输出功率以及功率波动曲线,可以发现,经过 10 h 的稳定运行,输出功率稳定在 3060 W 以上,激光器功率未出现下降。功率起伏比例小于 0.5%,光-光转换效率保持为 73%。上述实验结果表明该激光器可在长时间内稳定输出,未出现光子暗化现象。

实验过程中每间隔 20 min 对光谱、 M^2 和时域分布进行监测,部分结果如图 6 所示。从图 6(a)可

以发现,运行后 60 min 内,放大器的 SRS 散射光出现了缓慢增长,经过 100 min 运行后,各项指标和温度分布趋于稳定,SRS 抑制比保持在 20 dB 左右。光束质量测量结果如图 6(b)所示,长时间连续测试中,由于测试系统中的高反镜和准直镜的热效应导致测得的光束质量有所下降,但 M^2 在连续测试过程中仍然能够保持在 1.6~1.7。图 6(c)给出了在长时间高功率连续测试中,随机存取的 3 次时域数据,由于制冷系统的影响,3 次时域采集时对应的实时功率输出会有低量级的波动,在图 6(c)中分别标示为 P_1 、 P_2 、 P_3 3 个功率输出值。从时域信号可以看出,由于 TMI 的时域生长时间和表现时间在毫秒量级^[40],连续测试过程中 100 ms 尺度上输出激光时域起伏不大,输出稳定。对这 3 次时域信号进行傅

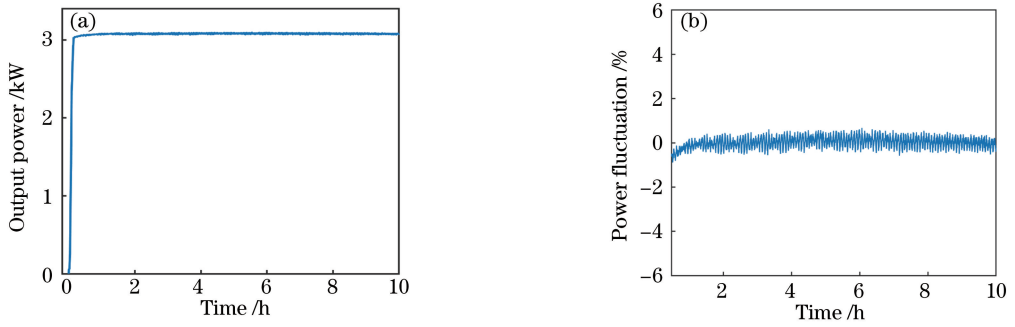


图 5 放大器连续工作 10 h 的测试结果。(a)输出功率曲线;(b)功率波动曲线

Fig. 5 Test results of amplifier for 10 h of operation. (a) Output power curve; (b) power fluctuation curve

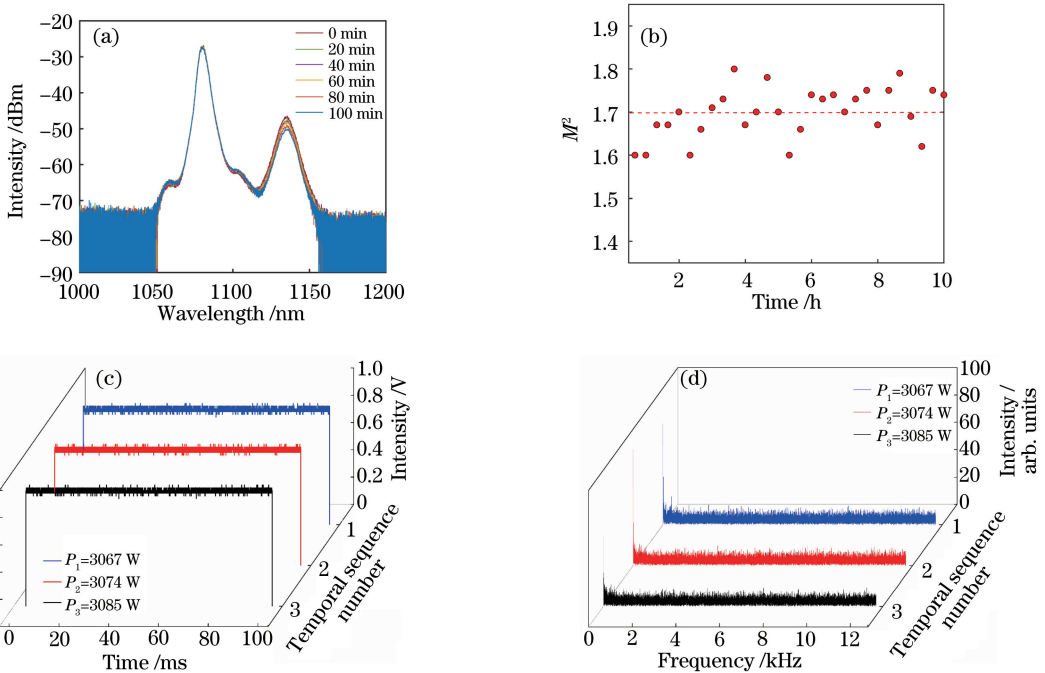


图 6 连续测试的 10 h 内不同时刻的输出结果。(a)光谱;(b)光束质量;(c)时域分布;(d)频域分布

Fig. 6 Output results at different moments in 10 h of continuous test. (a) Spectra; (b) beam qualities; (c) time domain distributions; (d) frequency domain distributions

里叶变换后得到如图 6(d)所示的结果,在 kHz 水平的频域数据上都没有观察到 TMI 特征频率尖峰,且频域信号均匀,时/频域上的信号皆说明连续测试过程中没有发生模式不稳定。

4 结 论

对 3 kW 近单模全光纤放大器的实现及其稳定长时输出进行实验研究。结果表明,采用减小增益光纤弯曲半径的方式能够滤除光纤中的高阶模式,对提高放大器 TMI 阈值具有显著作用,在前/后向单端抽运的情况下其阈值功率可分别提升 11% 和 22%。由于减小弯曲半径的方法可滤除进入增益光纤前段的高阶模,后向抽运下放大的输出激光高阶

模成分比前向抽运更少,且后向抽运对于热分布更具优势,模式不稳定抑制效果也更明显;优化前/后向抽运功率配比来综合抑制 SRS 与 TMI,采用双端抽运方式实现了功率大于 3 kW 的激光输出,在 SRS 抑制比为 24 dB 时,光束质量低于 1.6,近似单模输出,因此抑制 SRS 对光纤的热管理有一定的促进作用,并能提高 TMI 阈值,有利于激光器稳定工作。同时,还研究了放大器长时间工作特性,在 3 kW 水平进行了 10 h 的连续测试实验。SRS 抑制比稳定在 20 dB 左右,光束质量可稳定保持 1.7 以下,输出光斑形态良好,时/频域上也未观察到模式不稳定效应特征。所设计的激光器性能稳定,有望用于工业加工等应用并实现长时间工作。

参 考 文 献

- [1] Zhang J, Pan Y Z, Hu G J, *et al.* Application and forecast of high power fiber lasers[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, 24(4): 222-226.
张军, 潘玉寨, 胡贵军, 等. 高功率光纤激光器的应用与展望 [J]. *半导体光电*, 2003, 24(4): 222-226.
- [2] Wang T J, Li Y T, Yang S L, *et al.* High power fiber laser & its application[C]. *National Conference on Photoelectric Technology and Systems*, 2003: 1198-1202.
王天及, 李耀棠, 杨世宁, 等. 高功率光纤激光器及其应用[C]. *全国光电技术与系统学术会议*, 2003: 1198-1202.
- [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): 63-92.
- [4] Song Z Q. The development of high-power fiber laser and its applications[J]. *Shandong Science*, 2008, 21(6): 72-77.
宋志强. 大功率光纤激光器技术及其应用[J]. *山东科学*, 2008, 21(6): 72-77.
- [5] 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.
- [6] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Otto H J, Stutzki F, Modsching N, *et al.* 2 kW average power from a pulsed Yb-doped rod-type fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6446-6449.
- [13] Wang X L, Tao R M, Xiao H, *et al.* Experimental studies of mode instability and thermal effects in all-fiber amplifier [C]. *Advance Solid-State Laser Congress*, 2013: JTh2A.44.
- [14] Yang B L, Zhang H W, Shi C, *et al.* Mitigating transverse mode instability in all-fiber laser oscillator and scaling power up to 25 kW employing bidirectional-pump scheme [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27828-27835.
- [15] Laurila M, Jørgensen M M, Lægsgaard J, *et al.* Highly efficient 90 μm core rod fiber amplifier delivering >300 W without beam instabilities [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics-International Quantum Electronics Conference*, 2013: 1.
- [16] Puju P V, Zelenova M V, Tyrtysnyy V A. Mode instability observation in fiber amplifier of single-frequency radiation at 1560 nm wavelength [C]. *International Conference Laser Optics*, 2016: S1-S15.
- [17] 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.
- [18] Jauregui C, Eidam T, Otto H J, *et al.* Temperature-induced index gratings and their impact on mode instabilities in high-power fiber laser systems [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 440-451.
- [19] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [20] 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.
- [21] Dong L. Stimulated thermal Rayleigh scattering in optical fibers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2642-2656.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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): 1-10.
- [25] Laurila M, Saby J, Alkeskjold T T, *et al.* Q-switching and efficient harmonic generation from a single-mode LMA photonic bandgap rod fiber laser [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10824-10833.
- [26] Alkeskjold T T, Laurila M, Scolari L, *et al.* Single-mode ytterbium-doped large-mode-area photonic bandgap rod fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7398-7409.
- [27] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [28] Jauregui C, Otto H J, Stutzki F, *et al.* Passive mitigation of mode instabilities [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8961: 896128.
- [29] 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): 1-6.
- [30] Smith A V, Smith J J. Increasing mode instability thresholds of fiber amplifiers by gain saturation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15168-15182.
- [31] Yan P, Huang Y S, Sun J Y, *et al.* 3.1 kW monolithic MOPA configuration fibre laser bidirectionally pumped by non-wavelength-stabilized laser diodes [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(8): 080001.
- [32] Yu H L, Zhang H W, Lü H, *et al.* 315 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(14): 4556-4560.
- [33] 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.
- [34] Wang X L, Tao R M, Yang B L, *et al.* Experimental study of the relationship between mode instability effect and the stimulated Raman scattering in ytterbium doped all-fiber laser oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0801008. 王小林, 陶汝茂, 杨保来, 等. 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 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0801008.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Eznaveh Z S, López-Galmiche G, Antonio-López E, *et al.* Bi-directional pump configuration for increasing thermal modal instabilities threshold in high power fiber amplifiers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9344: 93442G.
- [38] Li T L, Zha C W, Sun Y H, *et al.* 3.5 kW bidirectionally pumped narrow-linewidth fiber amplifier seeded by white-noise-source phase-modulated laser [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(10): 105101.
- [39] 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.
- [40] 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.