

LD 抽运主振荡功率放大结构 4.1 kW 全光纤激光器

王小林 张汉伟 陶汝茂 粟荣涛 周 朴 许晓军

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 利用半导体激光器(LD)抽运大模场增益光纤实现了输出功率大于 4 kW 的主振荡功率放大结构全光纤激光器。实验研究了增益光纤纤芯直径和抽运波长不同情况下激光器的受激拉曼散射(SRS)和横向模式不稳定(TMI)特性。为了抑制 SRS,选择纤芯为 30 μm 的大模场掺镱光纤作为增益介质;为了抑制光纤放大器中的 TMI,利用增益光纤吸收系数较低波段对应的 915 nm LD 作为抽运源,将增益光纤弯曲半径降低到 10 cm 以提高高阶模的损耗。在种子功率为 100 W、最高注入抽运功率为 5.3 kW 时获得了 4.1 kW 的功率输出,光束质量 M^2 为 2.2,输出激光中无 SRS 和 TMI 现象。

关键词 激光器;光纤激光器;主振荡功率放大;受激拉曼散射;横向模式不稳定

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0502002

Laser Diode Pumped 4.1 kW All-Fiber Laser with Master Oscillator Power Amplification Configuration

Wang Xiaolin Zhang Hanwei Tao Rumao Su Rongtao Zhou Pu Xu Xiaojun

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A laser diode (LD) pumped all-fiber laser with master oscillator power amplification configuration is demonstrated, of which output power is more than 4 kW. The stimulated Raman scattering (SRS) and transverse mode instability (TMI) characteristics of lasers are experimentally studied under different core-diameter gain fibers and different pump wavelengths. In order to mitigate SRS, a large mode area Yb^{3+} doped fiber with core diameter of 30 μm is selected as gain media. In order to suppress TMI, LD with center wavelength of 915 nm is used as pump source, so the absorption coefficient of the gain fiber is lower at 915 nm, and the bending radius of the gain fiber is reduced to 10 cm to increase the loss of the higher modes. When the seed power is 100 W, the highest pump power is 5.3 kW, the laser power of 4.1 kW is achieved, and the beam quality M^2 is 2.2. There are no SRS and TMI effects observed in the output laser.

Key words lasers; fiber lasers; master oscillator power amplification; stimulated Raman scattering; transverse mode instability

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 060.2320

1 引 言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、体积小、重量轻等优点,在工业加工、3D 打印、生物医疗等领域具有广泛的应用前景^[1-2]。随着高功率、高亮度抽运源和双包层增益光纤的发展,掺镱高功率激光器输出功率得到了迅速的提升^[3-6]。尤其是随着同带抽运技术的发展,高功率单纤光纤激光器输出功率突破了 10 kW^[7]。然而,近年来发现的横向模式不稳定(TMI)现象^[8-12]严重限制了高功率光纤激光器的功率提升^[13]。TMI 是由增益光纤内部热效应所导致,激光器抽运功率大于一定阈值时,激光中的基模与高阶模式

收稿日期: 2016-01-22; 收到修改稿日期: 2016-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(61505260)

作者简介: 王小林(1985-),男,博士,副研究员,主要从事光纤激光器及相干合成方面研究。

E-mail: chinaphotonics@163.com

之间出现动态耦合,使输出激光中高阶模式成分增加,光束质量严重下降^[13];使用包层光滤除装置后,光纤激光器的输出功率还会严重下降^[13-17]。在传统 LD 抽运的光纤激光系统中,由于量子亏损较高、增益光纤对抽运光的吸收系数较大,使增益光纤中的热效应较为严重,导致 TMI 阈值较低。在许多情况下,TMI 的阈值甚至比受激拉曼散射(SRS)的阈值低^[14,17-18],目前 TMI 已被国际公认为是影响高功率光纤激光功率提升的一个重要限制影响因素^[13]。为了抑制 TMI,研究人员提出了多种方法,一种最为有效的 TMI 抑制方法是选择纤芯直径较小、支持模式数量较少的掺杂光纤作为增益介质^[14]。但该方法会降低 SRS 阈值,同样影响激光器输出功率的提升。

为了减轻 SRS、抑制 TMI,在对 TMI 影响因素已有理论分析的基础上^[18-20],本文搭建了高功率的主振荡功率放大(MOPA)结构光纤放大器实验平台,对不同纤芯直径的增益光纤进行了实验研究,分析了不同抽运波长对 SRS 和 TMI 的影响。结合实验研究结论,选择纤芯直径为 30 μm 的大模场增益光纤抑制 SRS。实验中利用增益光纤吸收系数较低波段对应的 915 nm LD 作为抽运源,同时通过弯曲主放大器增益光纤增加高阶模式损耗的方式来抑制 TMI。结果表明,在最高注入抽运功率为 5.3 kW 时获得了 4.1 kW 的功率输出,输出激光中无 SRS 和 TMI 现象。

2 MOPA 结构全光纤激光器结构

MOPA 结构全光纤激光器原理图如图 1 所示。振荡器利用 3 个功率为 100 W 的 915 nm 抽运源(LD),通过 3×1 抽运合束器(PC)对激光谐振腔进行抽运。激光谐振腔由高反射光纤光栅(HRFBG)、掺镱光纤(YDF1)和低反射光纤光栅(OCFBG)构成。其中 HRFBG 的反射率大于 99.5%,中心波长为 1080 nm,3 dB 带宽约 2 nm;OCFBG 的反射率约为 8%,中心波长为 1080 nm,3 dB 带宽约 1.2 nm。YDF 的纤芯与包层直径分别为 20 μm 和 400 μm (即 20/400 光纤),纤芯与包层数值孔径分别为 0.063、0.46,在 915 nm 抽运波长处的吸收系数约为 0.4 dB/m。PC 的抽运输入臂纤芯和包层直径分别为 105 μm 和 125 μm ,数值孔径为 0.22;输出臂纤芯与包层直径分别为 20 μm 和 400 μm ,纤芯与包层数值孔径分别为 0.06、0.46。抽运功率为 300 W 时振荡器输出功率大于 200 W。实验中,为了抑制 SRS,保证放大器的稳定性,种子激光工作在 100 W 左右。

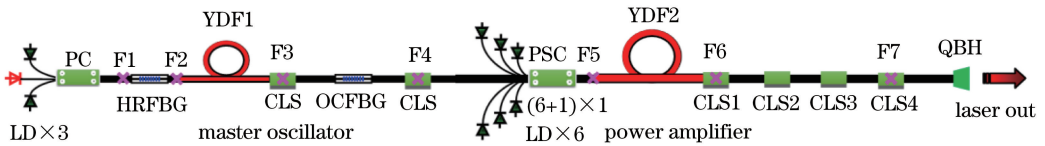


图 1 MOPA 结构光纤激光器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber laser with MOPA configuration

主放大器采用 $(6+1) \times 1$ 的抽运/信号合束器(PSC)对抽运功率和信号进行合束。为了研究 SRS 和 TMI 的阈值与抽运波长的关系,选择最大功率分别为 500 W、900 W 的 975 nm 和 915 nm 光纤耦合半导体激光器作为抽运源。由于实际上各个抽运源的功率不等,经过合束器后,975 nm 和 915 nm 激光器的实际总抽运功率分别为 3 kW 和 5.3 kW。实验中,利用纤芯直径分别为 20、25、30 μm 的掺镱双包层光纤(YDF2)作为增益介质,以研究 SRS 和 TMI 的阈值特性。为了滤除未吸收的抽运光和模式不稳定导致的包层模,利用足够长度的包层光滤除装置(CLS)滤除包层光,然后采用商用的光纤端帽(QBH)扩束后输出。实验中,为了满足 CLS 和光束扩束的需求,传能光纤总长度大于 6 m(其中 CLS 光纤 3 m,QBH 尾纤 3 m),传能光纤纤芯直径均为 30 μm 。

3 实验结果与分析

实验中,首先利用 915 nm 和 975 nm 抽运源对纤芯与包层直径分别为 25 μm 和 400 μm 的掺镱光纤(25/400 光纤)进行抽运,研究 SRS 和 TMI 的阈值特性。利用 915 nm 抽运时,由于掺镱光纤对 915 nm 波段吸收系数较低(仅为 0.5 dB/m),为了保证 15 dB 的总吸收系数,增益光纤总长度为 30 m。实验发现,输出功率为 1.45 kW 时出现了明显的 SRS 效应,如图 2(a)所示,其中第 2 个光谱峰的中心波长为 1135 nm,即

1080 nm 激光的拉曼光谱。由于 SRS 的出现,初步判断采用该结构难以实现 3 kW 以上的功率输出。利用 975 nm 抽运时,为了抑制 TMI,将增益光纤弯曲半径减小到 10 cm 左右。在最高抽运 3 kW 时输出功率为 2.34 kW,出现了非常明显的 TMI,如图 2(b)和图 2(c)所示,图 2(b)为实验中利用示波器测量得到放大器输出功率的时域,图 2(c)为该时域信号的功率谱。结果表明:由于 TMI 的出现,基模与高阶模式之间存在动态耦合,使得输出激光出现明显的功率起伏;对应频谱的低频部分也呈现出明显的连续频率成分,说明该结构的放大器也难以具备功率进一步提升的能力。

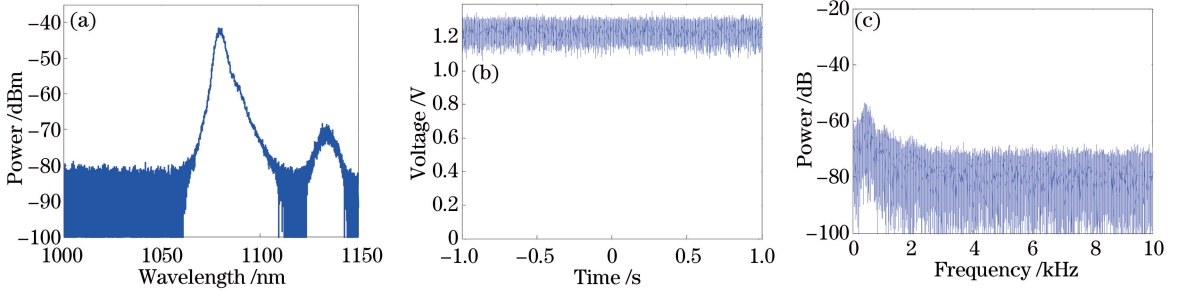


图 2 915 nm LD 抽运 25/400 光纤时的(a)输出光谱、(b)输出时域谱和(c)对应频谱

Fig. 2 (a) Output spectrum, (b) time domain spectrum and (c) corresponding frequency domain spectrum when 25/400 fiber is pumped by 915 nm LD

根据 TMI 的原理,利用模场直径较小的增益光纤可以一定程度地抑制 TMI^[14]。实验中,用中心波长为 975 nm 的 LD 对纤芯直径为 20 μm 、包层直径为 400 μm 、长度为 18 m 的掺镱光纤进行抽运,将增益光纤弯曲半径减小到 10 cm 以抑制 TMI。在最大抽运功率为 3 kW 时,输出功率达到了 2.34 kW。从输出激光时域及对应的功率谱来看,没有出现 TMI 的征兆[如图 3(a)和图 3(b)所示];光谱也没有观察到明显的 SRS [如图 3(c)所示]。但是由于 975 nm 波段总抽运功率的限制,无法获得大于 3 kW 的有效功率输出。

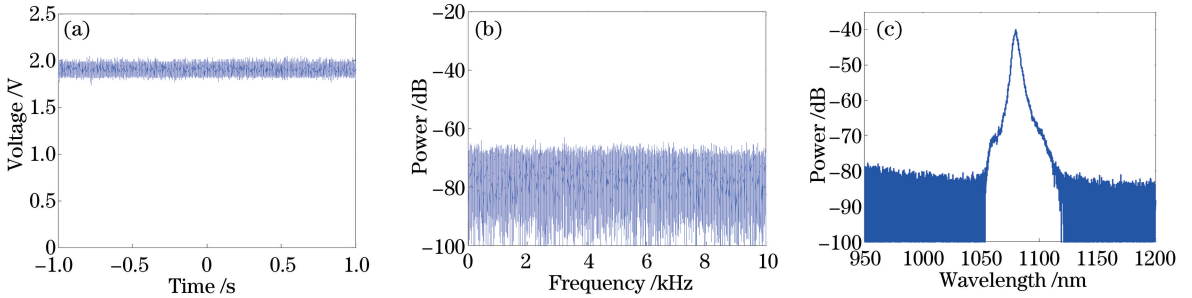


图 3 975 nm LD 抽运 20/400 光纤的(a)输出时域谱、(b)输出频域谱和(c)光谱

Fig. 3 (a) Output time domain spectrum, (b) frequency domain spectrum and (c) spectrum when 20/400 fiber is pumped by 975 nm LD

实验研究表明:利用 915 nm 抽运 25/400 增益光纤时,由于增益光纤有效模场面积较小、增益光纤较长,使得 SRS 阈值较低;利用 975 nm 抽运 25/400 光纤时,TMI 阈值较低,功率进一步提升受限;利用 975 nm 的 LD 对 20/400 光纤进行抽运,可以抑制 SRS 和 TMI,但是由于抽运功率的限制,暂时无法获得大于 3 kW 的功率输出。

理论和实验研究都表明:对于光纤放大器中的 TMI 而言,利用 915 nm 抽运可以获得较 975 nm 抽运更高的输出功率阈值^[14]。为了获得大于 4 kW 的功率输出,最终采用 915 nm 的 LD 对纤芯和包层直径分别为 30 μm 和 400 μm 、长度为 25 m 的掺镱光纤进行抽运,辅助弯曲光纤滤除高阶模式的方法抑制 TMI。实验中,将增益光纤的弯曲半径减小到 10 cm,在最高抽运功率为 5.3 kW 时,获得了 4.1 kW 的激光功率输出。输出功率与抽运功率的关系曲线如图 4(a)所示。由于 915 nm 附近增益光纤的吸收平坦,在抽运功率提升的过程中,放大器的效率基本维持不变,在最高功率时光光转换效率为 75.5%。图 4(b)给出最高功率时测量得到的输出光谱特性,由图可知,输出光谱中没有任何 SRS 波段的信号;图 4(c)为 4.1 kW 时测试得到的时域信号,可见光纤激光器输出时域稳定,没有出现 TMI 导致的功率起伏现象。上述结果表明:输出功率为

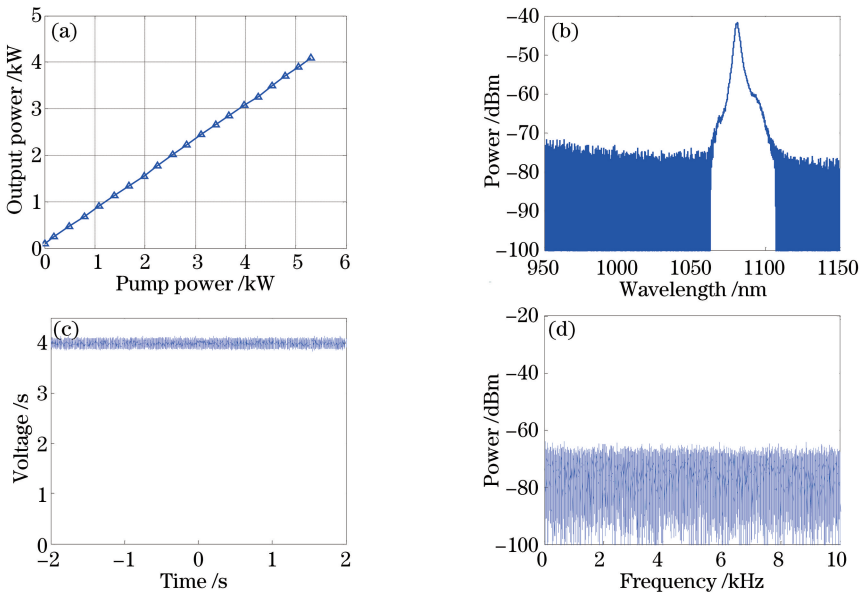


图 4 4.1 kW 全光纤放大器输出特性。(a) 功率；(b) 光谱；(c) 时域；(d) 频域
 Fig. 4 Output characteristics of 4.1 kW all-fiber amplifiers. (a) Power; (b) spectrum; (c) time domain; (d) frequency domain

4.1 kW 时,没有出现 SRS,TMI 也得到了较好的抑制,该激光器具功率进一步提升的潜力。

用光束质量测量仪 BeamWave 1000 测试了激光器的光束质量,测量结果如表 1 所示。表 1 中给出了光束质量测量过程中参数,其中 z_R 为瑞利距离, z 为光束传送距离, z_0 为光腰位置, w_0 为光腰大小。结果表明:在最高功率时,激光器光束质量约为 $M^2 = 2.2 (M_x^2 = 2.02, M_y^2 = 2.31)$ 。在最高功率时激光光斑如图 5 所示,该激光器光斑形态较基模光束稍差。

表 1 光束质量测量结果

Table 1 Measurement results of beam quality

Property	M_2	$2w_0/\mu\text{m}$	$z-z_0/\text{mm}$	z_R/mm	θ/mrad
X value	2.02	232.4	101.8	67.0	3.5
Y value	2.31	291.4	122.4	105.3	3.2

为了验证激光器的功率提升能力,实验测试了不同抽运功率情况下整个激光器系统中最高温度点(增益光纤与合束器的熔接点)的温度特性,测试结果如图 6 所示。实验采用了良好的制冷方法,结果表明:在最高抽运功率为 5.3 kW 时,熔点的温度稳定在 65 °C 左右,曲线中个别温度点的数值起伏是由测量误差导致的。考察激光器的特性,在最高输出功率时激光器中没有出现 SRS 和 TMI,考虑到增益光纤涂覆层长时间稳定工作的温度为 80 °C,表明通过增加抽运功率有望一定程度地提高激光器输出功率。

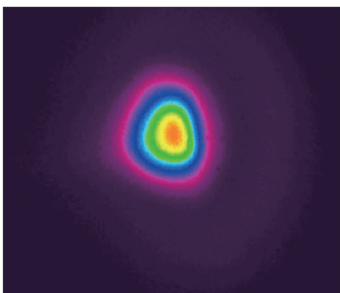


图 5 最高输出功率时的光斑形态

Fig. 5 Beam profile of laser at the highest output power

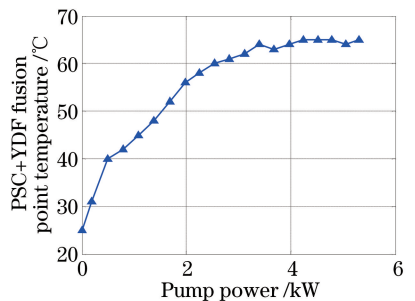


图 6 光纤熔点温度特性

Fig. 6 Temperature characteristics of the fiber fusion point

4 结 论

目前,横向模式不稳定已经成为影响高功率光纤激光功率提升的重要因素之一。如何平衡受激拉曼散射和横向模式不稳定、获得高功率高光束质量的光纤激光输出是一个重要的研究方向。利用 MOPA 结构,通过优化光纤参数,避免了受激拉曼散射的产生;通过选用 915 nm 抽运源、弯曲光纤选模,抑制了横向模式不稳定的发生,实现了功率为 4.1 kW 的全光纤激光输出。选择抽运吸收系数稍低、量子效率较高的抽运波长(比如 980 nm)对激光器进行抽运,有望提高放大器效率,获得更高功率的光纤激光输出。

参 考 文 献

- Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- Galvanauskas A. High power fiber lasers[J]. Optics & Photonics News, 2004, 15(7): 42-47.
- Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 1-23.
- Zervas M N. High power ytterbium-doped fiber lasers-fundamentals and applications[J]. International Journal of Modern Physics B, 2014, 28(12): 1442009.
- Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Yu Hailong, *et al.*. 3.15 kW all-fiber single-mode laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0219003.
王小林, 张汉伟, 于海龙, 等. 3.15 kW 全光纤单模激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0219003.
- Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW near single-mode all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702001.
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702001.
- IPG Photonics Inc. IPG photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser [EB/OL]. [2015-12-25] <http://www.laserfocusworld.com/articles/oiq/2009/06/ipg-photonics-successfully.html>.
- Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- 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.
- 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.
- 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.
- Dong L. Stimulated thermal Rayleigh scattering in optical fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2642-2656.
- Jauregui C, Limpert J, Tunnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- Tao Rumao. Study of thermal-induced modal instabilities in high power narrow-linewidth fiber amplifiers with near diffraction-limited beam quality[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
陶汝茂. 高功率窄线宽近衍射极限光纤激光放大器热致模式不稳定研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- Tao Rumao, Zhou Pu, Xiao Hu, *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.
- Tao Rumao, Wang Xiaolin, Xiao Hu, *et al.*. Theoretical study of the threshold power of mode instability in high-power fiber amplifier[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性现象研究进展[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0114002.
- Wang Xiaolin, Tao Rumao, Xiao Hu, *et al.*. Experimental studies of mode instability and thermal effects in all-fiber amplifier[C]. Conference on Advance Solid-State Laser, 2013, JTh2A: JTh2A.44.
- Tao Rumao, Ma Pengfei, Wang Xiaolin, *et al.*. 1.4 kW all-fiber narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifier [C]. SPIE, 2014, 9255: 92550B.
- Tao Rumao, Ma Pengfei, Wang Xiaolin, *et al.*. Influence of core NA on thermal-induced mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(8): 085101.
- Tao Rumao, Ma Pengfei, Wang Xiaolin, *et al.*. Experimental study on mode instabilities in all-fiberized high-power fiber amplifiers[J]. Chin Opt Lett, 2014, 8(s2): s20603.