中国光学（中英文）
Chinese Optics
核心期刊

2-μm MOPA结构全光纤激光器输出特性研究

吴玲 娄岩 侯欣宜 李保群 李永亮 王天枢 赵义武

Output characteristics of an all-fiber laser with a 2-μm MOPA structure

WU Ling, LOU Yan, HOU Xin-yi, LI Bao-qun, LI Yong-liang, WANG Tian-shu, ZHAO Yi-wu

引用本文:
吴玲, 娄岩, 侯欣宜, 李保群, 李永亮, 王天枢, 赵义武. 2-μm MOPA结构全光纤激光器输出特性研究[J]. 中国光学, 2023, 16(2): 399-406. doi: 10.37188/CO.2022-0191
WU Ling, LOU Yan, HOU Xin-yi, LI Bao-qun, LI Yong-liang, WANG Tian-shu, ZHAO Yi-wu. Output characteristics of an all-fiber laser with a 2-m MOPA structure[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 399-406. doi: 10.37188/CO.2022-0191

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022-0191

文章编号 2097-1842(2023)02-0399-08

2-μm MOPA 结构全光纤激光器输出特性研究

吴 玲,娄 岩*,侯欣宜,李保群,李永亮,王天枢,赵义武
（长春理工大学 光电工程学院，吉林 长春 130022）

摘要: 为改善高功率掺铥光纤激光器(TDFL)的输出性能,提高系统的光-光转化效率,研制了一种全光纤主振荡功率放大结构(MOPA)的高功率 TDFL,可在连续(CW)和准连续(QCW)两种模式下工作。首先,搭建了激光振荡器,对种子源激光器的输出特性进行研究。接着,搭建掺铥光纤放大器,并将其与激光振荡器连接,研究 MOPA 结构光纤激光器的输出特性。最后,在 QCW 调制模式下,分析 MOPA 结构光纤激光器的脉冲特性。结果表明:激光振荡器实现了中心波长为 1 940 nm 连续稳定的激光输出,最高平均输出功率为 18.56 W,斜率效率为 54.84%,且光谱无拉曼成分。利用该低功率连续激光作为种子源经过自制的掺铥光纤放大器后,平均输出功率可达 66.9 W,斜率效率为 48.48%。当系统在 QCW 模式下工作时,可以实现对频率和占空比的调节,且当频率为 75 Hz,占空比为 10% 时,经计算其峰值功率为 80.3 W。该研究方案对研制 2 μm 波段更高功率的 MOPA 激光器具有参考意义。

关 键 词: 掺铥光纤激光器;主振荡功率放大;光纤放大器;准连续
中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2022-0191

Output characteristics of an all-fiber laser with a 2-μm MOPA structure

WU Ling, LOU Yan*, HOU Xin-yi, LI Bao-qun, LI Yong-liang, WANG Tian-shu, ZHAO Yi-wu
(*College of Opto-Electronic Engineering*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *lyan@cust.edu.cn*

Abstract: In order to improve the output performance of a high-power Thulium-Doped Fiber Laser (TDFL) and increase the optical-optical conversion efficiency of the system, a high-power TDFL with an all-fiber Main Oscillation Power Amplification (MOPA) structure was developed, which can operate in both Continuous Wave (CW) and Quasi-Continuous Wave (QCW) modes. First, a laser oscillator was built to study the output characteristics of the seed source laser. Then, a thulium-doped fiber amplifier was built and connected to the laser oscillator to study the output characteristics of the MOPA structured fiber laser. Finally, the pulse characteristics of the MOPA structured fiber laser were analyzed under the QCW modulation mode. The laser oscillator achieved a continuous and stable laser output with a central wavelength of 1 940 nm, and the highest average output power was 18.56 W. The slope efficiency was 54.84%, and the spectrum was free of

收稿日期: 2022-09-01; **修订日期:** 2022-09-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61975021);吉林省科技发展计划项目(No. 20220402014GH, No. 20200201185JC)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61975021); Science and Technology Development Program of Jilin Province (No. 20220402014GH, No. 20200201185JC)

Raman components. Using this low-power continuous laser as the seed source through the homemade thulium-doped fiber amplifier, the average output power could reach 66.9 W, and the slope efficiency was 48.48%. When the system operated in the QCW mode, the frequency and duty cycle can be adjusted, and the peak power was calculated to be 80.3 W when the frequency was 75 Hz and the duty cycle was 10%. This research is of referential significance for the development of higher power MOPA lasers in the 2 μm band.

Key words: thulium-doped fiber laser; main oscillation power amplification; fiber amplifier; quasi-continuous wave

1 引　言

掺铥高功率光纤激光器具有电光转换效率高、光束质量好、结构简单紧凑、环境适应能力强、稳定性好等特点[1]。2 μm 波段掺铥光纤激光器 (TDFL) 的输出波长处于人眼安全波段，且同时覆盖了多个重要的吸收带，因此被应用于诸多领域，如激光医疗手术、激光雷达和激光大气监测与传感等[2-5]。由于水分子在该波段具有较高的吸收峰，能够实现对生物组织精准、高效的消融与切割，可以用做激光手术刀[6]。此外，2 μm 光纤激光在泌尿系统中应用效果良好，在临床医疗中多用于结石粉碎[7]。

最近几年，2 μm 波段高功率 TDFL 成为了研究热点，主振荡功率放大器 (MOPA) 结构以其光束质量好、参数可调等优点成为主流的中高功率光纤激光器设计方法[8-9]。2013 年，Zhou 等人[10]报道了一种 100 W高功率 Tm^{3+}掺杂全光纤 MOPA，其由一级放大结构组成，最大输出激光功率为 100.4 W，斜率效率为 56%。同年，Wang 等人[11]报道了一种利用分布式布里渊散射效应 (SBS) 研制的新型全光纤结构被动调 Q 2 μm TDFL，最大输出功率为 2.49 W，斜率效率为 12%，脉宽为 20 ns，单脉冲能量为 50 μJ。2014年，该团队[12]报道了一种由声光调制器 (AOM)调制的窄带脉冲激光器作为种子源的两级 2 μm掺 Tm^{3+}光纤放大器，在 50 kHz 重频下得到超过 50 W 的最大输出平均功率，最大单脉冲能量为 1 mJ。2015 年，该团队[13]报道了全光纤高功率石墨烯锁模 Tm/Ho 共掺光纤激光器。在中心波长 1879.4 nm 处产生高达 7 MHz 的超快脉冲，脉冲宽度为 4.7 ps。该团队研制的 TDFL 都为脉冲光纤激光器，单脉冲能量和平均功率较低。2016年，Yang 等人[14]采用 MOPA 结构获得了中心波长为 1940 nm 的窄线宽高功率全光纤激光器，在 356 W 的泵浦功率下获得了高达 140.9 W 的激光输出功率，对应的光-光转化效率为 39.6%。2017年，PAL D 等人[15]实现了输出功率为 16.1 W、斜率效率为 65.6% 的 1950 nm CW 激光，在 QCW工作模式下，已测量 400 μJ 至 5 mJ 范围内的脉冲能量，峰值功率为 16 W，设计的激光器已成功用于体外肾结石破碎。同年，Shen 等人[16]报道了一种采用全光纤 MOPA 结构实现 400 W 窄线宽 TDFL，放大器的激光光谱线宽在 1941 nm 处为 67 pm。但只能在 CW 模式下工作，有一定局限性。2020 年，Zhang[17]等人利用镀金镜上沉积的溶液处理硫化铅 (PbS) 纳米粒子 (NPs)，并将其作为可饱和吸收体 (SA)，调制 2 μm Tm^{3+}掺杂光纤激光器，产生超快脉冲。锁模掺 Tm^{3+}光纤激光器在波长为 1993 nm 处获得平均输出功率为 115.6 mW(重复频率 15 MHz)，最大脉冲能量为 7.3 nJ，脉宽为 4.24 ps，峰值功率为 1.7 kW。该 TDFL 采用环形腔结构，平均功率和单脉冲能量都较低。2021 年，Shin J S 等人[18]采用 MOPA 结构得到了中心波长为 2050 nm 的连续波 TDFL，最大输出功率为 204.6 W，泵浦功率为 350.4 W，放大器的斜率效率经测量为 58.4%，但其同样只能在 CW 模式下工作。

随着 MOPA 技术和光纤合束技术的迅速发展，TDFL 的输出功率已经达到了数百瓦至千瓦级别，但传统 793 nm 激光二极管 (LD) 搭建的激光器在大功率泵浦下，光纤的热效应管理难以得到有效控制，如何提高激光器的效率是目前急需解决的问题[19-24]。本文设计了一种利用光纤光栅对实现全光纤结构的高功率 TDFL，可在 CW 和 QCW 两种模式下工作。在 CW 模式下，实验研究了增益光纤长度和泵浦功率对激光特性的影响。激光波长可以稳定在 1940 nm，光谱无自发辐射 (ASE) 和拉曼成分。通过合理控制水冷温度对系统进行热管理，在最大输出功率为 66.9 W

时, 斜率效率达 48.48%。在 QCW 模式下, 频率和占空比可调, 当频率为 75 Hz, 占空比为 10% 时, 峰值功率达 80.3 W。结果表明: 该光纤激光器具有高功率和高鲁棒性, 具有广阔的应用前景。

2　实验装置

高功率全光纤 MOPA 结构 TDFL 由线性激光振荡器和双包层光纤放大器组成, 实验装置如图 1 所示。采用光纤激光输出头(EFC)输出激光。整体结构采用水冷控温(水冷机温度设定为 25 °C)。

种子源实物图如图 2(a) 所示, 振荡器采用江苏天元激光公司生产的 2 个 793 nm LD 作为泵浦源, 其最高平均输出功率为 20 W, 输出尾纤的纤芯和包层直径分别为 105 μm 和 125 μm。考虑掺铥光纤 (TDF) 的吸收特性, 其主要在 790、1 180 和 1 550 nm 波段处各有一个较强的吸收峰, 由于 790 波段处的吸收峰大于 1 180 和 1 550 nm 波段处的吸收峰, 且用 793 nm LD 泵浦 TDFL 能够高效率地激发交叉弛豫过程, 提高高功率 TDFL 的量子效率。因此, 选用光纤耦合输出中心波长为 793 nm 的多模 LD 作为泵浦源。使用 (2+1)×1 大功率多模泵浦信号合束器(combiner)将 2 个 LD 输出的光耦合进 TDF 中, 耦合效率为 95%。前向泵浦不仅有利于泵浦光和种子光的耦合, 且由于泵浦光的输入端与信号光的输出端不在同一方向上更便于两者分离, 使输出激光光束质量高。因此, 光纤放大器和种子激光器均采用前端泵浦方式。增益介质为武汉长进激光公司 CJTDF-10/130 型双包层 TDF, 其纤芯和内包层直径分别为 10 μm 和 130 μm、对应的数值孔径分别为 0.14 和 0.46, 所用 TDF 在 793 nm 处的泵浦吸收系数为 4.7 dB/m, 总长度 4 m。将一对光纤光栅置于 TDF 两侧构成谐振腔, 光纤类型为无源双包层光纤, 光纤的纤芯、包层尺寸及数值孔径与 TDF 相匹配。其中, 高反射率光纤光栅(HR-FBG)的反射率为 99.5%, 3 dB 带宽为 2.2 nm, 中心波长为 1 939.91 nm; 低反射率光纤光栅的(LR-FBG)反射率为 9.2%, 3 dB 带宽为 1 nm, 中心波长为 1 939.87 nm。腔内剩余泵浦光经包层功率剥离器(CPS)去除, 以获得良好的光束质量。实验中采用 2 kW 功率计测量激光输出功率, 同时, 用 Yokogawa 公司 AQ6375 型光谱分析仪(光谱分辨率为 0.05 nm)对输出光谱进行记录。QCW 模式是通过泵浦控制驱动器对 LD 进行内部调制获得的, 用 InGaAs 光电探测器 (Thorlabs) 和示波器 (Tektronix, Inc.) 测量脉冲形状。

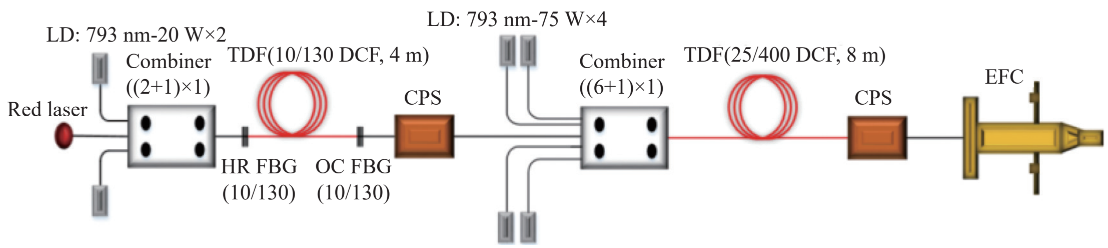
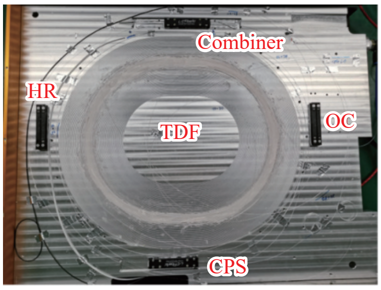


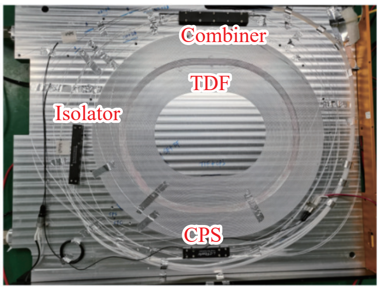
图 1　2-μm 高功率激光器示意图 。LD: 激光二极管; CPS: 包层功率剥离器; EFC: 光纤激光输出头

Fig. 1　Schematic diagram of 2-μm high power fiber laser. LD: laser diode; CPS: cladding power stripper; EFC: endcaped fiber cable

如图 2(b) 所示, 为得到更高的输出功率, 采用自制的掺铥光纤放大器对种子光进行功率放大。光纤功率放大器主要包括 4 个最大输出功率为 75 W 的 LD、(6+1)×1 的多模泵浦信号合束器、8 m 长的大模场面积(LMA)的双包层 TDF、CPS 等。双包层 LMA-TDF 的纤芯直径为 25 μm, 数值孔径为 0.10, 内包层直径为 400 μm, 数值孔径为 0.46, 该增益光纤在 793 nm 处的包层吸收系数为 2.4 dB/m。为了有效散热, 改善输出激光的光束质量和掺铥光纤功率放大器的转换效率, 将 8 m 长的 TDF 包裹在水冷板内冷却。在输出端采用大功率的 CPS 对未吸收的泵浦光进行滤光。激光器各部分之间均采用光纤熔接, 形成全光纤一体化结构。本实验在种子源和放大级间插入隔离器(ISO), 目的是防止放大级激光的 ASE 击穿器件。然而, 在插入 ISO 后, 激光输出功率和光光转换效率明显下降。这一原因归结于 ISO 的插入损耗较大。为保证激光器输出更高能量, 后续实验中移除 ISO。同时, 遵循先关放大级, 再关种子源的操作流程, 确保激光器安全稳定运转。



(a) 种子源实物图
(a) Physical diagram of seed source



(b) 放大级实物图
(b) Physical diagram of amplification

图 2 2-μm 高功率激光器种子源和放大级实物图

Fig. 2 Physical diagrams of the seed source and amplification stage of the 2-μm high-power laser

3 实验结果与分析

3.1 种子激光器输出特性

为保证进入放大级光源的光束质量，测量了主振荡器的输出特性。当把 793 nm 泵浦的功率增加至 4 W 时，种子源开始产生稳定的连续激光输出，由于 TDF 与无源光纤的熔接损耗相对较高以及受各器件插入损耗等的影响，TDFL 的起振阈值较高。图 3 为采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪测得的种子源的光谱，其中心波长为 1 940 nm，与实验所用光纤布拉格光栅 (FBG) 的反射峰一致，边模抑制比为−16.15 dB，3 dB 光谱线宽为 0.09 nm，同时光谱中无 793 nm 光的吸收峰，证明泵浦光已被完全吸收。该激光振荡器较好的光谱特性得益于实验中使用了较长的 TDF。较长的 TDF 可以充分吸收泵浦光，且对短波 ASE 成分具有重吸收效应，有利于 ASE 的抑制和长波段激光的激发，其次，较高反射率的输出光纤光栅能够提供足够强的信号光反馈，使 1 940 nm 波段激光在与其它光谱成分的谱线增益竞争中占据优势，从而有助于抑制寄生振荡和短波 ASE。值得注意的是，边模抑制比较低是由于测量方法导致的。输出的激光经过功率计探头表面反射进入光谱接收器，该过程中激光能量损耗较大，进入光谱仪的激光功率低，因此边模抑制较低。

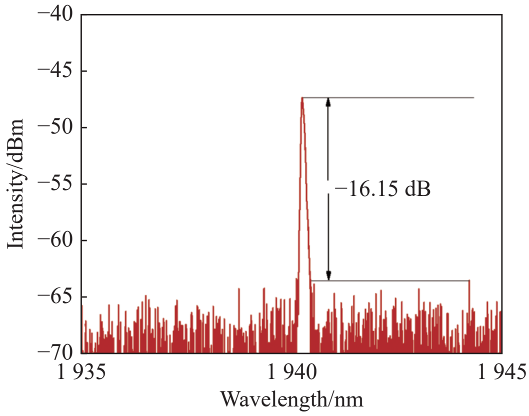
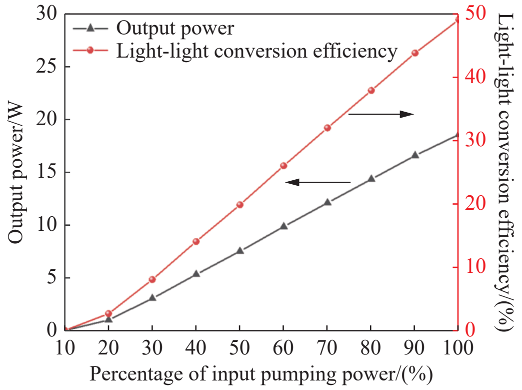


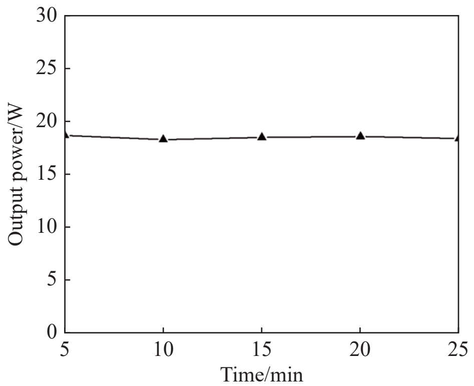
图 3 种子激光器光谱图

Fig. 3 Spectrogram of the seed laser

由于铥光纤激光器 (TFL) 以准三能级方式运转[19]，掺杂光纤的温度对激光输出特性影响很大，因此实验中所用的 TDF 固定在水冷板上，用来减少量子亏损、提高激光的光-光转化效率。图 4(a) 为种子源的输出功率和光-光转化效率随泵浦功率的变化关系图。种子源的平均输出功率和光-光转化效率随泵浦功率几乎成线性增加。当泵浦功率较低时，测得 LD 的中心波长在 785 nm 处，导致输出激光的光-光转化效率较低。随泵浦功率的增加，中心波长逐渐接近 793 nm，双包层 TDF 对泵浦光的吸收效率增加，激光的光-光转化效率逐渐增加。当种子源泵浦满功率输出时，通过红光激光器使 EFC 对准功率计的中心位置，以保证输出功率的测量更准确，并提高光纤熔接质量，得到种子源的最大激光输出功率为 18.6 W，相应的光-光转化效率为 49%，斜率效率为 54.84%。通常地，光纤中非线性效应的发生将导致激光输出功率急剧降低，然而从图 4(a) 中可以看出，在高泵浦功率情况下连续 TFL 的光-光转化效率并没有任何降低，表明本实验并未产生受激拉曼散射 (SRS) 等非线性效应。这归因于 TDF 较高的掺杂浓度以及较大的纤芯直径，它们有效地提高了非线性效应产生的阈值。为确定种子激光器在最高输出功率时的稳定性，本实验测量了输出功率在 18.6 W 时的功率波动，如图 4(b) 所示，25 min 内的功率波动±0.2 W，这表明激光器可以长时间保持稳定的功率输出。



(a) 输出功率与转化效率随泵浦功率变化曲线
(a) Output power and conversion efficiency versus pump power



(b) 输出功率随时间变化曲线
(b) Output power versus time

图 4　种子激光器输出特性图

Fig. 4　Output characteristics of seed laser

3.2　MOPA 激光器输出特性

将种子源连接到放大级, 放大级只开 2 个 LD, 在种子源泵浦输入功率百分比为 80%, 测试放大级泵浦输入功率百分比从 10% 到 100% 条件下, MOPA 激光器在不同输出功率下的光谱。图 5(彩图见期刊电子版) 为 TDFL 输出功率分别为 10 W、30 W、54 W 时的输出光谱。可见, 不同输出功率下的光谱形状、中心波长及光谱线宽基本保持不变。在最大输出功率为 54 W 时测得输出激光的中心波长为 1 940 nm, 3 dB 光谱线宽为 0.10 nm, 与种子激光的中心波长保持一致。图 5 表明, TDFL 没有产生寄生振荡, 放大过程中也没有产生较强的 ASE。

如图 6(a) 所示为 MOPA 激光器的输出功率和光-光转化效率随放大器中 LD 泵浦功率变化的关系图。可见, TDFL 的输出功率和光-光转化效率随泵浦功率几乎成线性增加。当泵浦功率增加到 178 W 时, TDFL 产生了 54 W 输出功率, 相应的光-光转化效率为 30%, 斜率效率为 41.79%。

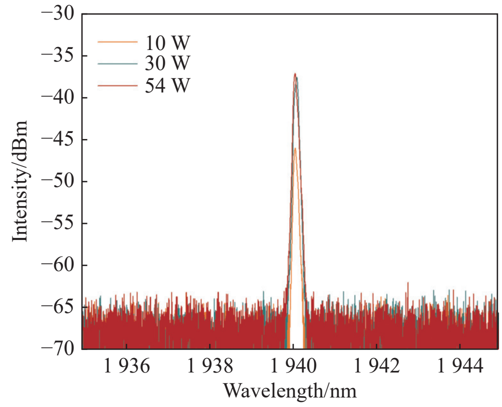
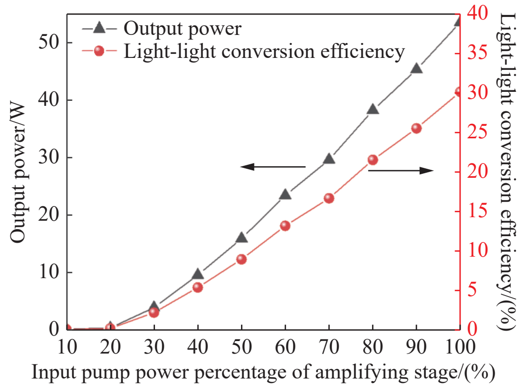


图 5　MOPA 激光器在不同输出功率时的光谱

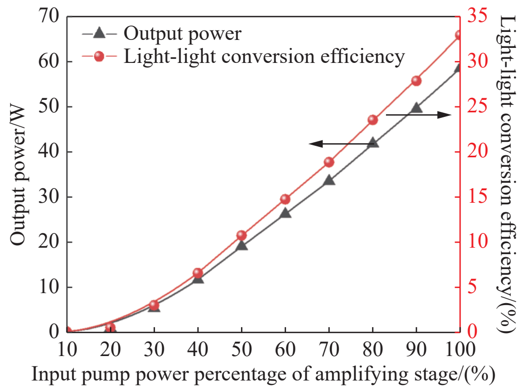
Fig. 5　Spectram of MOPA laser at different output powers

实验中, 测量了 MOPA 激光器输出功率为 54 W 时的功率波动, 在 30 min 内测得激光功率波动性为±1%, 波动较小主要归因于实验中使用了全光纤集成的光学元器件。

由拉曼阈值公式[20] 可知, 通过缩短光路有效长度可以提高光-光转化效率, 因此将放大级



(a) 优化前 MOPA 激光器输出特性
(a) Output characteristics of MOPA laser before optimization



(b) 优化后 MOPA 激光器输出特性
(b) Output characteristics of MOPA laser after optimization

图 6　优化前后 MOPA 激光器输出特性图

Fig. 6　Output characteristics of MOPA laser before and after optimization

TDF 的长度缩短至 6 m。图 6(b) 为优化后的激光器的输出功率和光-光转化效率随放大器中 LD 泵浦功率变化趋势图。结果表明，实验优化后，激光器的输出功率和光-光转化效率均显著提高，在种子源泵浦激光器输入功率百分比为 80%，放大级泵浦激光器满功率输出时，激光器的最大平均功率达 58.5 W，计算得光-光转化效率为 33%，斜率效率为 44.74%。

将放大级的 4 个 LD 全部开启，通过增加泵浦功率，激光器的输出性能有一定程度的提高。在种子源泵浦激光器输入功率百分比为 80% 时，激光器输出功率和光-光转化效率随放大器中 LD 泵浦功率变化的关系如图 7 所示。当放大级泵浦激光器输入功率百分比为 60% 时，最大激光输出功率为 66.9 W，光-光转化效率为 37.64%，斜率效率为 48.48%。由此可知，可以通过增加 LD 的泵浦功率来提高激光器的输出性能。

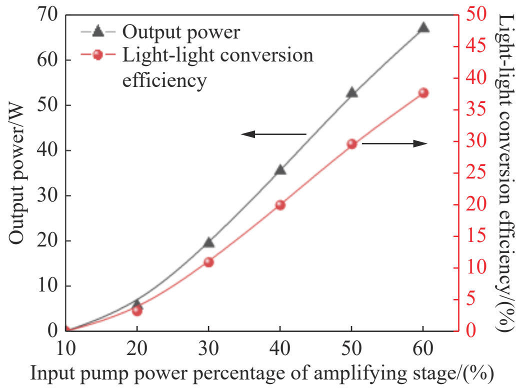


图 7 放大级开 4 个泵后，MOPA 激光器的输出功率和转化效率随泵浦功率的变化

Fig. 7 Output power and conversion efficiency of the MOPA laser versus the pump power after turning on 4 pumps in the amplified stage

为检查激光器的散热状态，水冷机温度设置为 25 °C，在放大过程中用红外热像仪检查了各熔接点以及 TDF 的表面温度。由于导热膏覆盖了 TDF，TDF 的最高表面温度无法准确测量，只能测量导热膏表面的温度。激光输出功率高达 66.9 W 时，放大级的 TDF 与 CPS 熔接点的温度为 56.9 °C，其余熔接点温度相对较低。

在 QCW 操作模式下，通过泵浦调制，TDFL 的占空比可在 1% 到 100% 内变化，重复频率 50 Hz~2 kHz 可调节。在频率为 50、75、100、125、150、175 Hz，占空比为 10%~100% 内进行测试，如图 8(彩图见期刊电子版) 所示。可见，低频率条件下，输出功率与调制频率相关性弱，只与占空比有关。计算得峰值功率、脉冲能量和脉宽分别为 66.4~80.3 W，40 mJ~1.33 J 和 500 μs~20 ms。重复频率为 50 Hz、占空比为 5%、脉冲宽度为 1 ms 的脉冲的激光脉冲和脉冲序列如图 9 所示。

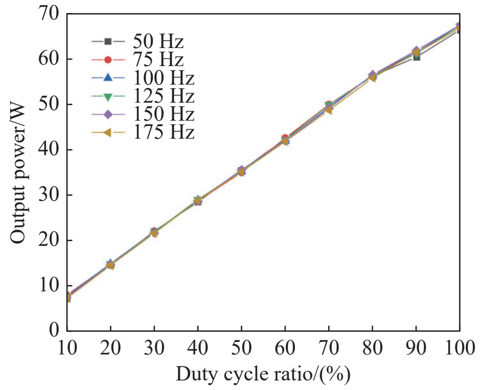
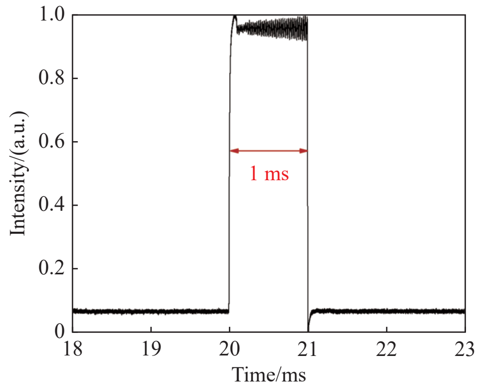


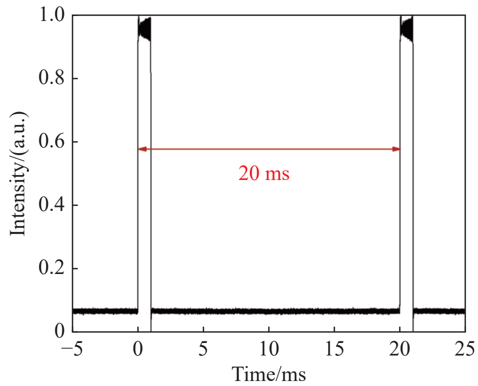
图 8 不同调制频率下，激光输出功率和占空比的关系

Fig. 8 Laser output power versus the duty cycle under different modulation frequencies



(a) 单激光脉冲

(a) Single laser pulse



(b) 激光脉冲序列

(b) Laser pulse sequence

图 9 重复频率为 50 Hz，脉冲宽度为 1 ms 的脉冲

Fig. 9 Pulses with 50 Hz repetition rate and 1 ms pulse width

4　结　论

本文设计了一种基于 MOPA 结构的全光纤高功率 TDFL, 可以实现 CW 和 QCW 两种模式。种子源的最大输出激光为 18.56 W, 斜率效率为 54.84%。MOPA 激光器的最大输出功率为 66.9 W, 斜率效率为 48.48%, 放大过程未观察到 SRS 和 ASE。在最大输出功率下, 激光中心波长为 1940 nm, 光谱半高宽为 0.10 nm。种子放大良好, 光谱特征无明显变化。QCW 模式的最大峰值功率为 80.3 W, 脉冲能量为 1.33 J。QCW 操作模式能够调整脉冲持续时间、平均功率、能量和重复频率, 满足激光碎石手术中对 TFL 参数的要求, 可用于控制消融率并限制手术过程中的热损伤, 具有良好的应用前景。

参考文献:

[1]　李鑫, 杨超, 李永亮. 2 μm高功率掺铥连续光纤激光器研究进展[J]. 激光杂志, 2022, 43(11): 1-8.
LI X, YANG CH, LI Y L. Research progress of 2 μm high-power thulium-doped CW fiber laser[J]. *Laser Journal*, 2022, 43(11): 1-8. (in Chinese)

[2]　MINGAREEV I, WEIRAUCH F, OLOWINSKY A, *et al*.. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2095-2099.

[3]　PAL A, SEN R, BREMER K, *et al*.. "All-fiber" tunable laser in the 2 μm region, designed for CO_2 detection[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7011-7015.

[4]　王思颖, 陈静, 刘小平. 2 μm激光治疗子宫内膜息肉的临床疗效[J]. 中国激光医学杂志, 2020, 29(6): 368-370.
WANG S Y, CHEN J, LIU X P. Clinical efficacy of 2 μm laser treatment for endometrial polyps[J]. *Chinese Journal of Laser Medicine*, 2020, 29(6): 368-370. (in Chinese)

[5]　WANG X, ZHOU P, ZHANG H W, *et al*.. 100 W-level Tm-doped fiber laser pumped by 1173 nm Raman fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4329-4332.

[6]　胡韵箫. 中红外医用光纤激光的研制及其与生物组织作用的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
HU Y X. Development of mid-infrared medical fiber laser and research on interaction of the laser with biologic tissue[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)

[7]　刘敏, 高小峰. 铥光纤激光碎石基础研究和临床应用进展[J]. 中华泌尿外科杂志, 2021, 42(1): 75-78.
LIU M, GAO X F. Advances in fundamental research and clinical application of Thulium fiber laser lithotripsy[J]. *Chinese Journal of Urology*, 2021, 42(1): 75-78. (in Chinese)

[8]　RICHARDSON D J, NILSSON J, CLARKSON W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited][J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.

[9]　EHRENREICH T, LEVEILLE R, MAJID I, *et al*.. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 758016.

[10]　LÜ H B, ZHOU P, ZHANG H W, *et al*.. High-power all-fiberized thulium-doped fiber MOPA[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(12): 125101.

[11]　TANG Y L, LI X H, WANG Q J. High-power passively *Q*-switched thulium fiber laser with distributed stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5474-5477.

[12]　TANG Y L, LI X H, YAN ZH Y, *et al*.. 50-W 2-μm nanosecond all-fiber-based thulium-doped fiber amplifier[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 3100707.

[13]　LI X H, YU X CH, SUN ZH P, *et al*.. High-power graphene mode-locked Tm/Ho co-doped fiber laser with evanescent field interaction[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16624.

[14]　YANG C, JU Y L, YAO B Q, *et al*.. 140 W high power all-fiber laser at 1940 nm with narrow spectral line-width by MOPA configuration[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(8): 230.

[15]　PAL D, SEN R, PAL A. Design of all-fiber thulium laser in CW and QCW mode of operation for medical use[J]. *Physica Status Solidi C*, 2017, 14(1-2): 1600127.

[16]　YAO W CH, SHAO ZH H, SHEN CH F, *et al*.. 400 W all-fiberized Tm-doped MOPA at 1941 nm with narrow spectral linewidth[C]. *Proceedings of Advanced Solid State Lasers 2017*, Optica Publishing Group, 2017: JTu2A. 33.

[17]　LIU X X, LI X H, TANG Y L, *et al*.. PbS nanoparticles saturable absorber for ultrafast pulse generation in 2-μm fiber

laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(1): 161-164.

[18] SHIN J S, CHA Y H, CHUN B J, *et al*.. 200-W continuous-wave thulium-doped all-fiber laser at 2050 nm[J]. *Current Optics and Photonics*, 2021, 5(3): 306-310.

[19] 施亚齐，戴梦楠. 激光原理与技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2012: 22-76.
SHI Y Q, DAI M N. *Laser Principles and Technology*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2012: 22-76. (in Chinese)

[20] AGRAWAL G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 5th ed. Amsterdam: Elsevier, 2013: 295-352.

[21] PAL D, GHOSH A, SEN R, *et al*.. Continuous-wave and quasi-continuous wave thulium-doped all-fiber laser: implementation on kidney stone fragmentations[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6151-6155.

[22] 韩文国, 延凤平, 冯亭, 等. 高功率掺铥光纤激光器及其在生物组织切割中的应用[J]. 发光学报, 2021, 42(5): 708-716.
HAN W G, YAN F P, FENG T, *et al*.. High-power thulium-doped fiber laser and its application in biological tissue cutting[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(5): 708-716. (in Chinese)

[23] 匡尚奇, 郭祥帅, 冯玉玲, 等. 半导体激光器系统输出混沌激光研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1133-1145.
KUANG SH Q, GUO X SH, FENG Y L, *et al*.. Research progress of optical chaos in semiconductor laser systems[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1133-1145. (in Chinese)

[24] 赵宏斌, 苏安, 尹向宝, 等. 石墨烯缺陷对光子晶体光吸收特性的调制[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 418-425.
ZHAO H B, SU A, YIN X B, *et al*.. The modulation effect of graphene defects on the light absorption properties of photonic crystals[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 418-425. (in Chinese)

作者简介：

吴　玲(1998—), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 2020 年于河南师范大学获得学士学位, 主要从事光纤激光器技术及其应用的研究。E-mail: 2020100215@mails.cust.edu.cn

娄　岩(1981—), 女, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2012 年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事空间激光通信、激光应用等方面的研究。E-mail: lyan@cust.edu.cn