

准连续 2 μm 掺铥光纤激光器时频特性控制研究

梅雪晗¹, 陈翔^{2*}, 徐港², 杨元忠², 张仲², 雷诚¹, 李胜³, 王行环³,
王度^{1*}

- (1. 武汉大学 工业科学研究所, 湖北 武汉 430072;
2. 武汉思创精密激光科技有限公司, 湖北 武汉 430074;
3. 武汉大学中南医院 泌尿外科, 湖北 武汉 430071)

摘要: 波长 2 μm 附近的激光位于大气传输窗口和水的强吸收峰, 在医疗、激光雷达、材料加工以及中红外泵浦源等方面具有重要应用。掺铥光纤激光器(thulium-doped fiber laser, TDFL)是一种可在 2 μm 波长获得高功率输出的重要光源。本文针对准连续(quasi-continuous wave, QCW)TDFL 中的弛豫振荡和模间四波混频问题, 通过增加偏置电流、优化增益光纤长度以及改变光纤盘绕直径等方案, 优化了激光器的时域及频域输出特性, 并探究了不同增益光纤结构对光纤传输模式的影响。研制的 QCW-TDFL 在脉宽 100 μs , 重复频率 1 kHz, 占空比为 10% 的情况下, 在中心波长 1939.2 nm 实现了峰值功率 894 W, 平均功率 89.4 W 的输出, 并获得了稳定可控的脉冲输出波形和光谱特性。

关键词: 准连续光纤激光器; 2 μm 激光光源; 掺铥光纤; 弛豫振荡; 模间四波混频
中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Study of time and frequency domain characteristics of a quasi-continuous 2 μm thulium-doped fiber laser

MEI Xue-Han¹, CHEN Xiang^{2*}, XU Gang², YANG Yuan-Zhong², ZHANG Zhong²,
LEI Cheng¹, LI Sheng³, WANG Xing-Huan³, WANG Du^{1*}

- (1. The Institute of Technological Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Wuhan Strongest Laser Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China;
3. Department of Urology, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China)

Abstract: Lasers with a the wavelength of and 2 μm are located in the atmospheric transmission window and at the strong absorption peak of water, and have important applications in medicine, LIDAR, material processing, and pump sources for mid-infrared lasers. The thulium-doped fiber laser (TDFL) stands out as a critical light source capable of delivering high power outputs at this wavelength. In this paper, to address the problems of relaxation oscillation and inter-modal four-wave mixing in a quasi-continuous wave (QCW) TDFL, the time and frequency-domain output characteristics of the laser are optimized by increasing the bias current, optimizing the length of the gain fiber, and changing the diameter of the fiber coiling, etc. The effects of different gain fiber structures on the fiber transmission modes are also investigated. The developed QCW-TDFL achieves a peak power of 894 W and an average power of 89.4 W at a central wavelength of 1 939.2 nm with a pulse width of 100 μs , a repetition frequency of 1 kHz and a duty cycle of 10%, and obtains stable and controllable pulse output waveform and spectral characteristics.

Key words: quasi-continuous fiber laser, 2 μm laser source, thulium-doped fiber, relaxation oscillation, inter-modal

收稿日期: 2024-06-12, 修回日期: 2024-07-18

Received date: 2024-06-12, revised date: 2024-07-18

基金项目: 湖北省重点研发计划(2023BCB001); 国家自然科学基金(62075200, 12374295); 湖北省重点研发计划(2023BCB001); 国家自然科学基金(62075200, 12374295)

Foundation items: Supported by the Key Research and Development Program of Hubei province (2023BCB001), the National Natural Science Foundation of China (62075200, 12374295)

作者简介(Biography): 梅雪晗(2000-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究领域为掺铥光纤激光器. E-mail: meixuehan@whu.edu.cn

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: wdxz@foxmail.com, chenx@whscjmgjg.com

引言

掺铥光纤激光器(thulium-doped fiber laser, TDFL)的发射波长在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右,处于人眼安全波段和大气传输窗口,并且该波段与水 and 塑料材料的吸收峰高度匹配^[1,2],在激光雷达^[3]、医疗外科手术^[4-8]、非金属材料加工领域^[9-11]具有重要应用价值。同时, $2\text{ }\mu\text{m}$ 的TDFL也可以作为泵浦源产生 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的中红外波段激光^[12-15]。不同的应用促进了各种类型TDFL的发展,其中准连续(quasi-continuous wave, QCW)TDFL通过电调制可以实现连续和脉冲两种输出形式,具有稳定性高、时域可控性好、峰值功率高、电光转换效率高等优点。在医疗领域, QCW-TDFL得益于较高的峰值功率和低平均功率,可以以更高的效率实现碎石和消融,并且降低对周边正常组织的热损伤。实际应用中, QCW-TDFL可能出现由弛豫振荡、模间四波混频(inter-modal four-wave mixing, IM-FWM)等现象引起的时域和频域不稳定,因此,如何对QCW-TDFL的时频特性进行控制具有重要的研究价值。

目前对于QCW光纤激光器时频特性的研究主要集中在波长为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的掺镱光纤激光器。南京理工大学的徐珩^[16]等人对连续掺镱光纤激光器进行时域调制,通过增大驱动偏置电流的方式抑制了巨脉冲输出。之后该团队的李思宇^[17]等人对准连续激光器上升沿过冲现象进行了实验和仿真研究,通过提升偏置电流的方式抑制了过冲现象。国防科技大学的丁欣怡^[18]等人研究了泵浦上升时间对弛豫振荡的影响,结果表明增加泵浦上升时间可以有效地抑制弛豫振荡。2016年, Pal Debasis^[19]等人设计的QCW-TDFL在准连续模式的上升沿观察到了过冲现象,且排除了泵浦光脉冲波形异常的可能性,他们判断是发生了弛豫振荡,但并未报道解决方案。在频域方面,国防科技大学的陈恒^[20]等人研究光纤弯曲对掺镱光纤激光器输出特性的影响时,发现增大光纤的弯曲半径可以抑制激光器中的模式不稳定(transverse mode instability, TMI)效应和IM-FWM效应;南京理工大学的闫明鉴^[21]等人实验验证了TMI会促进IM-FWM的发生并同时抑制受激拉曼散射(stimulated Raman scattering, SRS),之后通过增加盘绕直径的方式同时抑制了TMI和

SRS。可以看出,对于 $2\text{ }\mu\text{m}$ QCW-TDFL时频域特性的研究较少,且技术解决方法暂未见报道。

本文针对 $2\text{ }\mu\text{m}$ QCW-TDFL输出脉冲的弛豫振荡和IM-FWM现象及优化方法开展研究。提出通过增加偏置电流和优化光纤长度的方式抑制弛豫振荡,并结合仿真与实验,通过光纤结构设计以及优化盘绕策略的方式解决IM-FWM问题。设计并搭建了一台QCW-TDFL工程样机,在 793 nm 半导体激光器(laser diode, LD)泵浦下,采用单腔振荡的方案,在脉宽 $100\text{ }\mu\text{s}$ 、重复频率 1 kHz 、占空比为 10% 的条件下,实现了峰值功率 894 W 、平均功率 89.4 W 的输出,光-光效率为 45.99% ,斜率效率 50.94% ,输出激光中心波长为 1939.2 nm 。上述方案较好地控制了QCW-TDFL输出的时频特性,成功抑制了弛豫振荡和IM-FWM现象,获得了稳定可控的时域脉冲波形以及光谱特性。

1 实验系统与原理

全光纤结构的QCW-TDFL实验装置如图1所示,采用线形单腔结构,泵浦源为6支波长 793 nm 、输出功率为 350 W 的LD,利用 $(6+1)\times 1$ 的光纤合束器将6支正向泵浦的LD耦合到掺铥增益光纤(thulium-doped fiber, TDF)中。为了研究不同TDF结构对输出频域特性的影响,设计和采用了普通阶跃型光纤A和折射率匹配包层型光纤B作为对比。增益光纤A, B纤芯直径均为 $25\text{ }\mu\text{m}$,纤芯NA分别为 0.095 和 0.09 ,两种TDF的纯 SiO_2 包层直径均为 $400\text{ }\mu\text{m}$,但增益光纤B在纤芯外多一层掺杂匹配的包层。光纤A和B在 793 nm 处的吸收系数分别为 2.4 dB/m 和 2.0 dB/m 。TDF两端的高低反射光栅构成了谐振腔,其中高反射光栅反射率为 99.5% ,低反射光栅反射率为 10% 。激光离开谐振腔之后经过包层光剥除器去除剩余的泵浦光,最终通过SMA905光纤跳线输出。为了有效散热,设计了带有U型跑道槽的铝合金水冷板,将TDF盘绕于刻槽内,并在刻槽处涂敷导热硅脂以确保光纤与水冷板的充分接触,水冷机温度设定为 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 。选用 5 kW 的AC-DC电源,LD驱动采用线性恒流方案,每路DC-DC驱动一支LD,共6路,使用单片机输出脉冲DAC的方式控制DC-DC输出脉冲电流。单片机输出1路信号时,6路驱动接收同一信号并保持同步,

LD 不区分时序。

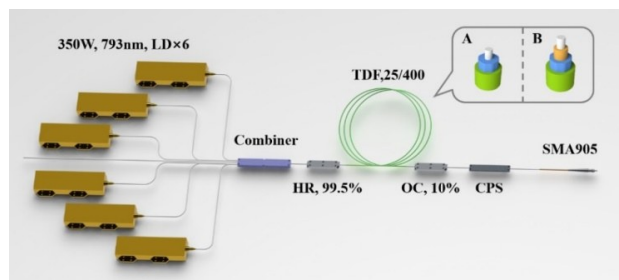


图 1 QCW-TDFL 实验装置示意图 (HR: 高反光栅; OC: 低反光栅; CPS: 包层光剥除器)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup of QCW-TDFL (HR: high reflector; OC: output coupler; CPS: cladding power stripper)

图 2 为 Tm^{3+} 的能级图, 其中 N 表示各能级粒子数密度, 括号内的时间代表能级寿命, 由 $^3\text{F}_4$ 能级向 $^3\text{H}_6$ 能级的跃迁会产生波长 2 μm 的受激辐射。铥离子在多个波长范围都存在吸收峰, 主要采用的泵浦波长是 793 nm 和 1 570 nm, 当采用 793 nm 的泵浦光时, 处于基态的 Tm^{3+} 吸收一个光子被泵浦到 $^3\text{H}_4$ 能级, $^3\text{H}_4$ 能级的能级寿命很短, 并不稳定, 处于该能级的 Tm^{3+} 粒子由于光子自淬灭过程将弛豫到 $^3\text{F}_4$ 能级, 同时释放一个光子。这个光子的能量使得位于基态 $^3\text{H}_6$ 能级的 Tm^{3+} 离子被激发到 $^3\text{F}_4$ 能级, 发生了交叉弛豫。一个泵浦光子产生了两个 $^3\text{F}_4$ 能级的 Tm^{3+} 粒子, 理论上来说可以实现 200% 的量子效率^[22], 交叉弛豫过程可以提高泵浦的利用率, 同时降低激光阈值, 减小发热量, 并且 793 nm 的 LD 很容易实现高功率的泵浦, 所以目前大功率 TDFL 的泵浦源普遍采用 793 nm 的 LD。但 793 nm 泵浦的铥离子能级结构较为复杂, 除了交叉弛豫, 还存在能量上转换过程^[23], 即 793 nm 泵浦光将基态粒子激发到 $^3\text{H}_4$ 能级后, 两个处于激发态的团簇铥离子, 相互距离较近, 产生了能量转换, 其中一个粒子释放能量跃迁回到 $^3\text{F}_4$ 能级, 另一个粒子通过吸收能量被进一步激发到 $^1\text{G}_4$ 能级。这使得激光上能级 $^3\text{F}_4$ 的粒子数不可控, 导致弛豫振荡现象发生时, 其脉冲的峰值不尽相同。

2 实验结果与讨论

2.1 光脉冲弛豫振荡抑制

使用光电探测器测试光信号的强度, 并将光强转换为电信号显示在 Tektronix MDO4104C 示波器上。如图 3(a)、(b) 所示, 可以观察到每个激光脉冲

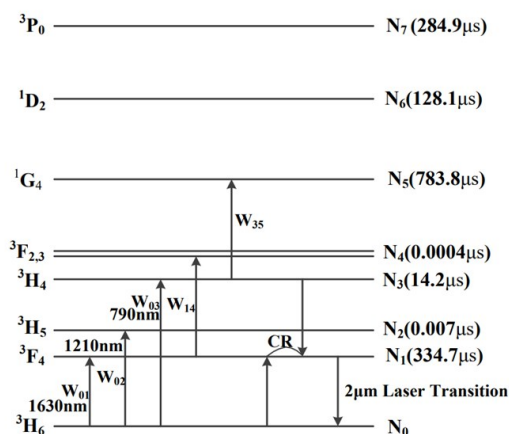


图 2 铥离子的能级结构^[24]

Fig. 2 Energy level structure of Tm^{3+} ions

都出现了弛豫振荡, 并且只在上升沿产生一个远高于稳态峰值的脉冲尖峰, 之后会迅速回落并保持稳定, 这是一种准连续光纤激光器特有的时域特性。在弛豫振荡时的高功率脉冲输出, 一般强度是稳定时的 2~10 倍, 容易对光路造成损伤, 同时也会降低光纤中的非线性阈值, 使得系统的转换效率降低。因此, 有必要对弛豫振荡进行抑制。

此类弛豫振荡出现的原因普遍认为是由可饱和吸收体效应导致的^[17], 可饱和吸收体依赖非线性效应, 在光强弱时对于光的吸收较强, 光强增加时对光的吸收逐步降低, 并最后达到饱和状态^[25]。参考可饱和吸收体的被动调 Q 技术^[26], 当谐振腔内光强较弱时, 可饱和吸收体对光的吸收较强, 此时腔内损耗较大, 反转粒子数大量积累, 当腔内粒子数不断增多, 荧光光强逐渐增加, 可饱和吸收体对于光的吸收作用减弱, 使得腔内损耗变小, 阈值降低, 当减小到某个临界值时, 会在短时间内迅速产生一个脉冲。在 QCW 光纤激光器中, 部分未泵浦或弱泵浦的光纤充当了可饱和吸收体, 当电源输出的电流从低电平变化到高电平时, 存在泵浦功率不够强的阶段, 会形成部分未泵浦和弱泵浦的光纤, 这部分光纤会吸收其他部分的激光并大量累积反转粒子数, 直至达到阈值并产生弛豫振荡现象。

对此, 通过单片机输出脉冲 DAC 波形编辑, 在电脉冲调制泵浦源关闭时, 保持一定数值的偏置电流, 使得光纤中不存在未泵浦或弱泵浦的部分, 将反转粒子数始终维持在一个较低的水平。通过对不同光纤长度进行优化测试, 最终在光纤长度 5 m, 偏置电流 2 A 时, 如图 3(c)、(d) 所示, 光-光转换效率及弛豫振荡脉冲的抑制达到了最优化。

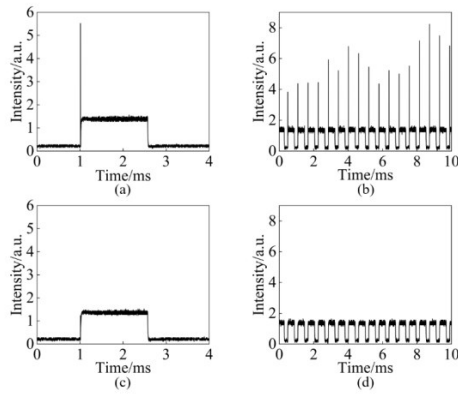


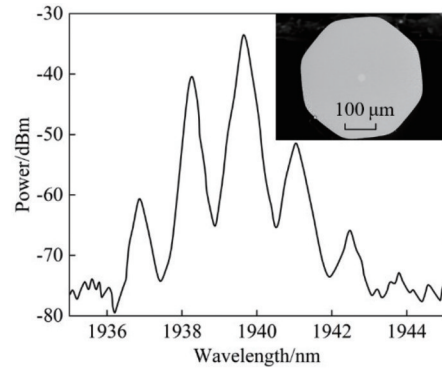
图3 弛豫振荡的出现与抑制:(a),(b)观察到弛豫振荡;(c),(d)弛豫振荡被抑制

Fig. 3 Emergence and suppression of relaxation oscillations: (a), (b) observed relaxation oscillations; (c), (d) relaxation oscillations are suppressed

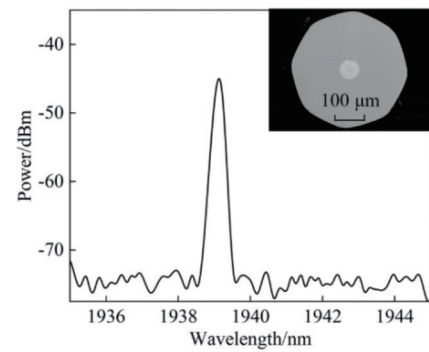
2.2 模间四波混频及抑制

对两种不同增益光纤进行实验,用YOKOGAWA Q6375B 光谱分析仪测量输出光谱。使用普通阶跃型增益光纤 A 时,当激光振荡输出约 5 W 时就出现了如图 4(a)所示的光谱多峰现象,在中心波长 1 939.6 nm 的主峰旁出现了次峰,每个波峰之间的间隔 1~2 nm。随着功率逐步升高,光谱没有出现明显变化,因此,可排除自激振荡和模式竞争效应。而使用折射率匹配包层型增益光纤 B,在相同条件下重复实验,其输出光谱如图 4(b)所示,光谱中心波长为 1 939.2 nm,仅存在一个主峰,且在不断增加功率时并未观察到次峰的出现。通过高低反光栅的反射谱及透射谱测试,进一步排除了光栅中心波长不适配的可能性。推测光纤 A 中传输的高阶模与基模满足特定的相位匹配条件后,耦合导致了光谱频移,使得在功率改变的情况下各光谱成分也能稳定存在,即光纤 A 中存在 IM-FWM 现象。

利用扫描电子显微镜(SEM)对两种增益光纤 A、B 的截面进行观察,如图 4(a)、(b)所示。通过能谱仪(EDS)分析,该包层含有掺杂浓度约 13.6 wt% 的 Ge 元素。利用有限元分析对两种不同结构的光纤进行仿真,模型尺寸设置与实际情况相同,掺 Ge 包层直径定为 60 μm ,设置纯 SiO_2 包层折射率为 1.4389,纤芯折射率为 1.4417。在划分网格时将纤芯部分精细化,主要关注纤芯内光纤模式的分布,在包层最外侧添加一层完美匹配层,消除了实际光纤正八边形结构与仿真中圆形结构的差异,通过改变光纤的等效折射率,模拟实际光纤盘绕直径 15



(a)



(b)

图4 不同增益光纤输出光谱与截面图:(a)增益光纤 A 输出光谱与横截面图;(b)增益光纤 B 输出光谱与横截面图

Fig. 4 Output spectra and cross sections of different gain fibers: (a) output spectrum and cross section figure of gain fiber A; (b) output spectrum and cross section figure of gain fiber B

cm。根据上述参数设置进行仿真计算和参数化扫描。结果显示,增益光纤 A 一共可以支持 6 个矢量模,对应标量模 LP_{01} 和 LP_{11} 模,如图 5(a)~(c)所示,而光纤 B 仅支持一对简并的基模,即 LP_{01} 的传播,如图 5(d)所示。激光在光纤 A 的纤芯中的高阶模无法被完全抑制,而光纤 B 始终保持基模传播。

Tm^{3+} 因其独特的电子能级和光物理性质,在不影响 Tm^{3+} 发生团簇的情况下,掺杂浓度越高,越能增强交叉弛豫效应,但是掺杂浓度大,折射率就升高,会影响其单模输出。在 TDF 的制备中,通过增加一层掺 Ge 层来降低光纤折射率,也就是 TDF 常提到的台阶结构。正是因为有了这一掺 Ge 层,光纤 B 的纤芯在掺杂浓度高于 A 的同时,相对折射率较 A 来说更低,保证了其纤芯中的基模传播。

同时,对抑制增益光纤 A 中 IM-FWM 的方法进行探究。通常采用改变光纤盘绕直径的方式抑制

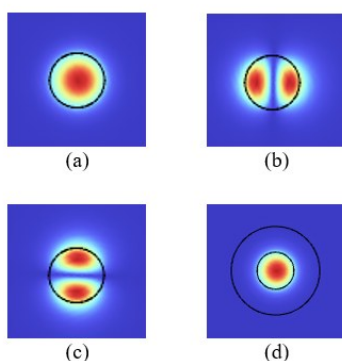


图 5 不同种增益光纤模场分布:(a)A 光纤 LP_{01} 模;(b)A 光纤 LP_{11a} 模;(c)A 光纤 LP_{11b} 模;(d)B 光纤 LP_{01} 模

Fig. 5 Mode field distributions of different gain fibers: (a) LP_{01} of gain fiber A; (b) LP_{11a} of gain fiber A; (c) LP_{11b} of gain fiber A; (d) LP_{01} of gain fiber B

高阶模的出现。由于增益光纤纤芯直径 25 μm , NA 0.095, 经有限元仿真计算, 将光纤弯曲时各模式的限制损耗定义为:

$$L_c = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

其中, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示光纤模式有效折射率的虚部, 通过公式 1 计算得到光纤的弯曲损耗, 如图 6 所示, 当光纤弯曲直径大于 12 cm 时, LP_{01} 模和 LP_{11} 模的损耗对弯曲直径均不敏感, 但当弯曲直径小于 12 cm 时, LP_{11} 模限制损耗开始急剧升高, 而 LP_{01} 模的限制损耗直到弯曲直径小于 7 cm 才开始明显增加, 因此 7 ~ 12 cm 区间能够保证较小的基模损耗同时滤除掉大部分高阶模。

2.3 2 μm QCW-TDFL 输出特性

在重复频率 1 kHz、掺铥增益光纤 B 的长度为 5 m、

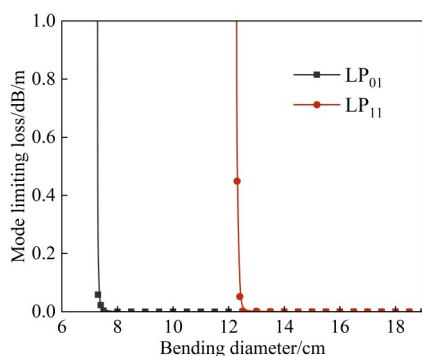


图 6 光纤弯曲直径与模式限制损耗关系仿真

Fig. 6 Simulation of the relationship between fiber bending diameter and mode limiting loss

偏置电流设为 2 A 的情况下, 将 LD 工作电流由 2 A 逐渐提升, 得到如图 7 中所示 793 nm 泵浦峰值功率与 1 940 nm 输出峰值功率的关系曲线。当泵浦光输出峰值功率 1 944 W, 1 940 nm 输出峰值功率 894 W, 光-光转换效率为 45.99%, 斜率效率为 50.94%。此时输出激光的脉冲宽度为 100 μs , 占空比 10%, 测得的脉冲序列如图 8 所示。本实验采用 Fluke TiS45 热成像仪观察增益光纤的温度, 由于 TDF 上涂敷有导热硅脂, 其表面的温度无法准确测量, 但在功率提升过程中无异常高温点出现, 当输出平均功率达到最高 89.4 W 时, TDF 最高温度未超过 50 $^{\circ}\text{C}$ 。同时采用 Abris-M 红外激光观察镜观察光路, 在出光全过程中无漏光点出现。使用 Ophir BeamSquared 光束质量分析仪测试输出激光的光束质量因子 (M^2), 得到的光束质量拟合曲线和近场光斑分布如图 9 所示, 激光在 x 和 y 方向上的光束质量大小分别为 1.683 和 1.723。

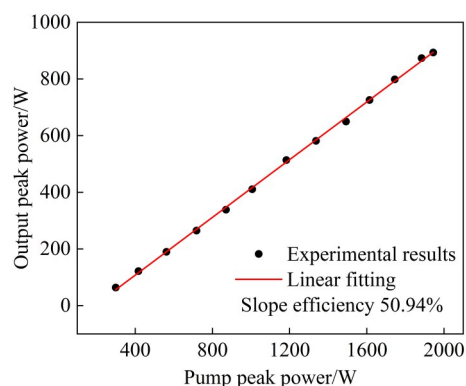


图 7 1 kHz 时泵浦峰值功率-输出峰值功率关系

Fig. 7 Curves of laser output peak power under different pump peak power at 1 kHz

3 结论

本文在自研的 2 μm QCW-TDFL 实验样机平台上, 研究了弛豫振荡及模间四波混频现象, 并提出了相应的解决方案, 改善了 QCW-TDFL 的时频输出特性。该光纤激光器采用单腔振荡的方案, 通过 6 支 793 nm 的 LD 泵浦, 在 1 940 nm 波长实现了平均功率 89.4 W、峰值功率 894 W 的准连续输出。针对在搭建过程中发生的弛豫振荡、模间四波混频等时域和频域问题, 结合实验和仿真, 通过改变光纤长度, 增加偏置电流以及改变光纤种类和盘绕直径的方式较好地控制了 QCW-TDFL 输出的时频特性, 获

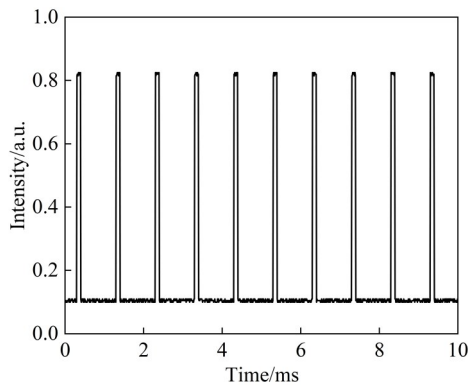


图8 最高功率输出占空比10%的脉冲序列

Fig. 8 Maximum power output pulse train with 10% duty cycle

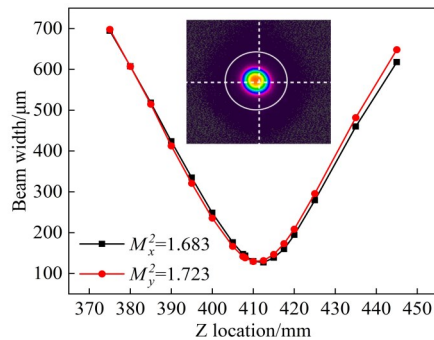


图9 光束质量拟合曲线与近场光斑分布图

Fig. 9 Beam quality fitting curves with near-field spot distribution

得了规则且稳定的时域脉冲波形以及光谱,对高功率QCW-TDFL的研制具有参考价值。

References

- [1] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4–50.
- [2] Nie W, Kan R F, Xu Z Y, et al. Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(20): 204204.
- [3] Koch G J. Field testing of a high-energy 2- μm Doppler lidar [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4(1): 043512.
- [4] Blackmon R L, Irby P B, Fried N M. Comparison of holmium: YAG and thulium fiber laser lithotripsy: ablation thresholds, ablation rates, and retropulsion effects [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2011, 16 (7) : 071403–071407.
- [5] Huang Y, Jivraj J, Zhou J, et al. Pulsed and CW adjustable 1942 nm single-mode all-fiber Tm-doped fiber laser system for surgical laser soft tissue ablation applications [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16674–16686.
- [6] Enikeev D, Taratkin M, Klimov R, et al. Thulium-fiber laser for lithotripsy: first clinical experience in percutaneous nephrolithotomy [J]. *World Journal of Urology*, 2020, 38 (12): 3069–3074.
- [7] Enikeev D, Taratkin M, Klimov R, et al. Superpulsed thulium fiber laser for stone dusting: In search of a perfect ablation regimen—A prospective single-center study [J]. *Journal of Endourology*, 2020, 34(11): 1175–1179.
- [8] Shah D, Patil A, Reddy N, et al. A clinical experience of thulium fibre laser in miniperc to dust with suction: a new horizon [J]. *World Journal of Urology*, 2020, 39 (7) : 2727–2732.
- [9] Böhms S, Schmidt M, Stichel T, et al. Single-step laser plastic deposition (LPD) using a near-infrared Thulium fiber-laser [J]. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106185.
- [10] De Pelsmaeker J, Graulus G J, Van Vlierberghe S, et al. Clear to clear laser welding for joining thermoplastic polymers: A comparative study based on physicochemical characterization [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 808–815.
- [11] 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.
- [12] Dubinskii M, Creeden D, Wood G L, et al. Thulium fiber laser-pumped mid-IR OPO [C]. *Laser Source Technology for Defense and Security IV*. SPIE , 2008, 6952: 204–210.
- [13] Gebhardt M, Gaida C, Kadwani P, et al. High peak-power mid-infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Tm: fiber master oscillator power amplifier system [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1212–1215.
- [14] Schneider J, Forster P, Romano C, et al. High pulse energy ZnGeP₂ OPO directly pumped by a Q-switched Tm³⁺-doped single-oscillator fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 2139–2142.
- [15] Kieleck C, Berrou A, Donelan B, et al. 6.5 W ZnGeP₂ OPO directly pumped by a Q-switched Tm³⁺-doped single-oscillator fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40 (6): 1101–1104.
- [16] Xu H. Study of time-domain modulation characteristics of high-power ytterbium-doped fiber lasers [D]. Nanjing University of Science & Technology, 2016. 徐珩. 高功率掺镱光纤激光器时域调制特性的研究 [D]. 南京理工大学, 2016.
- [17] Li S Y. Study on time domain characteristics of quasi continuous fiber laser [D]. Nanjing University of Science & Technology, 2020. 李思宇. 准连续光纤激光器时域特性研究 [D]. 南京理工大学, 2020.
- [18] Ding X Y, Wang L, Zeng L F, et al. Double-ended output near-single-mode quasi-continuous wave monolithic fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72 (15) : 89–97.
- [19] 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*, 2016, 14(1–2): 1600127.

- [20] Chen H. Study on the output characteristics of distributed side-coupled cladding-pumped fiber laser [D]. National University of Defense Technology, 2020.
陈恒. 分布式侧面耦合包层泵浦光纤激光器输出特性研究 [D]. 国防科技大学, 2020.
- [21] Yan M J. Research on time-domain instability and its suppression in high-power continuous-wave fiber lasers [D]. Nanjing University of Science & Technology, 2021.
闫明鉴. 高功率连续波光纤激光器时域不稳定性及其抑制研究 [D]. 南京理工大学, 2021.
- [22] Jackson S D, Sabella A, Lancaster D G. Application and development of high-power and highly efficient Silica-based fiber lasers operating at 2 μm [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 567–572.
- [23] Tankala K, Frith G, Carter A, et al. Mitigation of photo-degradation in 790nm-pumped Tm-doped fibers [C]. Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications, SPIE, 2010, 7580: 98–106.
- [24] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 948–956.
- [25] Li K X. Pulsed fiber lasers by using two-dimensional materials as saturable absorbers [D]. Beijing University of Technology, 2017.
李克轩. 基于二维材料可饱和吸收体的脉冲光纤激光技术研究 [D]. 北京工业大学, 2017.
- [26] Fang Y. Research on all-fiber passively Q-switched ytterbium-doped fiber laser [D]. Jilin University, 2017.
方妍. 全光纤化被动调 Q 掺铒光纤激光器研究 [D]. 吉林大学, 2017.