文章编号:1001-9014(2025)02-0161-07

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2025. 02. 003

准连续2μm 掺铥光纤激光器时频特性控制

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院,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2μm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2μm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在脉宽为100μs、重复频率为1kHz、占空比为10%的情况 下,在中心波长为1939.2 nm时,实现了峰值功率为894W、平均功率为89.4W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;2μm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: Α

Time and frequency domain characteristics control of a quasicontinuous 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*}

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

Abstract: Lasers with wavelengths around 2 μ m are located in the atmospheric transmission window and at the strong absorption peak of water, and have important applications in medicine, light detection and ranging(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 μ s, 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 four-wave mixing

收稿日期:2024-06-12,修回日期:2024-07-18 **B**金项目: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: chenx@whscjmjg. com, wdxz@foxmail. com

引言

掺铥光纤激光器 (thulium-doped fiber laser, TDFL)的发射波长在2 µm左右,处于人眼安全波段 和大气传输窗口,并且该波段与水和塑料材料的吸 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 µm的TDFL也可以作为泵浦源,产生3~5 µm 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凭借其高峰值功率和低平均功率的特 性,能够高效实现碎石与消融,同时减少对周围正 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 fourwave 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 µm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]等人在 QCW-TDFL研究中发现,准连续模式上升沿出现明 显过冲现象。在排除泵浦光脉冲波形异常后,他们 将其归因于弛豫振荡,但未提出解决方案。在频域 方面,国防科技大学的陈恒^[20]等人在研究光纤弯曲 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2μm 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 µm 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,在脉宽为100 μs、重复频率为1 kHz、占空比为 10%的条件下,实现了峰值功率为894 W、平均功率 89.4 W的输出,光-光效率为45.99%,斜率效率为 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。激光器采用线形单腔结构,泵浦源为6支波长 为793 nm、输出功率为350 W的LD,利用(6+1)×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25μm,纤芯NA 分别为0.095和0.09,两种TDF的纯SiO,包层直径 均为400 µm,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%。激光经谐振腔 输出后,通过包层光剥除器去除残余泵浦光,最终 经由 SMA905 接口的光纤跳线输出。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℃。选用5kW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 2 为 Tm³⁺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³F₄能级 向³H₆能级的跃迁会产生波长为 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



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)

浦光时,处于基态的Tm³⁺吸收一个光子被泵浦到³H。 能级,³H.能级的能级寿命很短,并不稳定,处于该能 级的Tm³⁺粒子由于光子自淬灭过程将弛豫到³F₄能 级,同时释放一个光子。这个光子的能量使得位于 基态³H₄能级的Tm³⁺离子被激发到³F₄能级,发生了 交叉弛豫。一个泵浦光子产生了两个³F₄能级的 Tm³⁺粒子,理论上可以实现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³H₄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³F₄能级,另一个粒子通过吸收能量被进一步激发 到'G₄能级。这使得激光上能级'F₄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。



图 2 铥离子的能级结构^[24]

Fig. 2 Energy level structure of Tm³⁺ ions

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,在光强减弱时对光的吸收较强,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 0 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,最终在光纤长度为5 m、偏置电流为2A时,光-光转换效率及弛豫振荡脉 冲的抑制达到了最优化,如图3(c)和(d)所示。

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YOKOGA-WA Q6375B光谱分析仪测量输出光谱。当使用普 通阶跃型增益光纤A时,在激光振荡输出约5W 时即出现光谱多峰现象(图4(a))。在中心波长 为1939.6 nm的主峰旁出现了次峰,每个波峰之间



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) suppressed relaxation oscillations

的间隔为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时,在相同实验条件下,其输出光谱如图4(b)所示。观测到的光谱中心波长为1939.2 nm的单个主峰,且在功率提升过程中始终未出现次峰。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。推测在光纤A中,传输的高阶模与基模在满足特定相位匹配条件后发生耦合,导致光谱频移现象。该耦合效应使得不同光谱成分在功率变化时仍能稳定维持,这一特性证实了光纤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,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为15 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LP₀₁和LP₁₁模,如图5(a)~(c)所示, 而光纤B仅支持一对简并的基模,即LP。1的传播,如 图 5(d) 所示。激光在光纤 A 的纤芯中的高阶模无



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

法被完全抑制,而光纤B始终保持基模传播。

Tm³⁺因为其独特的电子能级和光物理性质,在 不影响Tm³⁺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 高阶模的出现。由于增益光纤纤芯直径为25μm, NA为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:

$$L_{c} = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \operatorname{Im}(n_{\text{eff}}), \qquad (1)$$



图 5 不同种增益光纤模场分布:(a)A光纤LP₀₁模;(b)A光 纤LP_{11a}模;(c)A光纤LP_{11b}模;(d)B光纤LP₀₁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

其中,Im(n_{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,LP₀₁模和 LP₁₁模的损耗对弯曲直径均不敏感;但当弯曲直径 小于12 cm时,LP₁₁模限制损耗开始急剧升高,而 LP₀₁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 损耗的同时,滤除掉大部分高阶模。



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

2.3 2 µm QCW-TDFL 输出特性

在重复频率为1kHz、掺铥增益光纤B的长度为5m、偏置电流设为2A的情况下,将LD工作电流由2A逐渐提升,得到如图7中所示793nm泵浦峰值功率与1940nm输出峰值功率的关系曲线。当泵浦光

输出峰值功率为1944 W时,1940 nm输出峰值功率为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 μ s,占空比为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°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





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

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1940 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 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 HI-TRAN2012 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 2µm 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 Silicabased fiber lasers operating at 2 μ m [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 photodegradation in 790nm-pumped Tm-doped fibers [C]. Fi-

ber 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掺镱光纤激光器研究 [D]. 吉 林大学, 2017.