

高功率窄谱宽 1 915 nm 掺铥光纤激光器研究

张 伟^{1,2}, 吴闻迪¹, 余 婷¹, 孟 佳³, 杨中国¹, 陈晓龙¹, 刘超铭⁴, 叶锡生¹

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息技术研究中心, 上海 201800;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海大学 理学院, 上海 200444;

4. 哈尔滨工业大学 空间环境材料行为与评价技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 开展了 1 915 nm 高功率、高效率、窄谱宽输出的掺铥光纤激光器(TDFL)研究。基于全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构, 采用 40 W 的 793 nm 半导体激光器泵浦纤芯直径 25 μm 的双包层大模场面积(LMA)掺铥光纤, 获得了最高功率 12.1 W 的 1 915 nm 窄谱宽连续种子激光输出。将 8 W 种子光注入掺铥光纤放大器, 在 793 nm 激光泵浦功率为 142.9 W 时, 获得了平均功率 90 W 的激光输出, 其中心波长为 1 915.051 nm, 3 dB 谱宽仅为 94 pm, 斜率效率为 60.2%, 光-光转换效率达 63.0%。该系统在 40 min 运行考核时间内输出激光稳定性良好。

关键词: 掺铥光纤激光器; 主振荡功率放大; 1 915 nm; 窄谱宽; 高效率

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0505001

Study on high-power narrow-bandwidth 1 915 nm thulium-doped fiber laser

Zhang Wei^{1,2}, Wu Wendi¹, Yu Ting¹, Meng Jia³, Yang Zhongguo¹,
Chen Xiaolong¹, Liu Chaoming⁴, Ye Xisheng¹

(1. Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

4. National Key Laboratory of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A high-power high-efficiency narrow-bandwidth thulium-doped fiber laser(TDFL) with output wavelength 1 915 nm was studied in this work. The thulium-doped fiber laser was based on system of master oscillator power amplifier (MOPA). The laser diode with about 40 W output power and 793 nm wavelength was used to pump double cladding large-mode-area (LMA) thulium-doped fiber with 25 μm core diameter, the narrow-bandwidth continuous wave (CW) seed laser with wavelength 1 915 nm and maximum power 12.1 W was obtained. When the 793 nm pump power was 142.9 W, after the 8 W

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-12

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(1505521XR0)

作者简介: 张伟(1991-), 男, 硕士生, 主要从事掺铥光纤激光技术方面的研究。Email: zhangwei2016@siom.ac.cn

导师简介: 余婷(1977-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事激光技术及非线性频率变换方面的研究。Email: yuting@siom.ac.cn

叶锡生(1967-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光技术、激光与物质相互作用方面的研究。Email: xsye@siom.ac.cn

seed laser going through the thulium-doped fiber amplifier, the output laser had average power of 90 W, central wavelength of 1 915.051 nm, 3 dB spectrum bandwidth was 94 pm, with slope efficiency of 60%, and optical-to-optical conversion efficiency of 63%. The stability of output laser of this system behaves well in the 40 min operation checking time.

Key words: thulium-doped fiber laser; MOPA; 1 915 nm; narrow bandwidth; high efficiency

0 引言

2 μm 波段激光在大气遥感、激光雷达、激光通信、医疗等众多领域有着重要应用^[1-2],并且是产生 3~5 μm 中红外激光的重要泵浦源^[3-4]。掺铥光纤激光器(Tm-doped fiber laser, TDFL)的光谱发射范围为 1.7~2.1 μm, 其中 1.9~2.0 μm 波段与掺钬晶体的多个宽带吸收峰相对应,因此可用于泵浦掺钬晶体以输出 2.05~2.15 μm 波段激光,从而形成更长波长的 2 μm 激光源。目前,这类更长波长激光源的技术路线主要有^[5-7]:利用 1 908 nm TDFL 泵浦 Ho:YAG 晶体,利用 1 940 nm TDFL 泵浦 Ho:YLF 和 Ho:YAP 晶体,等。近年来,吸收光谱范围宽于 Ho:YAG 和 Ho:YLF 晶体的 Ho:YAP 晶体逐渐成为研究热点并取得长足进步。不同参数的 Ho:YAP 晶体在吸收谱线方面也存在差异,掺杂浓度为 0.5 at% 的 Ho:YAP 晶体在 1 915 nm 处的吸收强于 1 908、1 941、1 980 nm 等处的吸收^[8]。因此,选择 1 915 nm TDFL 作为 Ho:YAP 晶体的泵浦源更为合适,这就对高功率高效率 1 915 nm 窄谱宽 TDFL 的研发提出了强劲的需求。

近 10 多年来,人们对中心波长为 1908 nm 和 1 940 nm 等的 TDFL 研究较多^[9-14],而对 1 915 nm TDFL 的研究则较少,国外暂无报道。在国内,2015 年,中国科学院上海光学精密机械研究所余婷等人^[8]采用全光纤结构,以 793 nm LD 泵浦掺铥光纤,直接振荡输出中心波长为 1 915.26 nm、谱宽为 0.065 nm 的激光,功率为 71.1 W,斜率效率达 39.7%;同年,华中科技大学邢颖滨等人^[15]采用全光纤结构,以 793 nm LD 泵浦国产掺铥光纤直接振荡输出 1 915 nm 激光,功率为 121 W,斜率效率为 51%,光-光转换效率为 48%,其 3 dB 谱宽约 2 nm;2016 年,余婷等人^[16]基于全光纤结构以 793 nm LD 泵浦掺铥光纤,直接振荡产生中心波长 1 915.4 nm、光谱宽

度 0.154 nm 的激光,功率提升到 82.3 W,斜率效率达 41.8%。

由于 TDFL 在输出激光波长小于 1 950 nm 时重吸收损失迅速增加^[17],因此要在 1 915 nm 波段实现高功率高效率窄谱宽输出就较为困难。目前对 1 915 nm TDFL 的研究虽已取得一些进展,但仍需继续发展高功率、高效率 and 窄谱宽输出技术。

目前,已见报道的 1 915 nm TDFL 几乎均采用直接振荡方案实现激光输出,文中则基于主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)结构实现 1 915 nm TDFL 的高功率高效率窄谱宽稳定输出,进一步提高功率和光谱稳定性。在 MOPA 结构中,种子激光功率低,光栅承受功率低,光谱展宽小、噪声低,因而利于控制光谱,不仅实现高功率输出,还可有效减少光谱展宽。

1 理论模拟与分析

1.1 功率模拟

铥离子的吸收谱如图 1 所示^[18]。由图可以看出,铥离子在 790 nm 附近吸收峰最强。目前,790 nm 波段的高功率 LD 技术已经较为成熟,所以,文中采用 793 nm 作为泵浦波长开展理论模拟和后续实验研究。

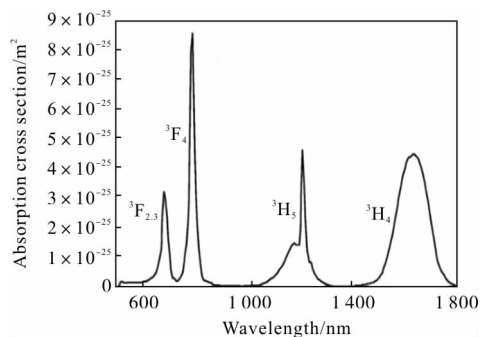


图 1 铥离子吸收谱

Fig.1 Absorption spectra of thulium ions

铥离子的能级结构如图 2 所示^[18],图中右部括

号内所注为各能级的寿命(单位为 μs)。由于 $^3\text{H}_5$ 能级寿命极短,只有 $0.007 \mu\text{s}$,故忽略该能级上的粒子数。因此,利用 793 nm 激光泵浦的掺铥光纤放大器为准三能级系统。

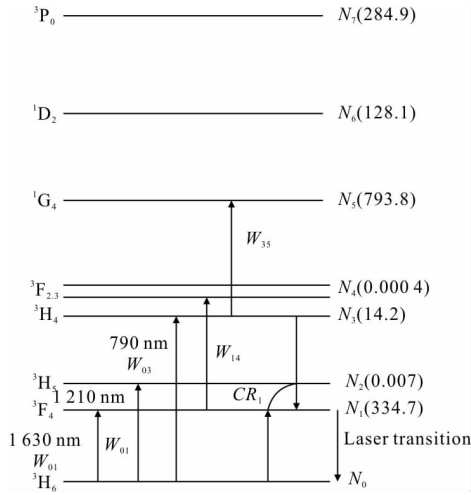


图 2 铥离子的能级分布及其寿命

Fig.2 Energy levels distribution and lifespan of thulium ions

设能级 $^3\text{H}_6$ 、 $^3\text{F}_4$ 、 $^3\text{H}_4$ 分别为能级 0、1、3 且对应粒子数分别为 N_0 、 N_1 、 N_3 , CR_1 表示交叉弛豫过程,则掺铥光纤上某一点的速率方程可表示为:

$$\begin{cases} \frac{dN_0}{dt} = -(W_{01} + W_{03})N_0 + W_{10}N_1 - CR_1 + \frac{N_1}{\tau_1} + \beta_{30} \frac{N_3}{\tau_3} \\ \frac{dN_1}{dt} = W_{01}N_0 - W_{10}N_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + \beta_{31} \frac{N_3}{\tau_3} + 2CR_1 \\ \frac{dN_3}{dt} = W_{03}N_0 - \frac{N_3}{\tau_3} - CR_1 \\ N = N_0 + N_1 + N_3 \end{cases} \quad (1)$$

$$CR_1 = k_{3101} N_3 N_0 - k_{1310} N_1^2 \quad (2)$$

式中: N 为掺杂浓度; τ_i 为能级 i 的寿命; β_{ij} 为能级 i 到能级 j 的自发辐射分支比; k_{3101} 表示能级 3 和 0 到能级 1 的交叉弛豫系数; k_{1310} 表示能级 1 到能级 3 和 0 的交叉弛豫系数; W_{03} 为泵浦光吸收系数; W_{10} 为信号光受激发射系数, W_{01} 为信号光受激吸收系数,可分别由下式求得:

$$W_{03} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA} \sigma_a(\lambda_p) [P_f(z) + P_r(z)] \quad (3)$$

$$W_{10} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_e(\lambda_s) [S_f(z) + S_r(z)] \quad (4)$$

$$W_{01} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_a(\lambda_s) [S_f(z) + S_r(z)] \quad (5)$$

式中: Γ_p 和 Γ_s 分别为泵浦光场和信号光场的重叠因子; $\sigma_a(\lambda_p)$ 和 $\sigma_e(\lambda_p)$ 分别为泵浦光的吸收截面和发射截面; $\sigma_a(\lambda_s)$ 和 $\sigma_e(\lambda_s)$ 分别为信号光的吸收截面和发射截面; $P_f(z)$ 是泵浦光前向功率传输方程; $P_r(z)$ 是泵浦光后向功率传输方程; $S_f(z)$ 是信号光前向功率传输方程; $S_r(z)$ 是信号光后向功率传输方程,分别由以下各式求得:

$$\frac{dP_{f,r}(z)}{dz} = \mp P_{f,r}(z) [\Gamma_p (\sigma_a(\lambda_p) N_0 + \sigma_e(\lambda_p) N_1) + \delta_p] \quad (6)$$

$$\frac{dP_{f,r}(z)}{dz} = \pm S_{f,r}(z) [\Gamma_s (\sigma_e(\lambda_s) N_1 + \sigma_a(\lambda_s) N_0) - \delta_s] \quad (7)$$

式中: δ_p 和 δ_s 分别为泵浦光和信号光在光纤中的本征吸收。

联立以上各式,用有限差分法解微分方程组,当关键参数分别取值^[12,19]为 $N=8.6 \times 10^{25}$ 、 $\sigma_a(\lambda_s)=0.4 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 、 $\sigma_e(\lambda_s)=5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 、 $\sigma_a(\lambda_p)=8 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 、 $\sigma_e(\lambda_p)=8 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 、 $\Gamma_p=0.8964$ 、 $\Gamma_s=0.7520$ 、 $\delta_p=1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ 、 $\delta_s=2.3 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ 、 $k_{1310}=3.0 \times 10^{-23} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $k_{3101}=0.8 \times k_{3101}$ 时,通过 MATLAB 软件模拟求解掺铥光纤放大器内不同位置处激光功率的结果如图 3 所示,其中 P_p 和 P_s 分别为不同位置处的泵浦光和信号光功率。模拟结果表明,当泵浦功率为 143 W 、掺铥光纤长度为 2 m 、信号输入功率为 8 W 时,信号光输出功率为 86.7 W 。

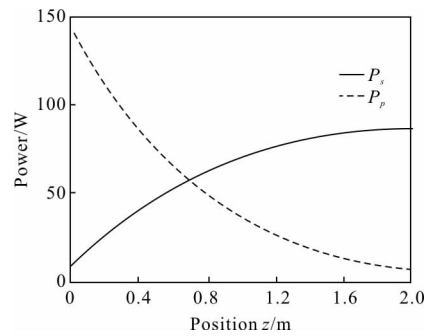


图 3 掺铥光纤放大器模拟结果

Fig.3 Simulation results of Tm-doped fiber amplifier

1.2 光谱分析

光纤激光器的基本结构如图 4 所示。一对光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)构成激光谐振腔,两 FBG 间光纤长度 L 为腔长, P_s 和 P_r 分别表示正、反方向传输的信号光功率。

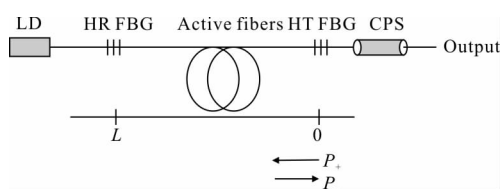


图 4 光纤激光器结构图

Fig.4 Schematic of fiber laser

参考文献[20]中描述了非相干光场由于自相位调制效应在传能光纤中的光谱展宽特性,其自相关函数被定义为:

$$K(\tau) = \left[\int I(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega \right] / 2\pi \quad (8)$$

式中: $I(\omega)$ 为光谱功率密度。

这样,就可以描述经窄带高透 FBG 反射的对应功率 $P_+(x=0)$ 的光谱强度 $I_+(\omega)$ 的演变。在腔内经过一次往返后,相关函数可表示为:

$$K_-(\tau) = GK_+(\tau) [1 + v^2(K_+(0)^2 - K_+(\tau)^2)]^{-2} \quad (9)$$

式中: $K_{\pm}(\tau)$ 分别表示 $x=0$ 处反射和入射光的相关函数; $G = \exp\left(2 \int_0^L g_s dx\right)$ 为光往返一次的增益, g_s 是饱和增益系数; $v = 2\gamma LP/P_+(0)$ 是往返一次的非线性系数; $\bar{P} = \int_0^L (P_+(x) + P_-(x)) dx / (2L)$ 是谐振腔内平均光功率。

当谐振腔内光谱稳定后,满足边界条件:

$$I_+(\omega) = R(\omega) I_-(\omega) \quad (10)$$

式中: $R(\omega)$ 为反射光谱,可用洛伦兹函数表示:

$$R(\omega) = R_0(\omega) \exp(-\omega^2 / \Delta_{FBG}^2) \quad (11)$$

式中: R_0 表示高透光栅反射率; Δ_{FBG} 为其反射谱半高全宽。

由于 $I_+(\omega)$ 可以表示为:

$$I_+(\omega) = 2P_+(0) / (\Delta \cosh(\omega/\Delta)) \quad (12)$$

式中: Δ 是生成光谱宽度。

$P_+(0)$ 和 Δ 之间有如下关系:

$$\left(\frac{\pi}{2} \frac{\Delta}{\Delta_{FBG}} \right)^2 = R_0 G v^2 P_+(0)^2 = 1 - R_0 G (1 - 2v^2 P_+(0)^2) \quad (13)$$

联立以上各式,可以求解输出光谱宽度为:

$$\Delta = (4/\pi) (\Delta_{FBG} \gamma L / \ln(1/R_0)) P_{out} \quad (14)$$

由此可见,输出光谱宽度与输出功率呈线性关系。此外,参考文献[21]中指出光栅反射谱的半高

全宽可表示为:

$$\Delta_{FBG} = \lambda_B s \sqrt{\left(\frac{\delta n}{2n_0} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \right)^2} \quad (15)$$

式中: λ_B 为光栅中心波长; δn 为光栅折射率变化; n_0 为光栅纤芯折射率; s 由光栅折射率决定; N 为光栅波数。随着光纤激光器输出功率增加,光栅纤芯的热负载增大会导致其密度改变,进而使光栅折射率变化 δn 增大,最终导致光栅反射光谱展宽。

由此可见,光纤激光器输出功率不仅直接影响输出光谱,还会通过影响 FBG 的反射谱宽度而间接影响输出光谱。因此,基于 MOPA 结构采用低功率种子振荡器的方案可以有效地控制光谱,再通过放大器既可达到高功率又可有效地避免高功率下 FBG 反射谱展宽对最终输出光谱的不利影响。

2 实验装置

基于全光纤 MOPA 结构所建立的高功率高效率窄谱宽 TDFL 实验装置如图 5 所示。

图 5(a) 所示种子振荡器采用 793 nm LD 作为泵浦源,其最大输出功率为 37.5 W。泵浦光通过 LD 尾纤并经 FBG 后耦合进入增益介质。增益介质采用长 4 m、纤芯/包层直径为 25/250 μm 的 LMA 掺铥光纤,其对 793 nm 包层泵浦吸收系数为 4 dB/m。掺铥光纤被盘绕在铝热沉上进行水冷散热,最小盘绕直径为 12 cm。振荡器采用一对 FBGs 作为激光谐振腔,高反光栅的中心波长为 1 915.010 nm、线宽为 1.597 nm、反射率为 98.05%,低反光栅的中心波长为 1 914.930 nm、线宽为 0.511 nm、反射率为 11.45%。激光输出端熔接有自研的包层光滤除器,用于滤除包层中剩余的泵浦光。

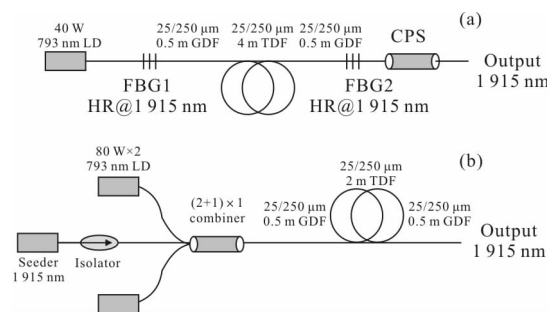


图 5 掺铥光纤激光器实验装置图

Fig.5 Schematic setup of Tm-doped fiber laser

为了获得高功率 1 915 nm 激光输出,将图 5(a)中获得的低功率种子激光注入掺铥光纤放大器进行功率放大,实验装置如图 5(b)所示。图 5(b)主要包含的器件有隔离器、(2+1)×1 泵浦合束器、80 W 的 793 nm LD 以及 2 m 双包层 LMA 掺铥光纤。隔离器最大承受功率为 10 W,在 2 μm 波段的隔离度为 22 dB。(2+1)×1 合束器泵浦臂的功率耦合效率分别为 94%和 91%。掺铥光纤的纤芯/包层直径为 25/250 μm,纤芯和包层的数值孔径分别为 0.09 和 0.46,对 793 nm 激光的包层泵浦吸收系数为 9.5 dB/m。掺铥光纤被盘绕在带 U 型槽的铝热沉上进行水冷散热,最小盘绕直径为 16 cm。为防止菲涅耳反射光损伤前端器件,将激光输出端面切为 8°斜角。

3 实验结果与分析

由于 790 nm 波段泵浦的 TDFL 属于准三能级系统,故温度对激光器输出功率的影响较大。通过控制水箱温度,在 LD 水冷温度为 25 ℃、掺铥光纤水冷温度为 14 ℃时,种子振荡器的输出功率最高、稳定性最好。振荡器的泵浦阈值功率为 5.1 W。当泵浦激光功率取最大值 37.5 W 时,信号光的输出功率达 12.1 W,斜率效率达 37.5%。实验发现,输出为 9.2 W 时功率和光谱稳定性良好,此时测得的中心波长为 1 915.021 nm、3 dB 光谱宽度为 0.087 nm (光谱分析仪型号 YOKOGAWA AQ6375,与参考文献[8]相同),如图 6 所示。对振荡器进行 40 min 运行考核发现,信号光输出功率稳定性良好,功率波动在±0.05 W 以内。

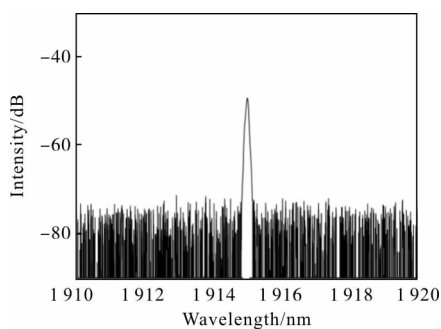


图 6 振荡器输出功率 9.2 W 时光谱

Fig.6 Optical spectrum of oscillator at 9.2 W output power

上述 9.2 W 种子光经隔离器后剩余功率为 8 W,

再将其注入掺铥光纤放大器进行功率放大。当输入 793 nm LD 泵浦激光功率为 142.9 W 时,在滤除剩余泵浦光后得到信号光输出功率为 90 W,斜率效率为 60.2%、光-光效率达 63.0%,如图 7 所示。该实验结果与前述理论模拟结果 86.7 W 相差 4%,两者基本吻合。当掺铥光纤长度合适且种子光功率达足够大时,掺铥光纤放大器的信号光输出功率与泵浦光输入功率呈较好的线性关系^[22],图 7 所示的实验结果符合这一规律。

实验测得的输出激光光谱与输入种子光光谱几乎保持一致,其中心波长为 1 915.051 nm、3 dB 光谱线宽仅 0.094 nm,并且无 ASE 等非线性效应产生,如图 8 所示。

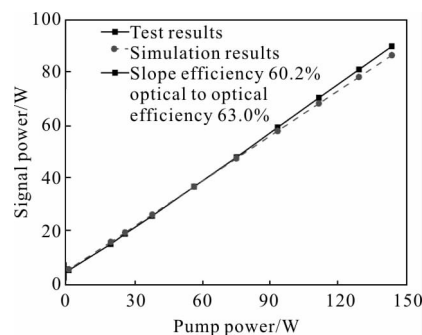


图 7 掺铥光纤放大器信号功率随泵浦功率变化关系

Fig.7 Relationship between signal power and pump power in Tm-doped fiber amplifier

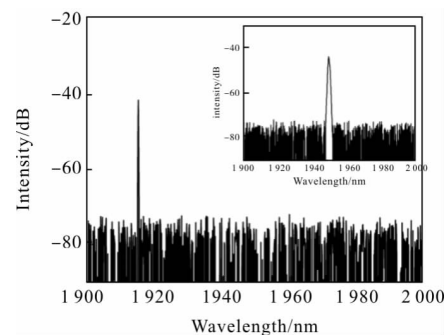


图 8 掺铥光纤放大器输出光谱

Fig.8 Output optical spectrum of Tm-doped fiber amplifier

掺铥光纤放大器输出信号光的功率稳定性也主要决定于种子光。实验中,放大器输出激光功率稳定性良好,如图 9 所示。在 40 min 运行考核时间内,输出激光功率的波动为±0.3 W,中心波长的波动为±0.02 nm,光谱宽度的波动也为±0.02 nm,体现出了优良的综合性能。

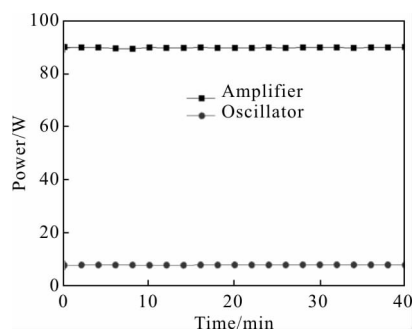


图 9 40 min 内掺铥光纤激光器功率稳定性

Fig.9 Stability of output power of Tm-doped fiber laser in 40 mins

4 结 论

基于全光纤 MOPA 结构成功实现了 1 915 nm TDFL 的高功率、高效率、窄谱宽输出。实验中,振荡器采用 793 nm LD 泵浦双包层 LMA 掺铥光纤,实现了功率 9.2 W、中心波长 1 915.021 nm、3 dB 谱宽小于 0.1 nm 的稳定种子激光输出。将经隔离器后剩余的 8 W 种子光注入掺铥光纤放大器进行功率放大,在 793 nm LD 泵浦光功率为 142.9 W 时,获得了功率达 90 W、与理论模拟结果基本吻合的信号光输出,且尚未出现 ASE 等非线性效应现象,有望通过增大泵浦功率进一步提高输出激光功率。掺铥光纤放大器输出激光的中心波长为 1 915.051 nm、3 dB 谱宽小于 0.1 nm、斜率效率为 60.2%、光-光效率达 63.0%;同时,输出激光稳定性良好,在 40 min 运行考核时间内输出激光功率波动为 ± 0.3 W、光谱中心波长波动为 ± 0.02 nm、光谱宽度波动为 ± 0.02 nm。该实验装置综合性能较为优良,且在高功率、高效率、窄谱宽等单一指标方面还有进一步提升的空间。

参 考 文 献:

[1] Honea E C, Beach R J, Sutton S B, et al. 115-W Tm: YAG diode-pumped solid-state laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(9): 1592-1600.

[2] Vincent F, Martin B, Bah S T, et al. 30W Fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2882-2885.

[3] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.

[4] Bu Xiangbao, Shi Hongxing, Cheng Zhaochen, et al. Tunable narrow-linewidth Cr:ZnSe laser pumped by Tm-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2017, 44(2):0201014. (in Chinese)

卜祥宝, 师红星, 程昭晨, 等. 掺铥光纤激光器抽运的可调谐窄线宽 Cr: ZnSe 激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201014.

[5] Ji E C, Liu Q, Hu Z Y, et al. High-power, high-energy Ho:YAG oscillator pumped by a Tm-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(12): 121402.

[6] Sun Feng, Zheng Jiankui. High power quasi CW Ho: YLF laser pumped by fiber laser[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2016, 14 (5): 34-37. (in Chinese)

孙峰, 郑建奎. 基于光纤激光器泵浦的高功率准连续 Ho: YLF 激光器[J]. *光学与光电技术*, 2016, 14(5): 34-37.

[7] Zhou R L, Ju Y L, Wang W, et al. Acousto-optic Q-switched operation Ho: YAP laser pumped by a Tm-doped fiber laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(7): 074210.

[8] Yu T, Bai G, Chen W B, et al. 20.2 W CW 2.118 μm Ho: YAlO₃ laser pumped by 1.915 nm Tm-doped fiber laser[C]// SPIE, 2015, 9466: 94660U.

[9] Hanna D C, Jauncey I M, Percival R M, et al. Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fiber laser [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(19): 1222-1223.

[10] Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, et al. 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format[C]// Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference. CLEOE -IQEC 2007. European Conference on IEEE, 2007: 1.

[11] Frith G, Carter A, Samson B, et al. Highly efficient 70 W all-fibre Tm-doped laser system operating at 1908nm[C]// Opto-Electronics and Communications Conference, 2008 and the 2008 Australian Conference on Optical Fibre Technology. OECC/ACOFT 2008, Joint Conference of the IEEE, 2008: 1-2.

[12] Johnson B R, Creeden D, Limongelli J, et al. Comparison of high power large mode area and single mode 1 908 nm Tm-doped fiber lasers[C]//SPIE, 2016, 9728: 972810.

[13] Hu Z Y, Yan P, Gong M L, et al. 227-W output all-fiberized Tm-doped fiber laser at 1 908 nm [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(10): 147-150.

[14] Yang C, Ju Y L, Dai T Y, et al. High-power Tm³⁺-doped all-fiber laser operating at 1 908 nm by a master oscillator power amplifier configuration with narrow spectral linewidth [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(6): 061403.

- [15] Xing Y B, Liao L, Li J Y, et al. Fabrication of Tm-doped fibers for high power and 121 W output all-fiber tm-doped fiber laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(3): 034204.
- [16] Yu T, Ye X S, Yang Z G, et al. All fiber thulium-doped fiber laser pumped Q-switched Ho: YAP laser [C]//4th International Symposium on Laser Interaction with Matter (LIMIS 2016), 2017: 101731M.
- [17] Frith G, Carter A, Samson B, et al. Design considerations for short-wavelength operation of 790-nm-pumped Tm-doped fibers[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(27): 5072.
- [18] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 948-956.
- [19] Xu J Q, Prabhu M, Lu J, et al. Efficient double-clad thulium-doped fiber laser with a ring cavity [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(12): 1983-1988.
- [20] Kablukov S I, Zlobina E A, Podivilov E V, et al. Output spectrum of Yb-doped fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2508-2510.
- [21] Zhang Liming, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. Output characteristics of kW stage main oscillator power amplifying fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(8): 1893-1896. (in Chinese)
张利明, 周寿桓, 赵鸿, 等. kW 级主振荡功率放大光纤激光器输出特性[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(8): 1893-1896.
- [22] Liu Jiang, Liu Chen, Shi Hongxing, et al. 342 W all-fiber CW Tm-doped fiber laser with narrow linewidth [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(19): 194209. (in Chinese)
刘江, 刘晨, 师红星, 等. 342 W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器[J]. *物理学报*, 2016, 65(19): 194209.