

激光与光电子学进展

2 μm 波段混合复合谐振腔型单纵模光纤激光器孙威威^{1,2}, 冯亭^{1,2*}, 李东元^{1,2}, 秦齐³, 延凤平³, 韦达^{1,2}, 姚晓天^{1,2}¹河北大学物理科学与技术学院光信息技术创新中心, 河北 保定 071002;²河北省光学感知技术创新中心, 河北 保定 071002;³北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

摘要 设计并演示了一种 2 μm 波段高信噪比混合复合谐振腔型单纵模 (SLM) 掺铥光纤激光器 (TDFL)。混合复合谐振腔由基于 3 个均匀光纤布拉格光栅 (FBG) 和 2 个光纤耦合器 (OC) 的非对称线形复合四腔和基于另外 2 个 OC 的双 OC 环形腔组成。基于游标原理, 非对称线形复合四腔可以实现激光 SLM 选择。双 OC 环形腔作为窄带滤波器, 进一步确保激光器长时间 SLM 稳定运行。采用放大的 1567 nm 激光泵浦掺铥光纤, 当泵浦功率为 2.80 W 时, 激光输出中心波长为 2049.160 nm, 输出功率为 15.47 mW, 光信噪比高达 75.65 dB, 200 min 测量时间内波长和功率波动分别小于 0.005 nm 和 0.85 dB, 10 min 测量时间内激光可以保持稳定的 SLM 运行, 激光器的阈值泵浦功率和斜率效率分别为 1.75 W 和 1.43%。提出的 TDFL 在自由空间光通信、激光雷达、光学传感等领域具有潜在的应用价值。

关键词 激光器与激光光学; 2 μm 波段光纤激光器; 混合复合谐振腔; 单纵模; 光纤滤波器

中图分类号 TN242

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220696

2- μm -Band Hybrid Compound-Resonating-Cavity
Single-Longitudinal-Mode Fiber LaserSun Weiwei^{1,2}, Feng Ting^{1,2*}, Li Dongyuan^{1,2}, Qin Qi³, Yan Fengping³,
Wei Da^{1,2}, Yao Xiaotian^{1,2}¹Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science and Technology, Hebei University,
Baoding 071002, Hebei, China;²Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China;³School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract We propose a 2- μm -band high optical signal-to-noise-ratio (OSNR) hybrid compound-resonating-cavity (CRC) single-longitudinal-mode (SLM) thulium-doped fiber laser (TDFL). The hybrid CRC consists of an asymmetric linear compound-four-cavity (AL-CFC) made of three uniform fiber Bragg gratings (FBGs) and two optical couplers (OCs), as well as a dual-coupler-ring (DCR) cavity made of two OCs. Based on the Vernier effect, the AL-CFC can select the SLM from dense longitudinal modes, and the DCR is used as a narrow-band filter to further stabilize the operation of SLM lasing over a long term. A 1567-nm laser diode amplified by a high-power erbium-doped fiber amplifier is used as a pump source. Under a pump power of 2.80 W, a stable SLM laser output is achieved at a center wavelength of 2049.160 nm with an output power of 15.47 mW and an OSNR as high as 75.65 dB. The fluctuations of the wavelength and power are respectively lower than 0.005 nm and 0.85 dB within a measurement time of 200 min. The SLM operation becomes stable within 10 min. The pump threshold and slope efficiency are 1.75 W and 1.43%, respectively. The proposed TDFL has potential for applications in free-space optical communication, laser radar, and optical sensing.

Key words laser and laser optics; 2- μm -band fiber laser; hybrid compound-resonating cavity; single-longitudinal mode; fiber filter

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-02-18; 录用日期: 2022-02-25; 网络首发日期: 2022-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61975049, 61827818)、河北省自然科学基金优秀青年科学基金(F2020201001)、河北省“三三三人才工程”(A202101010)、河北省创新能力提升计划(20542201D)、河北大学高层次人才科研启动项目(521000981006)

通信作者: *wlxyft@hbu.edu.cn

1 引言

近年来, $2\ \mu\text{m}$ 波段单纵模 (SLM) 光纤激光器因其在水分子、温室气体和一些其他化合物中的独特吸收特性, 以及在自由空间光通信、激光雷达大气测量、高分辨率光谱学和生物医疗^[1-5] 等领域的潜在应用, 备受青睐。而且, $2\ \mu\text{m}$ 波段激光处于人眼安全波段, 是自由空间光传输相关应用的优选光源。目前, 能够实现 SLM 激光运行的光纤激光器结构主要有短谐振腔 (短腔) 型和长谐振腔 (长腔) 型两种。短腔型主要指分布反馈型 (DFB)^[6-7] 光纤激光器和分布布拉格反射型 (DBR)^[8-10] 光纤激光器, 这两类激光器结构简单、SLM 运行稳定, 但由于增益光纤长度较短, 导致激光效率很低、谐振腔 Q 值不够高、线宽压窄困难、噪声特性差。长腔型光纤激光器拥有结构灵活多变、光子寿命长、Q 值高、线宽窄、噪声特性好等优点, 且可以通过简单延长增益光纤长度提高激光输出功率和激光效率。而较长的谐振腔会导致腔内纵模密集, 如何筛选且实现 SLM 激光输出成为该类型结构光纤激光器的研究重点。目前, 已经提出的适用于长腔型光纤激光器选择 SLM 的方法有基于光纤布拉格光栅 (FBG) 的超窄带滤波器^[11-13]、未泵浦掺杂光纤可饱和吸收体^[14-15]、微环谐振腔滤波器^[16] 等, 但这些方法具有成本高、损耗大、抗干扰能力差、制作重复性差等特点。复合谐振腔法是一种成本低、性能稳定、结构灵活、制作容易的光纤激光器 SLM 输出实现方法, 已经得到了研究者的普遍认可^[17-19]。本文课题组近年来对复合谐振腔型单纵模窄线宽光纤激光器开展了大量深入的研究工作, 提出了定量的结合理论和实验的复合谐

振腔滤波器研究方法, 并成功在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段实现了高质量的 SLM 激光输出^[20-22], 将其推广到 $2\ \mu\text{m}$ 波段 SLM 光纤激光器的研制具有重要意义。然而, $2\ \mu\text{m}$ 波段光纤激光在器件性能、损耗特性、泵浦方式等方面具有特殊性, $2\ \mu\text{m}$ 波段复合谐振腔型 SLM 光纤激光器值得深入研究。

本文提出并演示了一种非对称线形复合四腔 (AL-CFC) 和双光纤耦合器 (OC) 环形腔 (DCR) 组成的混合复合谐振腔型 SLM 掺铥光纤激光器 (TDFL)。AL-CFC 由 3 个 FBG 和 2 个 OC 构成, 4 个线性谐振腔腔长均不同, 均为有源主腔且相互交叉耦合, 基于游标效应显著增大有效纵模间隔。DCR 具有窄带滤波通道, 与 AL-CFC 共同作用, 确保了稳定的 SLM 激光输出。经测量, 搭建的 TDFL 具有良好的波长和功率稳定性, 当泵浦功率为 $2.80\ \text{W}$ 时, 激光输出中心波长为 $2049.160\ \text{nm}$, 光信噪比为 $75.65\ \text{dB}$, 输出功率为 $15.47\ \text{mW}$ 。

2 实验装置及原理

提出的 $2\ \mu\text{m}$ 混合复合谐振腔 SLM TDFL 的结构如图 1 所示。激光谐振腔主要由 AL-CFC 和 DCR 组成。AL-CFC 由 2 个 2×2 型 OC (OC3 和 OC4, 耦合比均为 50:50) 和 3 个高反射率的均匀 FBG (FBG1、FBG2 和 FBG3) 组成, 基于游标原理有效增大主腔纵模间隔来减少光栅带宽内的模式数量, 实现激光器单纵模运行; 具有窄带梳状滤波通道的 DCR (由 2 个 2×2 型 30:70 的 OC 组成, 环长为 $50\ \text{cm}$) 用来进一步抑制因环境扰动引起的模式跳变和多模振荡, 进一步提高激光器 SLM 运行稳定性。一段 $1.20\ \text{m}$ 长的掺铥光纤 (TDF, Nufern SM-TDF-10P/130-M) 作为增益介质。

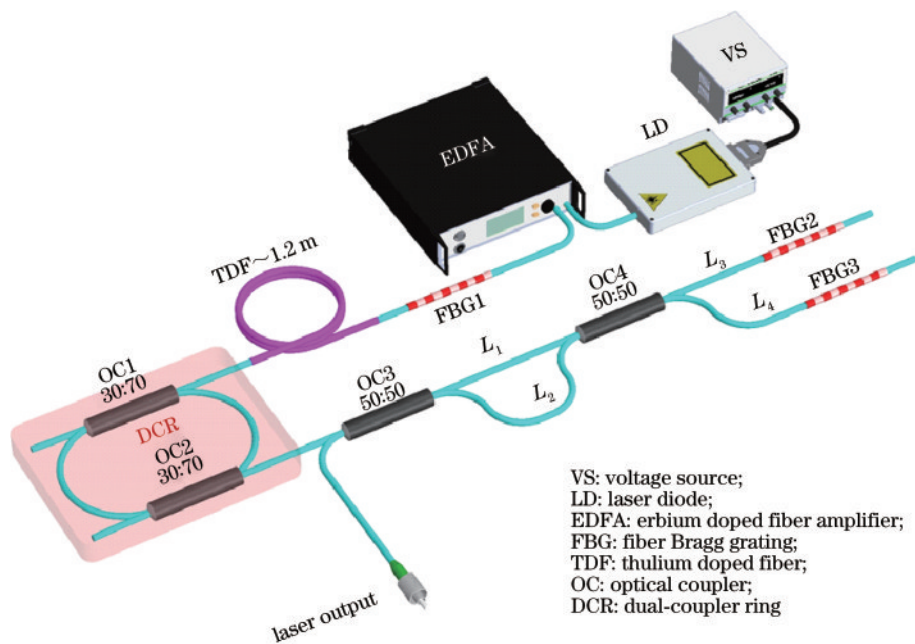


图 1 提出的混合复合谐振腔型 SLM TDFL 光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of proposed hybrid compound-cavity SLM TDFL

一台 1567 nm 半导体激光器(LD)经最大输出功率为 5 W 的掺铒光纤放大器(EDFA)放大后作为泵浦源,从 FBG1 端注入谐振腔。信号光在 OC3 处分成为两束,分别经长度为 $L_1=0.30$ m 和 $L_2=0.35$ m 的单模光纤(SMF)进入 OC4,再由 OC4 输出后经长度分别为 $L_3=0.30$ m 和 $L_4=0.40$ m 的 SMF 被 FBG2 和 FBG3 反射,所产生的 2 μ m 波段 SLM 激光经 OC3 的 50% 端口进行输出。激光器结构中所有的 OC 均为本文课题组使用熔融拉锥机自制。

使用分辨率为 0.05 nm、数据采样间隔为 0.003 nm 的光谱分析仪(OSA, Yokogawa AQ6375B)测得 3 个 FBG 的反射谱如图 2(a)所示,3 个 FBG 的反射通道的重叠区作为激光的波长选择通道,3 个 FBG 的反射率均为 $\sim 99\%$,重合区域中心波长为 ~ 2048.983 nm,半峰全宽(FWHM)为 ~ 35.74 GHz,3 个 FBG 的高度重合保证了复合谐振腔中激光的稳定振荡。形成的 4 个

线性腔分别为:FBG1-TDF-L1-L3-FBG2、FBG1-TDF-L2-L3-FBG2、FBG1-TDF-L1-L4-FBG3、FBG1-TDF-L2-L4-FBG3,其长度分别为 4.00、4.05、4.10、4.15 m,对应的自由光谱范围(FSR)分别为 25.77、25.45、25.14、24.84 MHz,计算公式为

$$R_{\text{FSR}} = c/2n_{\text{eff}}L, \quad (1)$$

式中: c 为光速; $n_{\text{eff}}=1.455$ 为 2 μ m 波段激光在 SMF 内传输的有效折射率; L 为谐振腔长。基于游标原理,有效 FSR 应为 4 个腔对应 FSR 的最小公倍数^[23-24],计算出有效 FSR(即有效纵模间隔)为 409.56 GHz,能够有效抑制多模振荡,从而实现激光器的 SLM 运行。然而,由于 4 个非对称线性腔的腔长较长且 3 个 FBG 的反射光谱重叠区带宽较宽,受环境影响会导致 SLM 输出不稳定。因此,在腔内嵌入一个具有窄带梳状滤波特性的 DCR,用来进一步抑制受环境影响可能导致的激光器多模振荡。DCR 透过率公式为^[22]

$$T = E \cdot E^*, E = \frac{-\sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{1-\gamma_2}\sqrt{1-\delta}\sqrt{\alpha_1}\sqrt{\alpha_2}\exp\left[(-\beta+ikn_{\text{eff}})L_{\text{DCR}}/2\right]}{1-\sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{1-\gamma_2}\sqrt{1-\delta}\sqrt{1-\alpha_1}\sqrt{1-\alpha_2}\exp\left[(-\beta+ikn_{\text{eff}})L_{\text{DCR}}\right]}, \quad (2)$$

式中: T 为透射率; E 为输出端口的电场振幅; $\gamma_1=0.08$ dB、 $\gamma_2=0.11$ dB 和 $\alpha_1=0.296$ 、 $\alpha_2=0.298$ 分别为实测的 OC1、OC2 的插入损耗和交叉耦合系数; $\delta=0.01$ dB 为 DCR 环内熔接点损耗; $\beta=20$ dB/km 为信号光传输损耗; $L_{\text{DCR}}=50$ cm 为 DCR 的环长; $k=2\pi/\lambda$ 为波矢。取 $2049.12 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2049.18 \text{ nm}$, 仿真得到的 DCR 滤波光谱如图 2(b)所示。在滤波器筛

选 SLM 的过程中,需要滤波器的 3 dB 带宽与主腔纵模的间隔相匹配,即 DCR 的 3 dB 带宽在主腔纵模间隔的 1~2 倍之间^[18]。从图 2(b)可见,DCR 的 3 dB 带宽为 40.88 MHz,在 4 个线性腔纵模间隔的 1~2 倍之间。因此,配合使用 AL-CFC 和 DCR 能够有效抑制受环境扰动出现的多模振荡,实现稳定 SLM 激光输出。

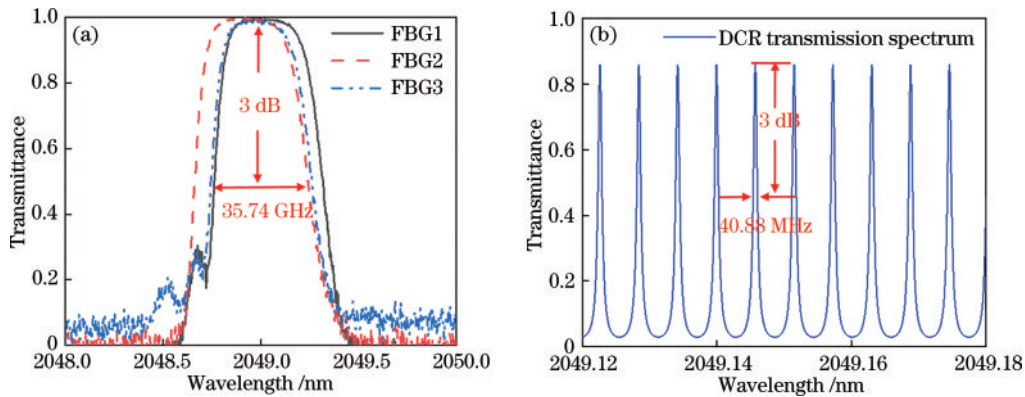


图2 FBG和DCR滤波光谱。(a)测得的FBG1、FBG2和FBG3的反射光谱;(b)仿真得到的DCR的透射光谱

Fig. 2 Filter spectra of FBG and DCR. (a) Measured reflection spectra of FBG1, FBG2, and FBG3; (b) simulated transmission spectrum of DCR

3 实验结果分析与讨论

TDFL搭建于普通钢制光学平台上,室温下进行实验和测试。在 1567 nm 泵浦激光功率达到 2.80 W 时,使用 OSA 测量激光输出光谱特性如图 3 所示。激光中心波长为 2049.160 nm,光信噪比高达 75.65 dB,插图(Inset)为在 200 min 内以 10 min 的间隔对光谱进

行 20 次重复扫描结果。为了研究激光输出稳定性,提取 20 次 OSA 扫描光谱的中心波长和峰值功率,如图 4 所示,可见功率波动小于 0.85 dB,中心波长波动小于 0.005 nm。

在相同泵浦功率下,使用法布里-珀罗(F-P)干涉仪(Thorlabs, SA200-18C)和示波器(Tektronix, TDS 2024C)测量激光输出的 SLM 特性,测量装置如

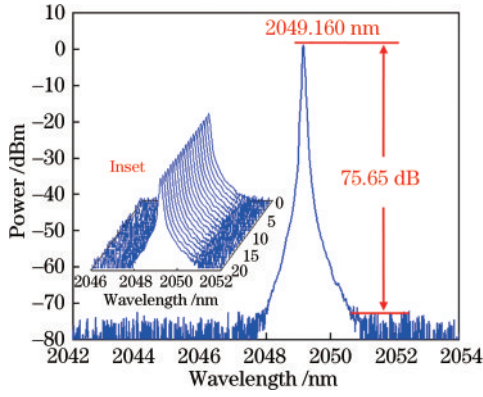


图3 OSA测量的激光输出光谱。插图为以10 min间隔重复 OSA 扫描 20 次
Fig. 3 Laser output spectrum measured by OSA. Inset shows 20-times repeated OSA scans at 10 min intervals

图5(a)所示。F-P干涉仪的自由光谱范围和分辨率分别为1.5 GHz和7.5 MHz。图5(b)为测量结果,其中

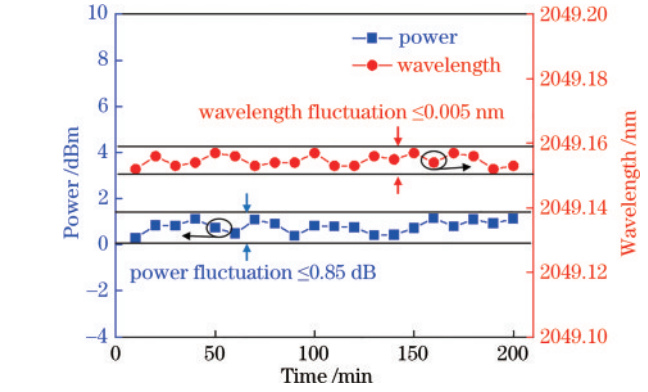
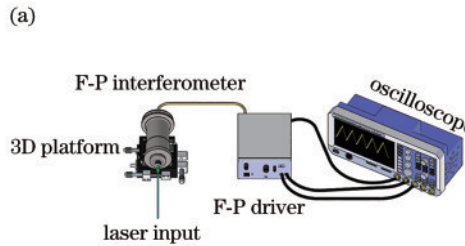


图4 激光中心波长和峰值功率波动
Fig. 4 Central wavelength and peak power fluctuation of laser

锯齿波表示干涉仪的驱动电压信号,曲线表示在一个电压扫描周期内的激光模式数。从图中可以看出,在大于一个干涉仪的FSR内有且仅有两个激光信号通过干涉仪,说明激光器处于SLM运行状态。

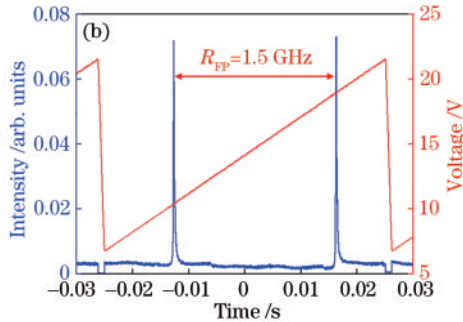


图5 F-P干涉仪测量光纤激光器SLM特性。(a)测量系统示意图;(b)测量结果

Fig. 5 SLM lasing measured by F-P interferometer. (a) Schematic of measurement system; (b) measurement result

采用自零差法进一步研究了激光器的SLM运行稳定性,激光输出通过1 GHz光电探测器(PD)和射频(RF)频谱分析仪(ESA, Keysight N9010A)进行测量,如图6(a)所示。使用ESA的最大保持模式测量10 min,没有捕获到任何拍频信号,表明激光器处在稳定的SLM运行状态。为了进一步验证DCR的性能,使用等长度的SMF代替DCR进行测量,以保证主腔长度不变,结果如图6(b)所示。使用最大保持模式在10 min的测量时间内可以看到少数几个拍频信号,说明DCR起到了稳定SLM输出的作用,能够有效抑制因光栅带宽较宽和腔长太长而受环境扰动引起的多模振荡,与预期结果一致。遗憾的是,由于目前实验条件限制,本文没有对SLM输出激光线宽特性进行表征。

最后,通过功率计(Thorlabs, S405C)测量了不同泵浦功率下的激光输出功率,如图7所示。对测量数据进行线性拟合,得到激光器输出斜率效率为1.43%,阈值泵浦功率为1.75 W。泵浦功率为2.80 W时,激光输出为15.47 mW。较高的阈值泵浦功率和较小的斜率效率主要是因为使用的双包层TDF与SMF熔接点模场失配严重,加上2 μm波段相

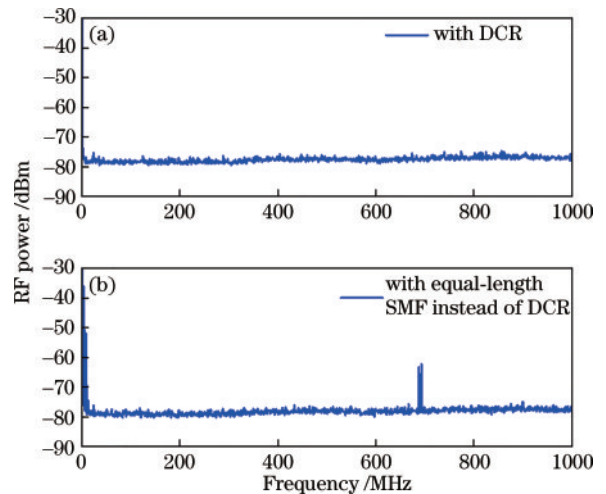


图6 自零差法测量激光SLM输出。(a)带有DCR的TDFL输出拍频谱;(b)用等长度SMF代替DCR的TDFL输出拍频谱
Fig. 6 SLM lasing measured by self-homodyne method. (a) Laser output beating spectrum for TDFL with DCR; (b) laser output beating spectrum for TDFL with equal-length SMF instead of DCR

Fig. 6 SLM lasing measured by self-homodyne method. (a) Laser output beating spectrum for TDFL with DCR; (b) laser output beating spectrum for TDFL with equal-length SMF instead of DCR

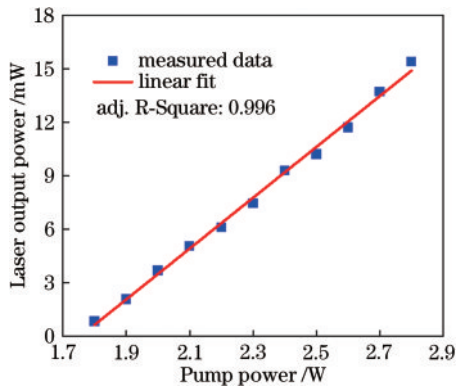


图 7 激光输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 7 Laser output power as a function of pump power

关器件普遍损耗较大,导致整体激光器转换效率较低。从图 7 中可以看出,泵浦功率达到 2.80 W 时,激光输出并没有达到饱和,但是考虑到熔接点发热较为严重,可能导致器件损坏,没有测试激光器的最高输出功率。

4 结 论

提出并实验验证了基于 AL-CFC 和 DCR 的混合复合谐振腔型 SLM TDFL。AL-CFC 得到了超大有效纵模间隔,可以实现激光器的 SLM 振荡;DCR 具有超窄带滤波特性,进一步确保激光器 SLM 运行的长时间稳定。当泵浦功率为 2.80 W 时,激光输出中心波长为 2049.160 nm、功率为 15.47 mW、光信噪比高达 75.65 dB。200 min 测量时间内,波长和功率波动分别小于 0.005 nm 和 0.85 dB。两种方法验证了激光器可以稳定工作在 SLM 输出状态,且验证了 DCR 对于 SLM 长期稳定性的效果。测量得到激光器的阈值泵浦功率为 1.75 W、斜率效率为 1.43%。提出的 2 μ m 波段 SLM 光纤激光器没有使用昂贵的超窄带滤波器件,制作简单、成本低廉,具有较好的实用化前景,在自由空间光通信、激光雷达、光学传感等领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 史伟, 房强, 李锦辉, 等. 激光雷达用高性能光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0802001.
Shi W, Fang Q, Li J H, et al. High-performance fiber lasers for LIDARs[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(8): 0802001.
- [2] Poulsen C V, Varming P, Pedersen J E, et al. Applications of single frequency fiber lasers[C]//2003 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe 2003) (IEEE Cat. No.03TH8666), June 22-27, 2003, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2003: 617.
- [3] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications[J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [4] 杨昌盛, 岑旭, 徐善辉, 等. 单频光纤激光器研究进展

[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114002.

Yang C S, Cen X, Xu S H, et al. Research progress of single-frequency fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114002.

- [5] 张安军, 段嘉霖, 邢颖滨, 等. 掺铥激光在生物医疗领域的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 0100004.
Zhang A J, Duan J L, Xing Y B, et al. Application of thulium-doped laser in the biomedicine field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0100004.
- [6] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [7] Voo N Y, Sahu J K, Ibsen M. 345-mW 1836-nm single-frequency DFB fiber laser MOPA[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(12): 2550-2552.
- [8] Guan X C, Yang C S, Qiao T, et al. High-efficiency sub-watt in-band-pumped single-frequency DBR Tm³⁺-doped germanate fiber laser at 1950 nm[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6817-6825.
- [9] 黄金, 孙博, 贾静, 等. 1064 nm 超短腔 DBR 单频掺镱硅酸盐光纤激光器[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 0814003.
Huang J, Sun B, Jia J, et al. 1064 nm ultrashort cavity single-frequency distributed Bragg reflector Yb-doped silica fiber laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(8): 0814003.
- [10] Zhang W N, Li C, Mo S P, et al. A comparison of gold versus silver electrode contacts for high-resolution gastric electrical mapping using flexible printed circuit board arrays[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(8): 1028-1032.
- [11] 王雪, 延凤平, 韩文国. 基于特殊子环腔单纵模窄线宽掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0901001.
Wang X, Yan F P, Han W G. Single longitudinal mode narrow linewidth thulium-doped fiber laser with special subring cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0901001.
- [12] 韩文国, 延凤平, 冯亭, 等. 基于光纤 Bragg 光栅 F-P 滤波器及复合双环腔滤波器的单纵模掺铥光纤激光器[J]. 发光学报, 2021, 42(9): 1419-1426.
Han W G, Yan F P, Feng T, et al. Single-longitudinal mode thulium-doped fiber laser based on Fabry-Pérot fiber Bragg grating filter and passive compound double-rings cavity[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(9): 1419-1426.
- [13] Cheng D, Yan F P, Feng T, et al. Five-wavelength-switchable single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser based on a passive cascaded triple-ring cavity filter[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(1): 1503608.
- [14] 马逸选, 陆宝乐, 王凯乐, 等. 宽带可调谐单频窄线宽掺铥光纤激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0114001.
Ma X X, Lu B L, Wang K L, et al. Tunable broadband single-frequency narrow-linewidth fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0114001.
- [15] Yin T C, Song Y F, Jiang X G, et al. 400 mW narrow linewidth single-frequency fiber ring cavity laser in 2 μ m waveband[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15794-15799.
- [16] Zhang J N, Yao W C, Wang H T, et al. A watt-level

- single-frequency fiber laser at 2 μm using a silica prolate microresonator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(15): 1241-1244.
- [17] 田允允, 冯素娟, 马龑, 等. 一种基于FBG宽调谐的复合环形腔单纵模光纤激光器[J]. 量子电子学报, 2013, 30(3): 288-292.
- Tian Y Y, Feng S J, Ma Y, et al. A wide-tunable single-longitudinal-mode fiber laser based on compound ring cavity and tunable fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(3): 288-292.
- [18] Feng S J, Mao Q H, Tian Y Y, et al. Widely tunable single longitudinal mode fiber laser with cascaded fiber-ring secondary cavity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(4): 323-326.
- [19] Feng T, Yan F P, Li Q, et al. Stable and high OSNR compound linear-cavity single-longitudinal-mode erbium-doped silica fiber laser based on an asymmetric four-cavity structure[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(10): 104205.
- [20] Feng T, Wei D, Bi W W, et al. Wavelength-switchable ultra-narrow linewidth fiber laser enabled by a figure-8 compound-ring-cavity filter and a polarization-managed four-channel filter[J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31179-31200.
- [21] Feng T, Ding D L, Zhao Z W, et al. Switchable 10 nm-spaced dual-wavelength SLM fiber laser with sub-kHz linewidth and high OSNR using a novel multiple-ring configuration[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(10): 105104.
- [22] Feng T, Jiang M L, Wei D, et al. Four-wavelength-switchable SLM fiber laser with sub-kHz linewidth using superimposed high-birefringence FBG and dual-coupler ring based compound-cavity filter[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36662-36679.
- [23] 王伟利, 延凤平, 张鲁娜. 基于多通道FP-FBG的波长可切换单纵模掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2101001.
- Wang W L, Yan F P, Zhang L N. Wavelength-switchable single-longitudinal-mode thulium-doped fibre laser with multi-channel FP-FBG[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2101001.
- [24] Zhang J L, Yue C Y, Schinn G W, et al. Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 104-109.