

文章编号: 1000-7032(2023)08-1479-08

基于无源双环复合子腔滤波器的 可调谐单纵模掺铥光纤激光器

关彪¹, 延凤平^{1*}, 冯亭^{2*}, 杨丹丹¹, 秦齐¹, 李挺¹,
于晨昊¹, 王向东¹, 姜有超¹, 熊本和夫³, 索玉平⁴

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 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;
3. 大阪工业大学电子信息系统工程学专业, 日本大阪 999001; 4. 山西医科大学第五临床医学院妇产科, 山西太原 030012)

摘要: 提出并实现了一种基于均匀光纤布拉格光栅(Uniform fiber Bragg grating, UFBG)和双环复合子腔滤波器的可调谐单纵模掺铥光纤激光器。3 dB带宽为0.18 nm的UFBG作为波长选择器件,与可进行模式选择的双环复合子腔滤波器相结合,实现了单纵模激光输出。测得激光器的输出波长为2 048.69 nm,光信噪比为71.82 dB。60 min内的最大波长和功率波动分别为0.03 nm和0.76 dB。此外,激光器的相对强度噪声在>0.5 MHz时,低于-127.81 dB/Hz;采用基于3×3耦合器的非平衡迈克尔逊干涉仪装置测得0.001 s时激光线宽为7.719 6 kHz。通过调整微位移平台改变作用在均匀光栅上的应力,单纵模激光实现了5.1 nm范围可调谐输出。

关键词: 光纤激光器; 掺铥光纤; 单纵模; 双环复合子腔滤波器

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230047

A Tunable Single-longitudinal-mode Thulium-doped Fiber Laser Enabled by A Passive Double-ring Compound Sub-cavity Filter

GUAN Biao¹, YAN Fengping^{1*}, FENG Ting^{2*}, YANG Dandan¹, QIN Qi¹, LI Ting¹, YU Chenhao¹,
WANG Xiangdong¹, JIANG Youchao¹, KUMAMOTO Kazuo³, SUO Yuping⁴

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, China;
3. Department of Electronics, Information and Communication Engineering, Osaka Institute of Technology, Osaka 999001, Japan;
4. Department of Gynecology and Obstetrics, The Fifth Clinical Medical College of Shanxi Medical University, Taiyuan 030012, China)

* Corresponding Authors, E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn; wlxyst@hbu.edu.cn

Abstract: A tunable single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser based on a uniform fiber Bragg grating (UFBG) and a double-ring compound sub-cavity filter is proposed and verified. A UFBG with a 0.18-nm reflection peak as wavelength-switchable element and a double-ring compound sub-cavity filter as the mode-selection mechanism are combined to realize the single-longitudinal-mode (SLM) laser. The wavelength of the laser was 2 048.69 nm and the optical signal-to-noise ratio was 71.82 dB. The maximum wavelength and power fluctuations within 60 min are found to be 0.03 nm and 0.76 dB, respectively. Moreover, the relative intensity noise is below -127.81 dB/Hz above 0.5 MHz. The laser linewidth at 0.001 s was measured as 7.719 6 kHz using an imbalanced Michelson interferometer composed of a 3 × 3 coupler. The lasing achieves a wide tunable range of 5.1 nm, which is obtained by tuning the micro-displacement platform to transform the strain on the UFBG.

Key words: fiber laser; thulium-doped fiber; single-longitudinal-mode; double-ring compound sub-cavity filter

收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61827818, 61975049, 62005013, 61975105)

Supported by National Natural Science Foundation of China(61827818, 61975049, 62005013, 61975105)

1 引 言

掺铥光纤激光器(Thulium-doped fiber laser, TDFL)具有宽输出波段范围(1 850~2 100 nm)^[1]、高斜率效率^[2]、高输出功率^[3]和高光束质量等特点,在多普勒激光雷达^[4]、相干光束合成^[5]、高精度光学测量系统^[6]和引力波探测^[7]等多个领域有重要的应用前景。可调谐的窄线宽单纵模(Single-longitudinal-mode, SLM)TDFL因其超长相干距离和低强度噪声等特征,得到了广泛关注。

稳定的 SLM 输出可以通过采用简单的线性短腔扩大纵模间隔、消除多纵模振荡实现^[8]。线性短腔结构包含分布布拉格反射和分布反馈两种。由于增益光纤长度限制,这两种激光器的输出功率通常很低。此外,线性短腔激光器受固有结构限制,无法实现宽光谱范围内的可调谐输出。除了线性短腔还可采用环形腔结构,通过在腔内加入具有模式选择功能的滤波器消除多纵模振荡和抑制模式竞争。其中包括超窄带滤波器,如基于可饱和吸收体的萨格纳克环^[9]、相移光纤光栅^[10]等。Cheng 等提出了一种稳定的 SLM 光纤激光器,由均匀光纤布拉格光栅(Uniform fiber Bragg grating, UFBG)和基于 FBG 的高精细 Fabry-Perot 滤波器组成^[11]。然而,仅使用光栅滤波器实现 SLM 输出对其带宽要求较高,且制作工艺复杂,成本高。为了实现低成本、结构简单易操作的 SLM 激光器,Zhang 等提出并验证了一种基于微环谐振器的 2 μm 单频光纤激光器,能够获得瓦级激光输出^[12]。Yin 等提出一种利用饱和吸收体作为自追踪窄带滤波器的 SLM 光纤激光器^[13]。然而,这种光纤滤波器对环境干扰很敏感且系统灵活性较低。

此外,还可以在环形激光器腔内采用复合子腔滤波器实现 SLM 振荡。这种方法可以避免驻波产生的空间烧孔效应。近年来,基于多个光纤耦合器(Optical couplers, OCs)组成的复合子腔滤波器的 SLM 光纤激光器引起了广泛关注。它们结构简单,制造成本低^[14-15]。游标效应^[16]是通过周期性的错位将微小的差异进行放大,主要依靠谐振腔构造的类似的周期峰或谷来完成。基于游标效应,利用复合子腔滤波器可以扩大自由光谱范围(Free spectral range, FSR)。通过调整 OC 的耦合比和相邻 OC 之间连接的尾纤长度可以对滤波输出特性实现便捷操控。

本文提出并验证了基于 UFBG 和双环复合子腔滤波器的可调谐 SLM TDFL,根据理论分析得到了滤波器的 3 dB 带宽和主谐振腔的有效 FSR。该激光器的输出中心波长为 2 048.69 nm,光信噪比(Optical signal-to-noise ratio, OSNR)高于 71.82 dB。此外,UFBG 的窄带反射峰和双环复合子腔滤波器相结合有效抑制了激光器的跳模。实验结果表明,提出的激光器可以在 SLM 状态下稳定工作,相对强度噪声(Relative intensity noise, RIN)为 -127.81 dB/Hz。对激光线宽进行测量,在积分时间为 0.001 s 时获得了 7.719 6 kHz 的线宽值。双环复合子腔滤波器表现出优秀的模式选择特性,提出的激光器系统具有简单易操作、输出功率和频率稳定等特点,在高分辨率分子光谱学领域具有潜在应用价值。

2 实验装置和原理

图 1(a)为搭建的基于无源复合子腔的 SLM TDFL。5.8 m 长的掺铥光纤(Thulium-doped fiber laser, TDF)作为增益介质。考虑到铥离子对 793 nm 激光的高吸收,通常选用该波段激光作为双包层掺铥光纤的泵浦源^[17]。中心波长为 793 nm 的泵浦光通过 793/2 000 nm 光纤合束器的输入端口注入到激光器腔内。双包层增益光纤在 793 nm 处的吸收系数为 3 dB/m,纤芯/包层的数值孔径为 0.15/0.46。实验测试结果表明 5.8 m 长的 TDF 能够为提出的 SLM TDFL 提供足够增益,在 2 050 nm 处具有较高的转换效率且接近自发辐射谱的最高峰。环形器在腔内可以确保激光单向传输。作为波长选择器件的 UFBG 被固定在微位移平台上,连接到环形器的 2 端口。该 UFBG 使用相位掩模法(掩模板的周期为 1 423.7 nm)制作,由 248 nm 的紫外准分子激光器直接写入到载氢后的单模光纤上。图 1(b)为 UFBG 的透射谱和反射谱。该光栅反射峰的中心波长位于 2 048.69 nm,反射率为 92.2%,3 dB 带宽为 0.18 nm。双环复合子腔滤波器由 3 个 2 \times 2 OC 组成,用来实现纵模选择。激光从分光比为 90:10 的 OC₄ 的 10% 端口输出,光谱由分辨率为 0.05 nm 的光谱仪(Optical spectrum analyzer, OSA, AQ6375, Yokogawa)观测。使用带宽为 12.5 GHz、阈值为 3 mW 的 PD(Photo-detector, PD, ET-5000F, EOT)对输出激光进行光电转换,并将输出的电信号传递到信号分析仪(N9020A, Keysight)上进行观测。利用光电探测

器、信号分析仪、示波器(DP07104, Tektronix)对输出激光进行RIN测量。

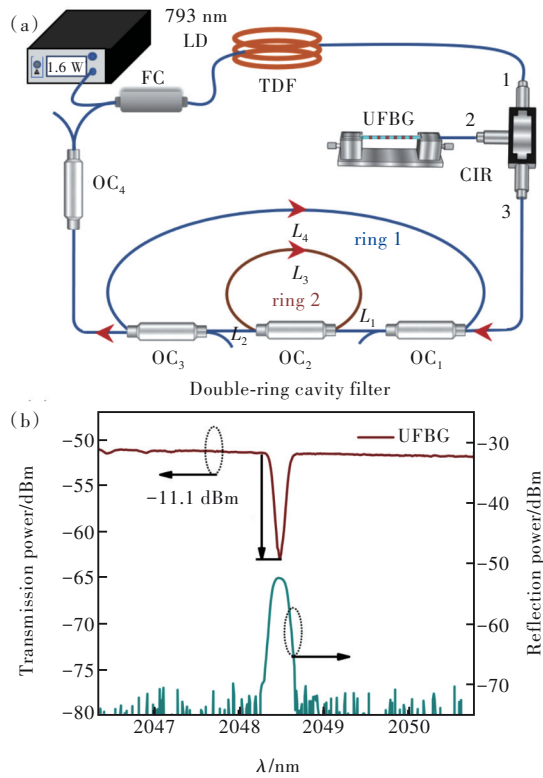


图1 (a)SLM TDFL结构示意图。LD: 半导体激光器; FC: 光纤合束器; TDF: 掺铥光纤; CIR: 环形器; UFBG: 均匀光纤布拉格光栅; OC: 光纤耦合器。环1由 L_1 、 L_2 和 L_4 组成, 环2由 L_3 组成。(b)UFBG的透射谱和反射谱。

Fig.1 (a) Schematic diagram of the proposed fiber laser. LD: laser diode. FC: fiber combiner. TDF: thulium-doped fiber. CIR: circulator. UFBG: uniform fiber Bragg grating. OC: optical coupler. Ring 1 was composed of L_1 , L_2 and L_4 , and ring 2 was composed of L_3 . (b) Transmission and reflection spectra of the UFBG.

为了实现SLM运行, 需要满足以下条件: 第一, 双环子腔滤波器的有效FSR(R_{FS})应大于0.5倍的UFBG反射带宽, 确保在UFBG的反射带宽内只有一条双环复合子腔的有效带宽占优势; 第二, 滤波器的主通道带宽应该是主腔相邻纵模间距的1~2倍^[18]。如图1(a)所示, 3个2×2 OC组成了一个双环子腔滤波器。3个OC在2050 nm波长下的耦合比均为50:50。子环腔1由 L_1 、 L_2 和 L_4 组成, 子环腔2由 L_3 组成, 其中, L_1 ~ L_4 是耦合器的尾纤长度。子环腔1和子环腔2的长度分别为1.82 m和1.8 m。由于两者之间的腔长差远小于单个子环腔腔长, 可根据公式进行计算^[19]:

$$R_{FS} = c/(n\Delta L), \quad (1)$$

其中 $c=3\times 10^8$ m/s为真空中的光速, $n=1.44$ 为有效折射率, ΔL 为子环腔1和子环腔2的长度差, 可得滤波器的有效FSR为10.4 GHz。UFBG的3 dB带宽为0.18 nm, 对应的频率范围为12.8 GHz。此时双环复合子腔滤波器的有效FSR大于0.5倍的UFBG反射带宽, 满足条件一。大于滤波器的有效FSR, 满足选模条件。主环腔的长度为13.7 m, 根据公式^[16]:

$$R_{FS} = c/(nL), \quad (2)$$

可得对应的纵模间隔为15.2 MHz, 其中 L 为主腔长度。滤波器的通带带宽可根据以下公式进行计算^[20]:

$$\Delta\nu = \frac{c\delta}{2\pi n(L_1 + L_2 + L_4)}, \quad (3)$$

其中 $L_1+L_2+L_4$ 表示复合子腔中最长的子环腔长度, 这决定了复合子腔滤波器的最小通带带宽。此外, $\delta=\ln(I_i/I_o)$ 表示光在子环腔1中传输一周后的损耗, 其中 I_i 和 I_o 分别为输入和输出光强度。 δ 是单程损耗, ~ 1.17 。根据计算, 滤波器的主通带3 dB带宽为21.4 MHz, 保证了在激光腔内只有单一纵模振荡。

3 结果与讨论

793 nm的泵浦源输出功率被设置为1.6 W。图2(a)所示为泵浦功率达到1.6 W时的激光输出光谱。由图2(a)可以看出, 输出激光的中心波长为2048.69 nm, OSNR为71.82 dB。以5 min的时间间隔记录激光光谱数据, 可以看到1 h内激光的输出功率和中心波长无明显波动。图2(b)为60 min内记录的13组数据的波长和功率波动曲线, 最大波长波动为0.03 nm, 最大功率波动为0.76 dB。结果表明, 提出的TDFL可以在60 min的测量时间内稳定工作。

输出激光的射频频谱如图3(a)所示。可以看出, 在0~100 MHz扫描范围内无明显拍频信号。对输出激光的频率特性进行连续1 h的监测, 结果表明单波长激光器在SLM状态下运行良好。图3(b)、(c)分别为输出激光在0~500 MHz和0~1 GHz范围内的射频频谱。为了进一步验证双环子腔滤波器的模式抑制特性, 将其从激光器谐振腔中移除并用相同长度的单模光纤代替, 扫描记录实验结果如图3(d)所示。在0~100 MHz频谱范围内可以观测到明显的拍频信号, 模式间隔为

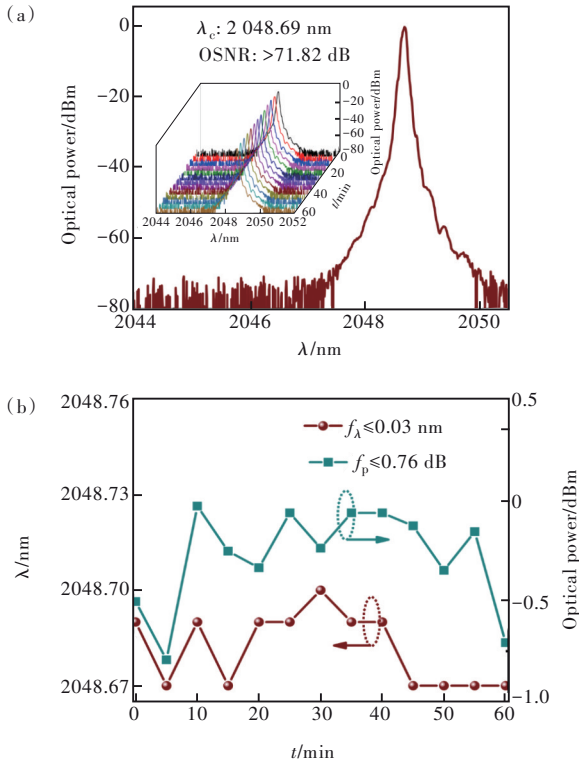


图 2 (a)泵浦功率为 1.6 W 时 TDFL 的输出光谱,插图为 60 min 内重复监测的光谱;(b)激光输出为 2 048.69 nm 波长和功率波动。

Fig.2 (a) The measured optical spectrum of the proposed TDFL with a pump power of 1.6 W. Inset is the spectra repeatedly monitored within 60 min. (b) Fluctuations of the wavelength and power at 2 048.69 nm.

15.2 MHz,与公式(2)的计算结果吻合。此外,实验中还记录了移除双环子腔滤波器后激光器在 0~1 GHz 间存在的大量拍频信号,如图 3(e)所示。与图 3(c)相对比,进一步验证了该滤波器卓越的 SLM 选择能力。

RIN 可以在频域上表征激光器的输出功率波动特性,是衡量激光器输出特性的重要指标。图 4 为 0~5 MHz 频带范围内的 RIN 谱,分辨率带宽 (Resolution bandwidth, RBW) 为 10 kHz,频率超过 0.5 MHz 时该激光器的 RIN 值稳定在 -127.81 MHz,满足干涉型光纤传感激光器的应用需求^[21]。其中,插图给出的是测量范围 0~500 kHz、RBW 为 100 Hz 的测量结果。在 26 kHz 处出现强度为 -90 dB/Hz 的弛豫振荡峰,这是由泵浦功率波动、腔内损耗、机械振动、热扰动引起的^[22]。此外,还监测到了部分由外部干扰引起的噪声峰。

激光线宽是 SLM 光纤激光器的重要指标,采用基于 3×3 OC 的非平衡迈克尔逊干涉仪对输出

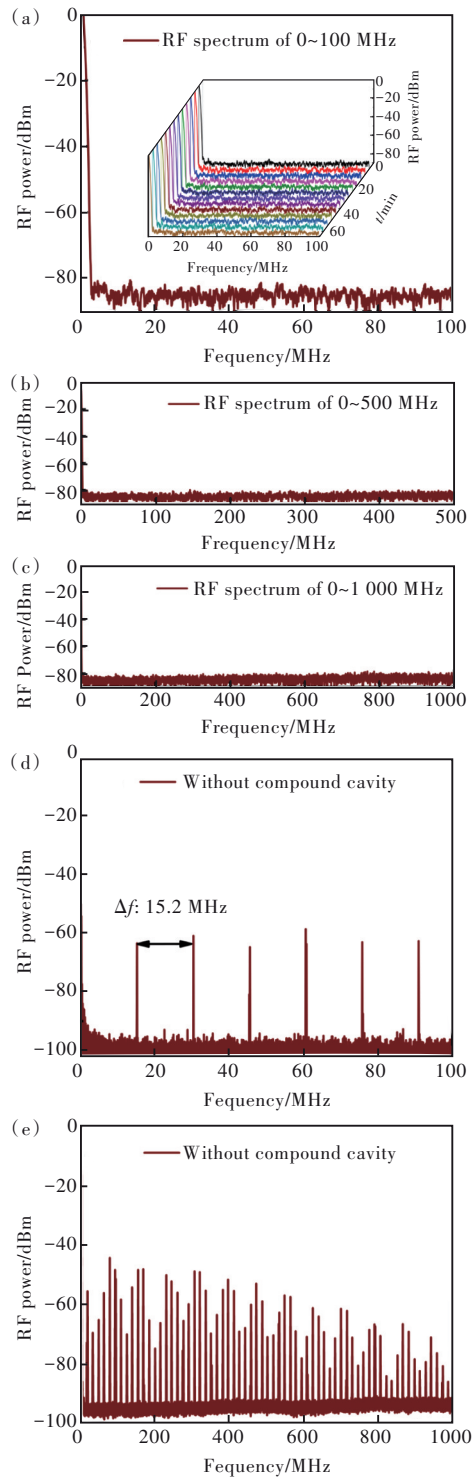


图 3 信号分析仪在 0~100 MHz, RBW 为 500 kHz(a), 0~500 MHz(b), 0~1 GHz(c) 范围的拍频结果;腔内不含双环复合子腔滤波器时, 0~100 MHz(d) 和 0~1 GHz(e) 范围内的拍频结果。

Fig.3 RF spectrum measured by the signal analyzer in the ranges of 0~100 MHz with an RBW of 500 kHz(a), 0~500 MHz(b), and 0~1 GHz(c). RF spectrum of the main cavity without the double-ring cavity filter in the ranges of 0~100 MHz(d) and 0~1 GHz(e).

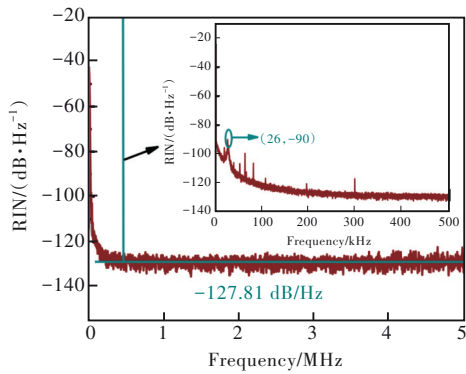


图 4 在 0~5 MHz 频率范围内, RBW 为 10 kHz 时的 RIN 谱, 插图为 0~500 kHz 时 RBW 为 100 Hz 的 RIN 谱。

Fig.4 RIN spectrum of the laser within the frequency range of 0~5 MHz with a 10 kHz RBW. The inset shows the same measurement at 0~500 kHz using an RBW of 100 Hz.

激光的频率噪声进行测量^[23]。基于 β -分割线原理计算了不同测量时间下的激光线宽, 结果如图 5 所示^[24]。不同积分时间(0.001, 0.01, 0.1, 1 s)下的激光线宽分别为 7.719 6, 27.460 5, 98.704 9, 695.592 5 kHz。测量时间为 0.001 s 时的激光线宽值为 $\sim 7.719 6$ kHz。随着测量时间增加, 激光器线宽值逐渐增大, 这是由环境振动或低频信号干扰产生的技术噪声引起的^[25]。此外, 泵浦长时间运行热效应累积会导致光纤温度过高, 使激光器低频热噪声增加^[26-27]。

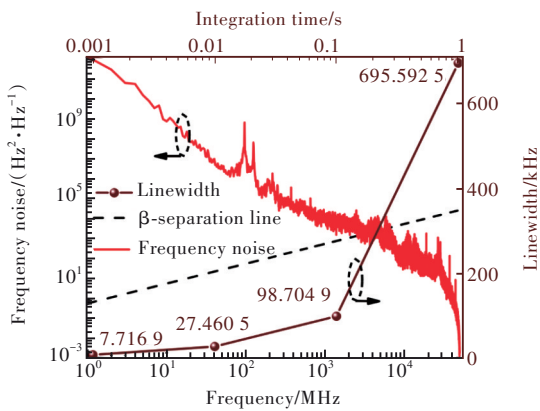


图 5 激光器的频率噪声功率谱密度以及不同积分时间下的线宽

Fig.5 Frequency noise power spectral density of the proposed laser and the linewidth at different integration time

为了进一步研究激光的输出功率特性, 在耦合器的 10% 输出端口使用功率计(Laserpoint)对输出功率进行测量。图 6 为输出功率随泵浦功率增加的变化曲线。当泵浦功率超过阈值功率

(1.6 W) 时, 输出功率呈现出线性变化趋势。对相同泵浦功率下的输出激光功率进行三次重复测量并计算出平均值。可以看出, 输出功率未达到饱和, 这表明输出功率可以随着泵浦功率的增加进一步提高。然而, 泵浦功率的持续增加会对光学元件造成热损伤。因此, 泵浦功率达到 6 W 时便未再继续提高, 此时输出功率为 96.3 mW, 平均斜率效率为 1.71%。掺铒光纤和单模光纤熔接时由于尺寸不匹配引起的模场失配损耗以及滤波器中耦合器 50:50 的耦合比造成的损耗会使激光器的斜率效率降低。

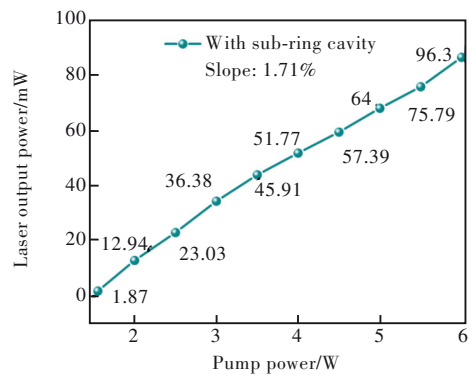


图 6 不同泵浦功率下激光器的输出功率变化

Fig.6 Output power variation of the laser with different pump powers

使用不同技术作用于 UFBG, 可对其输出中心波长进行调谐。常见的技术手段有对光栅施加轴向应力^[28]、对光栅施加微弯^[29]、调节光栅的温度^[30]、使用游标效应^[31]等。相比于其他方法, 对光栅上施加轴向应力操作简单, 便于精准控制调谐范围。固定微位移平台的左侧旋钮, 调节右侧旋钮使位移台向右侧移动, 在水平方向上对光栅施加应力。图 7 为 2 048.45~2 053.55 nm 波段的激

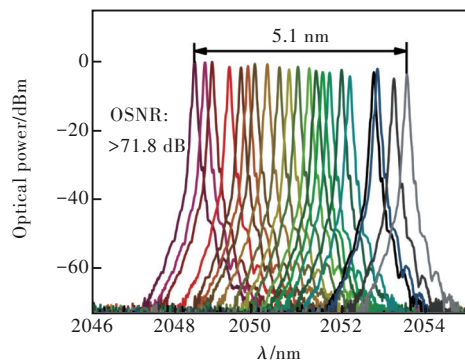


图 7 波长可调范围为 ~ 5.1 nm 的激光器光谱

Fig.7 The spectrum of the laser with a wavelength tunable range of ~ 5.1 nm

光输出光谱,连续调谐范围可达到 5.1 nm。波长调谐范围内激光的 OSNR >71.82 dB。然而,考虑到光栅裸纤的脆弱性和可重复使用性,不再对其继续增加应力。

将本文提出的 SLM TDFL 与之前报道的窄线宽激光器进行比较,如表 1 所示。由于 2 050 nm 波段的研究较少,因此引入了 1 940 nm 波段的激光器进行比较。与文献[13]、[32-33]、[35-36]

相比,输出激光的 OSNR 较高。这可能是实验中采用了较高的泵浦功率所致。功率波动与文献[33]的波动相差不大,且低于文献[35-36]中的激光功率波动。在积分时间为 0.001 s 下,获得的线宽低于文献[13]、[33]、[35]的线宽,这主要是由于滤波器具有良好的纵模选择特性。进一步调节微位移平台,获得了高于文献[33-34]的调谐范围。

表 1 基于不同技术的单纵模掺铽光纤激光器参数比较

Tab.1 Parameter comparison of SLM TDFL based on different techniques

Reference	Wavelength/nm	Maximal power fluctuation/dB	OSNR/dB	Linewidth	Tunable range
[13]	1 957.24	NA	60.00	20 kHz	NA
[32]	1 955.00	0.400	55.00	NA	7.00 nm
[33]	1 923.44	0.700	25.00	<9.1 MHz	2.70 nm
[34]	~2 050.00	0.560	72.11	9 kHz	4.13 nm
[35]	1 940.56	1.464	55.80	14.194 kHz	NA
[36]	2 048.40	0.910	35.60	3.7 kHz	NA
This work	2 048.69	0.760	71.82	7.719 6 kHz	5.10 nm

4 结 论

本文提出一种基于双环复合子腔滤波器的 SLM TDFL,谐振腔长为 13.7 m,纵模间隔为 15.2 MHz,有效保证了在双环子腔滤波器主通带带宽内实现激光 SLM 运行。在泵浦功率为 1.6 W 时,实现了稳定的高 OSNR(>71.82 dB)单波长窄线宽激光输出。60 min 内,波长抖动和功率抖动分别小于 0.03 nm 和 0.76 dB。分别在 0~100 MHz、0~500 MHz 和 0~1 GHz 三个频率范围内对射频信号进行了频率扫描,未观测到明显的拍频

信号。采用直接测量法得到的激光 RIN 值为 -127.81 dB/Hz。利用非平衡迈克尔逊干涉仪线宽测量系统对输出线宽进行表征,0.001 s 测量时间下的激光线宽为 7.719 6 kHz。提出的 SLM TDFL 作为放大系统的种子源在高分辨率分子光谱学、干涉型光纤传感等领域具有潜在的应用价值。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230047>.

参 考 文 献:

- [1] MCCOMB T S, SUDESH V, SHAH L, *et al.* Widely tunable (>100 nm) continuous-wave narrow-linewidth high-power thulium fiber laser [C]. *Proceedings of SPIE 7193, Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices, San Jose*, 2009: 404-411.
- [2] MOULTON P F, RINES G A, SLOBODTCHIKOV E V, *et al.* Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling [J]. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 2009, 15(1): 85-92.
- [3] EHRENREICH T, LEVEILLE R, MAJID I, *et al.* 1 kW, all-glass Tm: fiber laser [C]. *Proceedings of SPIE 7580, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications, San Francisco*, 2010: 1-16.
- [4] HENDERSON S W, SUNI P J M, HALE C P, *et al.* Coherent laser radar at 2 μ m using solid-state lasers [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1993, 31(1): 4-15.

- [5] YU C X, AUGST S J, REDMOND S M, *et al.* Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [6] PASSY R, GISIN N, VON DER WEID J P, *et al.* Experimental and theoretical investigations of coherent OFDR with semiconductor laser sources [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(9): 1622-1630.
- [7] KWEE P, BOGAN C, DANZMANN K, *et al.* Stabilized high-power laser system for the gravitational wave detector advanced LIGO [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(10): 10617-10634.
- [8] ZYSKIND J L, MIZRAHI V, DIGIOVANNI D J, *et al.* Short single frequency erbium-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28(15): 1385-1387.
- [9] ZHANG K, KANG J U. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(18): 14173-14179.
- [10] YAO Y, CHEN X F, DAI Y T, *et al.* Dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a simple linear cavity and its application in microwave generation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18(1): 187-189.
- [11] CHENG X P, SHUM P, TSE C H, *et al.* Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating Fabry-Pérot etalon [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, 20(12): 976-978.
- [12] 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 Photon. Technol. Lett.*, 2019, 31(15): 1241-1244.
- [13] YIN T C, SONG Y F, JIANG X G, *et al.* 400 mW narrow linewidth single-frequency fiber ring cavity laser in 2 μm waveband [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(11): 15794-15799.
- [14] LI D Y, FENG T, SUN W W, *et al.* Eight-wavelength-switchable narrow linewidth erbium-doped fiber laser based on cascaded superimposed high-birefringence fiber bragg grating [J]. *Electronics*, 2022, 11(22): 3688-1-12.
- [15] 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]. *Opt. Express*, 2021, 29(20): 31179-31200.
- [16] LEMIEUX J F, BELLEMARE A, LATRASSE C, *et al.* 100 GHz frequency step-tunable hybrid laser based on a vernier effect between a Fabry-Perot cavity and a sampled fiber Bragg grating [C]. *Proceedings of Advanced Semiconductor Lasers and Their Applications*, Santa Barbara, 1999: 186.
- [17] 林琳. 793 nm 泵浦铥掺杂双包层光纤激光器研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
LIN L. *Research on Doubled-clad Tm³⁺-doped Fiber Laser Pumped By 793 nm LD* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [18] 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]. *Opt. Express*, 2019, 27(25): 36662-36679.
- [19] ZHANG J L, LIT J W Y. All-fiber compound ring resonator with a ring filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(7): 1256-1262.
- [20] SVELTO O. *Principles of Lasers* [M]. New York: Springer, 2010.
- [21] CRANCH G A. Frequency noise reduction in erbium-doped fiber distributed-feedback lasers by electronic feedback [J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(13): 1114-1116.
- [22] TAN T Y, YANG C S, WANG W W, *et al.* Ultralow-intensity-noise single-frequency fiber-based laser at 780 nm [J]. *Appl. Phys. Express*, 2020, 13(2): 022002-1-6.
- [23] HAN W G, YAN F P, FENG T, *et al.* Wavelength-switchable single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser with sampled fiber Bragg grating [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 62212-62218.
- [24] DI DOMENICO G, SCHILT S, THOMANN P. Simple approach to the relation between laser frequency noise and laser line shape [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(25): 4801-4807.
- [25] 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 Photon. J.*, 2022, 14(1): 1-8.
- [26] FOSTER S, CRANCH G A, TIKHOMIROV A. Experimental evidence for the thermal origin of $1/f$ frequency noise in erbium-doped fiber lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79(5): 053802-1-7.
- [27] FOSTER S. Low-frequency thermal noise in optical fiber cavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2012, 86(4): 043801-1-8.
- [28] LIU S, YAN F P, PENG W J, *et al.* Tunable dual-wavelength thulium-doped fiber laser by employing a HB-FBG [J].

- IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2014, 26(18): 1809-1812.
- [29] DURÁN-SÁNCHEZ M, ÁLVAREZ-TAMAYO R I, POSADA-RAMÍREZ B, *et al.* Tunable dual-wavelength thulium-doped fiber laser based on FBGs and a Hi-Bi FOLM [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2017, 29(21): 1820-1823.
- [30] WANG T X, YAN Z J, MOU C B, *et al.* Narrow bandwidth passively mode locked picosecond Erbium doped fiber laser using a 45° tilted fiber grating device [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(14): 16708-16714.
- [31] ZHANG L N, YAN F P, FENG T, *et al.* Wavelength-tunable thulium-doped fiber laser with sampled fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2019, 120: 105707-1-5.
- [32] WANG T S, MA W Z, ZHANG P, *et al.* Multi-wavelength narrow linewidth thulium-doped fiber laser operating at 1.9 μm using a tunable Sagnac fiber period filter [J]. *J. Opt.*, 2015, 44(3): 210-214.
- [33] YANG W, LU P, WANG S, *et al.* A novel switchable and tunable dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser at 2 μm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2016, 28(11): 1161-1164.
- [34] CHENG D, YAN F P, FENG T, *et al.* Six-wavelength-switchable SLM thulium-doped fiber laser enabled by sampled FBGs and 3 \times 3 coupler based dual-ring compound cavity filter [J]. *IEEE Photon. J.*, 2022, 14(2): 1515908-1-8.
- [35] 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]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(9): 1419-1426. (in Chinese)
- [36] YANG D D, YAN F P, FENG T, *et al.* Three-wavelength-switchable narrow linewidth thulium-doped fiber laser enabled by a compound-cavity filter and a sampled fiber Bragg grating [J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61(35): 10374-10379.



关彪(1991-),男,山西兴县人,博士研究生,2014年于北京交通大学获得硕士学位,主要从事光纤激光器、光纤传感器及其应用等方面的研究。
E-mail: 15111008@bjtu.edu.cn



冯亭(1986-),男,河北张家口人,博士,教授,2014年于北京交通大学获得博士学位,主要从事光纤激光、光纤传感器及其应用等方面的研究。
E-mail: wlxft@hbu.edu.cn



延凤平(1966-),男,山西兴县人,博士,教授,1996年于北方交通大学获得博士学位,主要从事光纤激光器、光纤传感器、光纤通信、基于太赫兹超材料等方面的研究。
E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn