

基于全光纤拉锥滤波结构的波长可切换掺铒光纤激光器

孙明星

(洛阳市质量计量检测中心, 河南 洛阳 471003)

摘要:针对波长可切换光纤激光器存在调谐精度不高的问题, 提出并设计了一种基于全光纤拉锥干涉滤波结构的掺铒光纤激光器, 采用熔接机对多模光纤进行熔融拉锥处理, 制备光纤马赫-曾德尔(MZ)干涉结构, 所形成的周期性能量分布用于实现掺铒光纤激光器波长灵活可调谐输出。实验结果表明: 光纤滤波器周期为 0.8 nm, 激光器工作阈值为 58 mW, 在 1573.45~1574.59 nm 的 L 波段内实现了单波长可调谐激光输出, 波长间隔最小为 0.11 nm; 并通过调节偏振控制器, 实现了双波长激光可切换输出。在 10 min 的稳定性测试实验中, 没有出现明显的波长漂移。

关键词: 光纤激光器; 光纤干涉; 掺铒光纤; 光纤拉锥; 多模光纤

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)09-0037-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Wavelength switchable erbium-doped fiber laser based on all fiber taper filter structure

SUN Mingxing

(Luoyang Quality Measurement and Testing Center, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: In order to solve the problem of low tuning accuracy in wavelength switchable fiber laser, an erbium-doped fiber laser based on all fiber taper interference filter structure is proposed and designed. The fiber Mach-Zehnder(MZ) interference structure is fabricated by melting the multimode fiber with a fusion splicer. The periodic energy distribution is used to realize the wavelength flexibility of erbium-doped fiber laser tunable output. The experimental results show that the period of the fiber filter is 0.8 nm, the laser operating threshold is 58 mW, the single wavelength tunable laser output is realized in the L-band of 1573.45~1574.59 nm, and the minimum wavelength interval is 0.11 nm; the dual wavelength laser switchable output is realized by adjusting the polarization controller. In the 10 min stability test, there is no obvious wavelength drift.

Key words: fiber laser; fiber interferometer; erbium-doped fiber; fiber taper; multimode fiber

0 引言

光纤激光器具有环境适应性强、工作寿命长、相干性好和激光线宽窄等特点, 被广泛应用于光纤通信、光纤传感、成份分析、雷达探测和高功率激光等领域^[1-3]。其中, 多波长可调谐光纤激光器具有波长灵活输出、高信噪比和稳定性高等优势, 应用于微波信号产生、密集波分复用、光谱探测、生物医疗和激光通信等

方面^[4-6], 已经成为光纤激光领域的研究热点之一。

国内外研究机构对实现波长可调谐光纤激光输出开展了研究, 并且取得了较大进展。2015年, 曹晔等人^[7]设计了基于 Sagnac 环与光纤马赫-曾德尔(MZ)结构级联滤波的掺铒光纤激光器, 实现了间隔 2.2 nm 的多波长可调谐激光输出。2017年, Khaleel W A 等人^[8]设计了一种基于非线性光子晶体光纤的 MZ 滤波器, 该滤波器实现了三波长激光可调谐输出, 输出激光 3 dB, 线宽为 0.03 nm; Liu S 等人^[9]提出了一种基于非线性环形镜结构的双波长可调谐掺铒光纤激光器, 实现了波长最大间隔为 11.35 nm 的双波长激光输出, 激光信噪比高于 47 dB。2018年, 王天枢等人^[10]提出并实现了基于光纤 Fabry-Perot(FP)滤波器的 2 μm 波段掺铒光纤激光器, 结合掺铒光纤实现了 1855~2050 nm

收稿日期: 2020-04-21。

作者简介: 孙明星(1981—), 男, 河南平顶山人, 硕士, 工程师, 研究生毕业于兰州理工大学机械学院, 现工作于洛阳市质量计量检测测试中心, 主要从事光学仪器的计量校准及实验工作, 并对光纤传感器方面的检测进行研究, 参与中心的精密仪器、光纤传感测试实验室的建立。



孙明星:基于全光纤拉锥滤波结构的波长可切换掺铒光纤激光器

光谱范围的单波长激光可调谐输出;宋秋艳等人^[11]设计了一种基于锥形光纤的波长可调谐掺铒光纤激光器,实现了双波长可调谐激光输出,双波长最小间隔 1.48 nm;Li N 等人^[12]设计了基于多模光纤 MZ 干涉滤波结构的双波长可调谐掺铒光纤激光器,实现了双波长最大间隔 58.5 nm 的激光输出;Luo X 等人^[13]提出并设计了一种基于光纤 Michelson 干涉结构的多波长掺铒光纤激光器,实现了波长间隔小于 0.7 nm 的波长可调谐激光输出;Ibarra-Escamilla B 等人^[14]提出了一种基于可调谐光纤布喇格光栅的全光纤掺铒光纤激光器,实现了 2 μm 波段的双波长可调谐激光输出,激光功率漂移小于 0.07 mW。2019 年,Salim M A M 等人^[15]提出了一种基于光纤细锥干涉滤波结构的环形腔掺铒光纤激光器,在 1560~1565 nm 光谱范围内实现了三波长可调谐激光的稳定输出,信噪比高于 42 dB;Peng W J 等人^[16]设计了一种基于多模光纤与保偏光纤拼接的全光纤马赫-曾德尔(MZ)干涉结构,并基于该干涉结构结合保偏光纤作为滤波器实现了偏振可控的双波长激光可调谐输出,边模抑制比达到 45 dB;Liu X D 等人^[17]设计了一种基于光纤 Sagnac 干涉滤波结构的双波长可调谐环形腔掺铒光纤激光器,单波长调谐范围为 17.9 nm,信噪比高于 38 dB,功率漂移小于 0.94 dB。

综上所述,为了实现波长可调谐的光纤激光输出,通常在激光器谐振腔中需要插入特殊的光学器件(例如:特种光纤光栅、光子晶体光纤、高双折射光纤、光纤 Sagnac 结构或采用光纤非线性结构),但这些方案增加了系统的复杂程度和激光器腔内损耗。此外,所报道的光纤激光器的工作波长范围大多集中在 C 波段(1520~1560 nm)光谱范围,然而随着通信波段的不断扩展,L 波段工作的波长可调谐激光器已经逐渐成为研究热点。另外,目前报道的激光波长可调谐间隔通常较宽,难以实现精密的波长调谐。因此,上述因素不仅限制窄线宽光纤激光器的应用波段范围,同时难以获得精密的波长可调谐激光输出。本文采用多模光纤拉锥技术制备光纤 MZ 干涉结构,设计一种基于全光纤 MZ 滤波结构的波长可调谐掺铒光纤激光器。

1 系统设计原理

本文设计的掺铒光纤激光器系统原理如图 1 所示。该激光器由泵浦源、波分复用器、光纤环行器、全反镜、掺铒光纤、偏振控制器以及 MZ 干涉结构构成。光纤环行器和光纤全反镜构成激光器谐振腔的两端,

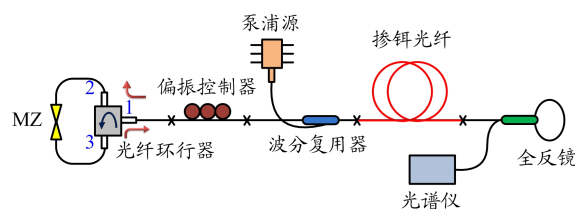


图 1 掺铒光纤激光系统原理

其中光纤环行器的端口 2 和端口 3 相对熔接构成反射镜,入射光由端口 1 注入,先后经过端口 2 和端口 3 再从端口 1 输出,起到反射镜的效果,构成激光器谐振腔的一端,光纤环行器的工作波段为 1500 nm。光纤全反镜将 1 支分光比为 50:50 的光纤耦合器的 2 个输出端相对熔接制备,构成了激光器谐振腔的另一端。泵浦光通过波分复用器耦合进入掺铒光纤,掺铒光纤作为激光器的增益介质为信号光提供放大,环行器和反射镜组成激光器的谐振腔。光纤锥结构起到 MZ 滤波作用,传输光由环行器端口 1 注入进滤波器进行滤波后再从端口 1 出射进入谐振腔起到能量调制的作用。偏振控制器用于调节激光器腔内损耗实现激光波长可调谐输出。

全光纤 MZ 干涉结构如图 2 所示,在单模光纤纤芯中传输的入射光经过熔接点 1 耦合进入多模光纤纤芯,在锥区处被分为 2 路光:一路在多模光纤纤芯中传输;另一路在锥区外部传输。最终 2 路光在熔接点 2 处汇合耦合进入单模光纤,在该传输过程中由于 2 路光光程不同,光程差不变,因此满足干涉条件,会产生周期性调制的梳状光谱。

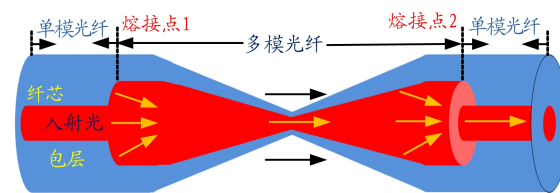


图 2 全光纤 MZ 干涉结构

所设计的 MZ 干涉波长间隔可表示为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n\Delta L} \quad (1)$$

其中, λ 是传输波长, n 是有效折射率, ΔL 表示 2 束光之间的光程差。因此,干涉周期与光程差呈反比关系。

光纤全反镜结构原理如图 3 所示,将分光比为 50:50 的 2x2 光纤耦合器的 2 个输出端相对

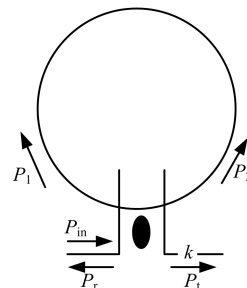


图 3 光纤全反镜原理

熔接,信号光 P_{in} 从耦合器一端输入,经过耦合器后被分为 2 束 (P_1 和 P_2),2 束光沿着逆时针和顺时针方向传输并在耦合区发生相干,反射光 P_r 从信号端口输出,透射光 P_t 从耦合器另一端输出。

反射光 P_r 和透射信号 P_t 由式(2)所示。其中, k 为耦合器分光比,因此,全反镜的反射率 R 和透射率 T 如式(3)所示。当 k 为 0.5 时,可以算出 $R=1, T=0$,此时全反镜具有最高的反射率。

$$\begin{cases} P_r=4k(1-k)P_{in} \\ P_t=(1-2k^2)P_{in} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} R=4k(1-k) \\ T=(1-2k^2) \end{cases} \quad (3)$$

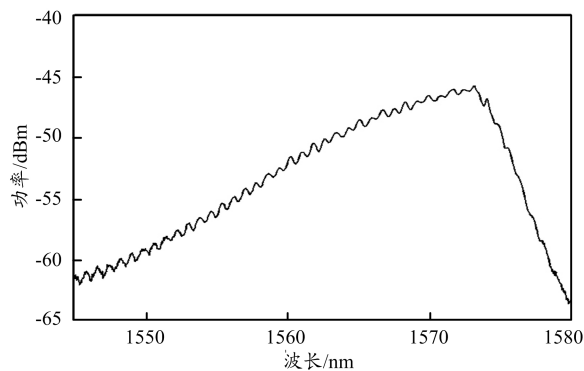
2 实验结果分析

2.1 MZ 干涉结构制备

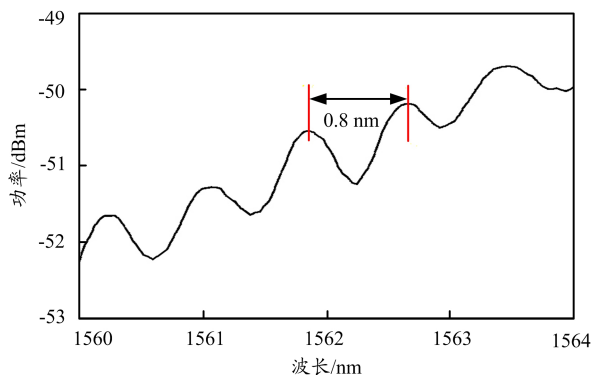
首先,根据光纤 MZ 原理对多模光纤进行拉锥处理制备光纤干涉结构,实验中采用的多模光纤为 Nufern 公司生产的 MM-S105/125-12A 型光纤,纤芯/包层直径为 105/125 μm 。将 2 段单模光纤分别与长度为 2 cm 的 2 段多模光纤熔接。然后,将多模光纤去除涂覆层并用酒精擦拭清洁光纤包层,并用专用光纤切割刀将多模光纤端面切平,再用光纤熔接机将清洁处理后的 2 段多模光纤进行熔融拉锥,形成光纤 MZ 结构。实验采用 Fujikura FSM-60 熔接机制备光纤拉锥结构,拉锥长度为 150 μm ;采用长度为 5 m 的 L 波段掺铒光纤(Nufern,EDFL-980HP)作为增益介质,并选用波长为 980 nm 的泵浦光(Oclaro Co.)对掺铒光纤进行抽运。实验采用光谱仪(Yokogawa,AQ6370)对 MZ 滤波器透射光谱进行采集,采集到的光谱如图 4(a)所示,在 1545~1580 nm 范围内能够观察到明显的干涉现象,其干涉周期为 0.8 nm;1560~1564 nm 光谱范围的光谱细节如图 4(b)所示。

2.2 激光器滤波效果测试

本文根据图 1 搭建激光器,选用长度为 5 m 的掺铒光纤作为增益介质,980/1550 nm 波分复用器用于将信号光耦合进入掺铒光纤,三浆偏振控制器、光纤环行器和光纤全反镜的工作波段均为 1500 nm 波段,尾纤纤芯/包层直径为 9/125 μm 。实验首先测试了未加入滤波器时的激光光谱特性,激光器工作阈值为 56.5 mW,采集到的光谱如图 5 所示,能够观察到明显的模式竞争,此时激光器难以实现稳定的单波长可调谐激光输出。接下来,将制备成功的 MZ 拉锥滤波器熔接到激光器谐振腔中,激光器工作阈值提高



(a) 1545~1580 nm 光谱范围



(b) 1560~1564 nm 光谱范围细节

图 4 光纤 MZ 滤波光谱

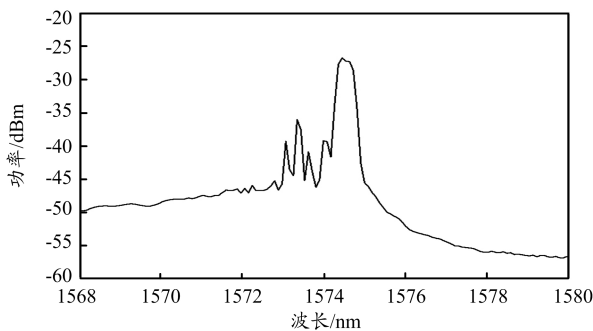
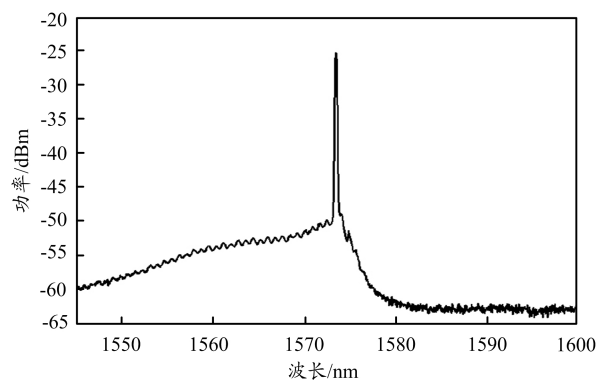


图 5 未加入滤波器时激光光谱

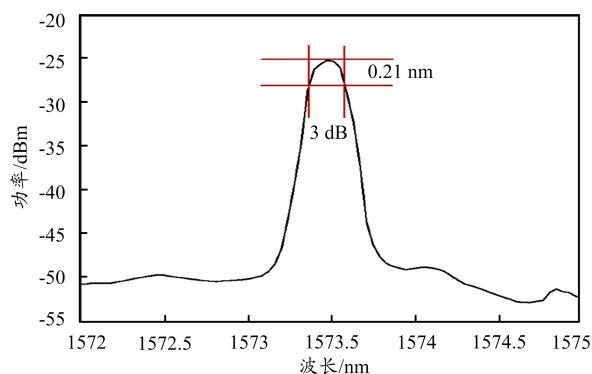
到 58 mW,产生了波长为 1573.49 nm 的单波长激光输出。进一步提高泵浦功率到 100 mW,所采集到 1573.49 nm 单波长激光光谱如图 6(a)所示;激光边模抑制比为 24.8 dB,3 dB 线宽为 0.21 nm,如图 6(b)所示,此时在光谱中能够观察到明显的梳状滤波效果。

2.3 激光器波长可调谐性能测试

实验中,泵浦功率固定在 120 mW,通过调节偏振控制器分别实现 1573.45 nm、1573.56 nm、1573.75 nm、1573.99 nm、1574.11 nm、1574.22 nm、1574.39 nm 和 1574.59 nm 单波长激光可切换输出,所采集到的光谱如图 7(a)所示,边模抑制比优于 19.56 dB,3 dB 线宽

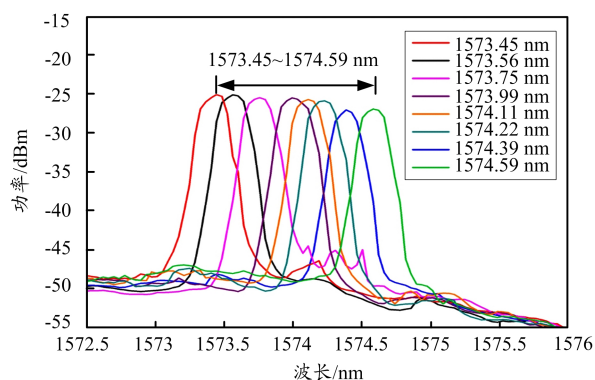


(a) 1545~1600 nm 光谱范围

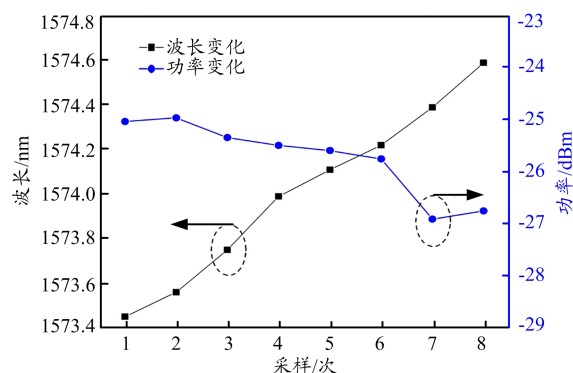


(b) 1572~1575 nm 光谱范围

图6 1573.41 nm 单波长激光输出



(a) 单波长激光输出光谱



(b) 输出波长及功率变化

图7 单波长可调谐激光输出

小于 0.22 nm; 在调谐过程中单波长激光波长和峰值功率变化如图 7(b)所示, 所产生单波长激光最小波长调谐间隔为 0.11 nm, 功率波动变化量低于 1.95 dB。

泵浦功率保持在 100 mW, 通过调节偏振控制器可以达到调整谐振腔内增益损耗的目的, 能够分别实现 1573.79/1574.47 nm; 1573.44/1574.07 nm 和 1573.2/1574.13 nm 3 组不同组合的双波长激光可调谐输出, 双波长间隔小于 0.91 nm, 所采集到的光谱分别如图 8 所示。实验中, 当双波长激光同时产生时, 激光线宽均小于 0.24 nm, 峰值功率差值小于 4.43 dB。

2.4 激光器稳定性测试

实验对单波长激光运转状态下的稳定性进行了测试及分析。当泵浦功率为 100 mW 时, 通过调节偏振控制器获得 1574.03 nm 单波长激光输出, 在室温 26℃ 的条件下对激光的稳定性进行了 10 min 的测试, 其光谱稳定性如图 9(a)所示, 在监测时间内没有观察到明显的波长漂移。通过对实验数据进行分析, 单波长激光功率漂移小于 0.311 dB, 如图 9(b)所示。在监测过程中单波长激光显示出良好的波长及功率稳定性, 在测试时间内没有明显的模式跳变现象出现。

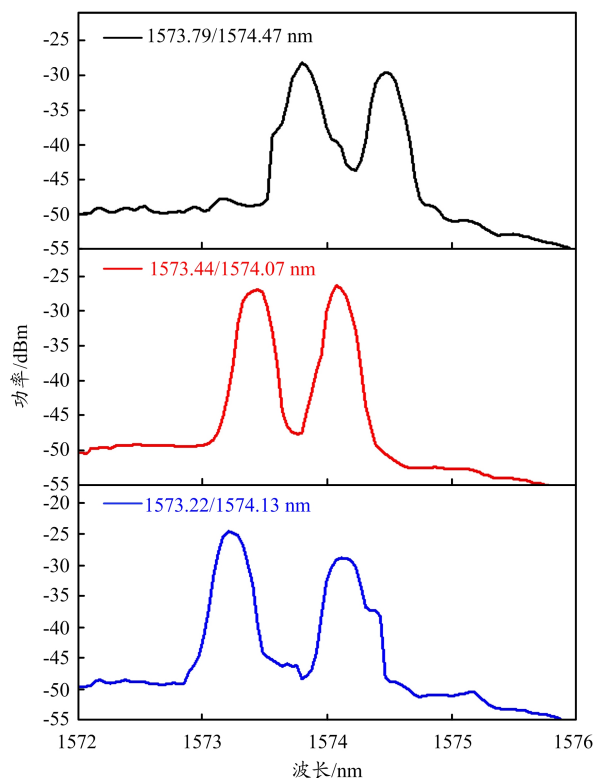
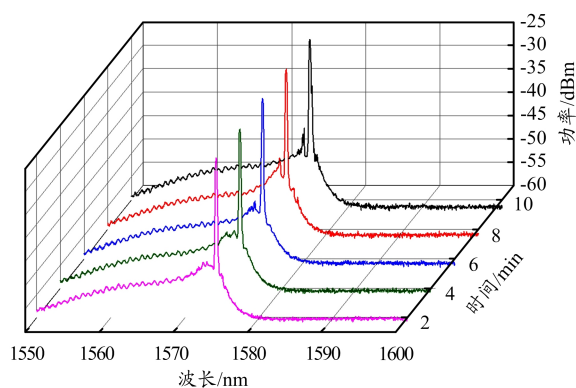
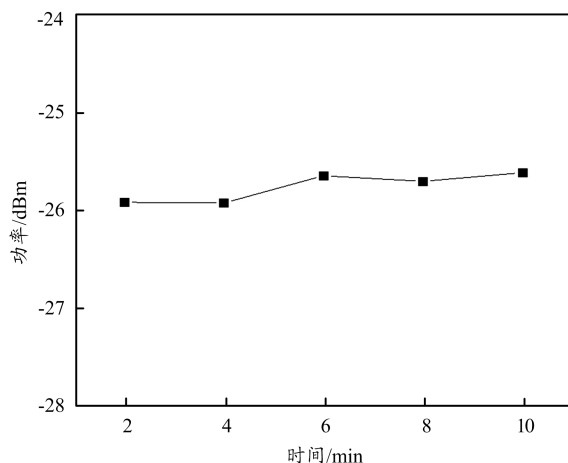


图8 3 组不同组合的双波长激光可调谐输出



(a) 1574.03 nm 激光光谱稳定性



(b) 功率稳定性

图9 单波长激光稳定性

3 结束语

本文提出并设计了一种基于全光纤拉锥结构的波长可调谐光纤激光器,采用光纤熔融拉锥技术制备了锥区长度为 $150\ \mu\text{m}$ 的光纤 MZ 滤波器,并将其作为激光器的调制器件实现了波长可调谐激光输出。所设计激光器能够在 $1573.45\sim 1574.59\ \text{nm}$ 的 L 波段光谱范围内实现单波长激光可切换输出(最小激光波长调谐间隔为 $0.11\ \text{nm}$)和双波长激光灵活可调谐输出,单波长激光运行时输出激光的边模抑制比高于 $19.56\ \text{dB}$, $3\ \text{dB}$ 线宽小于 $0.22\ \text{nm}$ 。在 $10\ \text{min}$ 监测情况下,激光器工作在单波长运转状态时功率波动优于 $0.311\ \text{dB}$,而且没有出现明显的模式跳变现象和波长漂移。所设计的激光器具有结构紧凑、输出稳定、信噪比高和窄线宽的特点,在光纤传感和激光通信方面具有较大的应用前景。

参考文献:

- [1] 周雪芳,倪勇,魏一振. L 波段线形腔多波长掺铒光纤激光器的研究[J]. 光通信技术, 2016, 40(7): 40-42.
- [2] WANG L, SHEN Z K, FENG X H, et al. Tunable single-longitudinal-mode fiber laser based on a chirped fiber Bragg grating [J]. Optics and Laser Technology, 2020. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105775.
- [3] WANG D D, SONG H Q, LONG X, et al. Switchable and tunable multi-wavelength emissions in pulsed ytterbium fiber lasers with black phosphorus saturable absorbers and polarization-maintaining fiber Bragg gratings [J]. Optics Communications, 2019, 452: 373-379.
- [4] 于大海,姜丹,李楠,等. 近红外可调谐光纤激光器的医学多组分检测研究[J]. 激光杂志, 2019, 40(8): 176-180.
- [5] 张鹏程,李陈,胡伟翔,等. 脉宽可调谐方波脉冲掺铒光纤激光器[J]. 光通信技术, 2019, 43(10): 29-31.
- [6] 于秀明,丁云飞,马万卓,等. $2.1\ \mu\text{m}$ 可调谐多波长掺铒光纤激光器[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 500-504.
- [7] 曹峰,陈磊,鹿楠,等. 基于 Sagnac 环和 M-Z 级联的可调谐掺铒光纤激光器[J]. 光电子·激光, 2015, 26(1): 9-14.
- [8] KHALEEL W A, AL-JANABI A H. Erbium-doped fiber ring laser with wavelength selective filter based on non-linear photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. Laser Physics, 2017. DOI: 10.1088/1555-6611/aa8287.
- [9] LIU S, YAN F P, TAN S Y, et al. Stability wavelength-spacing-tunable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. Optical and Quantum Electronics, 2017. DOI: 10.1007/s11082-016-0863-9.
- [10] 王天枢,王诚博,马万卓,等. $2\ \mu\text{m}$ 波段宽带可调谐全光纤激光器[J]. 应用光学, 2018, 39(4): 569-573.
- [11] 宋秋艳,陈根祥,田恺. 基于锥形光纤的可调谐光纤激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55: 286-291.
- [12] LI N, CUI L H, LIU J X, et al. Tunable dual-wavelength Er^{3+} -doped fibre laser based on a single multimode interference filter [J]. Laser Physics, 2018. DOI: 10.1088/1555-6611/aae27f.
- [13] LUO X, TUAN T H, SAINI T S, et al. Spacing-adjustable multi-wavelength erbium-doped fiber laser using a fiber Michelson interferometer [J]. Applied Physics Express, 2018. DOI: 10.7567/APEX.11.082501.
- [14] IBARRA-ESCAMILLA B, DURÁN-SÁNCHEZ M, ÁLVAREZ-TAMAYO R I, et al. Tunable dual-wavelength operation of an all-fiber thulium-doped fiber laser based on tunable fiber Bragg gratings [J]. Journal of Optics, 2018. DOI: 10.1088/2040-8986/aad25b.
- [15] SALIM M A M, ALI N, AZZUHRI S R, et al. Switchable erbium-doped fiber laser (EDFL) using non-adiabatic microfiber [J]. Optical Fiber Technology, 2019. DOI: 10.1016/j.yofte.2019.101967.
- [16] PENG W J, LIU P. Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter [J]. Acta Physica Sinica, 2019. DOI: 10.7498/aps.68.20190297.
- [17] LIU X D, LOU S Q, TANG Z J, et al. Tunable dual-wavelength ytterbium-doped fiber ring laser based on a Sagnac interferometer[J]. Optics and Laser Technology, 2019(116): 37-42.