

# 基于特殊子环腔单纵模窄线宽掺铥光纤激光器

王雪, 延凤平\*, 韩文国

北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 提出并实验验证了一种稳定的单纵模窄线宽环形腔掺铥光纤激光器, 通过使用特殊的子环腔和自制的光纤布拉格光栅, 实现了稳定的单纵模激射和窄线宽输出。子环腔由 3 个互相连接的光耦合器组成, 用来抑制密集的多纵模和跳模。采用自制的光纤布拉格光栅, 作为窄线宽波长滤波器, 最终实现了稳定的单纵模激射。实验结果表明, 该激光器在室温下可获得中心波长为 1940.6 nm, 光信噪比为 60 dB 的稳定信号输出。其频率噪声采用基于  $3 \times 3$  光耦合器的自零差技术进行测量。当测量时间为 0.05 s 时, 由频率噪声计算的线宽大约为 8 kHz。

**关键词** 激光器; 掺铥光纤激光器; 子环腔; 单纵模; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0901001

## Single Longitudinal Mode Narrow Linewidth Thulium-Doped Fiber Laser with Special Subring Cavity

Wang Xue, Yan Fengping\*, Han Wenguo

Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** This paper proposes and experimentally tests a stable single longitudinal mode (SLM) narrow linewidth thulium-doped fiber laser by utilizing a special subring cavity and homemade fiber Bragg grating (FBG). The subring cavity comprising three interconnected optical couplers is employed for suppressing the dense multiple longitudinal and hopping modes. The narrow bandwidth wavelength filter, which is composed of the homemade FBG, achieves stable SLM operation. The experimental result shows that the laser can obtain a stable 1940.6 nm output with an optical signal-to-noise ratio (OSNR) of 60 dB at room temperature. Its frequency noise is measured using a  $3 \times 3$  optical-fiber coupler with self-homodyne technology. The linewidth, which is calculated from frequency noise, is approximately 8 kHz when measurement time is 0.05 s.

**Key words** lasers; thulium-doped fiber laser; subring cavity; single longitudinal mode; fiber Bragg grating

**OCIS codes** 140.3510; 140.3570

## 1 引言

尽管工作在人眼安全的  $2 \mu\text{m}$  传输波段的单纵模 (SLM) 掺铥光纤激光器 (TDFL) 得到了广泛应用, 但是对于集中在  $2 \mu\text{m}$  波段高质量空间光网络激光信号的研究却很少。因此, 设计和实现  $2 \mu\text{m}$  波段高稳定性的 SLM, 窄线宽 TDFL 对于波分复用 (WDM)、大气探测、医疗, 以及雷达等系统具有重要意义<sup>[1]</sup>。而如何实现 SLM 操作, 抑制密集的多纵模 (MLM) 振荡和跳模现象是当前 SLM 光纤激

光器亟待解决的技术难题<sup>[2-3]</sup>。

通常采用短的线型腔<sup>[4-6]</sup>、可饱和吸收体<sup>[7-11]</sup>、复合腔<sup>[12-13]</sup>, 以及极窄的通带滤波器<sup>[14-15]</sup>等方法实现极窄的线宽和 SLM 操作, 其中复合的子环腔结构因其良好的抑制纵模特性已经成为研究的热点。基于游标效应<sup>[16]</sup>, 通过使用多环腔, 实现了更为有效地自由光谱范围 (FSR)。由两个耦合器<sup>[17-18]</sup>或高质量的三环子环腔 (TR-SC)<sup>[19-20]</sup>组成的复合环滤波器, 使用双环 (主腔环和子腔环) 谐振腔结构, 实现了稳定的 SLM 激射。因此, 在主腔中插入多环子环,

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-04-11; 录用日期: 2019-04-22

基金项目: 国家自然科学基金 (61620106014)、山东省高等学校科技计划项目 (J17KA089)

\* E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

可以有效地增大纵模间隔,减少 MLM 和跳模<sup>[21]</sup>。

本文提出并验证了一个在人眼安全传输的 2 μm波段稳定的 SLM 窄线宽 TDFL,通过使用自制的窄线宽光纤布拉格光栅(FBG)和一个特殊的 TR-SC,实现了稳定的 SLM 输出。仅在频率满足所有环形谐振腔的谐振条件时<sup>[22]</sup>,激光器开始振荡。通过合理地调整 TR-SC 的各个谐振腔长度,实现了光纤激光器 SLM 激光。此外,为了验证所提出的 SLM TDFL 的输出稳定性,进行了长达 100 min的观察,输出功率的最大变化为 0.26 dB,在 1940.6 nm处的中心波长的最大波动小于 0.01 nm,也就意味着在室温下,利用本文方法能获得高质量的 SLM 输出信号。

## 2 实验结构和原理

图 1 为所提出的基于 TR-SC 结构稳定的 SLM 窄线宽 TDFL 结构示意图,激光器由一个作为增益介质的 2.5 m 长的双包层掺铒光纤(吸收系数为 4.5 dB/m)、一个作为抽运的通过一个 793/2000 光纤合束器(FC)的 793 nm 激光器二极管(LD)、一个

偏振控制器(PC)、一个起偏器(polarizer)、一个光环行器(OC)、两个 90:10 的光耦合器(OCP)、两个 99:1 OCPs 和一个自制窄线宽的中心波长为 1940.8 nm的 FBG 组成。主腔的光纤总长约为 13.6 m,光纤合束器与 OCP-1 接入主腔中的光纤长度分别为 1.2 m和 2.3 m,OCP-2 与 OCP-4 接入主环腔中的光纤长度为 1.5 m,PC、起偏器,以及 FBG 中光纤长分别为 2.6 m、1.8 m 和 1.8 m,OC 在主腔部分的长度为 1.7 m。OC 保证了主腔中的单向振荡,使行波方向一致,避免了偏振烧孔效应。起偏器用来调整单偏振状态,将 PC 与起偏器相结合,可以引入偏振依赖损耗,从而抑制纵模和减少跳模。激光信号经过起偏器之后会产生线偏振光,而线偏振光经过光路后偏振态会旋转,当此激光信号再次回到起偏器时,通过调整 PC 来改变光信号的偏振态。只有当偏振态与起偏器的同光轴平行时,损耗最小。不同波长或频率的激光信号在环形腔中经过光路之后偏振态旋转的程度不一样,因此便达到了选频/选模式的效果,而其他的纵模和跳模位置损耗增大,从而更好地抑制其他位置的 MLM 和跳模。

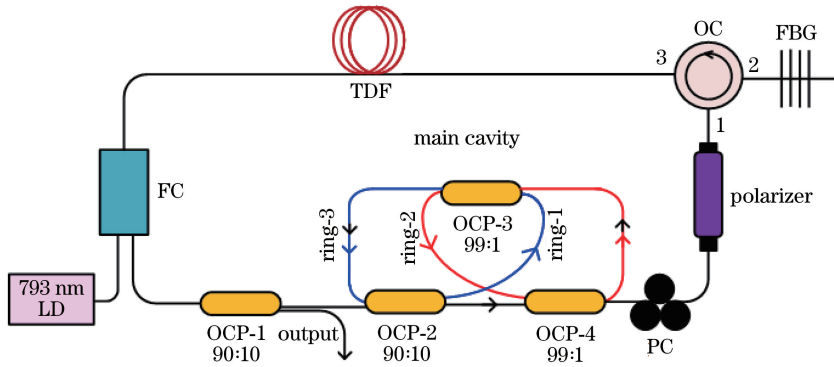


图 1 SLM 光纤激光器的实验结构

Fig. 1 Experimental setup of SLM fiber laser

FBG 作为自制的窄线宽的波长选择器,其传输光谱和反射光谱如图 2 所示。FBG 的中心波长为

1940.8 nm, 3 dB 带宽和反射率约为 0.12 nm 和 88%,也就意味着其带宽窄、反射率高,具有良好的

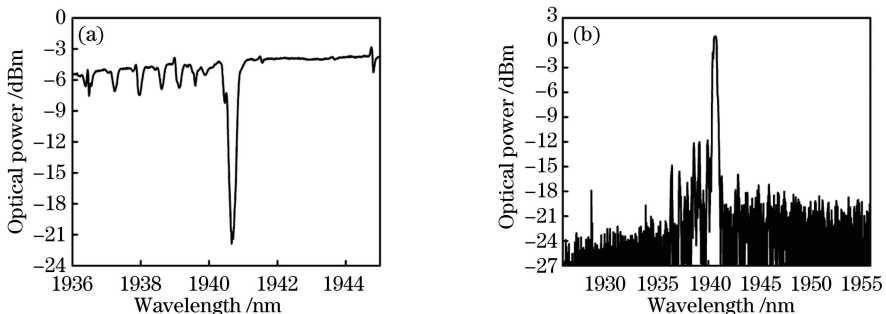


图 2 FBG 的光谱图。(a)传输谱;(b)反射谱

Fig. 2 Spectra of FBG. (a) Transmission spectrum; (b) reflection spectrum

初步滤波效果。对于激光器的输出检测采用的是分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪 (YOKOGAWA AQ6375, OSA) 和带有光电探测器的 Agilent 9010 频谱分析仪 (ESA)。

激光器的输出功率和谐振腔输出的光谱线宽受光纤耦合器的耦合比影响。当输出功率满足要求时,提高光纤耦合器的耦合比或使用耦合比更大的一端作为谐振腔的输入均可起到抑制 MLM 和跳模的作用,从而实现更窄的光谱线宽输出<sup>[23]</sup>。因此,将光纤耦合器 10% 的一端作为激光器输出端,90% 的一端作为主腔的输入端。TR-SC 由 3 个光纤耦合器(两个 99:1 耦合器:OCP-3 和 OCP-4,一个 90:10 耦合器:OCP-2)组成。OCP-2 和 OCP-4 在子环腔中分别保留了 90% 和 99% 的能量。3 个耦合器构成了相互嵌套的环形腔 (ring-1、ring-2、ring-3),长度分别为 0.85, 1.5, 2.9 m, 相应的 FSR 分别为 122, 69, 36 MHz。

从主腔密集的纵模中选择出 SLM 的原理如下:激光器仅在频率同时满足主腔、所有子环谐振腔,以及 FBG 的通频带条件的谐振条件时开始振荡<sup>[20]</sup>。而最终输出的纵模则由 FBG 和 TR-SC 共同滤波得到。FBG 具有极窄的带宽和较好的初步滤波效果。根据游标效应<sup>[24]</sup>,TR-SC 能有效地增加

FSR,这是因为子环的大环和小环会经过数次滤波,对于每一次滤波,更小的边频会被抑制。当腔长选择合理时,纵模间隔将大于最终的谐振波长间隔。此时,除了输出信号,其他的纵模均得到了抑制,从而实现了 SLM 激光。

### 3 实验结果与分析

保持抽运功率在 2.76 W 以下,通过仔细并有效地调整 TR-SC 所有子环腔的腔长,实现了 SLM 窄线宽 TDFL 稳定激射。典型的激光器输出光谱图如图 3(a)所示,其由分辨率为 0.05 nm 的 OSA 所测得。由实验数据可知,输出光谱的激射波长为 1940.6 nm,与 FBG 中心波长相对应。测得输出波长的 3 dB 带宽为 0.018 nm,受限于 OSA 的最小分辨率影响,实际的带宽会更小。SLM 输出的光信噪比 (OSNR) 为 60 dB。当抽运功率为 2.76 W 时,由于光路中光纤的耦合损耗,TDFL 输出激光信号的功率为 0.37 mW。为了验证本文所提激光器的稳定性,对光谱进行了超过 10 次的重复扫描,且每次时间间隔为 10 min,扫描结果如图 3(b)所示。在实验监测期间,保持激光器系统的其他部分不变,未发现明显的输出功率抖动和中心波长偏移,表明在室温下实现了 SLM TDFL 稳定激射。

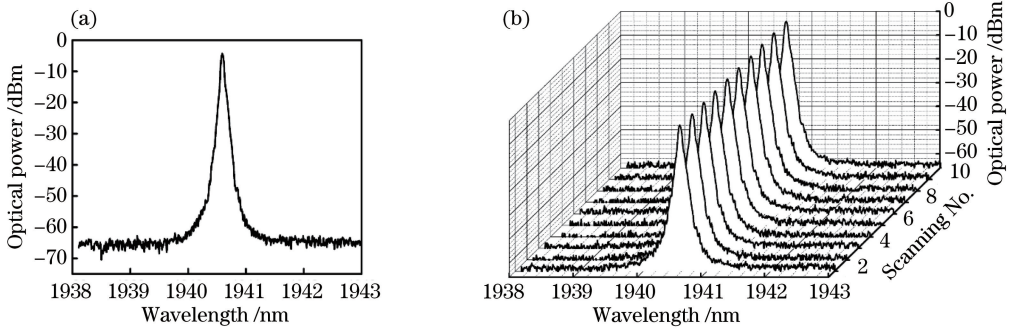


图 3 固定单波长下激射的光谱。(a) 典型光谱;(b) 间隔为 10 min 的 10 次重复 OSA 扫描光谱  
Fig. 3 Optical spectra of lasing at fixed single wavelength. (a) Typical spectrum;  
(b) spectra of 10 repeated OSA scans with interval of 10 min

为了进一步研究输出功率的波动和中心波长的偏移,绘制了输出激光的功率变化和波长偏移量的折线图,如图 4 所示,信号的输出功率抖动小于 0.26 dB,中心波长偏移小于 0.01 nm。在激射的过程中,由于 MLM 振荡和跳模现象的存在,输出信号的功率抖动和波长偏移几乎可以忽略。

为了阐明 SLM 的特性,将激光器的输出注入到光电探测器 (PD, 1 GHz) 中,光信号被转化成电信号,再将转换后的电信号接入 ESA 中,其射频

(RF) 信号由 ESA 检测。图 5 所示为使用分辨率为 10 kHz 的 ESA,在 1 GHz 范围内测得的光纤激光器的 RF 拍频光谱。ESA 的扫描范围远大于两个相邻的纵模间隔。包含所有子环腔和 FBG 的谐振腔主腔的长度约为 13.6 m,相对应基频的纵模频率间隔为 7.6 MHz,在 1 GHz 检测范围内,未检测到明显的拍频 RF 信号,表明 TDFL SLM 激射是稳定的。

使用由 3×3 光纤耦合器组成的非平衡迈克尔孙干涉仪 (MI) 检测频率噪声<sup>[18]</sup>。选择 50 m 长的

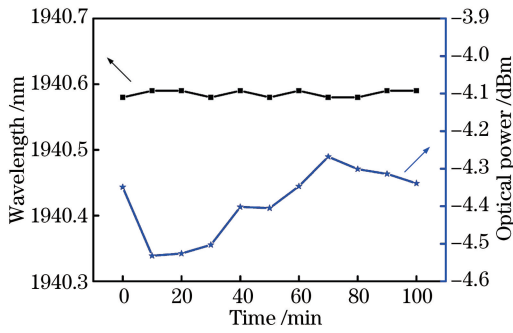


图4 在 1940.6 nm 处 SLM 激光的输出功率和中心波长变化  
Fig. 4 Fluctuations of output power and central wavelength in SLM lasing operation at 1940.6 nm

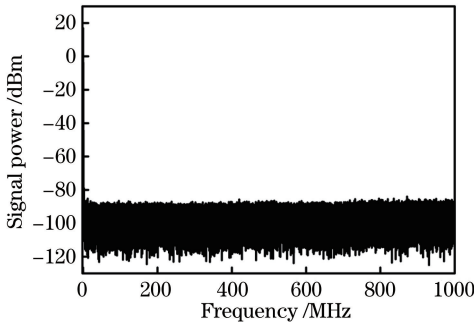


图5 在 0~1 GHz 范围内激光器输出的射频拍频光谱  
Fig. 5 Radio-frequency beating spectrum of laser output in range of 0-1 GHz

光纤作为 MI 的光纤延时线。频率噪声功率谱密度可以由相位噪声功率谱密度获得。 $\beta$  算法是一种解决激光频率噪声和激光线宽之间关系的简单的近似公式,用于评估任意噪声频谱密度的激光线宽。利用  $\beta$  算法,可将线宽和频率噪声的功率谱密度 (PSD) 进行关联,进而根据频率噪声计算待测激光的线宽<sup>[25]</sup>。测量的频率噪声,以及线宽和测量时间之间的关系如图 6 所示。随着测量时间的增加,线宽也在增加。当测量时间为 0.05 s 时,相应的频率

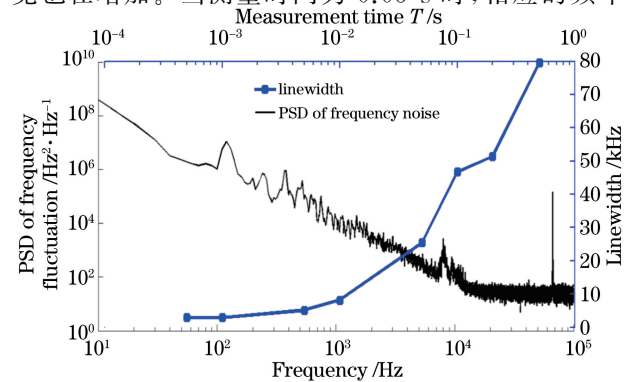


图6 SLM 光纤激光器的频率噪声的功率谱密度  
Fig. 6 Power spectral density of frequency noise of SLM fiber laser

噪声达到了白噪声限制,此时,由频率噪声计算得到的线宽最小值约为 8 kHz。

其他同时使用 TR-SC 结构作为 SLM 选择的研究,采用光纤法布里-珀罗可调谐滤波器 (FFP-TF) 或叠加光纤布拉格光栅 (SI-FBG) 作为波长选择器<sup>[19-20]</sup>,与之相比,本文所提激光器方案更易构建,且已在 TR-SC 结构上实现了稳定的 SLM 窄线宽 TDFL。此外,在 TR-SC 结构中使用的 3 个光耦合器的耦合比也均高于其他的研究工作,这也使得 SLM 激光更加稳定,且实验结果的稳定性可通过输出功率和中心波长的波动数据表征。

## 4 结 论

提出了稳定的 SLM 窄线宽 TDFL,并利用自制的窄线宽 FBG 和特殊的 TR-SC 结构进行了实验验证。TR-SC 结构很好地抑制了主腔中密集的 MLM 和跳模现象。通过合理调整所有子环腔长度,再结合 FBG 的窄带宽波长选择效果,实现了稳定的 SLM 激光。中心波长为 1940.6 nm 的输出信号的 OSNR 为 60 dB。频率噪声采用基于  $3 \times 3$  光耦合器的自零差技术进行测量。当测量时间为 0.05 s 时,通过频率噪声计算的线宽约为 8 kHz。与其他 TDFL 相比,本文搭建的激光器具有强稳定性和窄线宽特性,可以更好地应用于人眼安全的  $2 \mu\text{m}$  波段空间光网络中。

## 参 考 文 献

- [1] Liu S. Research on high quality multi-wavelength and pulsed laser seed sources for  $2 \mu\text{m}$  high power fiber laser systems [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.  
刘硕. 面向  $2 \mu\text{m}$  波段大功率光纤激光系统的高质量多波长及脉冲激光种子源研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [2] Feng S C. Research on multi-wavelength, single longitudinal mode fiber laser [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.  
冯素春. 多波长、单纵模光纤激光器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [3] Xu P. Research on ultra-narrow linewidth multi-wavelength fiber lasers [D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2008.  
徐攀. 超窄线宽多波长光纤激光器研究[D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2008.
- [4] Sejka M, Hübner J, Varming P, *et al.* Distributed feedback  $\text{Er}^{3+}$ -doped fibre laser [J]. Electronics Letters, 1995, 31(17): 1445-1446.

- [5] Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L, *et al.* Er<sup>3+</sup> · Yb<sup>3+</sup>-codoped fiber distributed-feedback laser [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(24): 2101-2103.
- [6] Qi H F, Song Z Q, Li S J, *et al.* Apodized distributed feedback fiber laser with asymmetrical outputs for multiplexed sensing applications [J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 11309-11314.
- [7] Cheng Y, Kringlebotn J T, Loh W H, *et al.* Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 875-877.
- [8] Meng Z, Stewart G, Whitenett G. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(5): 2179-2183.
- [9] Liu J, Yao J P, Yao J, *et al.* Single-longitudinal-mode multiwavelength fiber ring laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(4): 1020-1022.
- [10] Bai Y, Yan F P, Feng T, *et al.* Ultra-narrow-linewidth fiber laser in 2 μm band using saturable absorber based on PM-TDF [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0101003.  
白燕, 延凤平, 冯亭, 等. 基于保偏掺铒光纤饱和吸收体的 2 μm 波段超窄线宽光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0101003.
- [11] Yang J, Qu R H, Sun G Y, *et al.* A novel single longitudinal mode fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(4): 441-444.  
杨敬, 瞿荣辉, 孙国勇, 等. 一种新型结构的单纵模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2005, 32(4): 441-444.
- [12] Yeh C H, Huang T T, Chien H C, *et al.* Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation [J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 382-386.
- [13] Lee C C, Chen Y K, Liaw S K, *et al.* Single-longitudinal-mode fiber laser with passive multiple ring cavity and its application for video transmission [C] // 1998 Conference on Lasers and Electro-Optics May 3-8, 1998, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 1998: 417-418.
- [14] Hui Y L, Li Q, Zhang X, *et al.* Single frequency mode laser controlled by volume Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2805-2807.  
惠勇凌, 李强, 张翔, 等. 基于体布拉格光栅选模的单纵模激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2805-2807.
- [15] Chen D, Fu H, Liu W. Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser based on a fiber Bragg grating Fabry-Perot filter [J]. *Laser Physics*, 2007, 17(10): 1246-1248.
- [16] Mao X Q, Yan F P, Fu Y J, *et al.* A compact single-polarization erbium-doped fiber laser by exploiting vernier effect [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(11): 993-995.
- [17] Yeh C H, Chen H Z, Chen J Y, *et al.* Stabilized dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a single-longitudinal mode by utilizing fiber Bragg grating and a compound-ring filter [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(2): 025106.
- [18] 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.
- [19] Feng T, Ding D L, Liu P, *et al.* Widely tunable/wavelength-swept SLM fiber laser with ultra-narrow linewidth and ultra-high OSNR [J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(6): 433-436.
- [20] 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.
- [21] Liaw S K, Wang S, Shin C S, *et al.* Single-longitudinal-mode linear-cavity fiber laser using multiple subring-cavities [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(7): 1608-1611.
- [22] Pourshab N, Gholami A, Hekmat M J, *et al.* Analysis of narrow linewidth fiber laser using double subring resonators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(11): 2414-2420.
- [23] Dai Z Y. Theoretical and experimental study of a 1.55 μm single-frequency narrow-linewidth fiber laser [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.  
代志勇. 1.55 μm 单频窄线宽光纤激光器理论与实验研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [24] Lemieux J F, Bellemare A, Latrasse C, *et al.* Step-tunable (100 GHz) hybrid laser based on vernier effect between Fabry-Perot cavity and sampled fibre Bragg grating [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(11): 904-906.
- [25] Wang W T, Song Z Q, Qi H F, *et al.* Study of a single longitudinal fiber ring laser with a π phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Optics Communications*, 2017, 396: 88-91, 906.