

激光与光电子学进展

基于环形滤波器可调谐单频光纤激光器的研究

丁建一^{1,3}, 陈浩伟^{1,2,3*}, 白晋涛^{1,2,3}

¹西部能源光子技术国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710069;

²国家级光电技术与纳米功能材料国际联合研究中心, 陕西 西安 710069;

³陕西省光电子技术重点实验室, 西北大学光子学与光子技术研究院, 陕西 西安 710069

摘要 设计了一种非对称环形复合谐振腔, 将光纤环行器、光纤可调谐滤波器和光纤环形滤波器分别嵌入到主环形腔内, 基于游标效应的原理, 实现了调谐范围 1020~1090 nm 的高效、稳定可调谐单频光纤激光器。采用 980 nm 半导体激光器作为泵浦源, 在中心波长 1064 nm 处, 当泵浦功率为 200 mW 时, 利用延迟自外差法测得单频激光的输出线宽为 3.325 kHz, 光信噪比均大于 50 dB, 以 5 min 为间隔, 40 min 内测得输出激光波长稳定性为 0.02 nm。

关键词 激光器; 单频光纤激光器; 波长可调谐; 游标效应; 滤波器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1314003

Research of Tunable Single-Frequency Fiber Laser Based on Fiber Ring Filter

Ding Jianyi^{1,3}, Chen Haowei^{1,2,3*}, Bai Jintao^{1,2,3}

¹State Key Laboratory of Photon-Technology in Western China Energy, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

²International Collaborative Center on Photoelectric Technology and NanoFunctional Materials, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

³Provincial Key Laboratory of Photo-Electronic Technology, Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

Abstract In this work, a tunable single-frequency fiber laser with asymmetric compound ring cavity is designed. Fiber ring resonator, fiber optic tunable filter, and fiber ring filter are respectively embedded into the main fiber ring cavity. An efficient and stable tunable single-frequency fiber laser from 1020 nm to 1090 nm is achieved based on the principle of the vernier effect. A 980 nm semiconductor laser is used as the pump source, when the pump power is 200 mW, the output linewidth of the single-frequency laser measured by the delayed self-heterodyne method is 3.325 kHz, and the optical signal-to-noise ratio is greater than 50 dB, with 5 min as the interval, the measured output laser wavelength stability is 0.02 nm within 40 min.

Key words lasers; single-frequency fiber laser; wavelength tunable; vernier effect; filter

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3600; 140.3615

收稿日期: 2020-09-01; 修回日期: 2020-10-09; 录用日期: 2020-10-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405102)

通信作者: *67892020@qq.com

1 引言

单频光纤激光器具有相干性好、线宽窄、噪声低等优点,在激光通信、激光雷达、引力波探测、光频率标准和时钟、太赫兹波辐射等领域有着广泛的应用前景^[1-5],成为了激光领域科研工作者的研究热点。波长可调谐单频光纤激光器的宽谱特性使其在生物医学、高精度光谱测量、计量学等领域受到了科研工作者的青睐。目前单频光纤激光器的谐振腔型结构一般分为线型腔和环形腔,线型腔根据工作原理不同又可分为分布式反馈型(DFB)和分布布拉格反射型(DBR)^[6],其中DFB和DBR是驻波腔,容易引起空间烧孔效应^[7],导致激光器处于多纵模运转状态;而且由于谐振腔长度的限制和选模元件光纤布拉格光栅(FBG)波长的限制,很难实现宽波段的调谐。环形腔是行波腔,可以有效抑制空间烧孔效应,较长的谐振腔使其可以插入有效的选模器件和波长可调谐元件(如光纤布拉格光栅^[8]、超窄带通滤波器^[9]、法布里-珀罗标准具^[10]以及一段未泵浦的增益光纤或二维材料^[11-13]等),从而实现波长可调谐单频光纤激光器的输出。2015年Hou等^[14]采用保偏光纤和Sagnac环组成的梳状谱滤波器实现了单频激光输出,而后在谐振腔内加入可调谐滤波器实现了17.5 nm调谐范围的可调谐单频光纤激光输出;2016年,Yeh等^[15]使用10 cm掺镱光纤(YDF)和一个光学光纤镜作为干涉仪滤波器获得激光器单纵模(SLM)输出,并通过可调谐带通滤波器实现30 nm可调谐单频激光输出;2018年,Bai等^[16]通过全光纤Lyot滤波器和未泵浦的增益光纤实现了调谐范围1045~1076 nm的可调谐单频光纤激光输出,但全光纤Lyot滤波器的调谐范围与保偏光纤的长度有关,由于保偏光纤太短不易熔接,导致调谐范围很难继续增宽。同年,本课题组设计

出一种集可调谐带通滤波器、高精度环形滤波器和光纤环形镜于一体的全光纤复合腔结构可调谐单频窄线宽光纤激光器,调谐范围为1030~1090 nm,达到60 nm,但由于腔内光学元器件太多,损耗太大,导致其斜率效率偏低^[17]。

本文在环形腔的基础上,基于游标效应将光纤环形器(FRR)、光纤可调谐滤波器和光纤环形滤波器(FRF)嵌入到主环形腔(MFRC)内,有效缩短了腔长,减少了谐振腔内的光学元器件,从而减小了谐振腔内的损耗,实现了调谐范围1020~1090 nm、光信噪比(OSNR)均大于50 dB的高效、稳定的可调谐单频光纤激光器。在中心波长1064 nm处,当泵浦功率为200 mW时,利用延迟自外差法测得单频激光的线宽为3.325 kHz,弛豫振荡频率为300 kHz,相对强度噪声小于-90 dB/Hz;同时在70 nm的调谐范围内,以5 min为间隔,40 min内测得输出激光波长的稳定性为0.02 nm。

2 实验装置

可调谐单频掺镱光纤激光器的实验装置如图1所示,采用最大泵浦功率为600 mW的980 nm半导体激光器作为泵浦源,泵浦光经过尾纤由975/1064 nm波分复用器(WDM)耦合进入谐振腔,泵浦长度为2 m的掺镱增益光纤(INO Yb 501, Corrative, 镱离子摩尔浓度为0.021,芯径为6 μm ,数值孔径为0.13),然后泵浦光分别经过3 dB带宽为1 nm、光隔离度为54 dB的光纤可调谐滤波器,光纤环形器(由3 dB耦合器OC1和0.96 m的单模掺镱光纤组成)和光纤环形滤波器(由2 \times 2型30/70耦合器OC2、1 \times 2型20/80耦合器OC3和2.18 m单模掺镱光纤组成),光纤可调谐滤波器用于模式选择和波长调谐,同时还起到低阶滤波和确保腔内光单向传输的作用;采用光纤环形器和光纤环形滤

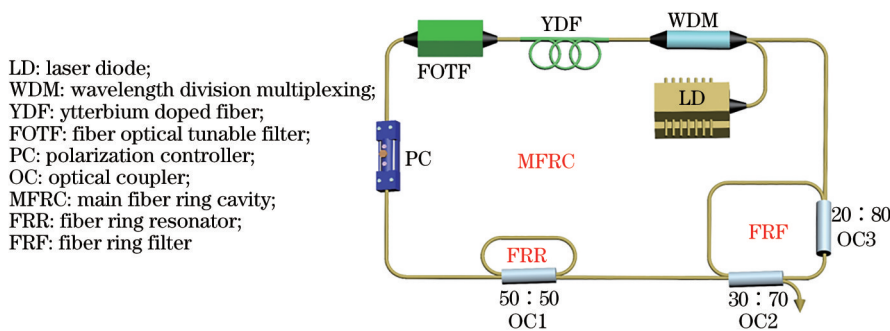


图1 宽带可调谐单频光纤激光器装置图

Fig. 1 Schematic of broadband-tunable single-frequency fiber laser

波器多环结构的复合腔可以增大模式抑制和滤波效果,基于游标原理,自由光谱范围(FSR)增大,易形成单纵模激光输出,经过光纤环形滤波器的光在光纤环中循环后透射出具有梳状的透射曲线,起到滤波和压窄线宽的作用。最后由耦合器(OC3)的一端和波分复用器的一端相连接形成可调谐单频光纤激光器的复合环形腔结构,所产生的可调谐单频激光经由耦合器(OC2)的30%端口输出。

多环形结构的复合谐振腔,也称为非对称环形复合腔结构,由光纤环形器和光纤环形滤波器组成。不同长度的子环腔对应不同的自由光谱区。主环腔的长度约为 11.38 m,对应 18.22 MHz 的纵模间距[图 2(a)],同理,光纤环形滤波器和光纤环谐振器的纵模间距分别为 95 MHz 和 214.8 MHz [图 2(b)和(c)],计算公式为

$$R_{\text{FSR}} = c/nL, \quad (1)$$

$$f = q_{\text{MFRC}} \cdot R_{\text{FSRMFRC}} = q_{\text{FRF}} \cdot R_{\text{FSRFRF}} = q_{\text{FRR}} \cdot R_{\text{FSRFRR}}, \quad (2)$$

式中: $n = 1.447$ 为纤芯折射率; L 为腔长; c 为真空光速; f 为最小公倍数; q 为纵模序数。每个子环腔对应的纵模间距将共同作用形成一个有效纵模间距,如图 2 所示。利用复合子环腔结构,根据游标效

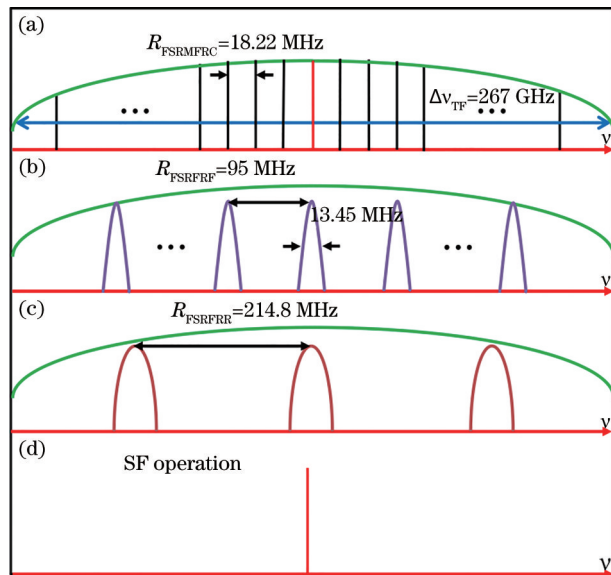


图 2 模式选择原理图。(a)主环腔的纵模数;(b)光纤环形滤波器的纵模间距和 3 dB 带宽;(c)光纤环谐振器的纵模间距;(d)选出的单纵模

Fig. 2 Mode selection schematic. (a) Number of longitudinal modes of MFRC; (b) longitudinal mode spacing and 3 dB bandwidth of FRF; (c) longitudinal mode spacing of FRR; (d) selected SLM

应^[18-19]计算出有效纵模间距为 367.3 GHz。

根据光纤环形滤波器透过率变化在复合环形腔结构中的滤波原理,当光场注入光纤环形滤波器时被分成两部分,其中一束光通过光纤环形滤波器提供有效的增益/损耗值 g 。光纤环形滤波器的透过率和 3 dB 带宽计算公式为^[20]

$$T = \frac{\gamma}{1 + g^2(1 - \gamma) - 2g\sqrt{1 - \gamma} \cos(\omega\tau)}, \quad (3)$$

$$\Delta f = \frac{1}{\tau} \arccos \left[\frac{4g\sqrt{1 - \gamma} - 1 - g^2(1 - \gamma)}{2g\sqrt{1 - \gamma}} \right], \quad (4)$$

式中: $\gamma = 0.7$ 是输出耦合器 2 的耦合因子; ω 是光场角频率; $\tau = 2\pi/R_{\text{FSR}}$ 是光纤环形滤波器的时间延迟; g 为有效增益/损耗,此处 g 值对应光纤环形滤波器的损耗,从耦合比进行合理估测, g 值估算为 0.8。经计算得到光纤环形滤波器的 3 dB 带宽 $\Delta f = 13.45$ MHz,该值小于 11.38 m 谐振腔对应的 18.22 MHz 纵模间距,说明该激光器处于单频运转状态。

3 实验结果分析与讨论

如图 3 所示,采用扫描法布里-珀罗干涉仪(F-P)标准具(SA210, Thorlabs, 美国)和示波器(OSC, DSO9104A, Agilent, 美国)采集单频光纤激光的输出信号,该扫描 F-P 标准具的自由光谱范围为 1.5 GHz,精度为 200,即该标准具的分辨率为 7.5 MHz。当泵浦光功率达到 100 mW 时,示波器中出现单频现象,锯齿波表示一个电压周期,曲线表示在一个斜坡电压周期内的单纵模式数。从图 3 可以看出,在一个锯齿波斜坡电压周期内存在着两

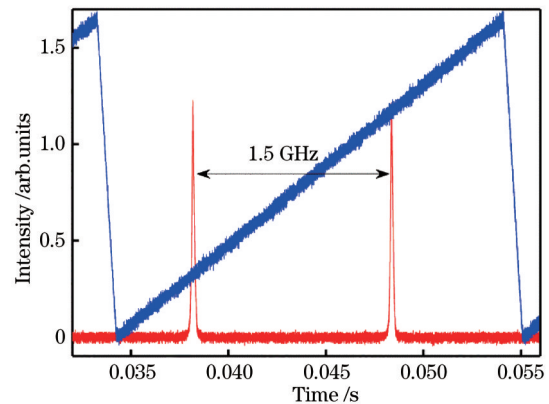


图 3 F-P 干涉仪测量光纤激光器单纵模特性
Fig. 3 SLM characteristics measured by a scanning F-P interferometer

个单纵模,即使展开一个模式也不会出现其他模式而是一个平滑的包络,不存在任何模式跳跃和模式竞争现象,表明该激光器已实现单频激光运转,且单频输出阈值功率为 100 mW。

实验中,在泵浦功率为 200 mW 时,通过计算机控制光纤可调谐滤波器实现了最大调谐范围为 1020~1090 nm 的可调谐单频光纤激光输出,采用光谱分析仪(OSA, AQ6370, YOKOGAWA, 日本,

波长分辨率为 0.02 nm)进行实时监测。从图 4(a)和(b)分别观测到波长每间隔 5 nm 时单频光纤激光器的输出光谱现象和输出波长最大波动为 0.02 nm。在整个波长调谐范围内,光信噪比均大于 50 dB,而且在波长调谐的过程中均未出现任何的跳模和模式竞争现象,结果表明,采用该复合谐振腔实现了稳定的调谐范围为 70 nm 的可调谐单频激光输出。

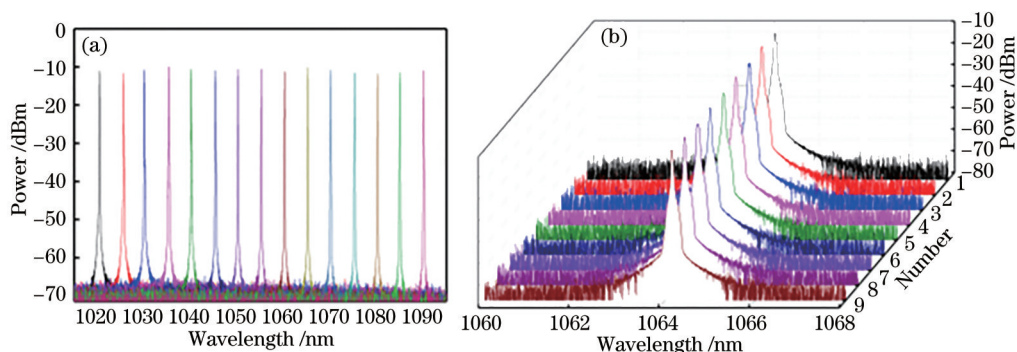


图 4 实验结果。(a) 1020~1090 nm 可调谐输出波长光谱图; (b) 40 min 内 1064 nm 的光谱稳定性

Fig. 4 Experimental results. (a) Output spectrum of tunable wavelength from 1020 nm to 1090 nm; (b) stability at 1064 nm in 40 min

实验中采用延迟自外差法^[21]测量单频光纤激光器的输出线宽,延迟单模光纤的长度为 30 km。测量系统中,3 dB 耦合器将光束分成两个路径,其中一路光是信号光,通过声光调制器将频率移到 150 MHz;另一束光被 30 km 单模光纤延迟。最后两束光信号耦合进行混频干涉,输出的拍频信号由光电探测器和频谱分析仪(ESA, N9010A, Keysight, 美国)检测。如图 5(a)所示,通过延迟自外差法测量的线宽信号由红线显示,蓝线是采用洛伦兹拟合得到的曲线,从图中可以看出,其 20 dB 线宽为 66.5 kHz,表明光纤激光器输出光的线宽为 3.325 kHz。从图 5(a)可以看出,洛伦兹拟合略小

于测量信号,这主要是由激光的白噪声和 f_0 噪声引起的。弛豫振荡频率 f_0 计算公式为^[22]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\delta_g - \delta_c}{T_R \tau_2} - \left(\frac{\delta_g}{2\tau_2 \delta_c}\right)^2}, \quad (5)$$

式中: f_0 取决于往返不饱和或小信号增益 δ_g 、总损耗系数 δ_c 、谐振腔内激光的往返时间 T_R 和增益介质上能级状态寿命 τ_2 。单频光纤激光器的相对强度噪声(RIN)如图 5(b)所示,采用带宽为 3 dB、截止频率为 1 GHz 的光电探测器进行检测,在泵浦功率为 200 mW 时,在 300 kHz 附近观察到弛豫振荡频率峰值为 -90 dB/Hz,此时在 0~2 MHz 的其他频率范围内没有观察到任何噪声。

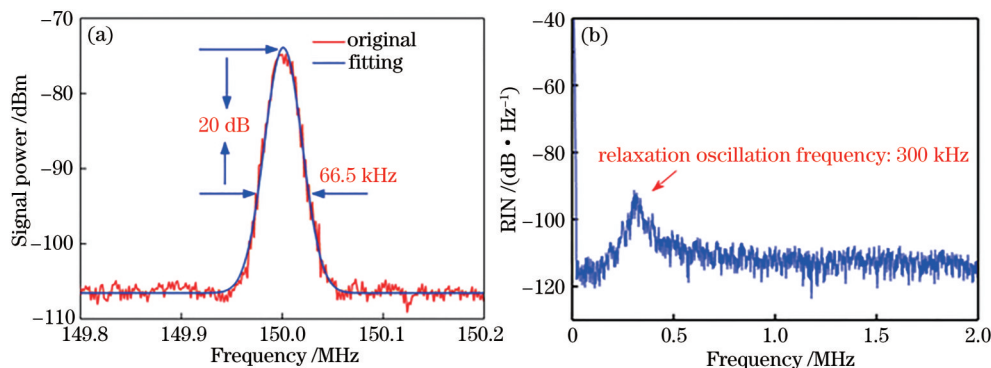


图 5 实验结果。(a) 线宽的测量结果; (b) 相对噪声强度频谱图

Fig. 5 Experimental results. (a) Measurement result of linewidth; (b) relative intensity noise spectrogram

4 结 论

本文提出并实验验证了将光纤环行器、光纤可调谐滤波器和光纤环形滤波器嵌入到主环形腔内形成非对称环形复合谐振腔以输出单频激光的可行性,腔内的光纤谐振器和光纤环形滤波器增大了纵模间距,确保了光纤激光器的单频输出。基于游标效应原理实现了稳定的 1020~1090 nm 可调谐单频光纤激光输出,单频激光输出的阈值功率为 100 mW,当泵浦功率增加到 200 mW 时,在中心波长 1064 nm 处,利用延迟自外差法测得单频激光的输出线宽为 3.325 kHz,光信噪比均大于 50 dB,在 300 kHz 的弛豫振荡频率处,相对强度噪声约为 -90 dB/Hz。在 70 nm 的调谐范围内,波长每间隔 5 nm,40 min 内测得输出波长最大波动为 0.02 nm。可调谐单频光纤激光器将成为高精度光谱测量、引力波探测、量子信息等基础科学研究领域的新手段。

参 考 文 献

- [1] Huynh T N, Smyth F, Nguyen L, et al. Effects of phase noise of monolithic tunable laser on coherent communication systems[J]. *Optics Express*, 2012, 20(26): B244-B249.
- [2] Li S H, Wang Q, Song R, et al. Laser diode pumped high-energy single-frequency Er: YAG laser with hundreds of nanoseconds pulse duration[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 031401.
- [3] Shi S P, Yang W H, Zheng Y H, et al. Noise analysis of single-frequency laser source in preparation of squeezed-state light field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701009.
史少平, 杨文海, 郑耀辉, 等. 压缩态光场制备中的单频激光源噪声分析[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0701009.
- [4] Peng X L, Yang C S, Deng H Q, et al. Research progress of blue-green single-frequency laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071606.
彭秀林, 杨昌盛, 邓华秋, 等. 蓝绿光单频激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 071606.
- [5] Soltanian M R K, Amiri I S, Alavi S E, et al. Dual-wavelength erbium-doped fiber laser to generate terahertz radiation using photonic crystal fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(24): 5038-5046.
- [6] 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.
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.
- [7] 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. 基于保偏掺铊光纤饱和吸收体的 2 μm 波段超窄线宽光纤激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0101003.
- [8] Xu S H, Li C, Zhang W N, et al. Low noise single-frequency single-polarization ytterbium-doped phosphate fiber laser at 1083 nm[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 501-503.
- [9] Yelen K, Hickey L M B, Zervas M N. Experimentally verified modeling of erbium-ytterbium co-doped DFB fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(3): 1380-1392.
- [10] 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.
- [11] Yin F F, Yang S G, Chen H W, et al. Tunable single-longitudinal-mode ytterbium all fiber laser with saturable-absorber-based auto-tracking filter[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10/11): 2702-2706.
- [12] Muhammad F D, Zulkifli M Z, Latif A A, et al. Graphene-based saturable absorber for single-longitudinal-mode operation of highly doped erbium-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(2): 467-475.
- [13] He X Y, Wang D N, Liao C R. Tunable and switchable dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(6): 842-849.
- [14] Hou Y B, Wang J, Zhang Q, et al. Widely-tunable single-frequency Yb-doped fiber ring laser[C]//2015 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), August 24-28, 2015, Busan, Korea (South). New York: IEEE Press, 2015: 1-2.
- [15] Yeh C H, Chen J Y, Chen H Z, et al. Stable and tunable single-longitudinal-mode erbium-doped fiber triple-ring laser with power-equalized output[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 1-6.
- [16] Bai H Y, Yin T C, Jiang X G, et al. A widely

- tunable single-longitudinal-mode ytterbium-doped fiber laser based on fiber lyot filter[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(9): 095105.
- [17] 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. 马选选, 陆宝乐, 王凯乐, 等. 宽带可调谐单频窄线宽光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0114001.
- [18] Choi S J, Peng Z, Yang Q, et al. Tunable narrow linewidth all-buried heterostructure ring resonator filters using vernier effects[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 106-108.
- [19] Feng T, Ding D L, Yan F P, et al. Widely tunable single-/dual-wavelength fiber lasers with ultra-narrow linewidth and high OSNR using high quality passive subring cavity and novel tuning method[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19760-19768.
- [20] Pan S L, Yao J P. Frequency-switchable microwave generation based on a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser incorporating a high-finesse ring filter[J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 12167-12173.
- [21] Ludvigsen H, Tossavainen M, Kaivola M. Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay[J]. *Optics Communications*, 1998, 155(1/2/3): 180-186.
- [22] Weingarten K J, Braun B, Keller U. *In situ* small-signal gain of solid-state lasers determined from relaxation oscillation frequency measurements[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(15): 1140-1142.