

宽带可调谐单频窄线宽光纤激光器

马选选^{1,2,3}, 陆宝乐^{1,2,3*}, 王凯乐^{1,2,3}, 侯瑶^{1,2,3},
张凯龙^{1,2,3}, 陈浩伟^{1,2,3}, 白晋涛^{1,2,3**}

¹陕西省光电技术与功能材料省部共建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西北大学光子学与光子技术研究所, 陕西省光电子技术重点实验室, 陕西 西安 710069

摘要 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。采用 980 nm 半导体激光器作为抽运源, 掺镱光纤在谐振腔内分别作为增益介质和可饱和吸收体, 成功实现波长为 1030~1090 nm 稳定的宽谱可调谐单频窄线宽激光输出。当抽运光的抽运功率为 300 mW 时, 在波长为 1070 nm 处得到的输出功率最大, 为 18.5 mW, 斜率效率达到 7.95%, 持续 1 h 内没有出现跳模现象, 功率不稳定性小于 1%; 当抽运功率为 200 mW 时, 利用延迟自外差法测量线宽, 得到波长调谐范围内的平均线宽为 8.7 kHz, 弛豫振荡频率为 64 kHz。

关键词 激光器; 光纤激光器; 单频; 滤波器; 可调谐激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0114001

Tunable Broadband Single-frequency Narrow-Linewidth Fiber Laser

Ma Xuanxuan^{1,2,3}, Lu Baole^{1,2,3*}, Wang Kaile^{1,2,3}, Hou Yao^{1,2,3},
Zhang Kailong^{1,2,3}, Chen Haowei^{1,2,3}, Bai Jintao^{1,2,3**}

¹ National Key Laboratory of Shaanxi Province for Photoelectric Technology and Functional Materials,
Xi'an, Shaanxi 710069, China;

² National Optical Technology and Functional Nanomaterials International Science and Technology Joint
Research Center, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

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

Abstract The tunable single-frequency (SF) narrow-linewidth fiber laser with all-fiber complex cavity structure is designed, which is composed of an optical fiber tunable filter, a high-precision ring filter, and a fiber loop mirror. A 980-nm semiconductor laser is used as the pumping source, and the ytterbium-doped fiber is employed as the gain medium and saturable absorber, then a wide-spectrum tunable single-frequency narrow-linewidth laser output from 1030 nm to 1090 nm is successfully realized. When the pump power is up to 300 mW, the output power is 18.5 mW and the slope efficiency is 7.95% at the wavelength of 1070 nm. There is no mode hopping phenomenon within 1 h, and the standard deviation of power stability is less than 1%. When the pump power is 200 mW, the linewidth is measured by the delay self-heterodyne method, and the average line width in the wavelength tuning range is 8.7 kHz, and the relaxation oscillation frequency is 64 kHz.

Key words lasers; fiber lasers; single frequency; filter; tunable lasers

OCIS codes 140.3510; 140.3570; 060.2430

1 引 言

单频光纤激光器具有线宽小、噪声低和相干长

度长等优良的光学特性,在重力波检测、微波光子和光纤传感等领域具有广泛的应用前景^[1-3],波长可调谐单频光纤激光器由于具有宽谱单频的特性,在计

收稿日期: 2018-06-07; 修回日期: 2018-07-25; 录用日期: 2018-08-21

基金项目: 国家重点研究计划(2017YFB0405102)、陕西省教育厅重点实验室项目(15JS103)

* E-mail: lubaole1123@163.com; ** E-mail: baijt@nwu.edu.cn

量学、生物医学、光谱学等方面的应用引起众多科研工作者的研究兴趣^[4-7]。目前,超短线形腔、线形腔和环形腔都可以实现单频窄线宽激光输出^[8],超短线形腔由于其超短的腔长以及选模元件光纤布拉格光栅(FBG)的波长限制,很难实现波长的宽范围调谐;线形腔则由于增益光纤中的空间烧孔现象导致激光器处于多纵模状态;而环形腔属于行波腔,可避免线形腔引起的烧孔效应,且可以插入适当的选模元件和波长调谐器件,从而实现可调谐单频光纤激光器的输出^[8-12]。波长可调谐的产生技术有很多种,例如,通过应力或者温度改变FBG的中心波长,以实现单频激光波长可调谐、未抽运掺杂光纤可饱和吸收体和级联滤波器件等,但这些方法实现的可调谐单频激光器具有调谐范围窄、器件损耗大、成本高等缺点^[11-14]。2008年,Zhang等^[15]报道了采用3.5 m未抽运掺铒光纤的萨尼亚克(Sagnac)环作为自诱导导光纤光栅滤波器结合可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器实现了45 nm可调谐单频光纤激光输出;2013年,Feng等^[16]使用一个光纤环(1环)滤波器来限制激光腔内纵模的数量,另一个双耦合器光纤环(2环)用来确保腔内有且仅有一个纵模振荡,通过逐级滤波的方式实现了光纤激光器的单频输出,最后采用可调谐FBG进行波长选择,实现了30 nm可调谐单频激光输出;2015年,Lu等^[17]采用1.5 m未抽运光纤作为可饱和吸收体形成Sagnac环结构的动态光栅,通过温度改变FBG的中心波长来实现可调谐单频光纤激光的输出;2016年,Feng等^[10]采用拉伸改变FBG的中心波长,同时将一个双耦合器光纤环滤波器内嵌在另一个光纤环滤波器内,实现了10 nm可调谐单频激光输出。2017年,Yeh等^[18]使用10 cm掺铒光纤(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。

本文以环形腔为基础,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(LMF)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。采用980 nm半导体激光器作为抽运源,掺铒光纤在谐振腔内分别作为增益介质和未抽运的可饱和吸收体,通过腔型的精确调节和优化,成功实现了1030~1090 nm稳定的宽谱可调谐单频窄线宽激光输出,持续工作1 h内没有出现跳模现象,功率的不稳定性小于1%。当抽运光功率为200 mW时,利用延迟自外差法进行线宽测量,在波长调谐范围内平均线宽为8.7 kHz,弛豫振荡频

率为64 kHz。

2 实验装置与原理

可调谐单频光纤激光器的实验装置如图1所示,采用抽运功率为600 mW的980 nm半导体激光器作为抽运源,抽运光由尾纤输出经980/1060 nm波分复用器(WDM)耦合进入谐振腔内抽运长度为80 cm的掺铒光纤[Yb501, Corative, 加拿大, 掺铒浓度(原子数分数,下同)为0.021,数值孔径为0.13],抽运光分别经过3 dB带宽为1 nm的可调谐带通滤波器、高精度滤波器(HFRF,由耦合比为80%:20%的2×2型耦合器C2和1.5 m未抽运增益光纤组成)和光纤环形镜[由耦合比为50%:50%的1×2型耦合器C3、三端环形器(CIR)和长度为2 m的未抽运增益光纤组成],可调谐带通滤波器对谐振腔内的多纵模进行模式抑制及波长调谐,然后由高精度滤波器对谐振腔内模式数量进行抑制,最后通过光纤环形镜实现谐振腔内单纵模的选取。由环形器的3端口与波分复用器的一端相连接形成可调谐单频光纤激光器复合环形腔结构,谐振腔内为了确保光在传输过程中保持单向传输,环形器的3端到2端有45 dB的隔离度作用。所产生的可调谐单频激光由置于可调谐滤波器(TF)和高精度滤波器之间耦合比为30%:70%的耦合器C1的30%端口输出。由于增益光纤具有宽带吸收作用,而且光纤环形镜可以动态诱导光栅滤波器,动态跟踪可调谐滤波器的波长输出,因此,它们组成的滤波器可用于波长可调谐光纤激光器,并且能得到一个较宽的调谐范围。

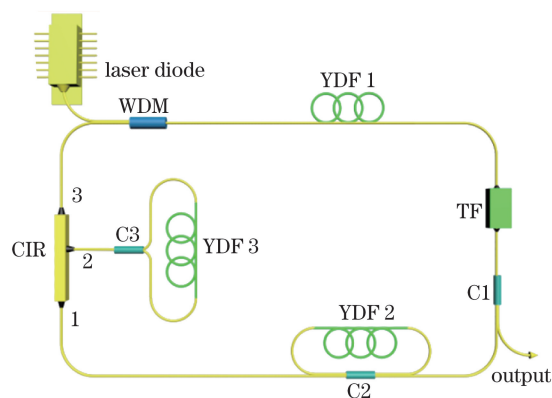


图1 可调谐单频光纤激光器的实验装置图
Fig. 1 Schematic of the wavelength-tunable single-frequency (SF) fiber laser

激光腔内可调谐滤波器、高精度滤波器和光纤环形镜可减少腔内起振的纵模数量,经过这三种器件的滤波作用可获得稳定的波长调谐单频输出。可

调谐滤波器不仅用来实现波长的大范围调谐,而且其 1 nm 的 3 dB 带宽可以有效压制掺铒光纤受激辐射所产生的众多模式,减少腔内起振的纵模数量。高精度滤波器由一个光纤环与未抽运光纤 YDF 2 组成。光通过可调谐滤波器后进入一个耦合比为 50%:50% 的耦合器,其中一路光耦合进入光纤环,其透过率为

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

式中: γ 为耦合器的分束比; g 为光纤环的增益; ω 为光场的角频率; $\tau = 2\pi/a_{\text{FSR}}$ 为延迟时间, $a_{\text{FSR}} = c/nL_1$ 为自由光谱范围, $c = 3 \times 10^8$ m/s 为光速, $L_1 = 2.3$ m,为高精度滤波器的长度。光纤环形镜是由 Sagnac 环与未抽运光纤 YDF 3 组成。光经过循环器进入一个耦合比为 50%:50% 的耦合器后分为两路,相向传输的振幅和偏振态相同的两路光在 YDF 3 中发生干涉,使光纤环形镜形成动态光栅。这种动态光栅的半高全宽为

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda} \kappa \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2n_{\text{eff}}L}\right)^2}, \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{2\Delta n}{\lambda n_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中: κ 为动态光栅的耦合系数;输入光波长 $\lambda = 1060$ nm;光纤折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$;动态光栅的长度 $L = 2$ m;YDF 3 中折射率的改变量 $\Delta n < 2 \times 10^{-7}$ 。因此, $\Delta f < 14$ MHz,这个值小于 11.8 m 腔长所决定的纵模间隔 18 MHz,说明激光器处于单纵模运转状态。

3 实验结果分析与讨论

图 2 所示为扫描 F-P 标准具测量的单频信号特征。采用扫描 F-P 标准具(SA210, Thorlabs, 美国)和示波器(DSO9104A, Agilent Technologies, 美国)对单频激光的特征进行实验观察。该扫描 F-P 标准具的自由光谱范围为 1.5 GHz,精度为 200,由此可知该标准的分辨率为 7.5 MHz。黑色锯齿波表示一个电压周期,红色曲线表示在一个斜坡电压周期内的单纵模式数。从图 2 可以看出,在一个锯齿波斜坡电压周期内存在着两个单纵模,其组成一个平滑的包络,即使展开一个模式也不会出现其他模式,不存在任何模式跳跃和模式竞争现象,证明该激光器完全实现了单频激光运转。

通过计算机程序控制光纤光学可调滤波器的的工作波长,输出不同波长的连续单频激光,采用横河光

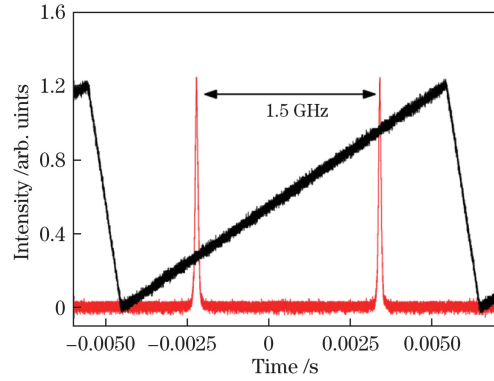


图 2 F-P 干涉仪测量的单频信号

Fig. 2 SF signal measured by a scanning F-P interferometer

谱仪(AQ6370C, Yokogawa, 日本,分辨率为 0.02 nm)测试恒定抽运功率为 300 mW、间隔为 5 nm 的可调谐单频光纤激光输出光谱如图 3 所示。可以看出,本实验成功实现了 1030~1090 nm 输出波长的连续可调谐,其信噪比大于 50 dB,并且在控制波长调谐时没有观察到任何跳模和模式竞争现象,也说明成功实现了稳定的 1030~1090 nm 连续可调谐单频激光输出。

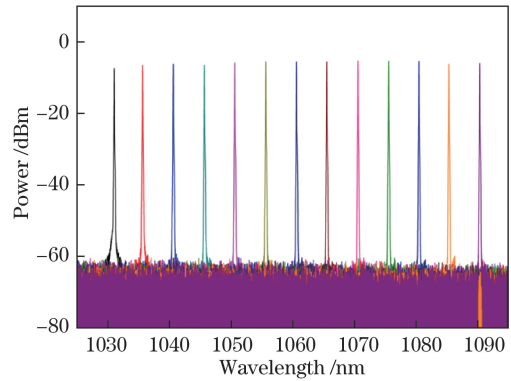


图 3 1030~1090 nm 输出波长调谐光谱图

Fig. 3 Output spectra of the proposed SF fiber laser with wavelength tuned from 1030 nm to 1090 nm

实验中,分别测试了不同工作波长下连续单频激光输出功率随着抽运功率的变化(图 4)。从图 4 可以看出,当激光器的工作波长不同时,对应的斜率效率和输出功率也不相同。研究了抽运功率为 300 mW 时,可调谐单频激光器在 1070 nm 处的输出特性,此时单频激光输出功率达到最大值 18.5 mW,斜率效率达到 7.95%。此激光介质在 1030 nm 处辐射谱的增益比其他工作波长强,单频输出激光应在此波段内具有最大的增益系数和激光输出斜率效率。然而实验结果表明,当斜率效率较大时,连续单频激光的工作波长也较大,这主要是因为激光发射较短波长的自发发射光被掺杂光纤再次

吸收,导致 1030 nm 处单频输出激光的输出功率和斜率效率没有达到最大值。

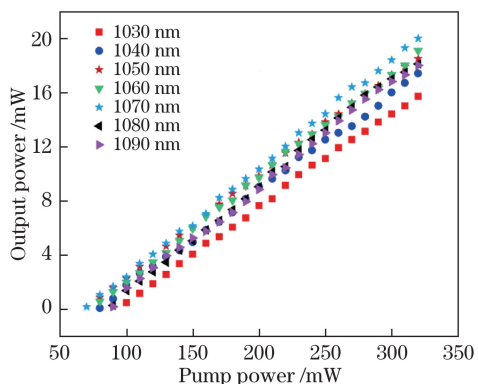


图 4 工作波长不同时,输出功率随着抽运功率的变化关系
Fig. 4 Output power versus pump power at different working wavelengths

实验中使用加拿大 Gentec 生产的 MAESTRO 功率计研究 1070 nm 处单频光纤激光输出功率的稳定性,通过设置采样时间间隔为 1 s,时间长度为 2 h 进行功率监测,图 5 所示为单频光纤激光器连续

工作 2 h 的输出功率稳定性曲线,其功率不稳定性小于 1%,表明该单频光纤激光器处于稳定运转状态。

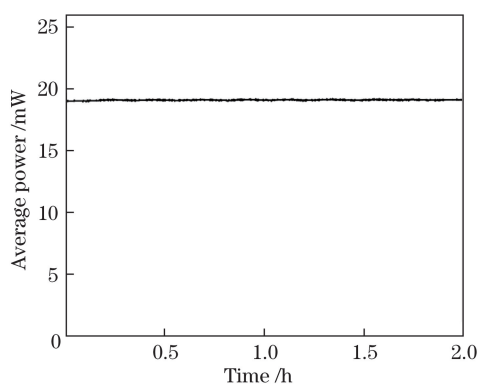


图 5 单频激光输出波长为 1070 nm 时输出功率稳定性曲线
Fig. 5 Output power stability of the SF fiber laser at 1070 nm

单频光纤激光器的波长稳定性和信噪比稳定性如图 6 所示,在室温环境中以 5 min 为间隔测量 1 h 内波长稳定性。由图 6(c)可知,当光纤光学可调滤波器的波长设置为 1060 nm 时,光谱中心波长没有

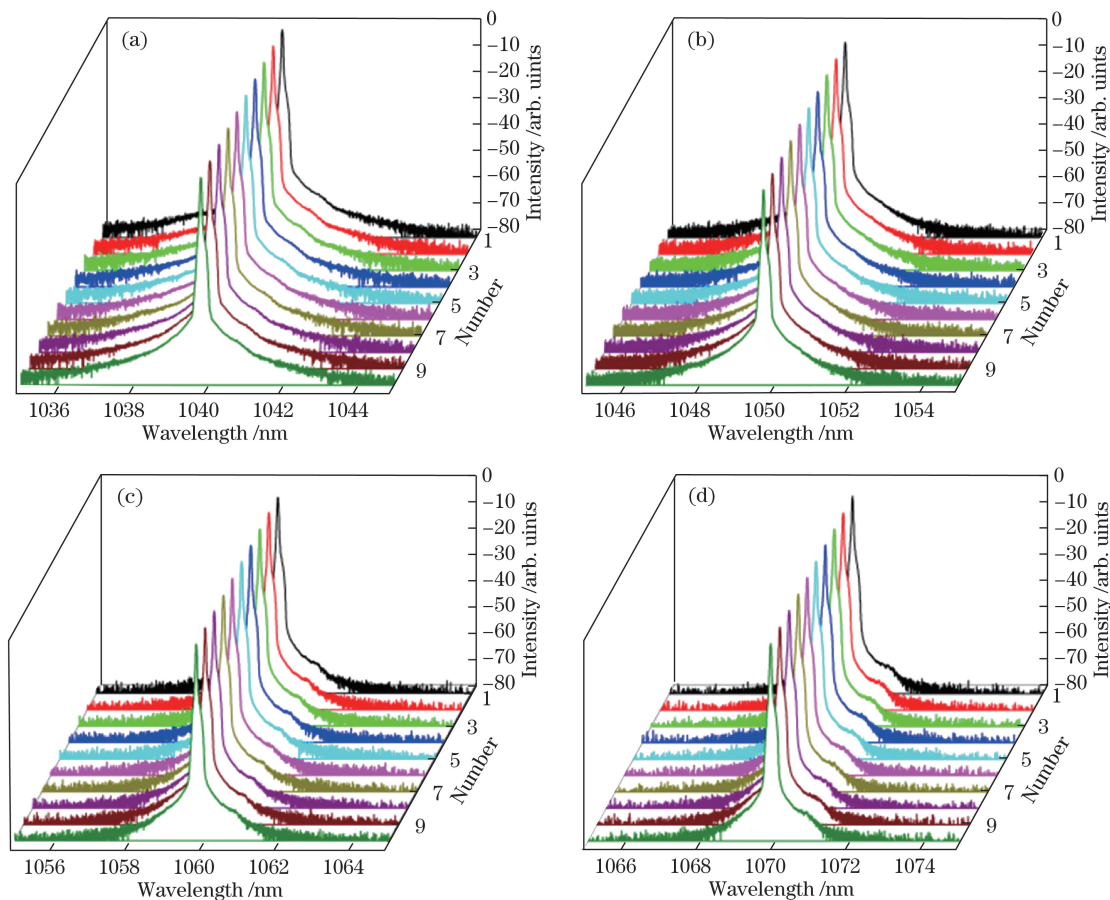


图 6 1 h 内单频激光在不同工作波长时的稳定性。(a) 1040 nm; (b) 1050 nm; (c) 1060 nm; (d) 1070 nm
Fig. 6 Stability of SF fiber laser within 1 h at different working wavelengths.

(a) 1040 nm; (b) 1050 nm; (c) 1060 nm; (d) 1070 nm

显著变化。通过计算可知:波长分辨率的不稳定性小于 0.02 nm;光学信噪比波动小于 0.22 dB。该波长偏移与光学信噪比波动是由于抽运功率与环境温度的变化引起。同时,还测量波长分别为 1040 nm [图 6(a)],1050 nm [图 6(c)],1070 nm [图 6(d)] 时的波长稳定性,可以得到它们的工作波长和光学信噪比的稳定性均较高。

使用 30 km 单模延迟光纤和延迟自外差方法测量可调谐单频光纤激光输出线宽,图 7(a)所示为抽运功率为 200 mW 时连续单频光纤激光输出工作波长为 1060 nm 的线宽。由于真实单频激光输出的线宽是自外差信号曲线线宽的一半,可以计算出单频激光器的线宽约为 9 kHz。为了得到单频激光输出其他波长的线宽结果,对 13 个波长线宽进行测量计算 [图 7(b)],并通过求平均值的方法得到平均线宽为 8.7 kHz,这表明该可调谐单频激光可以在非常大的范围内实现非常窄的光谱线宽。

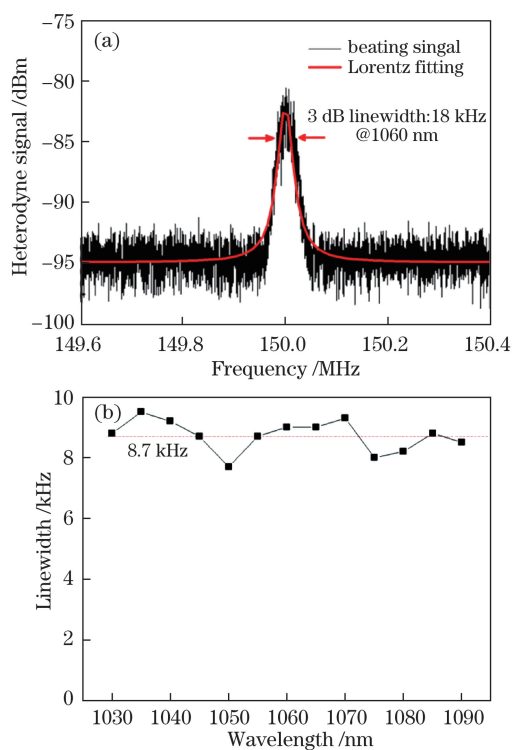


图 7 线宽的测量结果。(a)延迟自外差法测量的线宽;
(b)线宽与不同输出波长的关系

Fig. 7 Measurement of linewidth. (a) Measured linewidth of the self-heterodyne signal using a 30 km delay fiber; (b) linewidth versus different wavelengths

单频光纤激光器的相对噪声强度使用带宽为 3 dB、最大截止频率为 1 GHz 的光电探测器 (1611, Newport, 美国) 和射频光谱分析仪 (MS2724C, ANRITSU, 日本) 测量。当抽运源没有输入功率

时,频谱分析仪的相对噪声强度(RIN)曲线(接收噪声)如图 8 黑色曲线所示。当抽运源的抽运功率为 200 mW 时,弛豫振荡频率峰值约为 64 kHz(图 8 中的红色曲线),弛豫振荡是因为抽运场和激光信号场之间存在动态能量交换过程。通过对频率为 0~1 MHz 的相对噪声与接收的噪声进行对比,发现当频率大于 200 kHz 时,在单频光纤激光器的相对强度噪声频谱中没有观察到其他噪声成分。

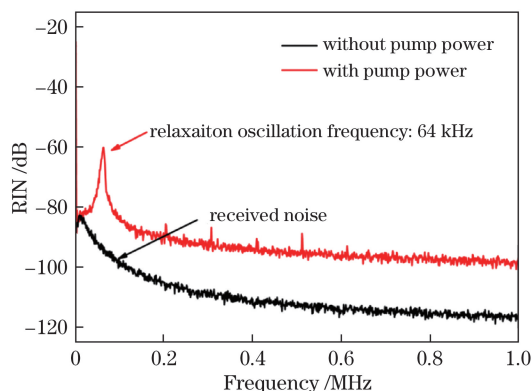


图 8 单频光纤激光器的相对强度噪声频谱

Fig. 8 Relative intensity noise spectra of SF fiber laser

4 结 论

采用可调谐带通滤波器、高精度环形滤波器和光纤环形镜组成的光学元器件作为滤波器件,设计出一种全光纤复合环形腔结构的可调谐单频窄线宽光纤激光器。采用 980 nm 半导体激光器作为抽运源,掺镱光纤在谐振腔内分别作为增益介质和未抽运可饱和吸收体,结合三端口环形器光隔离的作用保证激光在腔内单向传输,然后通过计算机程序控制光纤光学可调滤波器的工作波长,进而输出不同波长的连续单频激光,成功实现了 1030~1090 nm 稳定的宽谱可调谐单频窄线宽激光输出,当抽运功率为 300 mW 时,在波长为 1070 nm 处得到的输出功率最大,为 18.5 mW,斜率效率达到 7.95%,持续工作 1 h 内没有出现跳模现象,功率不稳定性小于 1%。当抽运光的抽运功率为 200 mW 时,利用延迟自外差法测量线宽,在波长调谐范围内平均线宽为 8.7 kHz,弛豫振荡频率为 64 kHz。

参 考 文 献

- [1] Geng J H, Spiegelberg C, Jiang S B. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(9): 1827-1829.
- [2] Jiang M, Su R T, Zhang Z X, *et al.* Coherent beam

- combining of fiber lasers using a CDMA-based single-frequency dithering technique[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4255-4260.
- [3] Wu T, Peng X, Gong W, *et al.* Observation and optimization of 4He atomic polarization spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 986-988.
- [4] Su R T, Zhou P, Wang X L, *et al.* Active coherent beam combining of a five-element, 800 W nanosecond fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 3978-3980.
- [5] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. Progress in lunar laser ranging tests of relativistic gravity[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(26): 261101.
- [6] Ray G J, Anderson T N, Caton J A, *et al.* OH sensor based on ultraviolet, continuous-wave absorption spectroscopy utilizing a frequency-quadrupled, fiber-amplified external-cavity diode laser[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(23): 1870-1872.
- [7] Fu P, Feng X Q, Lu B L, *et al.* Switchable dual-wavelength SLM narrow linewidth fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98: 56-60.
- [8] Yang C S, Chen D, Zhao Q L, *et al.* Research progress of 2.0 μm -band Tm-doped continuous wave single-frequency fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201006.
杨昌盛, 陈丹, 赵齐来, 等. 2.0 μm 波段掺铥连续单频光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201006.
- [9] Wan H D, Ding Z Q, Wang J, *et al.* Single-longitudinal-mode narrow linewidth fiber lasers using high roundness microsphere as mode selector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1001003.
万洪丹, 丁佐芹, 汪杰, 等. 基于高圆度微球腔选模的单纵模窄带光纤激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1001003.
- [10] 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.
- [11] Song Y W, Havstad S A, Starodubov D, *et al.* 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(11): 1167-1169.
- [12] Kim C S, Farokhrooz F N, Kang J U. Electro-optic wavelength-tunable fiber ring laser based on cascaded composite Sagnac loop filters[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14): 1677-1679.
- [13] 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.
- [14] Liu Y, Hsu Y, Hsu C W, *et al.* Narrow line-width single-longitudinal-mode fiber laser using silicon-on-insulator based micro-ring-resonator[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(2): 025102.
- [15] Zhang K, Kang J U. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14173-14179.
- [16] 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.
- [17] Lu B L, Huang S H, Yin M J, *et al.* Wavelength-tunable single frequency ytterbium-doped fiber laser with loop mirror filter[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(4): 044201.
- [18] Yeh C H, Tsai N, Zhuang Y H, *et al.* Stabilized and tunable single-longitudinal-mode erbium fiber laser employing ytterbium-doped fiber based interference filter[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 88: 180-183.