

基于掺铒光纤作为可饱和吸收体的窄线宽光纤激光器研究

张福宇¹, 王 蓊¹, 薛明昆¹, 衣文索²

¹长春理工大学物理学院, 吉林 长春

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年2月26日; 录用日期: 2024年4月5日; 发布日期: 2024年4月15日

摘 要

本文介绍了一种以未泵浦的掺铒光纤作为可饱和吸收体, 通过3 dB耦合器及环形器, 构成一个由驻波效应形成动态光栅的一种窄线宽光纤激光器。测得在中心波长在1559.54 nm处得到输出的激光器, 在泵浦功率为150 mW以下时可以保持长时间的稳定工作, 泵浦功率为70 mW, 输出光功率为17.03 mW, 斜率效率为30.73%, 光学信噪比为39 dB, 波长分辨率的不稳定性小于0.03 nm, 光学信噪比的波动小于0.16 dB, 从0到1 MHz的37.5 kHz信号频谱中的弛豫振荡频率峰值为-89.6 dB/Hz。通过延时自外差法测量线宽为1.99 kHz。

关键词

光纤激光器, 窄线宽, 动态光栅, 可饱和吸收体

Research on Narrow Linewidth Fiber Laser Based on Erbium Doped Fiber as Saturable Absorber

Fuyu Zhang¹, Ji Wang¹, Mingkun Xue¹, Wensuo Yi²

¹School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 26th, 2024; accepted: Apr. 5th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

文章引用: 张福宇, 王蓊, 薛明昆, 衣文索. 基于掺铒光纤作为可饱和吸收体的窄线宽光纤激光器研究[J]. 应用物理, 2024, 14(4): 157-165. DOI: 10.12677/app.2024.144019

Abstract

This article introduces a narrow linewidth fiber laser that uses an unpumped erbium-doped fiber as a saturable absorber and a 3 dB coupler and circulator to form a dynamic grating formed by the standing wave effect. The laser output obtained at the center wavelength of 1559.54 nm can maintain stable operation for a long time when the pump power is below 150 mW. The pump power is 70 mW, the output optical power is 17.03 mW, the slope efficiency is 30.73%, the optical signal-to-noise ratio is 39 dB, the wavelength resolution instability is less than 0.03 nm, the fluctuation of the optical signal-to-noise ratio is less than 0.16 dB, and the peak relaxation oscillation frequency in the 37.5 kHz signal spectrum from 0 to 1 MHz is -89.6 dB/Hz. The line width was measured to be 1.99 kHz using the delayed self heterodyne method.

Keywords

Fiber Laser, Narrow Linewidth, Dynamic Grating, Saturable Absorber

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

具有窄光谱线宽、长相干长度的光纤激光器被称为窄线宽光纤激光器，也叫做单纵模光纤激光器，其谐振腔内只存在一个单纵模，并具有非常窄的输出频率谱宽。该种光纤激光器在当今研究领域中最前沿的研究课题之一，以其卓越的性价比，在激光加工[1]、光纤通信[2]、激光雷达[3]、光纤传感[3]等领域得到广泛应用。光纤激光器与其他激光器相比，具有大的表面体积比、增益介质长、易散热、高亮度、单频运转、宽光谱范围、设计性能稳定、体积小和结构紧凑等特点。由于其优异的稳定性、良好的空间结构、紧凑简便的装置、高效率以及良好的散热性能，光纤激光器已成为近年来激光器领域研究的热点方向之一。

通过掺杂稀土元素制成的全光纤激光器取得了在超窄线宽、超窄脉冲、超高功率和超高亮度等方面的巨大成功。其中，将稀土元素掺入石英光纤中制成的光纤激光器增益光纤技术最为广泛应用。相对于半导体激光器，光纤激光器在输出激光的线宽、噪声、功率阈值、波长切换和光谱调谐等方面取得了显著的研究成果。它可以用于现有的光纤通信、光栅传感、激光测距和激光雷达等系统，是目前许多研究领域的热点之一。单频光纤激光器采用掺杂 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 等稀土离子的光纤作为增益介质，通过泵浦光的激励使掺杂离子的能级粒子数发生反转，然后在谐振腔中经过滤波器滤波，最终输出稳定的激光。实现窄线宽单频光纤激光器的设计方法如下：半导体激光放大器[4]，采用复合腔[5] [6] [7]选择模式，采用未泵浦光纤作为饱和吸收体，形成具有窄带滤波特性[8] [9] [10]的瞬态光栅。

2013年，华南理工大学 He 等人采用环形腔结构搭建激光器，以高浓度的掺铈镱酸盐光纤为增益介质，实现了最大输出功率超过 200 mW、线宽小于 7 kHz 的单频输出[11]；2017年，西北大学的 Lu 等人以复合环形腔结构搭建了一台 60 nm 宽带调谐的单频光纤激光器，平均线宽 8.8 kHz [12]；2018年，伊朗阿米尔卡比尔理工大学的 Poozesh 等人在环形腔内采用保偏掺铈光纤实现了 35 mW 的稳定单频输出，相应的线宽小于 6 kHz [13]；2020年，西北大学的 Wang 等人利用环形腔搭建了一台 1068 nm 的全保偏

单频掺铒双向光纤激光器, 输出线宽为 7.43 kHz [14]。

光纤中诱导动态光栅技术是一种利用光纤中掺杂物的非线性效应来实现频率转换的技术。通过在光纤中引入一个周期性调制的折射率变化, 可以将输入光信号转换成不同频率的输出信号。这种技术通常被用于光通信和光学传感器等领域。基于光纤中诱导动态光栅技术的窄线宽光纤激光器研究是一个重要的研究方向。该技术可通过调整光栅的周期和强度来实现光学谐振腔, 从而实现窄线宽光纤激光器的发射。综上所述, 基于光纤中诱导动态光栅技术的窄线宽光纤激光器研究是一个具有重要意义和广泛应用前景的研究方向。未来的研究应该注重对关键技术的深入探究和创新, 以推动该领域的发展。

本文以环形腔为基础, 设计了一种由未泵浦 EDF 作为可饱和吸收体, 通过 3 dB 耦合器及环形器实现两束相同光在可饱和吸收体内部形成动态光栅, 实现窄线宽输出。

2. 实验装置与原理

使用激光来回穿过未泵浦掺杂光纤, 并产生干涉, 形成驻波。随着注入光的增强, 光纤中会产生空间“烧孔”效应, 使得光纤的折射率被微弱周期性调制, 并在纤芯中形成窄带 FBG。这种 FBG 称为动态窄带 FBG, 由于它的中心波长与入射光波长相同并随之变化, 具有动态特性。动态窄带 FBG 的带宽与未泵浦掺杂光纤的长度呈反比关系, 即光纤越长, 光栅的滤波带宽越窄。因此, 我们可以选择适当长度的未泵浦掺杂光纤进行滤波, 以达到仅保留一个谐振腔纵模的目的。

图 1 是一个以未泵浦的 EDF (EDFC-980-HA) 作为可饱和吸收体的光纤激光器, 此型号的 EDF 在 1530 nm 处的吸收峰值为 6~7.5 dB/m, 980 nm 出的吸收峰值为 3~10 dB/m, 数值孔径为 0.23, 长度为 8 m, 由一个 980/1550 nm 的半导体激光器作为该激光器的泵浦源, 采用 980/1550 nm 的波分复用器(WDM)将泵浦光连接到作为增益光纤的掺铒光纤中, 增益光纤采用与作为可饱和吸收体相同型号的 EDF8m, 再连接到作为输出端口的 10/90 耦合器, 输出前置时, 可以使系统整体更加稳定, 减少发生跳模的可能[15], 其中 10%端口的传输端口在回路内, 90%端口的传输端口作为输出, 连接到一个 1550 nm 的光隔离器防止回光[15], 10%端口连接到 50/50 的 3 dB 耦合器, 相同的两束光分别进入两个环形器(CIR)的 1 端口, 在 2 端口作为可饱和吸收体的未泵浦掺铒光纤 EDF2 相遇。交换路径后通过 CIR 的 3 端口在另一个相同的 3 dB 耦合器处结合在一起, 连接一个 1550 nm 的光隔离器, 最后连接到 WDM 形成环路。该结构整体腔长约为 24 m。在两个环形器的 2 端口传输的相同的两束光在 EDF2 中相遇, 根据驻波效应形成动态光栅以达到压窄线宽的目的。

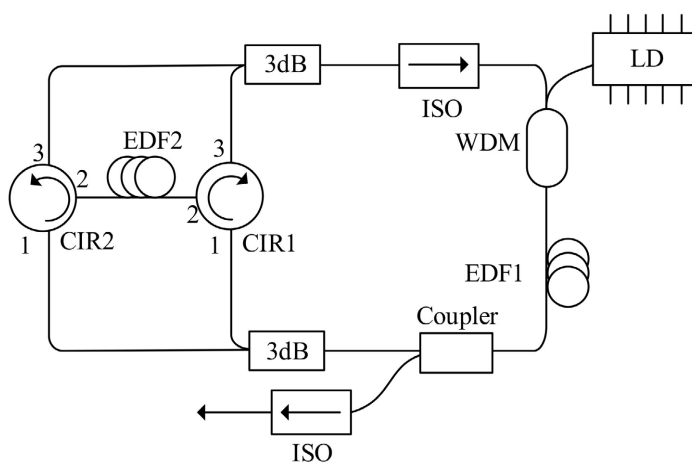


Figure 1. Schematic diagram of erbium-doped fiber laser
图 1. 掺铒光纤激光器的示意图

当光通过 2 个 CIR 的端口 2 时, 在未泵浦的 EDF 中有两个相反方向的传播光。根据驻波和非线性光学理论, EDF2 中的折射率的动态周期性分布。动态布拉格光栅是一个超窄的自跟踪滤波器。其半高全宽 (FWHM) 为[16]:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda} \kappa \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2n_{eff}L_g}\right)^2} \quad (1)$$

诱导动态光栅的耦合系数为 κ [17]:

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

其中, λ 代表中心波长, n 为未泵浦 EDF2 的有效折射率。 L_g 是 EDF2 的长度, Δn 是折射率的变化量, 可以通过 Kramers-Kronig 关系[18]得出。在该实验中, $\lambda = 1559.54 \text{ nm}$, $L_g = 8 \text{ m}$, $n_{eff} = 1.44$, 折射率的变化估计为 2×10^{-7} , $\kappa = 0.18$, $\Delta f = 3.36 \text{ MHz}$, 自由光谱范围可表示为:

$$\text{FSR} = c/nL \quad (3)$$

c 表示光速, n 为掺铒光纤的折射率, L 为掺铒光纤的长度。 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n = 1.44$, $L = 8 \text{ m}$ 。主腔的 FSR = 8.68 MHz。 2 个 3 dB 耦合器之间两束光的光程差为复合腔的长度, 复合腔的纵模间隔差为:

$$\Delta \nu_q = \frac{c}{2n \times \Delta L} \quad (4)$$

c 表示光速, n 表示掺铒光纤的折射率, ΔL 为复合腔长度, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n = 1.44$, $\Delta L = 0.3 \text{ m}$, $\Delta \nu_q = 0.35 \text{ GHz}$ 。显然动态光栅部分的 FWHM 小于复合腔和主腔, 这意味着这种结构的动态光栅可能实现窄线宽输出。

3. 实验结果分析与讨论

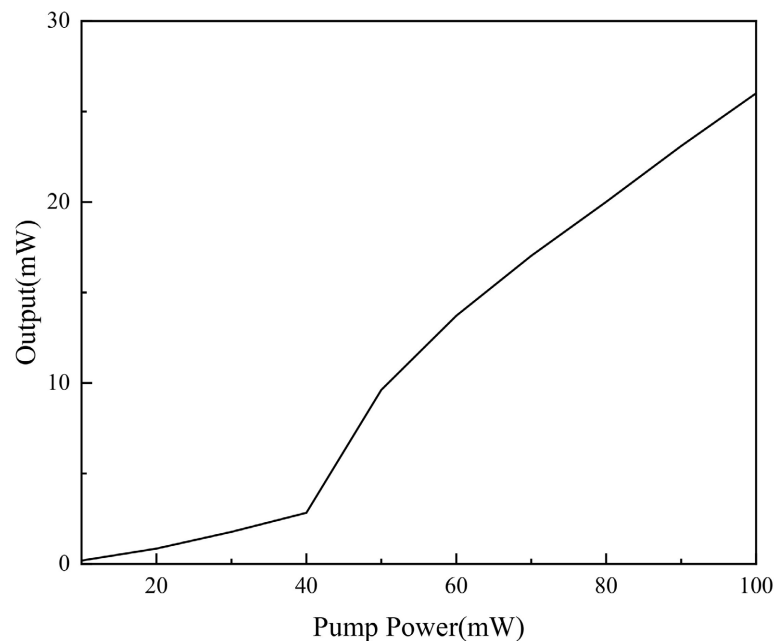


Figure 2. Slope efficiency of erbium-doped fiber lasers
图 2. 掺铒光纤激光器的斜率效率

输出光的斜率效率如图2所示, 泵浦光在 60 mW 后输出趋于稳定, 在泵浦光到达 100 mW 时, 输出为 26.01 mW, 该光纤激光器的斜率效率为 30.73%。中心波长在 1559.54 nm 处。

实验中使用功率计(THORLABS S145C)测试中心波长在 1559.54 nm 处, 泵浦功率为 70 mW, 输出功率为 17.53 mW 时该激光器输出功率的稳定性, 图3显示了 1 h 内此光纤激光器的输出功率的稳定性。

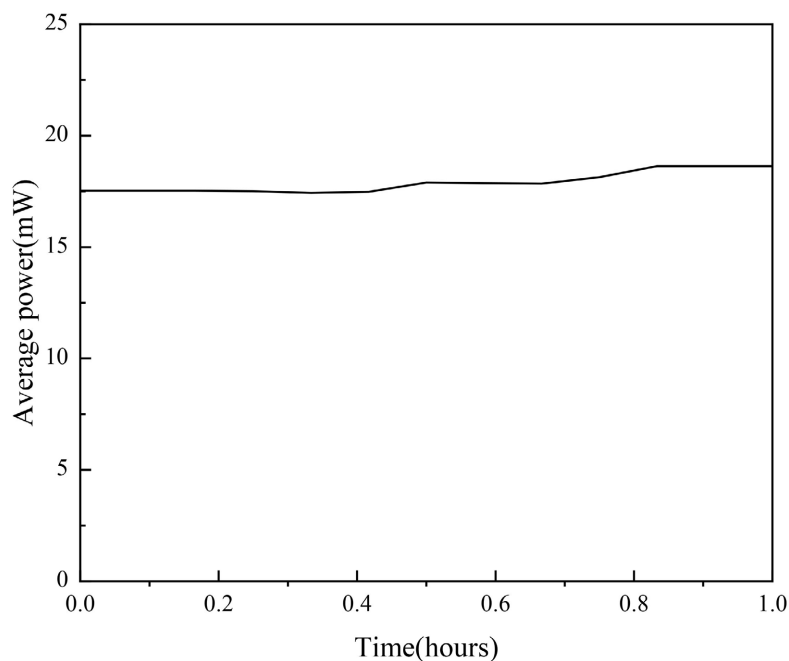


Figure 3. Stability curve of laser output power at a wavelength of 1559.54 nm

图3. 激光输出波长为 1559.54 nm 时输出功率稳定性曲线

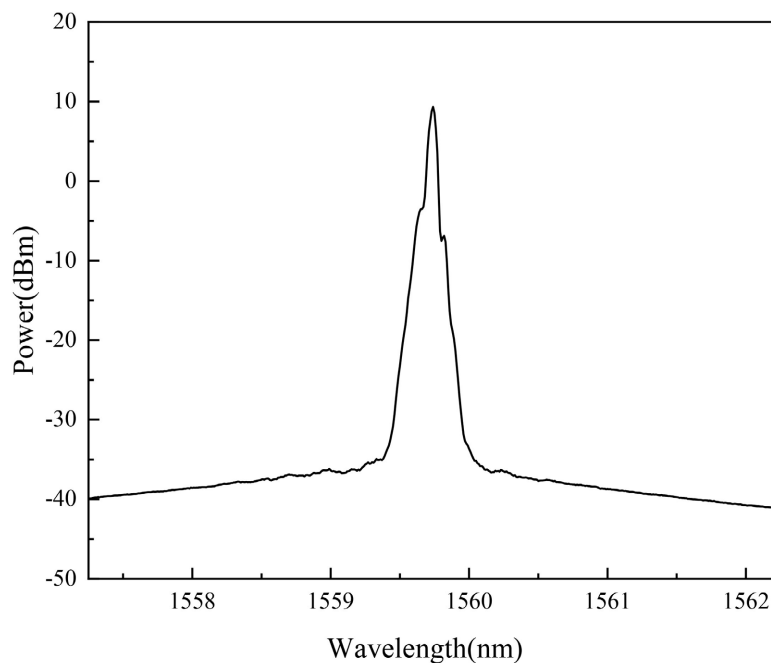


Figure 4. Output spectra of erbium-doped fiber lasers

图4. 掺铒光纤激光器的输出光谱

中心波长为 1559.54 nm 的光纤激光器的光谱图如图 4 所示,光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6375)的扫描范围在 1557.1~1562.1 nm 内,分辨率为 0.05 nm,光学信噪比为 39 dB。光谱在泵浦光为 150 mW 以下时可以保持长时间的稳定,泵浦光在 150 mW 时,输出达到 39.6 mW;在泵浦光到达 160 mW 时,开始发生周期为 22 s 一次的跳模现象,推测为泵浦功率过高,光纤激光器内部的光子密度会增加,这会导致光子之间的相互作用增强。当光子密度超过一定阈值时,非线性效应会变得非常显著,导致激光器输出的光频和光强发生剧烈的周期性变化。

光纤激光器的波长稳定性以及信噪比稳定性如图 5 所示,以 5 min 为间隔测量 1 h 内波长的稳定性。如图 5 所示,光谱中心波长没有显著变化。该波长偏移与光学信噪比波动是由于泵浦功率及环境变化所引起的。通过计算可知:波长分辨率的不稳定性小于 0.03 nm,光学信噪比的波动小于 0.16 dB。

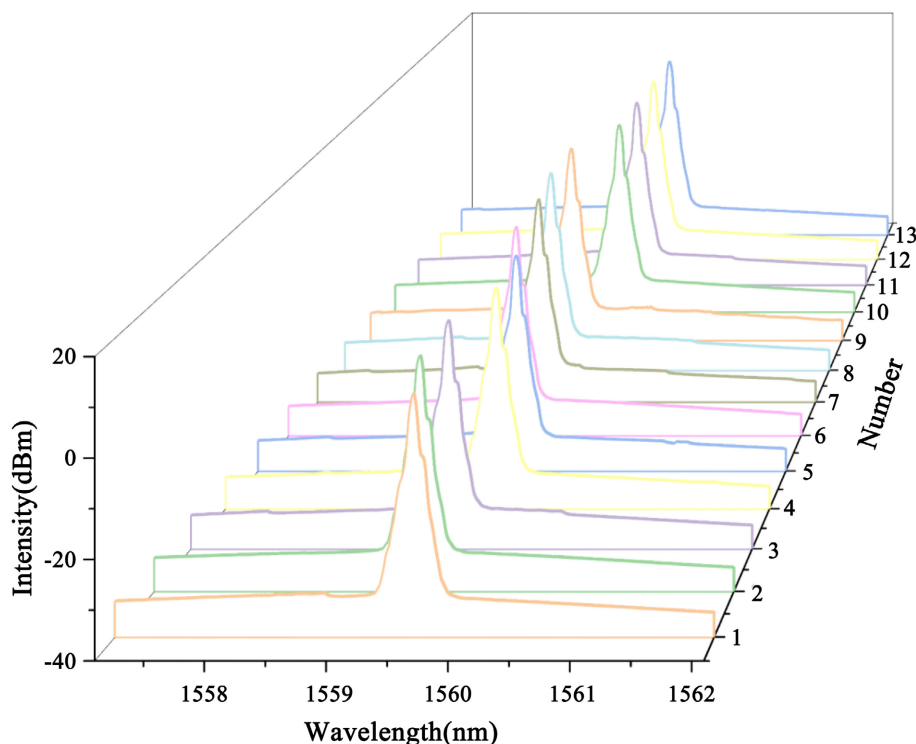


Figure 5. Output spectral stability of fiber laser within 1 hour

图 5. 1 h 内光纤激光器的输出光谱稳定性

该光纤激光器的线宽如图 6 所示,使用延迟自外差系统[19]测量该激光器的线宽。声光调制器(AOM)频移为 50 MHz,延迟光纤为 10 km 的单模延迟光纤,频谱分析仪(Agilent E4407B)用于测量外差信号,光电探测器的最高承受输出为 3 mW,在泵浦光为 70 mW 时,输出光为 17.03 mW,通过延迟光纤后,输出在光电探测器的承受范围内。使用洛伦兹线性拟合的频谱可以得到 1.99 kHz 的线宽。

使用带宽从 1 到 5 GHz,覆盖波长范围 400~1700 nm,最大峰值功率为 100 mW 的光电探测器(Thorlabs DET08CFC/M)和频谱分析仪(Agilent E4407B)测量此窄线宽激光器的相对强度噪声强度。当泵浦功率为 0 时,频谱分析仪的相对强度噪声如图 7 黑色曲线所示。当泵浦源的功率为 70 mW 时,从 0 到 1 MHz 的 37.5 kHz 信号频谱中的弛豫振荡频率峰值为 -89.6 dB/Hz。弛豫振荡是因为抽运场和激光信号场之间存在动态能量的交换过程。对比频率为 0~1 MHz 的相对噪声与接收的噪声。在此光纤激光器中没有观察到其他噪声成分。

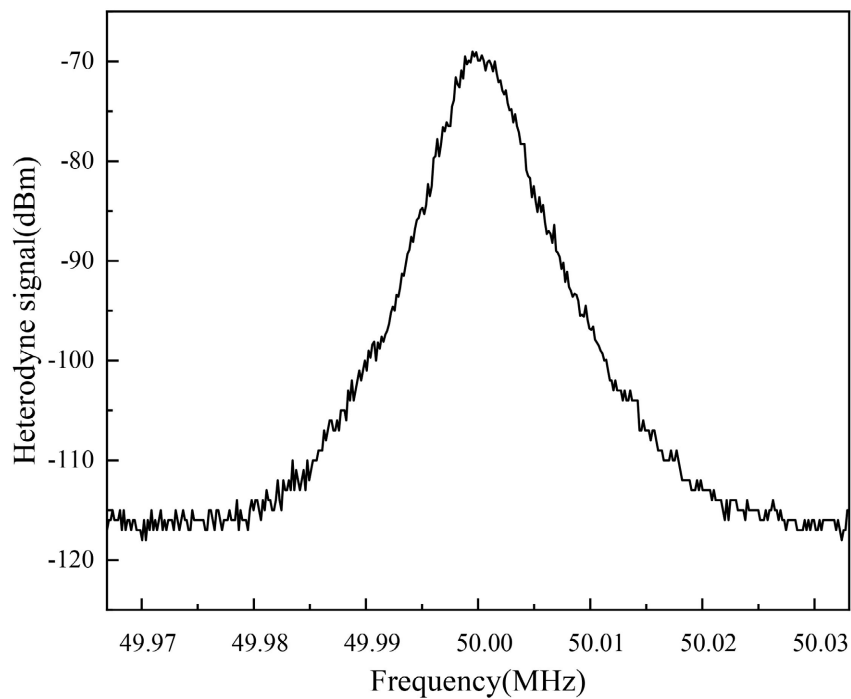


Figure 6. Spectral linewidth of erbium-doped fiber lasers

图 6. 掺铒光纤激光器的光谱线宽

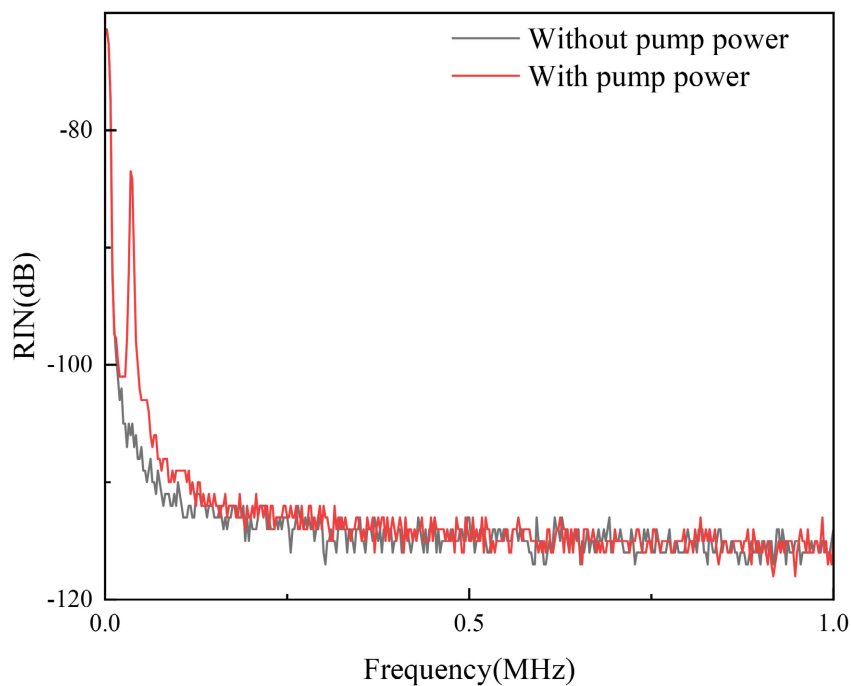


Figure 7. Relative intensity noise spectrum of fiber lasers

图 7. 光纤激光器的相对强度噪声频谱

4. 结论

通过将 EDF 作为可饱和吸收体, 3 dB 耦合器以及环形器, 设计了一种由未泵浦 EDF 作为可饱和吸

收体, 通过 3 dB 耦合器及环形器实现两束相同光在未泵浦的 EDF 中形成驻波, 光强的周期性分布导致吸收的周期性变化, 引起折射率的周期性变化的滤波结构。最终使可饱和吸收体内部形成一个动态光栅, 实现窄线宽输出, 证明了该结构是一种窄线宽光纤激光器。采用 980 nm 的半导体激光器作为泵浦源, 掺铒光纤在谐振腔内作为增益光纤以及可饱和吸收体, 光隔离器保证激光在谐振腔内的单向传输, 实验结果表明, 以 EDF 作为可饱和吸收体形成的动态光栅是保持该系统稳定运行的关键因素, 该结构有效地抑制了泵浦功率较低时的模式跳变。增益光纤以及可饱和吸收体的掺杂浓度、长度以及泵浦光的功率都会影响激光器的稳定性。采用 8 m 的 EDF 作为增益光纤, 以及 8 m 的未泵浦的 EDF 作为可饱和吸收体可以在泵浦为 150 mW 以下长时间地稳定运行。泵浦功率为 70 mW, 输出光功率为 17.03 mW, 斜率效率为 30.73%, 光学信噪比为 39 dB, 波长分辨率的不稳定性小于 0.03 nm, 光学信噪比的波动小于 0.16 dB, 从 0 到 1 MHz 的 37.5 kHz 信号频谱中的弛豫振荡频率峰值为-89.6 dB/Hz。通过延时自外差法测量线宽为 1.99 kHz。

参考文献

- [1] 马传刚. 激光焊接、切割在汽车制造中的应用研究[J]. 时代农机, 2016, 43(4): 29-31.
- [2] Tang, L., Shang, J., Wang, Z., *et al.* (2019) Gourd-Shaped Subring Resonator-Based Single Longitudinal Mode Erbium-Doped Fiber Laser. *Optical Engineering*, **58**, Article ID: 066110. <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.6.066110>
- [3] Wang, J., Zhu, R., Zhou, J., *et al.* (2011) Conductively Cooled 1-kHz Single-Frequency Nd:YAG Laser for Remote Sensing. *Chinese Optics Letters*, **9**, Article ID: 081405. <https://doi.org/10.3788/COL201109.081405>
- [4] Chen, H. (2004) Dynamics of Widely Tunable Single-Frequency Semiconductor Fiber Ring Laser. *Physics Letters A*, **320**, 333-337. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2003.11.038>
- [5] Yeh, C.-H. and Chi, S. (2005) A Wavelength-Tunable Erbium-Doped Fiber Double-Ring Laser with Stabilized Single-Frequency Operation. *Japanese Journal of Applied Physics*, **44**, 5003-5005. <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.5003>
- [6] Liegeois, F., Hernandez, Y., Peigne, G., Roy, F. and Hamoir, D. (2005) High efficiency, Single-Longitudinal-Mode Ring Fibre Laser. *Electronics Letters*, **41**, 729-730. <https://doi.org/10.1049/el:20050496>
- [7] Lee, C.-C., Chen, Y.-K. and Liaw, S.-K. (1998) Single-Longitudinal-Mode Fiber Laser with a Passive Multiple-Ring Cavity and Its Application for Video Transmission. *Optics Letters*, **23**, 358-360. <https://doi.org/10.1364/OL.23.000358>
- [8] Liu, J., Yao, J., Yao, J. and Yeap, T.H. (2004) Single-Longitudinal-Mode Multiwavelength Fiber Ring Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, **16**, 1020-1022. <https://doi.org/10.1109/LPT.2004.824975>
- [9] Stepanov, S. and Sánchez, M.P. (2011) Amplitude of the Dynamic Phase Gratings in Saturable Er-Doped Fibers. *Applied Physics B*, **102**, 601-606. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-4246-9>
- [10] Stepanov, S. and Hernández, E.H. (2007) Phase Contribution to Dynamic Gratings Recorded in Er-Doped Fiber with Saturable Absorption. *Optics Communications*, **271**, 91-95. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2006.09.044>
- [11] He, X., Xu, S.H., Li, C., Yang, C.S., Yang, Q., Mo, S.P., Chen, D.D. and Yang, Z.M. (2013) 1.95 μm kHz-Linewidth Single-Frequency Fiber Laser Using Self-Developed Heavily Tm^{3+} -doped Germanate Glass Fiber. *Optics Express*, **21**, 20800-20805. <https://doi.org/10.1364/OE.21.020800>
- [12] Le, B.L., Tao, J.B., Jin, K., *et al.* (2017) High-Stability Broadband Wavelength-Tunable Single-Frequency Ytterbium-Doped All-Fiber Compound Ring Cavity. *IEEE Photonics Journal*, **9**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2657747>
- [13] Poozesh, R., Madanipour, K. and Parvin, P. (2018) High SNR Watt-Level Single Frequency Yb-Doped Fiber Laser Based on a Saturable Absorber Filter in a Cladding-Pumped Ring Cavity. *Journal of Lightwave Technology*, **36**, 4880-4886. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2866472>
- [14] Wang, K.L., Wen, Z.R., Chen, H.W., *et al.* (2020) Observation of Reverse Self-Sweeping Effect in an All-Polarization-Maintaining Bidirectional Ytterbium-Doped Fiber Laser. *Optics Express*, **28**, 13913-13920. <https://doi.org/10.1364/OE.392903>
- [15] 熊水东, 徐攀. 掺铒光纤环形激光器中饱和吸收光栅瞬态特性引发跳模的实验研究[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 134206.
- [16] Wang, T., Zhang, L., Feng, C., Qin, M. and Zhan, L. (2016) Tunable Bistability in Hybrid Brillouin-Erbium Single-Frequency Fiber Laser with Saturable Absorber. *Journal of the Optical Society of America B*, **33**, 1635-1639. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.001635>

-
- [17] Xu, S., Yang, Z., Zhang, W., Wei, X., Qian, Q., Chen, D., Zhang, Q., Shen, S., Peng, M. and Qiu, J. (2011) 400 mW Ultrashort Cavity Low-Noise Single-Frequency Yb³⁺-doped Phosphate Fiber Laser. *Optics Letters*, **36**, 3708-3710. <https://doi.org/10.1364/OL.36.003708>
- [18] Pan, S. and Yao, J. (2009) Frequency-Switchable Microwave Generation Based on a Dual-Wavelength Single-Longitudinal-Mode Fiber Laser Incorporating a High-Finesse Ring Filter. *Optics Express*, **17**, 12167-12173. <https://doi.org/10.1364/OE.17.012167>
- [19] Okoshi, T., Kikuchi, K. and Nakayama, A. (2007) Novel Method for High Resolution Measurement of Laser Output Spectrum. *Electronics Letters*, **16**, 630-631. <https://doi.org/10.1049/el:19800437>