

短腔单频 DBR 光纤激光器中弛豫振荡噪声抑制的研究

湛彪¹ 徐善辉¹ 莫树培¹ 李灿¹ 杨昌盛¹ 冯洲明^{1,2} 张伟南^{1,2} 陈东丹^{1,2} 杨中民^{1,2}

(¹ 华南理工大学光通信材料研究所 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640)
² 广东省特种光纤材料与器件工程技术研究开发中心, 广东 广州 510640)

摘要 报道了短腔单频分布布拉格反射(DBR)Er³⁺/Yb³⁺共掺磷酸盐光纤激光器中弛豫振荡噪声的抑制结果。基于光电反馈法,该噪声抑制电路将激光器 1.15 MHz 处弛豫振荡峰值幅度抑制 26 dB 至 -121 dB/Hz;抑制后整个频带内相对强度噪声均低于 -120 dB/Hz。实验结果表明,此噪声抑制回路对单频光纤激光器的其他光学性能无影响。

关键词 光纤光学;光纤激光器;单频;短腔分布布拉格反射结构;弛豫振荡;Er³⁺/Yb³⁺离子;磷酸盐光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.090602

Study on the Relaxation Oscillation Suppression in a Short-Cavity Single-Frequency DBR Fiber Laser

Zhan Biao¹ Xu Shanhui¹ Mo Shupe¹ Li Can¹ Yang Changsheng¹
Feng Zhouming^{1,2} Zhang Weinan^{1,2} Chen Dongdan^{1,2} Yang Zhongmin^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, Institute of Optical Communication Materials, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China
² Special Glass Fiber and Device Engineering Technology Research and Development Center of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract Relaxation oscillation suppression in a short-cavity single-frequency distributed Bragg reflector (DBR) Er³⁺/Yb³⁺-codoped fiber laser is demonstrated. A tailored optoelectronic feedback circuit acting on the pump driver is designed to reduce the noise peak at the relaxation oscillation frequency of 1.15 MHz by 26 dB, to a relative intensity noise (RIN) value of -121 dB/Hz and thus the RIN value is below -120 dB/Hz across the whole frequency range. The noise suppression loop is integrated into the laser diode driver module and no laser beam quality degradation is observed.

Key words fiber optics; fiber laser; single frequency; short-cavity distributed Bragg reflector configuration; relaxation oscillation; Er³⁺/Yb³⁺ ions; phosphate fiber

OCIS codes 060.2280; 140.3510; 250.3140

1 引言

短腔单频光纤激光器因无跳模、极窄线宽、低噪声和全光纤结构等优点,近 20 年来一直是研究的热

收稿日期: 2013-04-10; **收到修改稿日期**: 2013-05-06; **网络出版日期**: 2013-06-26

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030203)、国家自然科学基金(11174085, U0934001, 60977060)、粤港招标项目(TC10BH07-1)、广东省科技计划项目(2009A090100044, 2009B091300127, cgzhzd0903, 2011B090400055)、中央高校基本科研业务费专项资金(2012ZZ0002, 2009ZZ0054)

作者简介: 湛彪(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器驱动电路及噪声抑制方面的研究。

E-mail: zhanbiao267@163.com

导师简介: 杨中民(1971—),男,教授,主要从事稀土离子掺杂玻璃、玻璃光纤及光纤器件与传感系统等方面的研究。

E-mail: yangzm@scut.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

点^[1-3]。但是,在大多数基于半导体抽运的单频光纤激光器中,频率位于几百千赫兹到几兆赫兹之间的弛豫振荡,限制了光纤激光器在高精度光纤传感^[4-7]、激光雷达^[8]、相干光通信^[9]及地震波探测^[10]等领域的进一步应用,如干涉型光纤传感要求激光光源的相对强度噪声(RIN)低于 -120 dB/Hz^[11]。目前,激光器弛豫振荡噪声的抑制方法主要有注入锁定法、模具清洁法、光电前馈法和光电反馈法。注入锁定法^[12]是将主激光器的光导入噪声抑制激光器(从激光器)中,在一定的情况下,主激光器的低噪声可直接转移到从激光器中。但该方法需另一台高性能低噪声的激光器与其同时运转。模具清洁法^[13]和光电前馈法^[14-15]因良好的噪声抑制效果也得到了较好的应用。但这两种方法成本高、结构复杂,同时破坏了光纤激光器的全光纤结构。相比之下,光电反馈法因简单的结构及良好的抗干扰性能而成为备受青睐的方法。Taccheo等^[16-21]曾用光电反馈法抑制固体激光器的弛豫振荡噪声。然而,迄今为止,在短腔单频分布布拉格反射(DBR)光纤激光器中,仍未见用光电反馈法进行弛豫振荡噪声抑制的详细报道。Spiegelberg等^[2]尽管提到了用光电反馈法对该类激光器的强度噪声进行抑制,但未详细说明,同时也未给出该噪声抑制回路对激光器其他光学性能是否有影响。

在本课题组的前期工作中,已在 2 cm长的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤中实现了 300 mW低噪声 1550 nm的单频光纤激光输出^[22],在高于 2 MHz频带,RIN低于 -120 dB/Hz^[23]。为进一步优化整个频带内光纤激光器的强度噪声,本文将分析短腔单频DBR光纤激光器的弛豫振荡噪声特性,并设计相应的反馈电路对该噪声进行抑制。

2 实验装置

本实验所用单频光纤激光器装置如图1(上方虚线内)所示。谐振腔结构与之前的报道^[24]类似,主要包括 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤、窄带光纤布拉格光栅(NB-FBG)和宽带光纤布拉格光栅(WB-FBG)。谐振腔封装于铜块中,并通过热电制冷器(TEC)进行精密温控(精度优于 0.1 °C)以保持输出功率和频率的稳定性。激光二极管(LD)发出的 980 nm抽运光通过波分复用器(WDM)耦合进谐振腔,输出激光从NB-FBG出射并经WDM信号端及光隔离器输出,其中隔离器可消除后级光路中的后向反射光对激光器的影响。谐振腔WB-FBG闲置端尾纤切成 8° 角,以消除后向端面光反射。

弛豫振荡噪声抑制反馈电路原理框图如图1(下方虚线内)所示。该环路基本原理是通过采集激光器的实时噪声信号作为反馈信号,经信号适调后对光纤激光器抽运源的驱动电流进行调节。具体来说,经光电探

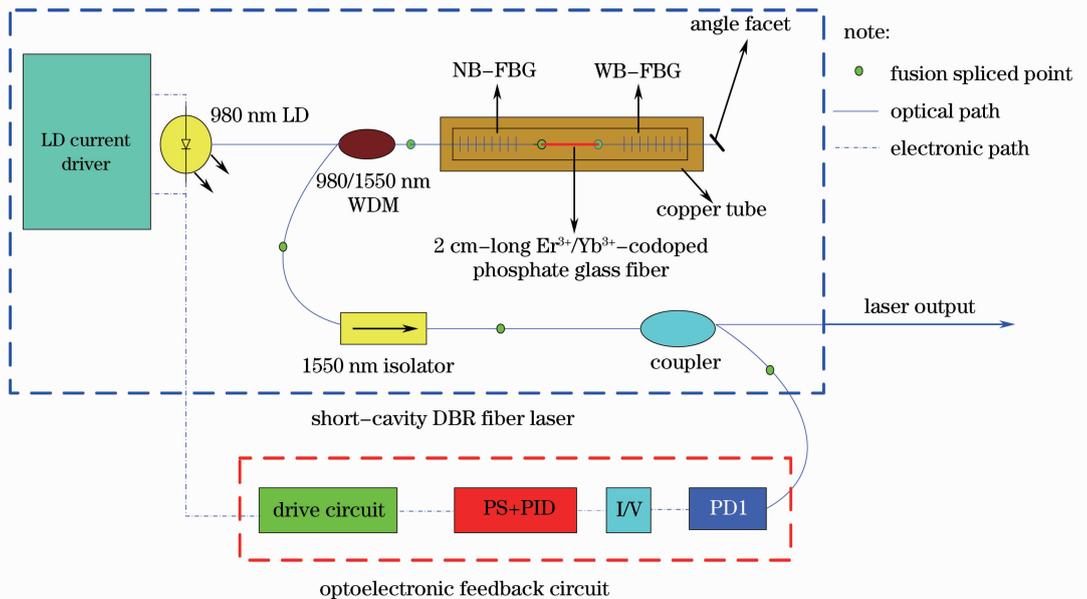


图1 弛豫振荡噪声抑制环路原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the optoelectronic feedback control loop for relaxation oscillation suppression

测器 PD1 转化后的电信号先经互阻放大器实现电流-电压(I/V)转换,后通过高通滤波电路提取噪声信号。噪声信号随后进入信号适调模块,该电路模块是整个抑制电路的关键部分。信号适调模块主要包括 PID 电路和移相电路(PS):从文献[16-17,25]知,为抑制激光器的弛豫振荡噪声,反馈电路的增益应非常大,故 PID 电路通过三级放大电路级联以获得足够大的增益,同时通过微分环节引入一定的相移;考虑到弛豫振荡频率处 270° 的相位突变^[16-17],移相电路在此频率点引入对应的相移。通过调试发现,整个噪声抑制回路抑制效果的好坏与恰当的相移直接相关,故再引入一移相电路。最后,调节信号经驱动级电路后,直接注入抽运源驱动电路以抑制弛豫振荡噪声。

3 实验结果及分析

测量强度噪声是将小部分输出光导入光电探测器中,再对相应电信号的频谱进行分析。实验中,通过可调光衰减器(VOA)调节入射到光电探测器中的光功率:一方面它应小于光电探测器的饱和功率以避免损伤器件;另一方面,它也应足够大以保证测量信号有足够高的信噪比(SNR)。基于光纤激光器的瞬态速率方程,夏江珍等^[26]指出线性腔光纤激光器的弛豫振荡频率与腔镜反射率、谐振腔腔长等因素相关;在其他参数固定的情况下,其弛豫振荡频率与谐振腔长度成反比。需要指出的是,得益于磷酸盐增益光纤的高增益,光纤激光器在很短的增益介质上即可实现较高功率输出,这解决了其稳健的单纵模运转与高的输出功率之间的矛盾^[22]。但是,在其他参数固定的情况下,因短腔 DBR 光纤激光器腔长较短,故其弛豫振荡频率相对较高。同时,短腔 DBR 光纤激光器一般工作在较高功率处,比如在高功率光纤激光放大系统中,种子激光器功率高能降低整个光放大环路中的放大自发辐射(ASE)噪声^[27]。实验发现,当增大抽运源驱动电流时,弛豫振荡峰值往高频方向移动且幅度减弱,如图 2 所示。基于以上两点,单频 DBR 光纤激光器弛豫振荡频率相对较高。如图 2 所示,当抽运电流大于 300 mA 时其弛豫振荡频率在 1 MHz 附近,故短腔单频 DBR 光纤激光器整个噪声抑制电路应选用增益带宽积较大的集成芯片(如 AD829),以保证整个控制电路的带宽匹配。另外,因弛豫振荡频率与抽运电流有关,该噪声抑制环路的移相网络中应引入电位器,以调节不同抽运电流下弛豫振荡噪声抑制所对应的合适相位点。

光纤激光器弛豫振荡噪声抑制前后频谱如图 3 所示。从自由运转激光器频谱(黑色)可以看出,该光纤激光器弛豫振荡为 $0.8 \sim 1.5$ MHz。对比弛豫振荡噪声抑制前后频谱知,1.15 MHz 处弛豫振荡峰值幅度被抑制了 26 dB 至 -121 dB/Hz,抑制后整个频带内 RIN 均低于 -120 dB/Hz,满足大多数高精度应用领域对激光器强度噪声的要求。

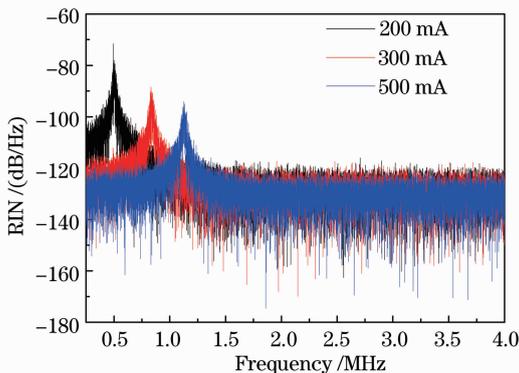


图 2 不同抽运电流下的弛豫振荡峰

Fig. 2 Relaxation oscillation peaks at different pump currents

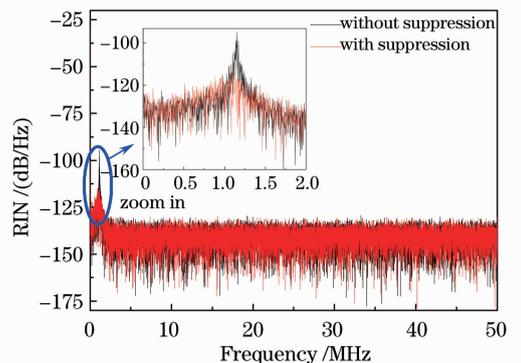


图 3 光纤激光器强度噪声测试谱。黑色为自由运转激光器噪声谱;红色为抑制后噪声谱。插图 为激光器弛豫振荡抑制前后低于 2 MHz 的强度噪声谱

Fig. 3 Experimental RIN spectra of the fiber laser. Black line: noise spectrum operating in the free-running regime. Red line: noise spectrum with the feedback loop turning on. Inset: the magnified RIN in the frequency of $0 \sim 2$ MHz

为检验弛豫振荡噪声抑制回路对光纤激光器其他性能的影响,在噪声抑制电路开启前后,测试了单频光纤激光器的光谱和线宽,如图4所示。其中,光谱测试选用了YOKOGAWA公司光谱仪(型号AQ637013),测试精度为0.02 nm。线宽测试采用延时自外差拍频法并通过Aglient公司频谱仪(型号N9320)进行测量,延时光纤长度为48.8 km。测试结果表明,该噪声抑制回路可较好地抑制弛豫振荡峰值,同时对光纤激光器的其他性能如信噪比、激光线宽等均无明显影响。

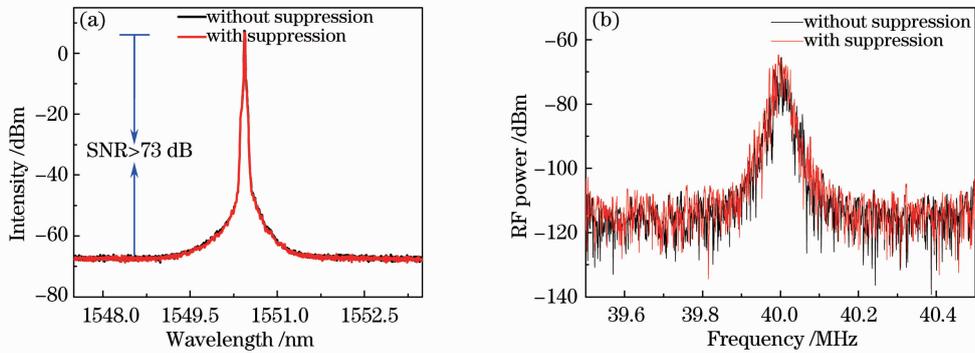


图4 (a) 弛豫振荡抑制前后激光光谱; (b) 弛豫振荡抑制前后激光线宽。黑色为自由运转; 红色为弛豫振荡抑制后
Fig. 4 (a) Laser spectra of the fiber laser; (b) self-heterodyne linewidths of the fiber laser. Black line: without relaxation oscillation suppression; red line: with relaxation oscillation suppression

4 结 论

综上所述,基于光纤激光器抽运源驱动电路的光电反馈噪声抑制回路,能较好地抑制短腔单频DBR光纤激光器中的弛豫振荡噪声,抑制后整个频带内RIN均低于 -120 dB/Hz;同时,该电路集成到原抽运源驱动电路时,对光纤激光器的其他光学性能无影响。以上结果表明,该单频光纤激光器在高精度光纤传感、激光雷达、相干光通信及地震波探测等领域有着更为广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 G A Ball, W W Morey, W H Glenn. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1991, 3(7): 613–615.
- 2 C Spiegelberg, J Geng, Y Hu, *et al.*. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm [J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(1): 57–62.
- 3 S H Xu, Z M Yang, W N Zhang, *et al.*. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb^{3+} -doped phosphate fiber laser [J]. Opt Lett, 2011, 36(18): 3708–3710.
- 4 L N Ma, Y M Hu, S Xiong, *et al.*. Intensity noise and relaxation oscillation of a fiber-laser sensor array integrated in a single fiber [J]. Opt Lett, 2010, 35(11): 1795–1797.
- 5 L N Ma, Z Hu, X Liang, *et al.*. Relaxation oscillation in Er^{3+} -doped and $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped fiber grating lasers [J]. Appl Opt, 2010, 49(10): 1979–1985.
- 6 G A Cranch, G Flockhart, C K Kirkendall. Distributed feedback fiber laser strain sensors [J]. IEEE Sens J, 2008, 8(7): 1161–1172.
- 7 Liang Xun, Xiong Shuidong, Hu Yongming, *et al.*. Impact of relative intensity noise on fiber optic hydrophone's phase generated carrier scheme [J]. Chinese J Lasers, 2009, 35(5): 716–721.
梁 迅, 熊水东, 胡永明, 等. 激光器强度噪声对光纤水听器相位载波解调的影响[J]. 中国激光, 2009, 35(5): 716–721.
- 8 J G Williams, S G Turyshev, D H Boggs. Progress in lunar laser ranging tests of relativistic gravity [J]. Phys Rev Lett, 2004, 93(26): 261101.
- 9 D Psaltis. Coherent optical information systems [J]. Science, 2002, 298(5597): 1359–1363.
- 10 B P Abbott, R Abbott, R Adhikari, *et al.*. LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory [J]. Rep Prog Phys, 2009, 72(7): 076901.

- 11 G A Cranch. Frequency noise reduction in erbium-doped fiber distributed-feedback lasers by electronic feedback [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(13): 1114–1116.
- 12 T C Ralph, E H Huntington, C C Harb, *et al.*. Understanding and controlling laser intensity noise [J]. *Opt Quantum Electron*, 1999, 31(5): 583–598.
- 13 Liu Kui, Cui Shuzhen, Zhang Hailong, *et al.*. Noise suppression of a single frequency fiber laser [J]. *Chin Phys Lett*, 2011, 28(7): 074211.
- 14 P K Lam, T C Ralph, E H Huntington, *et al.*. Noiseless signal amplification using positive electro-optic feedforward [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 79(8): 1471–1474.
- 15 Liu Kui, Yang Rongguo, Zhang Hailong, *et al.*. Noise suppression of single frequency fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1852–1856.
刘 奎, 杨荣国, 张海龙, 等. 单频光纤激光器的噪声抑制[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1852–1856.
- 16 S Taccheo, P Laporta, O Svelto, *et al.*. Intensity noise reduction in a single-frequency ytterbium-codoped erbium laser [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(21): 1747–1749.
- 17 G De Geronimo, S Taccheo, P Laporta. Optoelectronic feedback control for intensity noise suppression in a codoped erbium-ytterbium glass laser [J]. *Electron Lett*, 1997, 33(15): 1336–1337.
- 18 C C Harb, M B Gray, H A Bachor, *et al.*. Suppression of the intensity noise in a diode-pumped neodymium: YAG nonplanar ring laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30(12): 2907–2913.
- 19 Zhang Jing, Ma Hongliang, Wang Runlin, *et al.*. Suppression of intensity noise of LD-pumped single-frequency ring Nd: YVO₄ lasers by opto-electronic feedback [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9): 1031–1035.
张 靖, 马红亮, 王润林, 等. 光电负反馈抑制全固化单频激光器的强度噪声[J]. *光学学报*, 2001, 21(9): 1031–1035.
- 20 Li Ye, Cao Jianping, Deng Yongkai, *et al.*. Study on the properties and suppression of the intensity noise in semi-nonplanar monolithic lasers [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(8): 1050–1054.
李 焯, 曹建平, 邓勇开, 等. 半非平面单块激光器强度噪声及其抑制的研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1050–1054.
- 21 Zhang Xiuyong, Gao MMingwei, Gao Chunqing. Suppression of the intensity noise of monolithic non-planar ring oscillator laser [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(5): 774–777.
张秀勇, 高明伟, 高春清. 单块非平面环形腔激光器的强度噪声抑制技术研究[J]. *光学技术*, 2008, 34(5): 774–777.
- 22 S H Xu, Z M Yang, T Liu, *et al.*. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μm [J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1249–1254.
- 23 Zhang Weinan, Li Can, Mo Shupe, *et al.*. A compact low noise single frequency linearly polarized DBR fiber laser at 1550 nm [J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(8): 084205.
- 24 Zhang Weinan, Li Can, Feng Zhouming, *et al.*. Short cavity single frequency fiber laser at 1080 nm based on highly Yb³⁺-doped phosphate fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100601.
张伟南, 李 灿, 冯洲明, 等. 基于高掺 Yb³⁺ 磷酸盐光纤的 1080 nm 短腔单频光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 100601.
- 25 G A Cranch, M A Englund, C K Kirkendall. Intensity noise characteristics of erbium-doped distributed-feedback fiber lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, 39(12): 1579–1587.
- 26 Xia Jiangzhen, Qu Ronghui, Cai Haiwen, *et al.*. Studies on relaxation oscillation characteristics of fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(7): 807–810.
夏江珍, 瞿荣辉, 蔡海文, 等. 光纤激光器弛豫振荡特性研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(7): 807–810.
- 27 C S Yang, S H Xu, C Li, *et al.*. Ultra compact kilohertz-linewidth high-power single-frequency laser based on Er³⁺/Yb³⁺-codoped phosphate fiber amplifier [J]. *Appl Phys Express*, 2013, 6(2): 022703.