

文章编号: 1672-8785(2017)03-0017-04

基于腔内光放大器结构的光纤激光器噪声抑制方法

应 康 陈迪俊 魏 芳 蔡海文 瞿荣辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 设计了一种将半导体光放大器耦合于光纤激光器腔内的结构, 以抑制光纤激光器的相对强度噪声。基于半导体光放大器的增益饱和效应, 将光纤激光器在弛豫振荡峰处的相对强度噪声抑制了 30 dB。更进一步地, 通过腔内的放大器结构使得放大器内部的光学强度达到一个稳定态, 最终使得激光器的频率噪声没有因光放大器的加入而产生劣化。

关键词: 光纤激光器; 半导体光放大器; 相对强度噪声

中图分类号: TP7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.03.004

Intensity Noise Reduction of Fiber Laser via Intracavity SOA Structure

YING Kang, CHEN Di-jun, WEI Fang, CAI Hai-wen, QU Rong-hui

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: To suppress the relative intensity noise (RIN) of fiber DFB lasers, a structure which couples a semiconductor optical amplifier (SOA) into a fiber laser cavity is designed. On the basis of the gain saturation effect of the SOA, 30 dB RIN of the fiber laser at the relaxation oscillation frequency is suppressed. Furthermore, the optical intensity inside the SOA reaches a balanced state via the intracavity SOA structure. Finally, the frequency noise of the laser does not degrade with the addition of the SOA.

Key words: fiber laser; semiconductor optical amplifier; relative intensity noise

0 引言

低噪声激光光源在相干通信、光学传感、微波光子学以及引力波探测等领域都有着重要且广泛的应用。单频分布式反馈 (Distributed Feedback, DFB) 光纤激光器具有线宽极窄和相位噪声小等特性, 因此在光学传感等领域有着广泛应用^[1-5]。然而光纤激光器在百 kHz 左右的弛豫

共振频率下具有较大的相对强度噪声, 这也限制了它在高精度传感领域的应用。目前已经成熟的相关抑噪技术中有电子学负反馈技术^[6-8], 它是通过对光纤激光器的泵浦源强度进行负反馈调制来抑制光纤激光器的强度噪声的, 但是这类方法受限于较小的电子学带宽^[9]。近年来, 人们也提出了一些光学抑噪方法, 比如在腔内加入滤波器或非线性介质等^[10-11], 但其技术手

收稿日期: 2017-02-20

作者简介: 应康 (1987-), 男, 浙江嘉兴人, 助理研究员, 主要研究方向为单频激光器和光纤时频传递。

E-mail: yingk0917@siom.ac.cn

段往往较为复杂,成本较高。

最近,我们利用光放大器的增益饱和作用对光纤激光器的强度噪声进行了抑制^[12]。以掺铒光纤作为光放大器,在光纤激光器中成功地得到了 20 dB 的相对强度噪声抑制。然而由于铒离子的上能级粒子寿命较长,其响应频率只能达到百 Hz 量级。此后,也有一些研究人员通过半导体光放大器的增益饱和作用,在较大的带宽下抑制了光纤激光器的强度噪声^[13-15]。然而,这些研究都基于将半导体光放大器放在光纤激光器激光腔外的结构,这会显著劣化光纤激光器的频率噪声。关于这方面已有充分的实验予以证实^[16]。众所周知,半导体光放大器的折射率会随其内部光强度的变化而变化。因此,光放大器内部光强度的波动会导致频率噪声的增加。而在以往所用的将光放大器放到光纤激光器腔外的结构中,半导体光放大器的输入光功率具有较大的强度噪声,最终会显著劣化激光器的频率噪声性能。

本文设计了一种置于光纤激光器激光腔内的半导体光放大器结构,成功地抑制了光纤激光器的相对强度噪声,而且没有造成频率噪声的劣化。我们利用半导体光放大器在大带宽下的增益饱和作用以及激光腔内的功率稳态特性,实现了光纤激光器在弛豫共振峰处 30 dB 的强度噪声抑制,并且没有带来额外的频率噪声。

1 实验与讨论

图 1 为实验装置的示意图。其中,RSOA 为反射型半导体光放大器,FL 为 DFB 光纤激光器,WDM 为波分复用器,PD 为光电探测器,DAQ 为数据采集卡,FFT 为快速傅里叶变换,OSA 为光谱分析仪,SL 为 980 nm 半导体激光器的泵浦源。DFB 光纤激光器是在一段 2 cm 长的铒镱共掺的光敏光纤上光刻一段布拉格光栅而制成的;波长为 980 nm 的半导体激光器提供泵浦功率在 200 mW 左右的光纤激光器;在光纤激光器的一端制作一块光纤锥形透镜以提高光纤

与半导体光放大器的耦合效率;半导体光放大器是一块由美国 Thorlabs 公司生产的 SAF1126H 型 InP 增益芯片。光纤激光器的输出与半导体光放大器的耦合需要在显微镜下仔细调整并使得光纤激光器与光放大器尽可能靠近,如图 2 所示。这样,半导体光放大器就成为了激光器谐振腔的一部分。当光在激光腔内振荡时,由于光放大器的增益饱和作用,激光器的输出光的功率波动将会得到抑制。

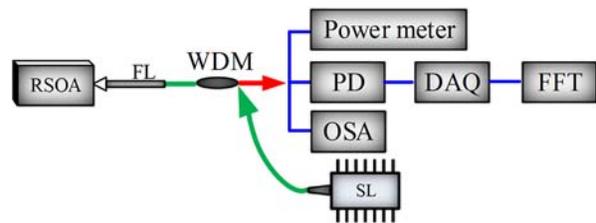


图 1 实验装置的示意图

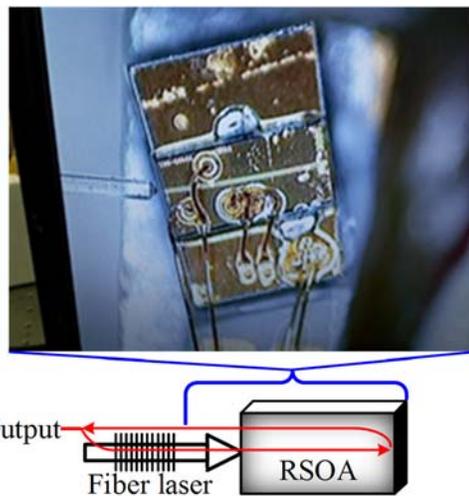


图 2 在显微镜下实现半导体光放大器与光纤激光器的耦合

首先,用功率计测量了不同实验参数下的系统输出功率。图 3 所示为测量结果,其中红线、黑线和蓝线分别表示 180 mW、200 mW 和 220 mW 的泵浦功率。从图 3 中可以看出,激光器的输出功率会随着半导体光放大器的驱动电流的增大而增大。更进一步地,当光放大器的驱动电流在 110 mA 以上时,不同泵浦强度的激光器的输出功率稳定在同一个值上。由此可见,激光器输出功率的波动被光放大器成功地抑制了。

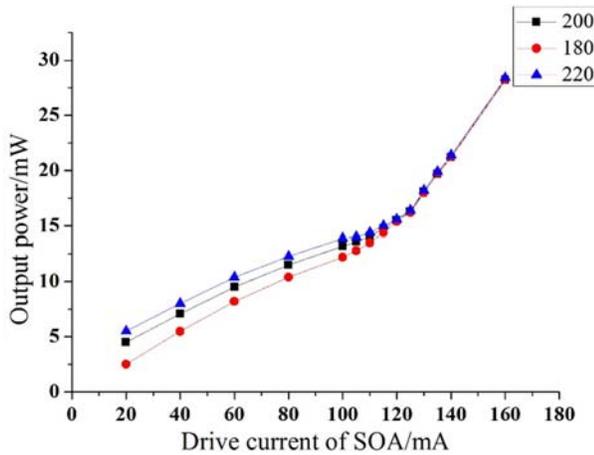


图 3 光纤激光器在不同光放大器驱动电流下的输出功率

接着采用光电探测器探测激光器的输出强度, 并通过将采集卡的采集数据输入计算机来进行频谱分析, 从而得到系统的相对强度噪声。频谱分析的带宽为 2.5 MHz。图 4 所示为在不同实验条件下得到的相对强度噪声测试结果。其中, 紫线、黄线、蓝线和青线表示半导体光放大器的驱动电流分别为 40 mA、80 mA、120 mA 和 150 mA; 红线表示腔内没有半导体激光器时的测试结果。从图 4 中可以看出, 在自由运转

的情况下, 激光系统在 750 kHz 弛豫共振频率处的相对强度噪声约为 -100 dB/Hz (图 4 中红线所示)。当半导体光放大器的驱动电流从 0 提高至 120 mA 时, 弛豫共振频率处的强度噪声降至 -130 dB/Hz。因此, 我们在实验中利用半导体光放大器的增益饱和作用, 成功地将光纤激光器在弛豫共振峰处的相对强度噪声抑制了 30 dB (图 4 中蓝线所示)。当半导体光放大器的驱动电流为 120 mA 时, 我们得到了最佳的强度噪声抑制效果, 成功地消除了光纤激光器的弛豫振荡峰。另外, 我们还测量了测量系统的背景噪声 (见图 4 中的绿线)。可以看出, 低频处的一些噪声是由探测器和采集卡带来的。

更进一步地, 我们采用一台 3×3 干涉仪测量了激光系统的频率噪声, 并以此评估了激光腔内半导体光放大器的加入对系统频率噪声的影响。关于 3×3 干涉仪的详细描述参见文献 [17]。图 5 所示为测量结果, 其中蓝线和红线分别代表激光系统不包含光放大器和包含光放大器时的测试结果。由此可见, 激光腔内光放大器的加

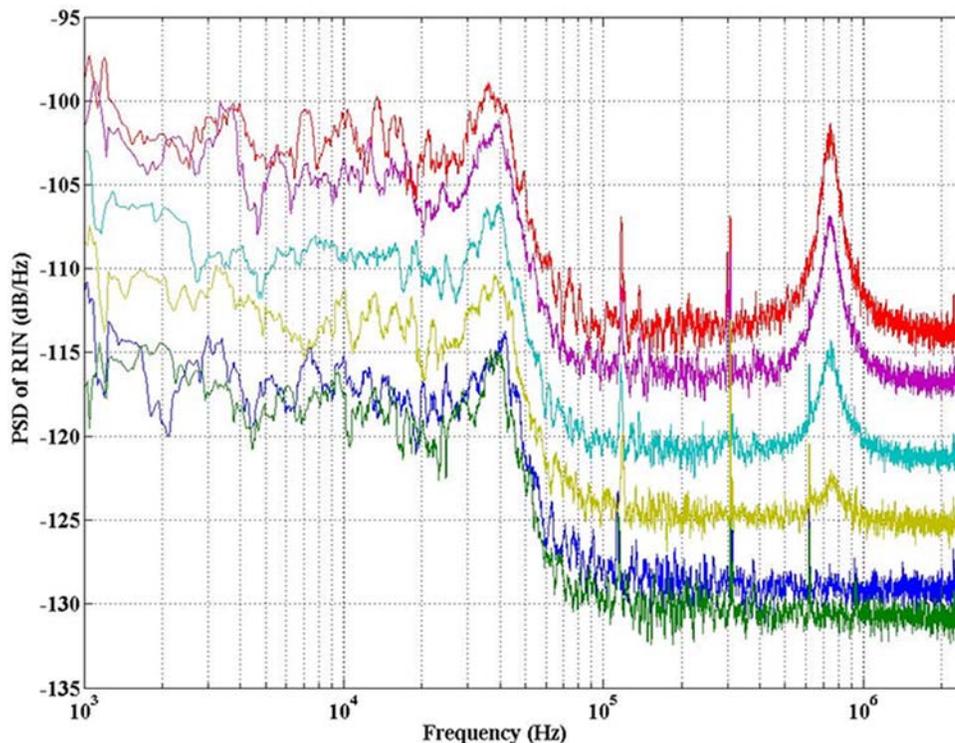


图 4 光纤激光器在不同实验条件下的相对强度噪声

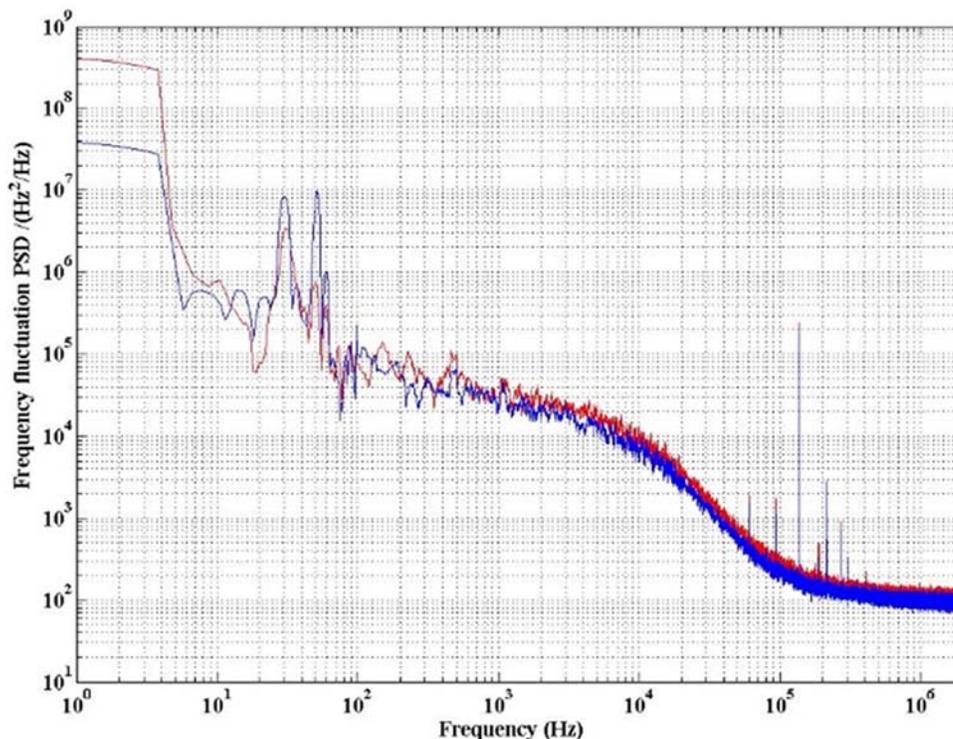


图 5 激光器在有/无半导体光放大器时的频率噪声谱

入并不会影响激光系统的频率噪声。我们在光放大器的驱动电流分别为 60 mA、80 mA 和 100 mA 的条件下进行了类似实验。结果表明，测得的激光系统的频率噪声并不会随着腔内光放大器的加入而发生变化。由此可见，由于半导体光放大器处于激光器腔内，光放大器内部的光功率是稳定的，因此它不会对激光器系统的频率噪声产生劣化效应。由测得的频率噪声可知，激光器的积分线宽小于 5 kHz。通过用更好的封装来隔绝环境扰动，我们有望得到更窄的激光输出线宽。

2 结束语

基于激光腔内的半导体光放大器结构，我们成功实现了光纤激光器的相对强度噪声抑制，并将其在弛豫共振频率下的相对强度噪声抑制了 30 dB。更进一步地，由于采用腔内光放大器结构，光强度在放大器的内部处于一个稳态，因此光放大器的加入并没有造成激光系统频率噪声的劣化。此种低噪声激光源有望在相干光通信、高分辨率光谱学以及引力波探测等领域得到广泛应用。

参考文献

- [1] Spiegelberg C, Geng J H, Hu Y D, et al. Low-noise Narrow Linewidth Fiber Laser at 1550 nm [J]. *J Lightwave Technol*, 2004, **22**(1): 57–62.
- [2] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, et al. Making Optical Atomic Clocks More Stable with 10-16-level Laser Stabilization [J]. *Nat Photonics*, 2011, **5**(3): 158–161.
- [3] The LIGO Scientific Collaboration. A Gravitational Wave Observatory Operating beyond the Quantum Shot-noise Limit [J]. *Nat Phys*, 2011, **7**(12): 962–965.
- [4] Littrell R, Hall N, Okandan M, et al. Impact of Relative Intensity Noise of Vertical-cavity Surface-emitting Lasers on Optics-based Micromachined Audio and Seismic Sensors [J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(28): 6907–6911.
- [5] Hosseini S, Banai A. Noise Figure of Microwave Photonic Links Operating under Large-signal Modulation and Its Application to Optoelectronic Oscillators [J]. *Appl Opt*, 2014, **53**(28): 6414–6421.
- [6] Pradhan S, Town G E, Wilson D. Intensity Noise Reduction in a Multi Wavelength Distributed Bragg Reflector Fiber Laser [J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(20): 2963–2965.

(下转第 30 页)