

文章编号: 0253-2239(2006)02-0217-4

## 低噪声光纤激光器的实验研究\*

俞本立 甄胜来 朱 军 曹志刚

(安徽大学物理与材料科学学院信息材料与器件安徽省重点实验室, 合肥 230039)

**摘要:** 光传感和光通信领域的迅速发展迫切需要相位噪声和强度噪声都很低的激光光源, 为满足这一需求, 设计出一种新型低噪声光纤激光器。激光器采用复合腔结构, 以掺铒光纤作为工作物质, 通过在未被抽运的掺铒光纤中形成的瞬态自写入光纤光栅的窄带滤波特性进行选模和压窄线宽, 产生稳定的单频激光输出; 经过光路改进, 激光输出光谱信噪比优于 62 dB; 利用光电负反馈电路, 弛豫振荡峰下降了约 25 dB, 低频段强度噪声也大为改善, 有效地抑制了光源的强度噪声。激光器的输出功率大于 1 dBm, 线宽小于 1 kHz, 边模抑制比超过 50 dB。优异的低噪声特性使得该激光器在光传感和光通信领域具有重要的应用价值。

**关键词:** 激光器; 光纤激光器; 光电负反馈; 饱和吸收

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Experimental Study on Low-Noise Fiber Laser

Yu Benli Zhen Shenglai Zhu Jun Cao Zhigang

(Anhui Key Laboratory of Information Materials and Devices, School of Physics  
and Material Science, Anhui University, Hefei 230039)

**Abstract:** With the rapid progress of optical sensors and optical communications, the laser source with low phase noise and intensity noise is in urgent demand. To meet the needs, a novel low-noise fiber laser with compound cavity structure is designed. The stable single-mode operation is realized by using a transient self-written fiber grating, produced by the effect of saturable absorption within a section of unpumped erbium-doped fiber, as narrow band filter for mode selecting and linewidth squeezing. Through optical path modification, the spectral signal-to-noise ratio is better than 62 dB. With opto-electronic negative feedback, the intensity noise of the source is well suppressed, the intensity noise in the low frequency band is greatly improved and the relaxation oscillation peak is reduced with about 25 dB. The laser has an output power more than 1 dBm, linewidth less than 1 kHz, and side-mode-suppression ratio larger than 50 dB. The excellent noise property indicates that the source has important applications in optical sensors and optical communications.

**Key words:** lasers; fiber lasers; opto-electronic negative feedback; saturable absorption

### 1 引 言

窄线宽单频激光器以其低噪声特性在光传感、光通信和光谱分析等领域是极具吸引力的一种光源。一般的光纤激光器具有窄线宽特性, 但在没有任何锁模和选频措施下, 其自由运转状态输出光一般为不稳定的多纵模激光, 其中心频率是极易跳变的, 人们采用了很多方法来获得单频激光<sup>[1,2]</sup>, 常采用的是复杂的结构或精密的控制技术, 难以在实际

中得到大量应用。利用未被抽运掺铒光纤饱和吸收形成瞬态自写入光栅来进行滤波的原理以其简便和稳定的特性获得了广泛的应用<sup>[3~6]</sup>。

此外, 激光器量子理论模型表明<sup>[7]</sup>, 激光二极管抽运的全固化单频固体激光器, 输出激光的强度噪声在几个 kHz 到几个 MHz 频率之间存在弛豫振荡<sup>[8~10]</sup>。光纤激光器的输出激光也包含着明显的弛豫振荡峰, 这使得光纤激光器的低频范围内强度噪声

\* 安徽省优秀青年科技基金(04042045)和安徽省高等学校青年教师科研资助计划(2004jq111)资助课题。

作者简介: 俞本立(1963~), 男, 安徽五河人, 安徽大学教授, 博士生导师, 主要从事光电技术、光传感等方面的研究。

E-mail: benliyu@ahu.edu.cn

收稿日期: 2005-02-23; 收到修改稿日期: 2005-07-08

较为明显,光纤激光器在光传感和光通信领域的广泛应用迫切要求降低光纤激光器的低频强度噪声。

本文首先在实验室已有工作的基础上,利用未抽运掺铒光纤饱和和吸收原理,通过对光纤激光器光路的改进,得到了光谱信噪比较高的单频窄线宽激光输出;进而利用光电负反馈实现对激光器弛豫振荡噪声的抑制。在 90 kHz 弛豫振荡峰处噪声降低了约 25 dB。

## 2 实验装置

实验装置由复合腔光纤激光器和光电负反馈电路两部分组成,如图 1 所示。

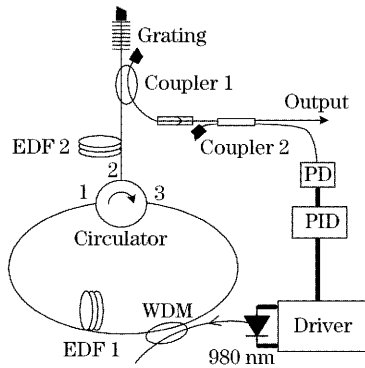


图 1 光电负反馈低噪声光纤激光器结构

Fig. 1 Schematic of opto-electronic negative feedback low-noise fiber laser

在文献[11]的基础上,我们改进了光路结构,设计了新型低噪声光纤激光器。装置由抽运激光器、波分复用器(WDM)、环形器、20:80 输出耦合器 1、光纤隔离器、光纤光栅、抽运掺铒光纤(EDF1)和未抽运掺铒光纤(EDF2)组成。抽运光源为 980 nm

光纤光栅稳频半导体激光器;波分复用器为 980 nm/1550 nm 波分复用器;抽运掺铒光纤为 Lucent HG6, 2 m, 1530 nm 处的吸收率为 11 dB/m;未抽运光纤为 Lucent HP15 m, 1530 nm 处的吸收率为 5.5 dB/m;光纤光栅中心波长 1549.7 nm, 3 dB 反射带宽 0.13 nm;光源输出从输出耦合器 1 的 20% 分光比脚输出。

光纤激光器的输出激光经 5:95 的输出耦合器 2 分成两路,其中 5% 的激光作为反馈信号输入到光电探测器光电管(Photo diode, PD)转换为电信号,再通过比例-积分-微分(Proportional-integral-differential, PID)电路处理后反馈到抽运激光器的驱动电路中,从而达到抑制强度噪声的效果。

实验中光谱测量用 HP71451B 光谱分析仪。激光线宽等的测量采用零拍法<sup>[12]</sup>,光纤零拍干涉仪中光纤延时线的长度为 15 km,光电接收器的频宽为 1.5 GHz,频谱分析仪是 AV4021,其最小分辨率带宽为 1 Hz,测量范围为 2 Hz~2 GHz。

## 3 原理分析

在图 1 结构中,EDF1 为抽运掺铒光纤,EDF2 为未抽运掺铒光纤,当抽运光功率和两段掺铒光纤长度合适时,EDF2 内部诱发了空间烧孔现象,形成了瞬态自写入光纤光栅,和光纤布拉格光栅相比带宽更窄,能够抑制边模激光,使光纤激光器得到单纵模输出,同时跳模的现象得到了有效的解决<sup>[3]</sup>。该结构中激光经光栅反射后耦合输出,与文献[11]相比荧光成分大为减少,因而光谱信噪比得到明显提高。

激光器在光电负反馈调控下的强度噪声为<sup>[8]</sup>

$$V = \frac{(1-\epsilon)\{V_f[\omega_r^2 - \omega^2]^2 + \omega^2\gamma_i^2\} + 4kk_m\gamma_i^2r(r-1)|H(\omega)|^2[(1-\eta_D)/(\eta_D\epsilon)]}{|i\omega\gamma_1 + (\omega_r^2 - \omega^2) - \sqrt{4kk_m\gamma_i^2r(r-1)}H(\omega)|^2} + \frac{(1/\epsilon)|i\epsilon\omega\gamma_1 + \epsilon(\omega_r^2 - \omega^2) - \sqrt{4kk_m\gamma_i^2r(r-1)}H(\omega)|^2}{|i\omega\gamma_1 + (\omega_r^2 - \omega^2) - \sqrt{4kk_m\gamma_i^2r(r-1)}H(\omega)|^2}, \quad (1)$$

其中  $r$  为归一化抽运因子,  $\gamma_i$  为上能级的自发辐射速率,  $k$  为总的腔衰减速率,  $k_m$  为输出镜耦合损耗,  $\omega$  为射频噪声分析频率,  $\omega_r$  为弛豫振荡频率,  $\gamma_1$  为弛豫振荡的阻尼速率,  $\eta_D$  为探测器效率,  $\epsilon$  为光束分束比,  $H(\omega)$  为反馈电路的传递函数。当  $H(\omega) = 0$  时, (1) 式变为自由运转激光的噪声式。(1) 式表明,通过光电负反馈调控,可改变激光输出强度噪声<sup>[8]</sup>,进一步通过反馈回路的优化,可降低光源的强度噪声。

通常采用比例-积分-微分电路来进行反馈控制。

激光器的输出经 5:95 的耦合器(coupler2)分成两路,其中 5% 的光耦合到光电探测器光电管,其输出的电信号经比例-积分-微分电路处理后反馈到抽运光源的驱动电路中。比例-积分-微分电路由比例、积分、微分三部分电路组成,比例电路的作用是按比例反应系统的偏差;积分电路的作用是使系统消除稳态误差,主要对低频的变化进行响应;微分电

路的作用是反映系统偏差信号的变化率,具有预见性,能预见偏差变化的趋势,能够对高频变化作出快速响应。合理调整三部分电路的参量,可使比例-积分-微分电路改善整个反馈网络的性能。通过反馈信号改变抽运激光的输出特性,从而能够有效地抑制光纤激光器的强度噪声。

#### 4 实验结果

激光输出光谱如图 2 所示,输出激光光谱信噪比大于 62 dB。由于光谱分析仪分辨力的限制,不太可能看出腔输出是否是真正的单频激光输出。

为了进一步研究腔输出激光的光谱特性,采用了零拍法来考察。图 3 即为零拍法的测量结果,说

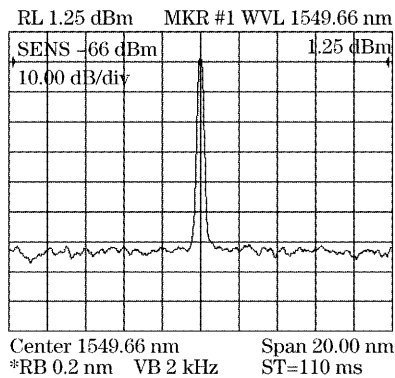


图 2 输出激光光谱

Fig. 2 Output of the laser spectrum

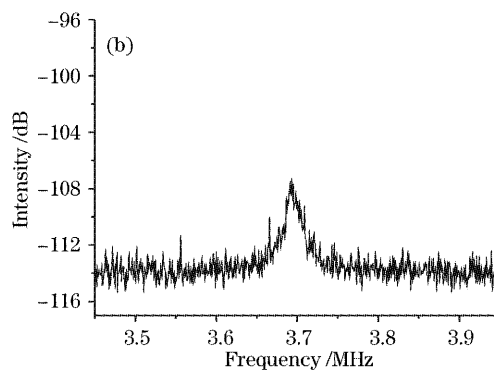
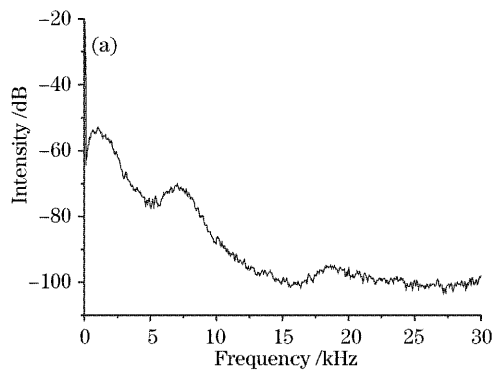


图 4 零拍测量频谱。(a)主模,(b)第一边模

Fig. 4 Homodyne measurement spectrum of the fiber laser. (a) Main mode, (b) first side-mode

为了减少隔直电容带来的线宽测量误差,给出真实的激光测量线宽,图 5 中采用了数据拟合。数据拟合结果带宽为 0.7 kHz。极窄的线宽表明了该激光器优异的相位噪声特性。

明了该激光是由一个主模和一系列的边模组成,其间距自由光谱范围 (Free Spectral Range, FSR) 为 3.7 MHz。是否为单频激光输出,要由边模抑制比 (Side-mode suppression ratio, SMSR) 来确定。

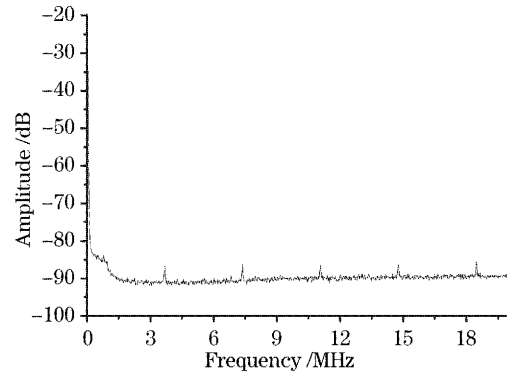


图 3 光纤激光的零拍测量频谱  
Fig. 3 Homodyne measurement spectrum  
of the fiber laser

由于激光线宽极窄加之频谱分析仪的零频测量误差,无法从图 3 中得到较为准确的边模抑制比,在实验中采用分别测量主模和第一边模峰高的方法。图 4(a)即是主模零拍射频谱,图中低频方向的凹陷是由光电转换电路中隔直电容及频谱分析仪零频误差引起的。图 4(b)是第一边模的零拍射频谱,比较图 4(a)和图 4(b)可得出激光的边模抑制比大于 53 dB,所以是很好的单频激光。

从图 6 可以看出,采用光电负反馈电路后,光纤激光器的强度噪声有了很明显的改善,特别是在弛豫振荡峰处强度噪声下降了约 25 dB。

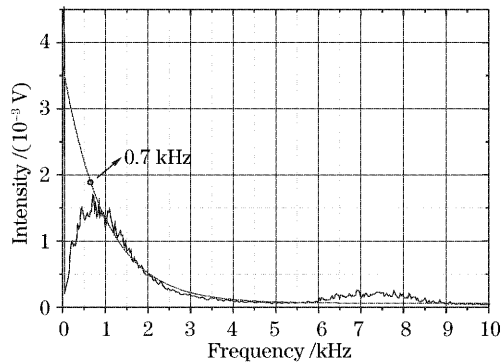


图 5 光纤激光器线宽

Fig. 5 Linewidth of the fiber laser

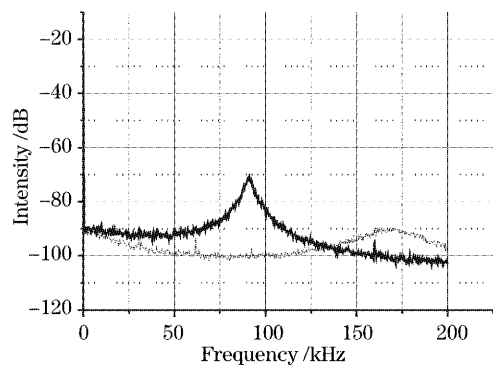


图 6 光电负反馈电路降噪结果

Fig. 6 Noise suppression using opto-electronic negative feedback

## 5 结 论

实验中光纤激光器的输出功率为 1.3 mW, 实验结果表明, 通过结构改进使激光输出光谱信噪比大于 62dB, 利用光电负反馈电路使低频段强度噪声也大为改善, 优异的低噪声特性使其在光纤传感和光纤通信领域具有较好的应用前景。进一步的研究可在该激光器的基础上, 通过保偏光纤器件的引入, 实现低噪声保偏激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 R. Larose, D. Stepanov, C. Latrasse. Simple frequency tuning technique for locking a single mode erbium-doped fibre laser to the centre of molecular resonances[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(10): 791~793
- 2 Jianluo Zhang, Chaoyu Yue, Gregory W. Schinn *et al.*. Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 104~109
- 3 Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- 4 H. H. Kee, G. P. Lees, T. P. Newson. A stable narrow linewidth Q-switched Er-doped fibre laser[C]. *CLEO*, 1999. 246~247
- 5 H. H. Kee, G. P. Lees, T. P. Newson. Narrow linewidth CW and Q-switched erbium-doped fibre loop laser[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1318~1319
- 6 S. J. Frisken. Transient Bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(24): 1776~1778
- 7 Timothy C. Ralph, Charles C. Harb, Hans A. Bachor. Intensity noise of injection locked lasers: Quantum theory using a linearized input/output method [J]. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **54**(5): 4359~4369
- 8 Zhang Jing, Ma Hongliang, Wang Runling. Suppression of intensity noise of LD pumped single-frequency ring Nd: YVO<sub>4</sub> laser by opto-electronic feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1031~1035 (in Chinese)  
张 靖, 马红亮, 王润林. 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
- 9 Zhang Jing, Zhang Kuansou, Chen Yanli. Intensity noise properties of LD pumped single-frequency ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1311~1316 (in Chinese)  
张 靖, 张宽收, 陈艳丽. 激光二极管抽运的环形单频激光器的强度噪声特性研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1311~1316
- 10 Ma Hongliang, Zhang Jing, Li Fenqin. Suppression of intensity noise by an opto-electronic feedback loop with amplitude modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1201~1205 (in Chinese)  
马红亮, 张 靖, 李凤琴. 利用振幅调制器进行光电负反馈抑制激光强度噪声[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1201~1205
- 11 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong. Stable single-frequency fiber ring laser with linewidth less than 0.5 kHz [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(4): 345~348 (in Chinese)  
俞本立, 钱景仁, 罗家童. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(4): 345~348
- 12 Yu Benli, Qian Jingren, Yang Yinghai. Homodyne method for measuring narrow linewidth laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(4): 351~354 (in Chinese)  
俞本立, 钱景仁, 杨瀛海. 窄线宽激光的零拍测量法[J]. *中国激光*, 2001, **28**(4): 351~354