

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2012.03.009

光电反馈抑制掺铒光纤激光器的低频强度噪声

张 飞, 朱 军, 汪 辉, 杨 珂, 马良川, 俞本立

(安徽大学光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

摘 要: 通过光电反馈电路对掺铒光纤激光器的中低频噪声进行了抑制。根据速率方程理论, 分析了影响掺铒光纤激光器强度噪声的因素, 通过电路仿真分析优化反馈电路参数, 重点讨论反馈信号的相位对噪声抑制的影响。实验表明: 激光器的低频 (小于 20 kHz) 强度噪声平均降低了 10 dB, 中频弛豫振荡峰处 (30 kHz 附近) 抑制达 35 dB, 并且克服了光电反馈抑制强度噪声使弛豫振荡峰向高频移动, 导致高频噪声增大的问题。优异的噪声特性使光纤激光器在光传感领域具有很高的实用价值。

关键词: 激光技术; 掺铒光纤激光器; 强度噪声; 光电反馈

中图分类号: TN248 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2012)03-0311-05

Intensity noise of erbium doped fiber laser at low frequency suppression through optoelectronic feedback

ZHANG Fei, ZHU Jun, WANG Hui, YANG Ke,
MA Liang-chuan, YU Ben-li

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and Manipulation, Ministry of Education,
Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: The low and medium frequency intensity noise of the erbium doped fiber laser (EDFL) is suppressed by using optoelectronic feedback. The factors affecting the intensity noise of the EDFL are analyzed by the rate equations. The importance of the phase of feedback signal in noise suppression are discussed by simulating and optimizing the feedback circuits. The experiment results show that the peak relaxation oscillation (about 30 kHz) is reduced to about 35 dB, at the low frequency band (below 20 kHz) falls to about 10 dB averagely and the relaxation oscillation peak moving to the higher frequency is suppressed. The excellent noise property indicates that the laser source has important applications in optical sensors.

Key words: laser techniques; erbium doped fiber laser; intensity noise; optoelectronic feedback

1 引 言

掺铒光纤激光器以其单模、窄线宽、相干度高, 较高的温度稳定性等诸多优点在光通讯, 光纤传感等领域得到广泛的应用。在高灵敏度的干涉型光纤传感系统中, 掺铒光纤激光器的中低频强度噪声很大程度上影响了系统的探测灵敏度。光纤激光器的弛豫振荡峰在几十 kHz 到几百 kHz^[1], 由于弛豫振荡的存在严

基金项目: 国家自然科学基金 (60940022)、教育部博士点基金 (20093401110002) 和高校省级优秀青年人才基金 (2011SQRL015) 资助项目

作者简介: 张 飞 (1986 -), 安徽宿松人, 研究生, 从事光纤激光器的研究。 E-mail: 97063977@qq.com

导师简介: 俞本立 (1963 -), 安徽五河人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤有源, 无源传感器的研究。

E-mail: benliyu@ahu.edu.cn

收稿日期: 2011-04-12; 修改日期: 2011-06-07

重影响了激光器的整体噪声水平以及相干型光纤传感器的性能, 所以解决光纤激光器的强度噪声问题成为迫切需要解决的问题。关于激光器的强度噪声抑制方法有很多, 例如采用振幅调制器^[2,3]注入锁定^[5,6]抑制激光器强度噪声。在光纤激光器中可利用光电反馈调制泵浦影响腔内增益^[7~9], 也可通过将 LiNbO₃ 波导调制器置入激光器谐振腔内通过反馈控制腔内损耗^[4]抑制强度噪声。

本文从激光器强度噪声理论出发, 利用光电反馈来降低掺铒光纤激光器的中低频强度噪声。实验结果表明: 在弛豫振荡峰处 (30 kHz 附近) 噪声抑制达 35 dB, 在低频 (小于 20 kHz) 噪声抑制也可达 10 dB 左右。因此, 通过光电反馈方式可获得良好强度噪声特性输出的激光。

2 理论分析

我们从速率方程理论分析掺铒光纤激光器的强度噪声特性, 采用铒离子的二能级模型^[10], n_2 上能级粒子数和腔内光子数密度 q 满足速率方程

$$\frac{dn_2}{dt} = (1 - n_2)(W_p + W_A) - n_2 \left(W_E + \frac{1}{\tau_2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = W_E N_0 n_2 - (1 - n_2) W_A N_0 - \frac{q}{\tau_c}, \quad (2)$$

当泵浦无反馈信号时 $\frac{dn_2}{dt} = 0$, $\frac{dq}{dt} = 0$, 可得稳定态的上能级粒子数密度和光子数密度为

$$n_{20} = \frac{r_{qa} N_0 + \frac{1}{\tau_c}}{\Delta r_q N_0}, \quad (3)$$

$$q_0 = \frac{\tau_c}{\Delta r_q} \left[W_p \Delta r_q N_0 - \left(r_{qa} N_0 + \frac{1}{\tau_c} \right) \left(W_p + \frac{1}{\tau_2} \right) \right], \quad (4)$$

式中 $\Delta r_q = r_{qa} + r_{qe}$, $W_A = r_{qa} q_0$, $W_E = r_{qe} q_0$, $r_{qa,e} = c\sigma_{a,e}/n$, 腔内光子寿命 $\tau_c = nL_c/c\gamma_0$, $\sigma_{a,e}$ 为吸收截面和受激发射截面, n 为光腔介质折射率, L_c 为腔的有效腔长, c 为真空中的光速, γ_0 为腔内损耗, N_0 为掺杂离子浓度。

激光器的强度噪声都是看作在稳定态基础上的微小波动 $W_p(t) = W_{p0} + \delta W_p(t)$, $n_2(t) = n_{20} + \delta n_2(t)$, $q(t) = q_0 + \delta q(t)$, $\gamma(t) = \gamma_0 + \delta \gamma(t)$ 代入 (1), (2) 式采用小信号近似 (保留一阶项) 和傅里叶变换。对腔内光子数密度扰动有影响的主要是泵浦扰动 $\delta q W_p$, 腔内损耗扰动 $\delta q \gamma$ 。相对强度噪声可表示为

$$RIN(f) = |H_p(f)|^2 \frac{S_{\delta W_p}}{W_{p0}^2} + |H_L(f)|^2 \frac{S_{\delta \gamma}}{\gamma_0^2}, \quad (5)$$

其中 $H_p(f)$ 和 $H_L(f)$ 为泵浦影响和损耗调制的传递函数

$$H_p(f) = \frac{A_2 A_4}{s^2 + A_1 s + A_4 A_3}, \quad H_L(f) = \frac{A_2 A_4}{s^2 + A_1 s + A_4 A_3}, \quad (6)$$

其中 $s = i2\pi f$, $A_1 = W_{p0} + q_0 \Delta r + 1/\tau_2$, $A_2 = (1 - n_{20}) W_{p0}/q_0$, $A_3 = n_{20} \Delta r_q - r_{qa}$, $A_4 = \Delta r_q N_0 q_0$, $A_5 = -\gamma_0 c/nL_c$ 。由 (5) 式可以看出激光器的相对强度噪声主要受泵浦传递函数 $H_p(f)$ 和损耗调制传递函数 $H_L(f)$ 影响。

所以实验中可以通过光电反馈影响激光器的泵浦输出或腔内损耗的方式来抑制激光器的强度噪声。我们采用光电反馈影响泵浦输出的方法对环形腔掺铒光纤激光器的噪声进行抑制: 通过光电管对掺铒光纤激光器输出取样, 经反馈电路对反馈信号的幅度和相位进行处理, 最后将处理的反馈信号耦合到泵浦驱动上, 调制泵浦输出光功率。虽然环形腔结构的光纤激光器腔长相对于直腔 (如 DFB) 较长, 但也只有几十米, 由于光速很快, 光子在腔内的响应时间还是较短的, 所以通过实时改变泵浦功率, 可有效改变腔内反转粒子数, 对掺铒光纤激光器的强度噪声进行抑制。

3 实验结构及原理

实验结构如图 1 所示, 我们采用的掺铒光纤激光器是实验室自行研制的环形腔掺铒光纤激光器, 输出波长为 1550 nm, 线宽小于 1 kHz^[11], 泵浦激光器是光纤光栅稳频的半导体激光器, 输出波长为 974 nm, 泵浦驱动电路为自行设计的。光纤激光器在过阈值点 77 mW 处输出功率为 580 μW。掺铒光纤激光器输出后经 5:95 耦合器分路, 一路 (95%) 输出激光接入光电探测器 PD₁ 并经由频谱仪 (Tektronix RSA 3408B) 分析, 另一路 (5%) 经过光电探测器 PD₂ 进入反馈电路处理耦合进泵浦驱动中。

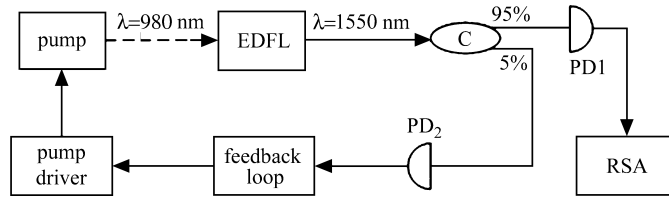


Fig.1 Structure diagram of system

光电反馈部分的示意图如图 2 所示, 反馈电路置于光电探测器 PD₂ 和泵浦驱动电路之间, 反馈电路的输出叠加到半导体激光器的恒流驱动电路上。工作时, 掺铒光纤激光器输出光信号 (5%) 被光电探测器探测, 并由前置放大器将光电流转变为光电压, 然后经电容隔直, 通过比例放大电路和移相电路将信号耦合至泵浦驱动电路上, 比例放大电路和移相电路均设置为可调。通过调节 R₄ 改变反馈电路增益; 调节 R₅ 改变反馈信号的相位, 使反馈信号相位超前, 可以弥补反馈以及电路带来的相位延迟, 所以从探测信号经反馈改变泵浦速率的时间可以通过, 可以认为反馈具有实时性。

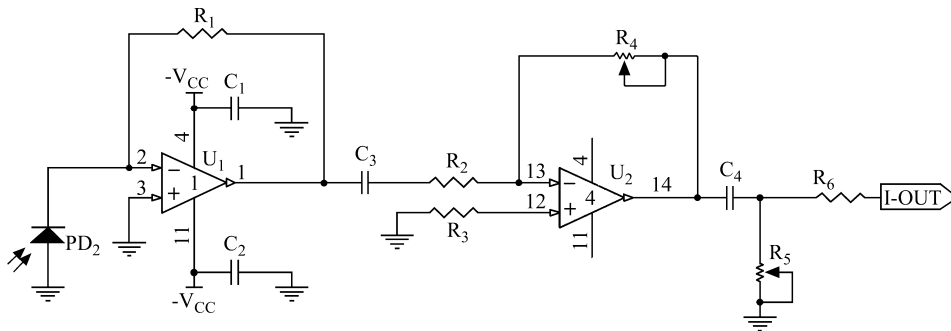
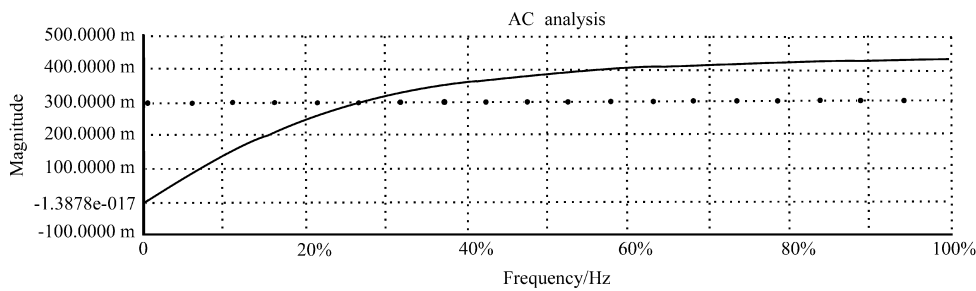


Fig.2 Schematic diagram of feedback circuits

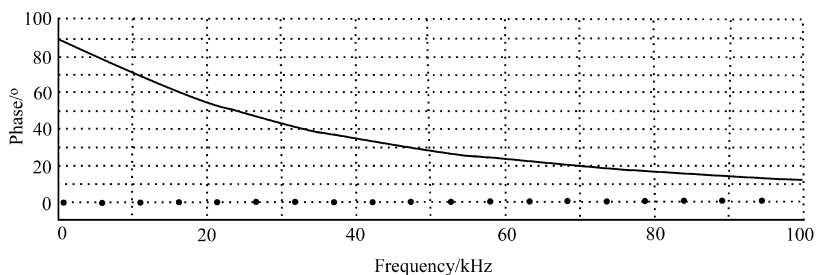
4 实验结果

由于反馈回路中泵浦抽运噪声传递函数在弛豫振荡频率处有 180° 相位变化, 所以反馈回路必须引入相位补偿电路, 防止反馈回路产生自激振荡^[12]。我们对反馈电路进行模拟仿真分析, 分析反馈电路的相位和幅度变化特性, 从而选取最优化方案。仿真时用幅度为 300 mV (峰峰值), 频率为 0 ~ 200 kHz 的正弦信号扫描通过反馈电路。反馈电路的输入输出对比如图 3 所示, (a) 是反馈电路幅度变化模拟图, 由图可看出在低频处信号幅度有一定衰减, 这是由于移相电路本身具有滤波特性, 所以会对低频信号有一定程度的衰减; (b) 是反馈电路的相位变化模拟图, 由图中可看出, 整个频段产生了 90° ~ 0° 的相位超前, 尤其在弛豫振荡频率处相位超前有 44°, 整个低频范围 (小于 20 kHz) 内相位超前达 55° ~ 90°。

调节 R₅ 可改变反馈信号相位变化的特性, 经多次仿真后, 我们选取了一个最优结果, 并在实验中测量了实际相位变化, 采用信号发生器模拟输入信号, 分别测量了 0 ~ 100 kHz 范围内若干频率点的输出与输入的相位差, 结果如图 4 所示, 与模拟基本一致。



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig.3 Circuit simulation

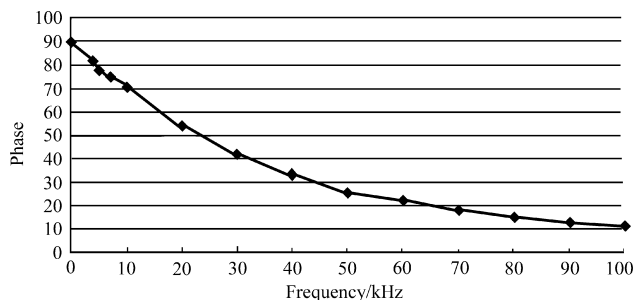


Fig.4 The phase data of feedback circuit

图 5 为从光电探测器 PD₁ 探测的未加入反馈电路和加入反馈电路的激光器的强度噪声对比。(a) 是 200 kHz 范围内强度噪声的对比, 可以看出加入反馈后激光的噪声曲线较平坦, 在弛豫振荡峰峰值处抑制

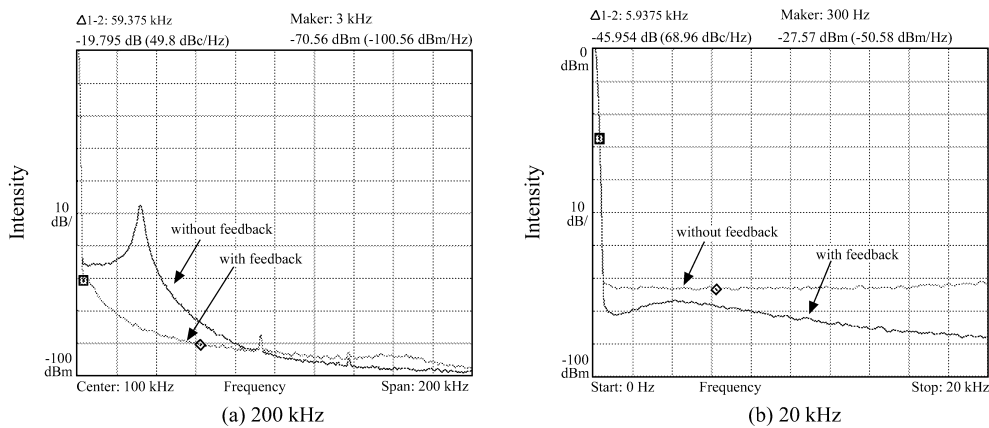


Fig.5 The comparison of intensity noise

可达 35 dB, 在 100 ~ 200 kHz 频率范围内有较小增加 (小于 5 dB)。 (b) 是低频 (20 kHz) 内的强度噪声对比, 从图可看出在 10 ~ 20 kHz 范围强度噪声的抑制达 15 dB 左右, 在 10 kHz 内噪声抑制约 8 dB。测量结果表明, 激光器的中低频强度噪声得到很好的抑制。

另外, 实验中我们发现不同腔长、不同掺杂光纤环形腔结构的掺铒光纤激光器的弛豫振荡频率不同, 但利用上面的反馈电路, 只需适当调节移相电路就能使掺铒光纤激光器的强度噪声得到很好的抑制效果。

5 结 论

通过加入光电反馈电路, 掺铒光纤激光器的中低频强度噪声得到良好的抑制。在弛豫振荡峰 30 kHz 附近的抑制能到 35 dB, 低频噪声 (小于 20 kHz) 下降约 10 dB 左右, 并且克服了以前光电反馈降低强度噪声时, 弛豫振荡峰会移向高频, 高频强度噪声骤增的问题。在此实验基础上可通过进一步优化移相电路, 使得低频噪声获得更大抑制, 同时也要避免高频噪声的增加, 从而实现全频段降噪。获得具有良好噪声特性的输出激光。

参考文献:

- [1] Okhotnikov O G, Salcedo J R. Stable relaxation-oscillation Er^{3+} -doped fiber laser [J]. *Photon. Tech. Lett. IEEE*, 1994, 6(3): 369-371.
- [2] Robertson N A, Hoggan S, Mangan J B, *et al.* Intensity stabilization of an argon laser using an electro-optic modulator -performance and limitations [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1986, 39(3): 149-153.
- [3] Taubman M S, Wiseman H, McClelland D E, *et al.* Intensity feedback effects on quantum-limited noise [J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, 12(10): 1792-1800.
- [4] Zhu G, Wang Q, Dong H, *et al.* Fiber laser relaxation oscillation noise suppression through the use of self-biased intracavity loss modulator [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 96(4): 1790-1793.
- [5] Farinas A D, Gustafson E K, Bayer R L. Frequency and intensity noise in an injection-locked solid-state laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, 12(2): 328-334.
- [6] Harb C C, Ralph T C, Huntington E H, *et al.* Intensity noise properties of injection-locked lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1996, 54: 4370-4382.
- [7] Csornyei M, Banky T, Bercei T. RIN peak suppression for solid state lasers [J]. *Microwaves, Radar and Wireless Communications*, 2002, 1: 183-186.
- [8] McCoy A D, Fu L B, Ibsen M, *et al.* Intensity noise suppression in fiber DFB laser using gain saturated SOA [J]. *Electron. Lett.*, 2004, 40(2): 107-109.
- [9] Yu benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun, *et al.* Experimental study on low-noise fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2006, 26(2): 811-814 (in Chinese).
- [10] Cranch G A, Englund M A, Kirkendall C K. Intensity noise characteristics of erbium-doped distributed-feedback fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(12): 1579-1587.
- [11] Yu Benli, Qian Jingren, *et al.* Stable single-frequency fiber ring laser with line width less than 0.5 kHz [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2001, 18(4): 345-348 (in Chinese).
- [12] Zhang Jing, Ma Hongliang, Wang Runling, *et al.* Suppression of intensity noise of LD pumped single-frequency ring Nd:YVO₄ laser by opto-electronic feedback [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, 21(9): 1031-1035 (in Chinese).