

文章编号: 0258-7025(2009)07-1852-05

## 单频光纤激光器的噪声抑制

刘奎 杨荣国 张海龙 白云飞 张俊香 郜江瑞

(山西大学光电所量子光学和光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要** 对单频光纤激光系统的输出噪声进行了测量和研究,利用前置光电负反馈方法对光纤激光器的强度噪声进行了抑制,调节反馈增益和延迟时间,可以在不同的边频处接近散离噪声极限,在分析频率 6.0 MHz 处抑制程度达到 22 dB。

**关键词** 量子光学;单频光纤激光器;强度噪声;光电前馈;噪声抑制

**中图分类号** O431.2;TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1852

### Noise Suppression of Single Frequency Fiber Laser

Liu Kui Yang Rongguo Zhang Hailong Bai Yunfei Zhang Junxiang Gao Jiangrui

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** The noise characteristic of the fiber laser with single frequency operation is experimentally investigated. The prepositive optoelectronic feed-forward is used to suppress the intensity noise of the fiber laser. Selecting the best delay time and feed-forward gain, the intensity noise can be suppressed near to shot noise limit at any sideband frequency. The maximum noise reduction of 22 dB is obtained at 6.0 MHz.

**Key words** quantum optics; single frequency; fiber laser; intensity noise; opto-electronic feed-forward; noise suppression

### 1 引言

单频激光器以其线宽窄、相干性好的优点,被广泛用于高灵敏度的干涉仪、高精度光谱、光通信以及量子光学与量子信息研究等领域。单频激光的发展,尤其是全固态激光技术的发展,极大地促进了量子光学、量子信息研究的迅速发展。光纤激光器作为新型光源具有输出功率高、体积小和频率稳定性好、线宽窄、易与光纤耦合进而集成化等固体激光器无法比拟的优点。但由于高输出功率的单频光纤激光系统存在较大的噪声,影响测量精度、非经典光场的产生,阻碍了光纤激光器在量子信息等领域中的应用。因此,如何获得单频、高功率、低噪声的单频光纤激光器光源,对激光技术本身的发展及其应用都具有特别重要的意义。

关于激光器噪声的抑制,已有很多方法,如注入锁定<sup>[1,2]</sup>、光电反馈<sup>[3,4]</sup>、模清洁剂<sup>[5,6]</sup>等,虽然受到带宽的限制,光电反馈易于实现,目前仍是一般最常采用的方法。光电反馈一般都是利用测量到的噪声信号控制驱动电流,抑制噪声。Christine Spiegelberg等<sup>[7]</sup>采用这种光电反馈的方法抑制了光纤激光器固有的弛豫振荡。本文报道了采用前置光电负反馈方法实现对瓦级输出的单频光纤激光系统强度噪声的抑制。首先从理论上进行了分析,给出了最佳抑制条件;在实验中通过调节反馈增益和延迟时间,实现了对不同噪声频率的抑制,使单频光纤激光器的输出噪声在相应的频率处接近或达到散离噪声极限,给出了在分析频率 6.0 MHz 处实验测量结果,抑制程度达到 22 dB,接近散离噪声极限。

收稿日期: 2009-04-13; 收到修改稿日期: 2009-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(10774096,60708010)资助项目。

作者简介: 刘奎(1982—),男,博士研究生,主要从事量子光学与激光技术等方面的研究。E-mail: liu555kui@163.com

导师简介: 郜江瑞(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事量子光学与激光技术等方面的研究。

E-mail: jrgao@sxu.edu.cn(通信联系人)

## 2 光纤激光器的噪声

光纤激光器的强度噪声<sup>[8~11]</sup>主要来源于激光器低频段的技术噪声、固有弛豫振荡和自发辐射引入的整个频谱范围内的量子噪声。此外,激光放大器中再放大过程中由于损耗和自发辐射也会引入噪声。

实验中采用了输出功率 20 mW 的单频光纤激光器和光纤放大器两部分组成的单频光纤激光系统,其最大输出功率为 2 W,中心波长为 1080 nm,激光线宽为 100 kHz。激光器的输出噪声主要为强度噪声。采用自零拍法<sup>[12]</sup>对光纤激光器的强度噪声进行测量,测量装置如图 1 所示。虚框中为前置

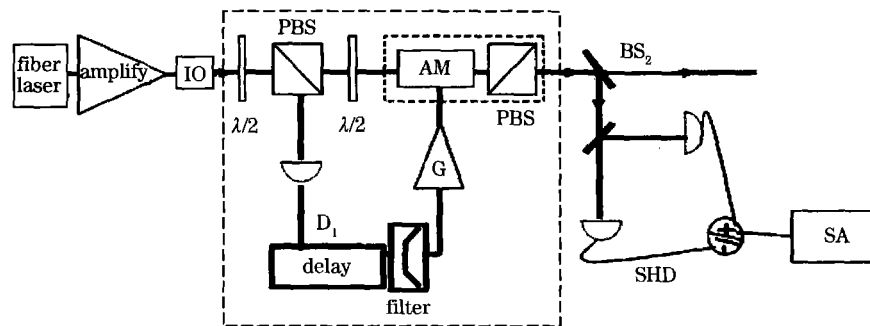


图 1 利用光电前置反馈方法抑制光纤激光器强度噪声的实验装置图

Fig. 1 Experiment setup of suppressing the intensity noise of fiber laser with opto-electronics feed-forward

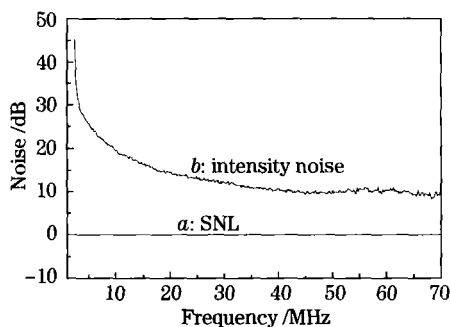


图 2 光纤激光器在 1~70 MHz 的强度噪声

Fig. 2 Intensity noise of fiber laser from 1 MHz to 70 MHz

## 3 光纤激光器强度噪声的抑制

### 3.1 噪声抑制基本原理及实验装置

采用前置光电反馈<sup>[4,13,14]</sup>方法对光纤激光器强度噪声进行有效的抑制,以满足在实验中的应用。前置光电反馈方法是利用透射光场与反射光场噪声之间的经典关联,从而将探测到的反射光场的噪声起伏反馈到透射光场上,来实现透射光场的噪声抑制。

实验装置如图 1 所示。光纤激光器输出的光经过由半波片和偏振棱镜(PBS)组成的反射率  $R$  可调

光电反馈抑制噪声装置,虚框后为自零拍测量装置 SHD,通过分束器  $BS_2$  分出一部分光进行噪声测量,分束器  $BS_2$  及探测器自身量子效率,总的效率  $\eta_3$  为 20%,当无反馈时,自零拍测量装置的两个探测器的交流信号相加即为直接从激光器出射的激光的强度噪声,相减为散离噪声基准(SNL)。图 2 为在分析频率 1~70 MHz 范围内所测得的强度噪声曲线。可以看出,光纤激光器在很大的频率范围内具有非常大的强度噪声,低频处噪声更大,10 MHz 处强度噪声相对散离噪声极限大约高出 20 dB。

的分束器被分为两部分,反射部分进入探测器  $D_1$  测量其强度噪声,并将其光电信号作为反馈信号,透射部分为激光器的输出光。反馈信号被反馈到由电光调制器(EOM)和棱镜(PBS)组成的振幅调制器上,由于透射光与反射光的强度噪声之间存在着经典关联,振幅调制器使透射部分的光的强度按照其强度噪声(即反馈信号)的大小进行相应的反向平移(负反馈),从而对激光的噪声进行抑制。经过噪声抑制的透射光的噪声由自零拍平衡探测装置进行测量。

### 3.2 理论分析

单频光纤激光系统的输出激光场为

$$\hat{A}_{in}(t) = A_{in} + \delta\hat{A}_{in}(t), \quad (1)$$

其中,  $\hat{A}_{in}(t)$  为场的湮灭算符,  $A_{in}$  为场的平均值,  $\delta\hat{A}_{in}(t)$  为场的噪声起伏项。

经过振幅调制器后的输出场的湮灭算符  $\hat{A}_{out}(t)$  表示为<sup>[14]</sup>

$$\hat{A}_{out}(t) = \sqrt{\eta_3} [\sqrt{1-R}A_{in} + \sqrt{1-R}\delta\hat{A}_{in}(t) + \sqrt{R}\delta\hat{v}_1(t) + \delta\hat{r}(t)] + \sqrt{1-\eta_3}\delta\hat{v}_3(t), \quad (2)$$

其中  $\hat{v}_1$  为分束器引入的真空噪声,  $\hat{v}_3$  为振幅调制器及测量引入的真空噪声,  $\delta\hat{r}$  为反馈回路所引入的噪声起伏项,  $\eta_3$  为总的测量量子效率。

$$\delta\hat{r}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \kappa(\tau) \sqrt{R\eta_2} \times A_{in} [\sqrt{R\eta_2} \delta\hat{X}_{A_{in}}(t-\tau) - \sqrt{(1-R)\eta_2} \delta\hat{X}_{v_1}(t-\tau) + \sqrt{R} \delta\hat{X}_{v_2}(t-\tau)] d\tau, \quad (3)$$

其中  $\kappa(\tau)$  为反馈回路的响应函数,  $\eta_2$  为探测器  $D_1$  的量子效率,  $\delta\hat{X}_{A_{in}} = \delta\hat{A}_{in} + \delta\hat{A}_{in}^+$ ,  $\delta\hat{X}_{v_i} = \delta\hat{A}_{v_i} + \delta\hat{A}_{v_i}^+$  为光场的正交振幅起伏。根据(1),(2)式,输出场的正交振幅噪声起伏为

$$\delta\hat{X}_{out}(t) = \delta\hat{A}_{out}(t) + \delta\hat{A}_{out}^+(t) = \sqrt{\eta_3} [\sqrt{1-R} \delta\hat{X}_{in}(t) + \sqrt{R} \delta\hat{X}_{v_1}(t) + \delta\hat{X}_r(t)] + \sqrt{1-\eta_3} \delta\hat{X}_{v_3}(t), \quad (4)$$

其中

$$\delta\hat{X}_r(t) = \delta\hat{r}(t) + \delta\hat{r}^+(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) [\sqrt{R\eta_2} \delta\hat{X}_{A_{in}}(t-\tau) - \sqrt{(1-R)\eta_2} \delta\hat{X}_{v_1}(t-\tau) + \sqrt{R} \delta\hat{X}_{v_2}(t-\tau)] d\tau,$$

$$G(\tau) = \kappa(\tau) \sqrt{R\eta_2} \times A_{in},$$

将(3)式代入(4)式中,并进行傅里叶变换可得

$$\delta\hat{X}_{out}(\omega) = \sqrt{\eta_3} \{ \sqrt{1-R} \delta\hat{X}_{in}(\omega) + \sqrt{R} \delta\hat{X}_{v_1}(\omega) + G(\omega) [\sqrt{R\eta_2} \delta\hat{X}_{in}(\omega) - \sqrt{(1-R)\eta_2} \delta\hat{X}_{v_1}(\omega) + \sqrt{R} \delta\hat{X}_{v_2}(\omega)] \} + \sqrt{1-\eta_3} \delta\hat{X}_{v_3}(\omega), \quad (5)$$

其中  $G(\omega)$  为反馈增益:  $G(\omega) = \kappa(\omega) \sqrt{R\eta_2} \times A_{in}$ 。

输出场的强度噪声谱为

$$V_{out}(\omega) = \langle |\delta X_{A_{out}}|^2 \rangle = \eta_3 \left| \sqrt{(1-R)} + G(\omega) \sqrt{R\eta_2} \right|^2 V_{in}(\omega) + \eta_3 \left| \sqrt{R} - G(\omega) \sqrt{(1-R)\eta_2} \right|^2 V_1 + \eta_3 \left| G(\omega) \sqrt{(1-\eta_2)} \right|^2 V_2 + (1-\eta_3) V_3, \quad (6)$$

其中  $V_1, V_2, V_3$  为真空噪声:  $V_1 = V_2 = V_3 = 1$ 。  $V_{in}$  为输入光的强度噪声强度。

从(6)式中可以看出,当反馈增益取合适值时,输入噪声  $V_{in}(\omega)$  可以得到抑制,在最佳增益条件下  $G(\omega) = G(\omega)_{opt}$ ,输出强度噪声抑制程度达到最佳,对应最小的输出噪声  $V_{out}(\omega)$  为

$$V_{out}^{opt}(\omega) = \frac{[R\eta_2 + (1-R)\eta_3][V_{in}(\omega) - 1] + 1}{(V_{in} - 1)R\eta_2 + 1}, \quad (7)$$

$$G(\omega)_{opt} = - \frac{(V_{in} - 1) \sqrt{(1-R)R\eta_2}}{V_{in}R\eta_2 + \eta_2(1-R) + (1-\eta_2)}, \quad (8)$$

其中,反馈增益的负号表示负反馈。

根据(7)式从理论上给出了最小噪声输出  $V_{out}^{opt}(\omega)$  随输入噪声  $V_{in}(\omega)$  和分束器的反射率  $R$  的变化关系,如图3所示。在分束器的反射率  $R$  一定时,输出噪声  $V_{out}(\omega)$  随输入噪声  $V_{in}(\omega)$  的增大而增大,而当输入噪声  $V_{in}(\omega)$  相同时,输出噪声  $V_{out}(\omega)$  随分束器的反射率  $R$  增大而减小,输出效率也成比例减小。一般情况下,为保证有效的激光输出,只能选择一个适中的透射率。因此,利用这种方法虽然能有效抑制掉主要噪声,但不能完全消除输

出激光的经典噪声。

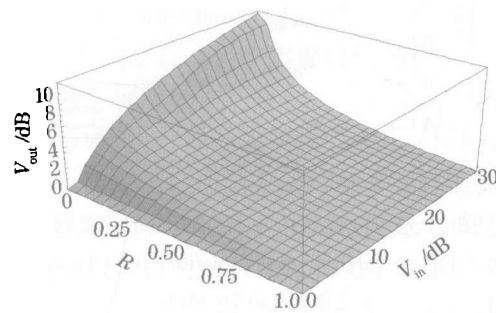


图3 最佳输出噪声  $V_{out}$  随输入噪声  $V_{in}$  和分束器的反射率  $R$  的变化关系。  $\eta_2=0.95, \eta_3=0.20$   
 Fig.3 Relationship of optimum  $V_{out}$  versus  $V_{in}$  &  $R$ ,  $\eta_2=0.95, \eta_3=0.20$

### 3.3 噪声抑制结果及讨论

根据实验装置(如图1),在实验上对光纤激光器的噪声进行了抑制。实验中,在反馈回路中加入了延时、带通滤波器和增益放大,以达到更好的噪声抑制效果。通过旋转振幅调制器前的半波片的角度可以选择反馈类型为负反馈还是正反馈。

图4给出了分析频率 6.0 MHz 处最终输出噪

声与反射率  $R$  的关系。图中圆点为实验数据,虚线表示根据(7)式所得的理论结果,实线是考虑到探测器输入功率有限,当反射率较大时加衰减使探测器输入功率不变,避免饱和效应,等效于改变探测器效率,使  $\eta_2$  与  $R$  乘积等于常数  $c$ 。其中,  $\eta_2 = 0.95$ ,  $\eta_3 = 0.20$ ,  $c = 0.24$ , 输入噪声  $V_{in}/N_{SNL} = 24$  dB ( $N_{SNL}$  表示 SNL 的值), 输出功率 50 mW。实验与理论基本吻合。

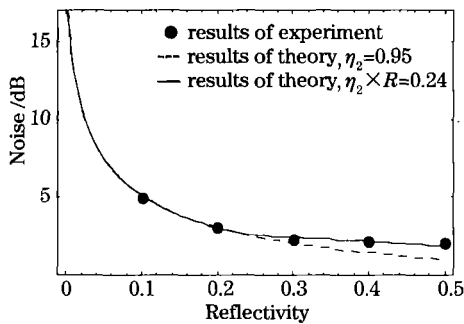


图 4 剩余强度噪声与反射率的关系图

Fig. 4 Residual noise versus reflectivity

从图 4 中可以看出,随着反射率的加大,激光的强度噪声也进一步被抑制,因为反射率增大意味着探测到的信息量增大,反馈抑制的效果肯定也随之变好。但当反射率加大到一定程度,由于探测器输入功率有限,衰减进入探测器的光功率,避免探测器饱和,影响了噪声抑制效果,在反射率  $R$  大于 0.3 后,噪声抑制的效果趋近平缓。为了在最大程度上抑制噪声,同时保障有效的激光输出,综合考虑激光的透射效率和噪声抑制程度,最终选择分束器的反射率为  $R = 0.3$ 。

当分束器的反射率为  $R = 0.3$  时,通过调节最佳的延时、滤波带宽和反馈增益,在分析频率 6.0 MHz 处对光纤激光器的强度噪声抑制的结果如图 5 所示,噪声抑制达到 22 dB,使输出激光噪声接

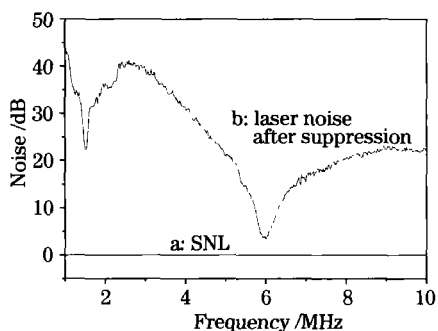


图 5 在 6.0 MHz 处光电反馈的强度噪声的最佳抑制

Fig. 5 Best noise suppression of fiber laser with opto-electronic feedforward at 6.0 MHz

近了散离噪声基准。由于反馈系统的带宽有限,而且系统对不同频率噪声的相位延时不同,可以通过调节合适的延时、滤波带宽和反馈增益,在一定带宽内实现不同频率点的噪声抑制。

对于激光器在大功率输出情况下的噪声抑制,由于受到单个探测器可接收功率的限制,使通过反馈方式对噪声抑制的效果受到限制,在这种情况下,为了避免反馈系统中探测器的饱和及提高噪声抑制效果,可以在反馈系统中采用多探测器对噪声进行联合测量<sup>[15,16]</sup>。这种方法虽然简单,但是每次只能在一个频率点对噪声压缩,且不能达到散粒噪声极限。为了在宽频段抑制噪声,获得达到散粒噪声极限的激光,下一步准备采用模清洁剂来对光纤激光器的噪声进行抑制。

## 4 结 论

对单频输出的光纤激光器的噪声特性进行了测量和研究,而且通过前置光电反馈方法对其强度噪声进行了有效的抑制,在 6.0 MHz 抑制程度达到 22 dB,接近了散离噪声基准。

## 参 考 文 献

- 1 S. T. Yang, Y. Imai, M. Oka *et al.*. Frequency stability, 10 W continuous-wave, laser-diode end-pumped, injection-locked Nd: YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1676~1678
- 2 Han Wei, Zhang Yali, Zhang Yan *et al.*. Single mode operation of an injection locked Fabry-Perot laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1318~1322  
韩 威,张雅丽,张 艳等. 注入锁定法布里-珀罗激光器的单模工作特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1318~1322
- 3 S. Rowan, A. M. Campbell, K. Skeldon *et al.*. Broadband intensity stabilization of diode-pumped monolithic miniature Nd: YAG ring laser[J]. *J. Mod. Opt.*, 1994, **41**(6): 1263~1269
- 4 Ma Hongliang, Zhang Jing, Li Fengqin *et al.*. Suppression of intensity noise by an opto-electronic feedback loop with amplitude modulator[J]. *Acta Optica Sinica.*, 2002, **22**(10): 1202~1205  
马红亮,张 靖,李凤琴等. 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): 1202~1205
- 5 B. Willke, N. Uehara, E. K. Gustafson *et al.*. Spatial and temporal filtering of a 10 W with a Fabry-Perot ring-cavity premode cleaner[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1704~1706
- 6 Chen Yanli, Zhang Jing, Li Yongmin *et al.*. Reduction of intensity noise of single-frequency Nd: YVO<sub>4</sub> laser using mode cleaner[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3): 197~200  
陈艳丽,张 靖,李永民等. 利用模清洁剂降低单频激光器的强度噪声[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3): 197~200
- 7 Christine Spiegelberg, Jihong Geng, Yongdan Hu. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 57~62
- 8 Xia Jiangjie, Qu Ronghui, Cai Haiwen *et al.*. Studies on relaxation oscillation characteristics of fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 807~810  
夏江珍,翟荣辉,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

- 9 E. Desurvire, J. R. Simpson. Amplification spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers[J]. *J. lightwave Technol.*, 1989, **7**(5): 835~845
- 10 Wu Yuexiang, Ma Xiaoming, Zhao Xiaoji. Effects of  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  concentration on gain and noise coefficient of fiber amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1057~1061  
吴粤湘,马晓明,赵晓吉. 钕镱共掺特性对光放大器增益和噪声系数的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1057~1061
- 11 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*, 2008, **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*, 2008, **35**(5): 716~721
- 12 Hans A. Bachor, Timothy C. Ralph. A Guide to Experiment in Quantum Optics[M]. Germany: Wiley-VCH, 2004. 206~211
- 13 M. S. Taubman, H. Wiseman, D. E. McClelland *et al.*. Intensity feedback effects on quantum-limited noise[J]. *J. Opt. Soc. Am B*, 1995, **12**(10): 1798~1800
- 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**: 1471~1474
- 15 Zou Hongxin, Zhai Shuqin, Yang Rongguo *et al.*. The generation and the measurement of high power twin beams[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2006, **12**(3): 125~128  
邹宏新,翟淑琴,杨荣国 等. 高功率孪生光束的产生与测量[J]. *量子光学学报*, 2006, **12**(3): 125~128
- 16 Zou Hongxin, Zhai Shuqin, Guo Juan *et al.*. Preparation and measurement of tunable high-power sub-Poissonian light using twin beams[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11): 1735~1737