

利用光电反馈抑制钛宝石激光器低频段的强度噪声

卢华东 苏 静* 彭堃堦

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 对前置光电负反馈抑制钛宝石激光器强度噪声方法的特性进行了理论分析,表明注入噪声不同对应的最佳反馈增益不同。利用前置光电负反馈方法,在实验上实现了全固态连续单频可调谐钛宝石激光器低频段的强度噪声抑制,通过调节反馈增益,使激光器的强度噪声抑制程度最大。在分析频率为 1.125 MHz 处,强度噪声由原来的 8.7 dB 降低到了 1.4 dB,抑制程度达 7.3 dB。调节反馈增益和相位延时,可以获得不同分析频率的强度噪声的降低。

关键词 激光器;钛宝石激光器;强度噪声;光电反馈;噪声抑制

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402014

Suppression of Intensity Noise at Low Frequencies of Ti:sapphire Laser by Optoelectronic Control

Lu Huadong Su Jing Peng Kunchi

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

Abstract The characteristic of the intensity noise suppression at the low frequencies of Ti:sapphire laser by using the optoelectronic feed-forward is theoretically analyzed. It shows that the best gain of the feedback circuit corresponds to the injecting noise. The suppression of intensity noise at low frequencies of Ti:sapphire laser by optoelectronic control is experimentally investigated, and the intensity noise of laser is suppressed as soon as possible by tuning the gain of the feedback circuit. The amplitude of the intensity noise reduces from 8.7 dB to 1.4 dB, and the maximum noise suppression of 7.3 dB is obtained at 1.125 MHz. It has been demonstrated that selecting the best delay time and feed-forward gain, the intensity noise can be suppressed near the quantum noise level at any sideband frequency.

Key words lasers; Ti:sapphire laser; intensity noise; optoelectronic feedback; noise suppression

OCIS codes 140.0140; 140.3460; 140.3580

1 引 言

紧凑稳定高效的单频激光光源,尤其是连续输出的单频可调谐钛宝石激光器,以其较宽的输出光谱^[1]、较高的输出功率、较低的强度噪声等优点,可广泛应用于高灵敏度的干涉仪、高分辨率激光光谱、引力波探测、量子通信、原子冷却等领域。全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的强度噪声在几兆赫兹

以下的低频段远高于量子噪声极限,存在很强的弛豫振荡^[2],这些噪声的存在将对许多实验结果产生不利的影 响,进而阻碍了钛宝石激光器在科研领域中的应用,因此降低钛宝石激光器低频段的强度噪声对激光技术本身的发展及其应用都具有很重要的意义。1996 年, Masaki Tsunekane 等^[3]利用全固态绿光激光器代替了氙离子激光器作为抽运源使钛宝

收稿日期: 2010-11-30; 收到修改稿日期: 2011-02-21

基金项目: 国家 973 计划(2010CB923103)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(60821004)、山西省青年科技研究基金(2009021004)和山西大学博士启动基金资助课题。

作者简介: 卢华东(1981—),男,博士研究生,主要从事全固态可调谐激光器器件方面的研究。E-mail: lu_sxu@163.com

导师简介: 彭堃堦(1936—),男,教授,主要从事量子光学和固体激光器器件等方面的研究。E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jingsu@sxu.edu.cn

石激光器的强度噪声有所降低。2011年,本课题组^[4]采用全固态的单频绿光激光器取代了单横模而多纵模的绿光激光器作为抽运源,使钛宝石激光器的强度噪声进一步降低。2006年, Jacopo Belfi等^[5]则利用注入锁定的方法对钛宝石激光器的强度噪声进行了抑制,但发现种子源的相位噪声直接影响注入锁定的钛宝石激光器输出激光的强度噪声特性。实验上还可以用模清洁剂^[6,7]来抑制激光器的强度噪声,然而模清洁剂相当于一个低通滤波器,只能对激光器高频段的强度噪声起抑制作用。对于激光器低频段的强度噪声,光电反馈是最为有效的一种抑制方法,尽管光电反馈只能针对某频率点的强度噪声起作用,但可以根据需要通过调节相位延时来选择不同的频率点进行强度噪声抑制。1986年, N. A. Robertson等^[8]首先利用振幅调制器抑制了氩离子激光器的强度噪声。1995年, M. S. Taubman等^[9]采用全量子理论进一步分析了振幅调制器进行强度反馈的特性。2002年,马红亮等^[10]利用振幅调制器进行后置负反馈抑制了单频1064 nm激光器的强度噪声。1997年, P. K. Lam等^[11]提出了前置负反馈进行噪声抑制的方法。2009年,刘奎等^[12]利用该方法抑制了单频光纤激光器的强度噪声。本文利用振幅调制器的前置光电负反馈来抑制钛宝石激光器的强度噪声,从理论上分析了光电负反馈回路的工作特性,并在实验上对自行研制的全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的强度噪声进行抑制。

2 钛宝石激光器强度噪声的抑制

2.1 实验原理和装置

利用振幅调制器进行光电负反馈抑制全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的实验装置原理如图1所示。抽运源采用的是经激光二极管(LD)抽运Nd:YVO₄, LBO腔内倍频,输出功率达8 W的单频绿光激光器^[13]。

抽运源输出的激光首先经由 f_1 准直成平行光,经由两导光镜 M_1 和 M_2 传输,然后再经 f_2 聚焦后注入到激光谐振腔中。通过调节谐振腔前面插入的532 nm半波片(HWP)来调整抽运光的偏振方向使得增益介质Ti:Al₂O₃能够充分吸收抽运光的能量。增益介质钛宝石晶体的尺寸为 $\phi 4$ mm \times 20 mm,晶体对532 nm波长的吸收系数为1.0 cm⁻¹,品质因数(FOM)值大于275,两端面均采用布氏角(60.4°)切割, c 轴垂直于晶体中的通光方

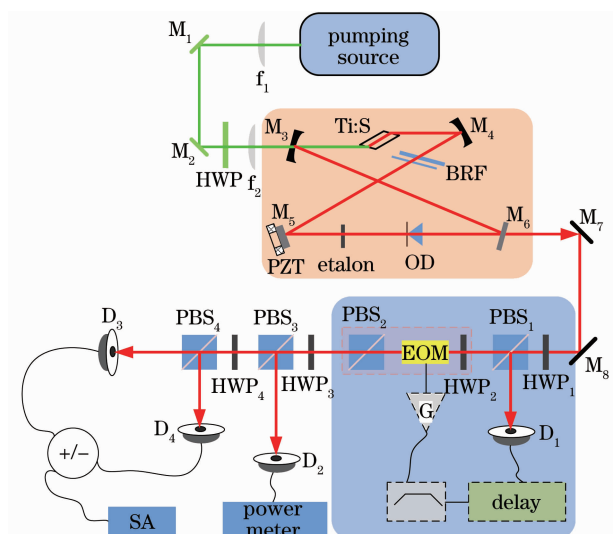


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

向,以使 π 偏振抽运光和振荡光几乎无损地透射,同时自动抑制 σ 偏振。连续单频钛宝石激光器谐振腔采用四镜环形谐振腔结构,在谐振腔设计过程中,充分考虑了像散^[14]、腔内损耗^[15]等因素,使激光器的效率最高。 M_4 与 M_5 之间插入双折射滤波器(BRF),其中 M_5 镀有对780 nm高反膜,并与压电陶瓷(PZT)相连,当给压电陶瓷加电压时, M_5 便发生移动,从而改变腔长,进而改变激光器的谐振频率; M_6 为输出镜,在780 nm处透射率为3.14%。在谐振腔内插入的双折射滤波片对激光器的波长可以进行粗调,插入的标准具一方面对激光器的波长进行细调,另一方面具有选模的作用。此外,插入的光学单向器(OD)可以在所调谐的波长范围内均能使激光器实现单向行波运行。最后,在抽运功率为8 W时,激光器的最大输出功率达2 W (792 nm),1 h功率波动优于 $\pm 0.5\%$ 。激光器锁定到参考法布里-珀罗(F-P)干涉仪上后,10 s内其频率稳定性优于 ± 184 kHz,15 min内频率稳定性优于 ± 3.3 MHz。

钛宝石激光器输出的激光经过两个导光镜 M_7 , M_8 后,注入到由HWP₁和偏振分束棱镜(PBS₁)组成的反射率 R_1 可调的偏振分束器中;输出的激光又经过电光调制器(EOM)。实验中使用的EOM为振幅调制器(AM),其型号为4102 M,是一种宽带(500~900 nm)响应的振幅调制器,振幅调制器和前面的HWP₂以及PBS₂一起构成振幅调制;其中HWP₂可以决定反馈是正反馈还是负反馈。HWP₃和PBS₃用以控制进行自零拍探测的功率,其余激光注入功率计的探头(D_2)以记录功率的大小及变化情况。HWP₄和PBS₄以及探测器 D_3 ,

D_1 组成自零拍探测系统以测量激光器的强度噪声。探测器 D_1, D_3, D_4 的型号为 S3399, 对 780 nm 波长的光量子效率为 58%, 后面为一级低噪声放大。 D_1 输出的光电流经过相位延迟, 低通滤波 (BLP-1.9+) 后, 由功率放大器 (ZFL-500LN)^[16] 放大后反馈到振幅调制器上, 构成反馈控制回路。 D_3, D_4 输出的信号相减为量子噪声极限, 相加为激光器的强度噪声; 信号相加减后由光谱仪 (SA) 进行记录。

2.2 理论分析

HWP₁ 和 PBS₁ 组成的偏振分束器的反射率为 R_1 , 损耗可忽略, 其反射光束由量子效率为 η 的探测器 D_1 探测, 该探测器和功率放大器一起构成反馈回路。输入光场的湮灭算符可表示为

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

式中 $\hat{A}_{in}(t)$ 为场的湮灭算符, \bar{A}_{in} 为光场的平均值, $\delta\hat{A}_{in}(t)$ 为光场的噪声起伏项。经过由 HWP₁ 和 PBS₁ 组成的偏振分束器后, 输出光场的湮灭算符可以表示为

$$\hat{A}_1(t) = \sqrt{1-R_1}\hat{A}_{in}(t) + \sqrt{R_1}\hat{v}_1(t), \quad (2)$$

式中 $\hat{v}_1(t)$ 为分束器引入的真空噪声。该光场再经过振幅调制器后的输出光场可表示为

$$\hat{A}_{out}(t) = \sqrt{\epsilon}[\hat{A}_1(t) + \delta\hat{r}(t)] + \sqrt{1-\epsilon}\hat{v}_2(t), \quad (3)$$

式中 $\hat{v}_2(t)$ 为振幅调制器引入的真空噪声, ϵ 为振幅调制器以及反馈回路总的量子效率, $\delta\hat{r}(t)$ 为反馈回路所引入的噪声起伏项, 可表示为^[17]

$$\begin{aligned} \delta\hat{r}(t) = & \int_{-\infty}^{\infty} \kappa(\tau) \sqrt{R_1\eta} \bar{A}_{in} [\sqrt{R_1\eta} \delta\hat{X}_{A_{in}}(t-\tau) - \\ & \sqrt{(1-R_1)\eta} \delta\hat{X}_{v_1}(t-\tau) + \sqrt{R_1} \delta\hat{X}_{v_2}(t-\tau)] d\tau, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\kappa(\tau)$ 为反馈回路的响应函数。 $\delta\hat{X}_{A_{in}} = \delta\hat{A}_{in} + \delta\hat{A}_{in}^\dagger$, $\delta\hat{X}_{v_i} = \delta\hat{A}_{v_i} + \delta\hat{A}_{v_i}^\dagger$ 分别为输入光场的强度起伏和由偏振分光棱镜引入噪声的强度起伏; 输出光场的强度起伏以及反馈回路光电流的强度起伏可以表示为 $\delta\hat{X}_{out}(t) = \delta\hat{A}_{out}(t) + \delta\hat{A}_{out}^\dagger(t)$, $\delta\hat{X}_r(t) = \delta\hat{r}(t) + \delta\hat{r}^\dagger(t)$ 。经傅里叶变换以后, 输出光场的强度噪声谱可以表示为^[11]

$$\begin{aligned} V_{out}(\omega) = & \langle |\delta\hat{X}_{out}|^2 \rangle = \epsilon \sqrt{1-R_1} + G(\omega) \times \\ & \sqrt{R_1\eta} \sqrt{V_{in}(\omega)} + \epsilon \left| \sqrt{R_1} - G(\omega) \sqrt{(1-R_1)\eta} \right|^2 \times \\ & V_1 + \epsilon \left| G(\omega) \sqrt{R_1} \right|^2 V_2 + (1-\epsilon) V_3, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 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; $G(\omega)$ 为反馈增益, $G(\omega) = \kappa(\omega) \sqrt{R_1\eta} \bar{A}_{in}$ 。

(5)式给出了相对量子噪声极限 (QNL) 的输出噪声随注入噪声以及反馈增益之间的关系, 其关系如图 2 所示。从(5)式及图 2 可见, 当反馈增益取合适值时, 激光器的强度噪声经振幅调制器反馈后, 输出噪声可以得到有效抑制, 而当注入噪声不同时, 获得最低噪声输出的最佳增益是不同的。

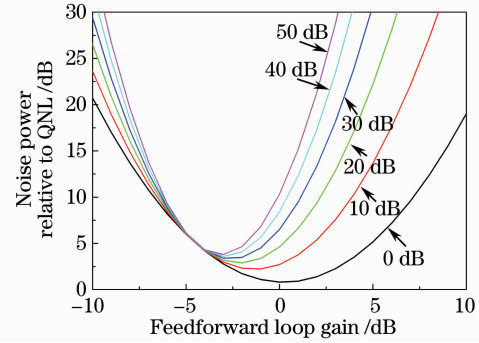


图 2 注入噪声不同时, 输出噪声随反馈回路增益的变化曲线

Fig. 2 Noise levels versus the gain of feedback loop at different noises

利用(5)式可以给出最低噪声输出时的最佳增益为

$$G(\omega) = - \frac{[V_{in}(\omega) - 1] \sqrt{(1-R_1)R_1\eta}}{[V_{in}(\omega) - 1]R_1\eta + R_1 + \eta}, \quad (6)$$

式中反馈增益的负号表示负反馈。从(6)式可知, 在注入噪声不同的情况下, 最佳增益决定于偏振分束器反射率。将(6)式代入(5)式, 可以得到最佳增益下, 抑制后的强度噪声表达式为

$$V_{out}^{opt}(\omega) = 1 + \frac{\epsilon[V_{in}(\omega) - 1](R_1 + \eta)(1 - R_1)}{R_1\eta[V_{in}(\omega) - 1] + R_1 + \eta}, \quad (7)$$

可见输出噪声最佳的抑制效果与注入噪声以及偏振分束器的反射率是紧密相关的。

3 实验结果

实验中可以通过旋转 HWP₁ 来控制偏振分束器的反射率, 实验中采用的反射率为 2%。通过调节振幅调制器前面的半波片来选择是正反馈还是负反馈。通过调节反馈回路中的延时、带通滤波器和增益放大, 可以获得最好的噪声抑制效果。反馈回路的注入噪声即激光器本身的强度噪声和反馈回路工作时的强度噪声的实验结果如图 3 所示; 插图为二者相减的结果。可见在 0.7~1.3 MHz 的频率段, 强度噪声得到了有效抑制, 在 1.125 MHz 处, 强度噪声由原先的 8.7 dB 降到了抑制后的 1.4 dB, 噪

声抑制达到了 7.3 dB,使输出激光的强度噪声接近了 QNL。而在噪声抑制点两端,激光器的强度噪声有所升高,这是因为在这些频率段,反馈回路对激光器的强度噪声没有作用,相反,反馈回路所引入的噪声附加在了激光器输出激光的强度噪声上,使得激光器的强度噪声有所升高。

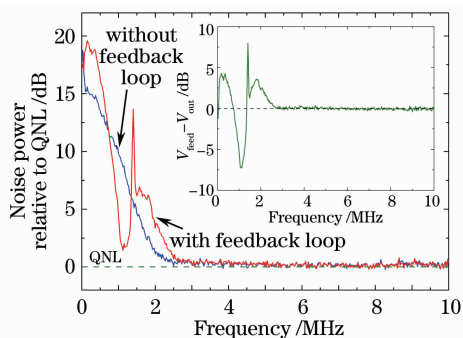


图 3 激光器的强度噪声谱

Fig. 3 Noise power spectra of the output laser

在进行噪声抑制的实验过程中,通过振幅调制器前面的衰减器来改变反馈回路的增益,发现在得到噪声抑制后,增大或减小增益,强度噪声都会增大,即当注入噪声一定时,只有反馈回路的增益最佳,激光器的强度噪声才能得到最大抑制,这与之前的理论分析是一致的。由于反馈系统的带宽限制,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。

4 结 论

实验研究了振幅调制器对激光器强度噪声进行抑制的工作特性。采用自行研制的全固态连续单频可调谐钛宝石激光器,通过调节反馈增益和相位延时,可以降低不同分析频率的强度噪声。在分析频率为 1.125 MHz 处,激光器的强度噪声由原先的 8.7 dB 降到了抑制后的 1.4 dB,噪声降低程度达 7.3 dB。该反馈回路设计简单,便于实际应用。

参 考 文 献

- 1 P. F. Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(1): 125~133
- 2 T. C. Ralph, C. C. Harb, H. 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

- 3 Masaki Tsunekane, Noboru Taguchi, Humio Inaba. High-power, efficient, low-noise, continuous-wave all-solid-state Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(23): 1912~1914
- 4 Huadong Lu, Jing Su, Changde Xie *et al.*. Experimental investigation about influences of longitudinal-mode structure of pumping source on a Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(2): 1344~1353
- 5 Jacopo Belfi, Jacopo Galli, Giovanni Giusfredi *et al.*. Intensity noise of an injection-locked Ti:sapphire laser: analysis of the phase-noise-to-amplitude-noise conversion[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(7): 1276~1286
- 6 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
- 7 Chen Yanli, Zhang Jing, Li Yongmin *et al.*. Reduction of intensity noise of single-frequency Nd:YVO₄ 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 Nd:YVO₄ 激光器的强度噪声[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3): 197~200
- 8 N. A. Robertson, S. Hoggan, J. B. Mangan *et al.*. Intensity stabilization of an argon laser using an electro-optic modulator-performance and limitations [J]. *Appl. Phys. B*, 1986, **39**: 149~153
- 9 M. S. Taubman, Howard Wiseman, D. E. McClelland *et al.*. Intensity feedback effects on quantum-limited noise[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(10): 1792~1800
- 10 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器强度噪声[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1202~1205
- 11 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): 1471~1473
- 12 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
- 13 Yaohui Zheng, Fengqin Li, Kunchi Peng. High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd:YVO₄ as a polarizing beam splitter[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(2): 309~312
- 14 Lu Huadong, Su Jing, Li Fengqin *et al.*. Compact, stable, tunable Ti:sapphire laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1166~1171
- 卢华东, 苏 静, 李凤琴 等. 紧凑稳定的可调谐钛宝石激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1166~1171
- 15 Lu Huadong, Su Jing, Peng Kunchi. Study on intracavity losses and output coupler transmission of all-solid-state tunable Ti:sapphire laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2328~2333
- 卢华东, 苏 静, 彭堃焯. 全固态连续单频可调谐钛宝石激光器腔内损耗及最佳透射率的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2328~2333
- 16 Model detailed technical information: AFL-500LN+. <http://www.minicircuits.com/cgi-bin/modelsearch?model=ZFL-500LN&x=23&y=10>
- 17 H. M. Wiseman, M. S. Taubman, H. A. Bachor. Feedback-enhanced squeezing in second-harmonic generation [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **51**(4): 3227~3233