文章编号：0253-2239(2002)10-1202-04

利用振幅调制器进行光电负反馈抑制激光强度噪声*

马红亮 张 靖 李凤琴 张宽收 谢常德 彭堃墀
(山西大学光电所，量子光学和光量子器件国家重点实验室，太原 030006)

摘要： 采用振幅调制器作为抑制激光强度噪声的元件，首先对光电负反馈回路进行了简要的理论分析，然后利用该光电负反馈进行抑制激光二极管抽运全固化单频环形 Nd:YVO_4 红外激光器强度噪声的实验。结果表明，在 0～1 MHz 的低频段，强度噪声大幅度降低，最大降低约 15 dB。

关键词： 振幅调制；强度噪声；反馈
中图分类号： TN248.1 **文献标识码：** A

1 引 言

单频激光器以其低的强度噪声广泛用于高灵敏度的干涉仪、高精细光谱、光通信等领域。近几年人们对激光二极管抽运环形单频激光器的强度噪声进行了大量理论和实验研究。理论分析表明，激光二极管抽运全固化环行单频激光器的强度噪声，在几千赫兹到几兆赫兹频率之间，远高于散粒噪声基准，且存在着强的弛豫振荡[1～3]。实验上，已实现了采用注入锁定[4,5]、光电反馈[6～8]、模清洁器[9,10]等技术对激光强度噪声进行抑制。

在以前的工作中[8]，采用负反馈光电流直接耦合到激光二极管驱动电流上，实现了对激光器弛豫振荡噪声的抑制，由于反馈回路中抽运噪声传递函数在弛豫振荡峰处有 180°相位跃变，反馈回路必须引入一相位补偿电路，防止反馈回路产生自激振荡。Robertson 等人[11]首先利用振幅调制器抑制氩离子激光器的强度噪声。随后 Taubman 等人[12]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。本文用振幅调制器的光电负反馈来抑制激光强度噪声，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激光二极管抽运全固化单频环形 Nd:YVO_4 红外激光器的强度噪声进行抑制，在 0～1 MHz 的低频段，得到了噪声的大幅度降低。该反馈回路设计简单，便于实际应用。

* 国家自然科学基金(69837010、60178012)和山西省青年科学基金资助课题。

E-mail：zhang74@yahoo.com

收稿日期：2001-09-29；收到修改稿日期：2001-12-05

2 理论分析

反馈回路实验装置原理图如图 1 所示。

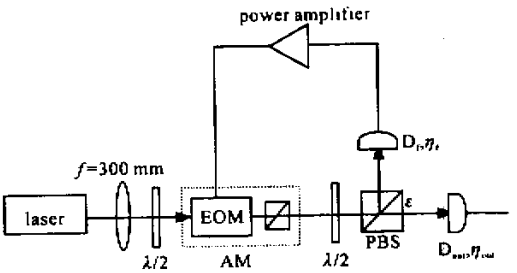

Fig. 1 Schematic of experimental setup. D_f, η_f: feedback-in-loop detector and its quantum efficiency; D_{out}, η_{out}: out-of-loop detector and its quantum efficiency; PBS: polarizing beam splitter; λ/2: half-wave plate; AM: amplitude modulator

假定偏振分光棱镜 PBS 的透射率为 ε，损耗可忽略，其反射光束由量子效率为 η_f 的探测器探测，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 A_{in} 可表示为

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

式中，$\bar{A}_{in}$ 为光场的平均值。δA_{in} 为光场的量子起伏，其平均值为零。假定反馈回路的振幅调制器不影响光场的平均功率，而只引入一个小的起伏项 δr，那么经过振幅调制器后，光场的湮灭算符 $A'_{in}(t)$ 可表示为

$$A'_{in}(t) = A_{in}(t) + \delta r = \bar{A}_{in} + \delta A_{in}(t) + \delta r. \tag{2}$$

经过偏振分光棱镜后，透射输出光和反射输出光的湮灭算符 A_{out}、A_{ref} 分别可表示为

$$A_{out} = \sqrt{\varepsilon}(\bar{A}_{in} + \delta A_{in} + \delta r) + \sqrt{1-\varepsilon}\,\delta A_V, \tag{3}$$

$$A_{ref} = \sqrt{1-\varepsilon}(\bar{A}_{in} + \delta A_{in} + \delta r) - \sqrt{\varepsilon}\,\delta A_V, \tag{4}$$

式中 δA_V 表示偏振分光棱镜所引入的真空起伏。利

用(4) 式,反馈回路所引入的小的起伏项 δr 可具体表示为[13]

$$\delta r = -\int_{-\infty}^{\infty} k(\tau)\sqrt{1-\varepsilon}\bar{A}_{\mathrm{in}}\{\sqrt{1-\varepsilon}[\delta X_{\mathrm{in}}(t-\tau)+\delta X_{\mathrm{r}}(t-\tau)]-\sqrt{\varepsilon}\delta X_{\mathrm{V}}(t-\tau)\}\mathrm{d}\tau, \tag{5}$$

$k(\tau)$ 为反馈回路的响应函数,负号表示负反馈

$$\delta X_{\mathrm{in}} = \delta A_{\mathrm{in}} + \delta A)_{\mathrm{in}}^{+},$$

$$\delta X_{\mathrm{r}} = \delta r + \delta r^{+},$$

$$\delta X_{\mathrm{V}} = \delta A_{\mathrm{V}} + \delta A_{\mathrm{V}}^{+},$$

分别表示输入场的强度起伏、反馈回路光电流的强度起伏、以及由偏振分光棱镜引入真空噪声的强度起伏。经傅里叶变换后,由(5)式可求得

$$\delta X_{\mathrm{r}}(\omega) = -g\left[\delta X_{\mathrm{in}}(\omega) - \sqrt{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}}\delta X_{\mathrm{V}}(\omega)\right]\Big/(1+g), \tag{6}$$

其中,ω 表示频率,$g = 2k(\omega)(1-\varepsilon)\bar{A}_{\mathrm{in}}$,称为反馈回路的开回路增益(open loop gain)。输出场的强度噪声谱 $V_{\mathrm{out}}(\omega) = \langle|\delta X_{\mathrm{out}}(\omega)|^2\rangle$,其中 $\delta X_{\mathrm{out}}(\omega) = \delta A_{\mathrm{out}} + \delta A_{\mathrm{out}}^{+}$ 表示输出场的强度起伏。对(3) 式进行傅里叶变换,将(6) 式代入,并取偏振分光棱镜引入的真空噪声 $V = 1$,最终可求得输出场强度噪声谱的表达式如下：

$$V_{\mathrm{out}}(\omega) = 1 + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\frac{(1-\varepsilon)[V_{\mathrm{in}}(\omega)-1]+|g|^2}{|1+g|^2}, \tag{7}$$

其中,$V_{\mathrm{in}}(\omega) = \langle|\delta X_{\mathrm{in}}(\omega)|^2\rangle$,为输入场的强度噪声谱。可见,输出场的强度噪声主要由偏振分光棱镜的透射率 ε、反馈回路的开回路增益 g、以及输入场的强度噪声 $V_{\mathrm{in}}(\omega)$ 决定。对式(7) 求极值得,当 $g(\omega) = (1-\varepsilon)[V_{\mathrm{in}}(\omega)-1]$ 时,反馈回路对输入光场有最大的噪声抑制：

$$V_{\mathrm{out}}(\omega) = 1 + \frac{\varepsilon}{1/[V_{\mathrm{in}}(\omega)-1]+(1-\varepsilon)}. \tag{8}$$

可见,当输入光场为相干光 $V_{\mathrm{in}} = 1$,反馈回路满足 $k(\omega) = 0$(即没有反馈) 时,得到输出光场噪声最小 $V_{\mathrm{out}}(\omega) = 1$,此时输出光场也为相干光。(7) 式的曲线如图 2 所示,从中我们可以看到,输入光强度噪声大,得到最佳抑制所需的反馈回路增益也越大,抑制后的噪声值也相应地略有增加,且 V_{out} 始终大于等于 1,因此不可能利用该光电负反馈回路获得振幅压缩光。此外可以看出,达到最佳抑制后,当减小反馈回路增益时,噪声变化明显,而增大增益时,噪声变化不明显,且当增益趋向于负无穷大时,输出光的强度噪声不再依赖于输入光的强度噪声,而为一固定值,由(7) 式可求得,它只与偏振分光棱镜的透射率有关：

$$V_{\mathrm{out}|\,\mathrm{gain}\to\infty}(\omega) = 1 + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}. \tag{9}$$

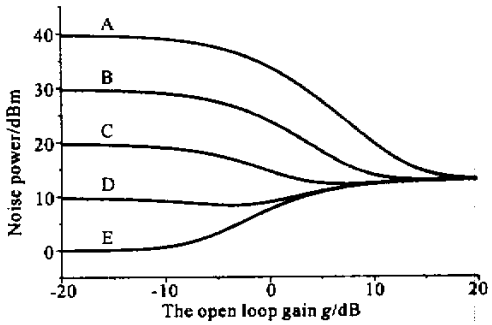

Fig. 2　The plot of theoretical analysis: with the different input noise, the intensity noise of output field versus the open loop gain g, the transmission ε is 0.99. The input noise of curve A, B, C, D, E is 40 dBm, 30 dBm, 20 dBm, 10 dBm, 0 dBm respectively. The curve E indicates the changes when the input noise is SNL (shot nosie limit)

3　实验装置及结果

实验装置如图 1 所示,激光器系统是采用自行研制和生产的激光二极管抽运全固化单频环形 Nd:YVO_4激光器,当抽运功率为 2 W 时,输出功率为 350 mW 的 1064 nm 单频红外激光,偏振方向为垂直偏振。焦距 $f = 300$ mm 的透镜是为了将激光器输出光的发散角减小到最小。AM 为振幅调制器(NEW FOCUS 4104),它和前面的半波片以及后面的格兰偏振分光棱镜一起构成振幅调制,半波片的作用是调整输入光的偏振方向,使得振幅调制器的调制发生在下降沿,从而满足回路设计负反馈的要求;另一个半波片和 PBS 一起构成偏振分束器;光探测器 D_{f}(Analog Modules 713A)所产生的光电流经一功率放大器(MINI-CIRCUITS NO. ZHL-6A-BNC)后反馈到振幅调制器上,构成反馈控制回路。光探测器 D_{out}监视输出激光的强度噪声,探测到的光电流送入频谱分析仪(HP8890L)。探测器 D_{f} 和

D_{out}均采用 FND-100 光电二极管。探测器 D_f 后面为两级同相放大，有着宽的增益带宽 10 kHz～100 MHz和大的动态范围，由于它只放大交流信号，因此反馈回路对激光的输出平均功率不产生影响。探测器 D_{out}是自行设计的，后面为一级互阻抗运算放大，把光电流信号变为电压信号，它的带宽为 0～5 MHz。输出的直流光电流为 1.3 mA，在测量完强度噪声后，可用白光光源照射探测器 D_{out}，在相同的直流光电流下获得散粒噪声基准。

实验结果如图 3 所示，激光器自由运转时输出激光的强度噪声谱(曲线 A)在大约 200 kHz 处存在一个很强的弛豫振荡峰，强度噪声在大于 1 MHz 处逐渐接近于散粒噪声。曲线 B 为加上反馈回路后测得的输出噪声谱，在 0～1 MHz 的低频段，强度噪声大幅度降低，在 100 kHz 附近降低约 15 dB，对弛豫振荡峰抑制约 10 dB，在大约 400 kHz 和 600 kHz 处的突起部分是由于激光器弛豫振荡峰强度较高，使探测器和功率放大器饱和而产生的二次和高次谐波，通过振幅调制器而引入到输出激光噪声中。与理论分析预计利用该回路不可能产生压缩相符，抑制后的噪声曲线均高于散粒噪声基准。

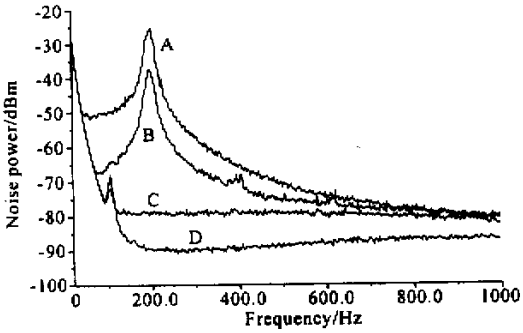

Fig. 3 Noise power spectra of the output laser, when the DC light current of the output detector is 1.3 mA. Spectrum analyzer parameters are RES BW-10 kHz, VBW-0.1 kHz, and SWP-2940 ms. A: the noise spectra without feedback loop; B: the noise spectra with feedback loop; C: a superposition of electronic noise and quantum noise of an equivalent Poissonian photo current; D: the electronic noise floor of the detection system

实验中，我们通过衰减器来改变反馈回路的增益，发现，在得到噪声最佳抑制后，增大增益，噪声几乎没有任何变化，而减小增益时，噪声迅速抬高，反应非常灵敏，这一点也与理论分析曲线噪声随增益的变化趋势相符。和以前工作相比较，该回路对弛豫振荡峰的抑制不如将光电流直接反馈到激光二极管抽运电流[8]，但对低频段噪声的抑制效果要优于后者，如果能同时采用两种技术来抑制激光的强度噪声，可获得更低的激光输出噪声。

结论 从理论和实验两方面研究了振幅调制器对激光强度噪声进行光电负反馈抑制的工作特性。实验上采用自行研制的激光二极管抽运全固化单频环形 Nd:YVO_4激光器，在低频段得到了噪声的大幅度降低，理论和实验结果相符较好。该反馈回路设计简单，便于实际应用。

参 考 文 献

[1] Ralph T C, Harb C C, Bachor H A. Intensity noise of injection locked lasers: Quantum theory using a linearized input/output method. *Phys. Rev.* (*A*), 1996, **54**(5): 4359～4369

[2] Zhang Jing, Chen Yanli, Zhang Tiancai *et al*.. Investigation of the characteristics of the intensity noise of singly resonant active second-harmonic generation. *J. Opt. Soc. Am.* (*B*), 2000, **17**(10): 1695～1703

[3] Zhang Jing, Zhang Kuansou, Chen Yanli *et al*.. Intenaty noise properties of LD pumped single-frequency ring lasers. *Acta Optica Sinica* (**光学学报**), 2000, **20**(10): 1311～1316 (in Chinese)

[4] Yang S T, Imai Y, Oka M *et al*.. Frequency stability, 10-W continuous-wave, laser-diode end-pumped, injection-locked Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1676～1679

[5] Farinas A D, Gustafson E K, Bayer R L. Frequency and intensity noise in an injection-locked solid-state laser. *J. Opt. Soc. Am.* (*B*), 1995, **12**(2): 328～334

[6] Harb C C, Bachor H A, Schilling R *et al*.. Suppression of the intensity noise in a diode-pumped Nd:YAG nonplnar ring laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(12): 2907～2913

[7] Zhang Jing, Chang Hong, Jia Xiaojun *et al*.. Suppression of intensity noise of LD-pumped single-frequency ring Nd:YVO_4/KTP green laser by opto-electronic feedback. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(10): 695～617

[8] Zhang Jing, Ma Hongliang, Wang Runling *et al*.. Suppression of intensity noise of LD pumped single-frequency ring Nd:YVO_4 laser by opto-electronic feedback. *Acta Optica Sinica* (**光学学报**), 2001, **21**(9): 1031～1035 (in Chinese)

[9] Willke B, Uehara N, Gustafson E K *et al*.. Spatial and temporal filtering of a 10-W Nd:YAG laser with a Fabry-Perot ring-cavity premode cleaner. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1704～1706

[10] Cheng Yanli, Zhang Jing, Li Yongming *et al*.. Reduction of intensity noise of single frequency Nd:YVO_4 laser using mode cleaner. *Chinese J. Lasers* (**中国激光**), 2001, **A28**(3): 197～200 (in Chinese)

[11] Robertson N A, Hoggan S, Mangan J B *et al*.. Intensity stabilisation of an argon laser using an electro-optic modulator-performance and limitations. *Appl. Phys.* (*B*), 1986, **39**:149～153

[12] Taubman M S, Wiseman H, McClelland D E *et al*.. Intensity feedback effects on quantum-limited noise. *J. Opt. Soc. Am.* (*B*), 1995, **12**(10):1792～1800

[13] Wiseman H M, Taubman M S, Bachor H A. Feedback-enhanced squeezing in second-harmonic generation. *Phys. Rev.* (*A*), 1994, **51**(4):3227～3233

Suppression of Intensity Noise by an Opto-Electronic Feedback Loop with Amplitude Modulator

Ma Hongliang Zhang Jing Li Fengqin Zhang Kuanshou Xie Changde Peng Kunchi

(*Institute of Opto-Electronics Shanxi University*, *The Key Laboratory of Quantum Optics*, *Ministry of Education*, *Taiyuan* 030006)

(Received 29 September 2001; revised 5 December 2001)

Abstract: An opto-electronic feedback loop with AM was used to suppress the laser intensity noise. The opto-electronic feedback loop was analyzed theoretically and then we experimentally suppressed the intensity noise of LD-pumped single-frequency ring Nd:YVO_4 infrared laser by using the feedback loop. The result indicated that the intensity noise is reduced greatly between 0～1 MHz frequency with the maximum reduction 15 dB.

Key words: AM-amplitude modulator; intensity noise; feedback