

文章编号: 0253-2239(2001)09-1031-05

光电负反馈抑制全固化单频激光器的强度噪声^{*}

张 靖 马红亮 王润林 张宽收 谢常德 彭[✉] 堉

(山西大学光电研究所量子光学教育部重点实验室, 太原 030006)

摘要: 实验研究了激光二极管抽运的 Nd:YVO₄ 环形单频激光器的强度噪声特性, 通过光电负反馈调制激光二极管抽运源, 使激光器的弛豫振荡噪声受到抑制, 在 300 kHz 弛豫振荡峰处输出光的强度噪声被降低 25 dB。

关键词: 环形单频激光器; 强度噪声; 负反馈

中图分类号: TN241 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、高精度光谱、光通信等领域。激光器量子理论模型表明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千赫兹到几兆赫兹频率之间存在弛豫振荡^[1,2], 弛豫振荡噪声受抽运噪声的影响较小, 即使抽运光为振幅压缩光也还存在着很强的弛豫振荡^[3], 这是因为弛豫振荡噪声主要由自发辐射噪声、偶极起伏噪声以及由输出耦合镜引入的真空起伏引起。在小于弛豫振荡的低频范围内, 激光器的强度噪声主要受抽运噪声的影响, 基本处于抽运噪声水平。近几年人们对激光二极管抽运的单块 YAG 非平面环形激光器的强度噪声进行了大量的研究, 采用注入锁定^[4,5]、光电反馈^[6,7]、模清洁剂^[8,9]等技术实现对弛豫振荡噪声的抑制。

本文利用包含抽运噪声及量子起伏在内的理论模型^[1,2], 分析激光器弛豫振荡噪声的来源及激光二极管抽运源的传递函数, 从理论上寻求能使激光器的弛豫振荡噪声得到最佳抑制的实验条件, 并在此基础上设计实验系统。实验采用自行设计制作的激光二极管抽运的四镜环形谐振腔^[7]得到 Nd:YVO₄ 1.064 μm 单频激光输出, 把光电负反馈控制系统的电信号耦合到激光二极管抽运源实现对激光器弛豫振荡噪声的抑制。低于弛豫振荡频率处噪声降低 4 dB, 在 300 kHz 弛豫振荡峰处噪声降低 25 dB。

2 理论分析

由文献[2]可知, 激光二极管抽运的全固化激光器输出激光的强度噪声谱可表示为各种噪声源影响的传递函数:

$$V_i = \left\{ 1 + \frac{4k_m^2(\omega^2 + \gamma_i^2) - 8k_m k \gamma_i \gamma_l (r-1)_l}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_{vac} + \left| \frac{\sqrt{4kk_m \gamma_i^2 r(r-1)}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + i\omega \gamma_l} \right|^2 V_P + \left\{ \frac{4kk_m \gamma_i^2 (r-1)}{(\omega_r^2 - \omega^2) + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_{spont} + \left\{ \frac{4k_m k (\gamma_i^2 + \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2) + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_{dipole} + \left\{ \frac{4k_m k_l (\gamma_i^2 + \omega^2)}{\omega_r^2 - \omega^2 + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_{loss}, \quad (1)$$

其中, $r = P_{in}/P_{th}$ 为归一化抽运因子, P_{in} 为抽运功率, P_{th} 为抽运阈值功率, ω 为射频噪声分析频率, L 为激光谐振腔长, γ_i 为上能级的自发辐射速率, $k = (k_m + k_l)$ 为总的腔衰减速率, 其中 k_m 和 k_l 分别为输出镜耦合损耗和内腔损耗引起的衰减, 注入噪声有来自输出耦合镜的真空噪声(V_{vac})、抽运光的强度噪声(V_P)、自发辐射噪声(V_{spont})、偶极起伏噪声(V_{dipole})以及内腔损耗引入的噪声(V_{loss})。 ω_r 为弛豫振荡的频率:

$$\omega_r = \sqrt{2kG\alpha^2} = \sqrt{2k\gamma_i(r-1)}, \quad (2)$$

G 为原子跃迁与激光腔模之间耦合的受激辐射速率, α^2 为每个原子所对应的内腔光子数, γ_i 为弛豫振荡的阻尼速率:

$$\gamma_i = G\alpha^2 + \gamma_i + \Gamma = \gamma_i r + \Gamma \quad (3)$$

Γ 为激光二极管抽运速率。一般而言, 除 V_P 外其他各种量子噪声源均处于量子噪声极限, 即

^{*} 国家自然科学基金(6997724、69837010)和山西省自然科学基金资助课题。

收稿日期: 2000-06-05; 收到修改稿日期: 2000-08-11

$$V_{vac} = V_{spont} = V_{dipole} = V_{loss} = 1,$$

而抽运光噪声 V_p 则由抽运源激光二极管的强度噪声决定。

因此, 我们可以通过测量给定激光器的各参数(表 1), 利用上式获得激光强度噪声谱的理论曲线。图 1 为归一化抽运因子 $r = 10$ 时, 不同抽运光的噪声 V_p 对激光输出强度噪声的影响。图中激光强度噪声用散粒噪声极限归一化, 用对数坐标 $10\lg(V_f)$ 表示, 横坐标以 $\lg(\omega/2\pi)$ 为单位, 因此 0 dB 表示散粒噪声基准 ($V_f = 1$)。由图可见, 全固化单频

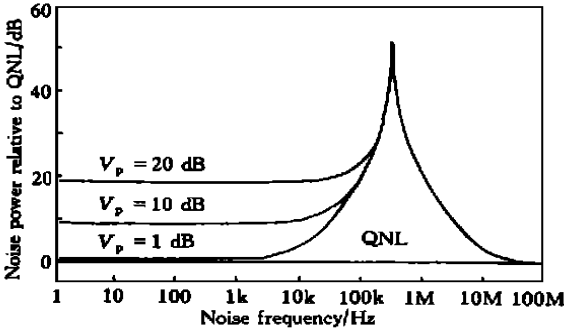


Fig. 1 Intensity noise spectra with different pump noise V_p , normalized pump rate r is 4.4

Nd:YVO₄激光器输出激光在低频段存在很高的弛豫振荡噪声。

Table 1. Parameters of single-frequency ring Nd:YVO₄ laser

optical cavity length L / mm	350
transmission of the output coupling mirror T	4%
intracavity loss \hat{q}_{cav}	2%
pump power P_{max}/W	1.1
decay rate of the output coupling mirror k_m/s^{-1}	1.71×10^7
decay rate of the intracavity loss k_l/s^{-1}	8.55×10^6
total cavity decay rate k/s^{-1}	2.56×10^7
spontaneous emission from upper laser level γ_l/s^{-1}	10^4
lasing threshold p_{th}/mW	250

(1) 式仅仅给出了自由运转激光器的强度噪声, 如果把抽运噪声源中的电反馈项考虑进去就可得到激光器在光电负反馈下的强度噪声。抽运源中引入的电反馈项为

$$\delta R = - \int_{-\infty}^{\infty} k(\tau) \hat{q}(t-\tau) d\tau, \quad (4)$$

它是反馈电路的时间响应函数 $k(\tau)$ 与探测的反馈光电流 $\hat{q}(t-\tau)$ 的卷积。式中 R 为电反馈算符, τ 为时间变量。因此我们得到激光器在光电负反馈下的强度噪声:

$$V_{sup} = \frac{(1-\epsilon) \left\{ V_f [(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_l^2] + 4kk_m \gamma_l^2 r(r-1) |H(\omega)|^2 [(1-\eta_D)/(\eta_D \epsilon)] \right\}}{\left| i\omega \gamma_l + (\omega_r^2 - \omega^2) - \sqrt{4kk_m \gamma_l^2 r(r-1)} H(\omega) \right|^2} + \frac{(1/\epsilon) \left| i\epsilon \omega \gamma_l + \epsilon(\omega_r^2 - \omega^2) - \sqrt{4kk_m \gamma_l^2 r(r-1)} H(\omega) \right|^2}{\left| i\omega \gamma_l + (\omega_r^2 - \omega^2) - \sqrt{4kk_m \gamma_l^2 r(r-1)} H(\omega) \right|^2}, \quad (5)$$

式中 $H(\omega)$ 为反馈电路的传递函数, η_D 为探测器效率, ϵ 为分束器分束比。当 $H(\omega) = 0$ 时, (5) 式变为自由运转激光器的强度噪声(1) 式。

从(1) 式的第二项可知抽运噪声的传递函数为

$$F(\omega) = \frac{\sqrt{4kk_m \gamma_l r(r-1)}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + i\omega \gamma_l}. \quad (6)$$

该函数为二阶传递函数, 类似于简谐阻尼谐振子的数学表达式。如果阻尼速率 γ_l 小于 ω_r 时, 传递函数 $F(\omega)$ 呈现出弛豫振荡。图 2 给出了抽运噪声传递函数的振幅和相位响应曲线, 该函数在弛豫振荡峰处有一个 π 相位跃变。因此在负反馈环路中要考虑调制抽运源引入的简谐阻尼谐振子。

从自动控制负反馈稳定性理论可知, 一个稳定负反馈闭环回路的条件要求开环增益的相位达到

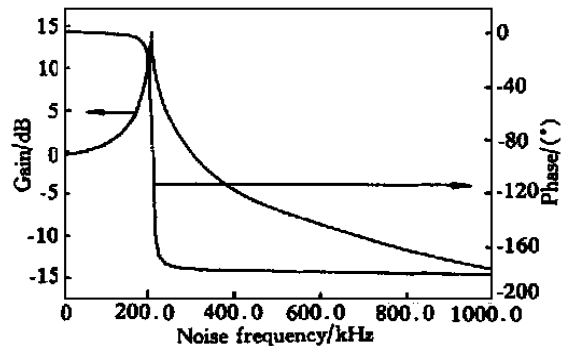


Fig. 2 A plot of the amplitude and the phase of the pump noise transfer $F(\omega)$ as a function of frequency. Used parameters are listed in Table 1

-180° 时开环增益的幅度小于 1, 如果不满足该条件负反馈回路是不稳定的而会产生振荡现象。此外当开环增益接近 -1 时, 稳定的反馈回路将放大噪

声。因此从图 2 抽运传递函数的波特图看出, 在反馈回路中需要引入一相位超前滤波电路来改善反馈控制环的性能, 既能使激光噪声获得较大的压缩, 又防止反馈回路产生自激振荡。我们考虑一个简单的相位超前传递函数:

$$H(\omega) = g[(p + i\omega s^2)/(p + i\omega)], \quad (7)$$

式中 g 为传递函数的线性增益, p 和 s 是由反馈回路特性所确定的参量。该传递函数在频率 ω_m 相位超前为最大值 ϕ_m :

$$\tan\phi_m = (s^2 - 1)/(2s), \quad \omega_m = p/s. \quad (8)$$

图 3 给出光电负反馈对激光器输出强度噪声的影响。曲线 A 为自由运转激光器的强度噪声,

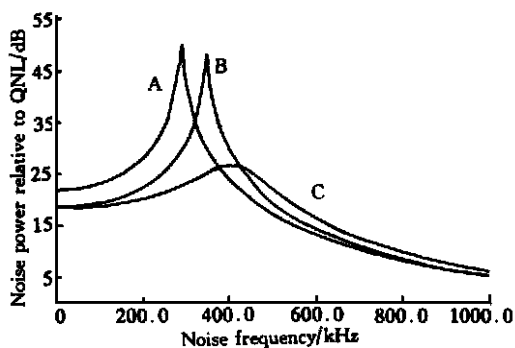


Fig. 3 The effect of feedback on the laser intensity noise spectrum. A: the free-running laser spectrum, $H(\omega) = 0$; B: the spectrum with feedback and no phase advance, $H(\omega) = g$; C: the spectrum with feedback and phase advance

$H(\omega) = 0$; 曲线 B 为反馈回路只引入线性增益而未引入相位超前时的激光强度噪声, $H(\omega) = g$; 曲线 C 为反馈回路引入相位超前时的激光强度噪声, $H(\omega) = g(p + i\omega s^2)/(p + i\omega)$ 。可以看出在反馈回路引入适当的相位超前可以很好地改善激光器的强度噪声。

3 实验装置和实验结果

实验装置如图 4 所示。激光器系统采用自行研制的激光二极管抽运全固化单频环形 Nd:YVO₄ 激光器, 抽运功率为 1.1 W 时, 输出功率为 200 mW 的 1064 nm 单频红外激光。实验装置分为控制和监视激光噪声两部分, 光探测器 D₁ 监视激光器的噪声, 探测到的光电流送入频谱分析仪(型号为 HP8890L)。光探测器 D₂ 控制激光器噪声, 被探测到的光电流耦合到激光二极管的驱动电流中。D₁ 和 D₂ 采用 Epitax 300 InGaAs 光电二极管。D₁ 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, D₂ 是型号为 Analog Modules 713A 光探测器, 该探测器后面为两极同相放大, 有着宽的增益带宽 0 ~ 100 MHz 和大的动态范围。进入 D₁ 和 D₂ 的光功率分别为 0.8 mW 和 1.2 mW。在测量完强度噪声后, 可用白光光源照射探测器, 在相同的直流光电流下获得散粒噪声基准。

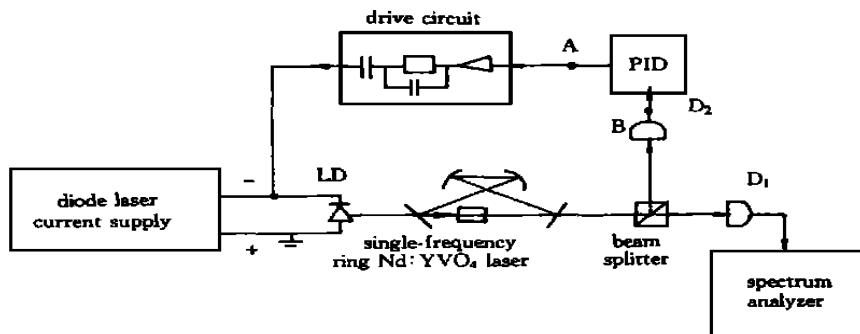


Fig. 4 A schematic diagram of the experimental arrangement

在实验装置中把光电反馈信号直接耦合到激光二极管上以减小时间延迟。光电反馈信号耦合到激光二极管上的驱动电路如图 4 所示, 它由一电流缓冲器(Burr-Brown BUF634)后接一并联 4.7 nF 的 50 Ω 的电阻, 再接一 4.7 μ F 的大电容组成, 这样可以使电反馈信号的交流部分耦合到激光二极管上而不影响激光二极管的直流驱动电流, 从而不影响激光二极管的输出功率。由于激光二极管驱动电源为

高阻恒流源, 它的内阻远大于激光二极管的电阻, 因此电反馈信号大部分都耦合到激光二极管上。该实验装置中使用的激光二极管驱动电源为负电压供电, 激光二极管的正极接地, 于是把驱动电路的正极接激光二极管的负极, 负极接激光二极管的正极, 这样电反馈信号在此被反相。使用网络分析仪(HP 4395A)测量从 A 点到 B 点的传输函数如图 5 所示, 该测量包括从电反馈驱动电路、激光二极管、

$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光输出到 D_2 光探测器。从图 5 可看出, 整个频率段引入了一个 180° 的相移, 这是由于把驱动电路的正极接激光二极管的负极, 负极接激光二极管的正极。在低频端增益和相位都发生变化, 这是由电反馈驱动电路和激光二极管驱动电源的滤波特性所引起的。在弛豫振荡峰处的增益比其它频率处的增益约高 30 dB, 相位在此处发生 180° 的跃变。

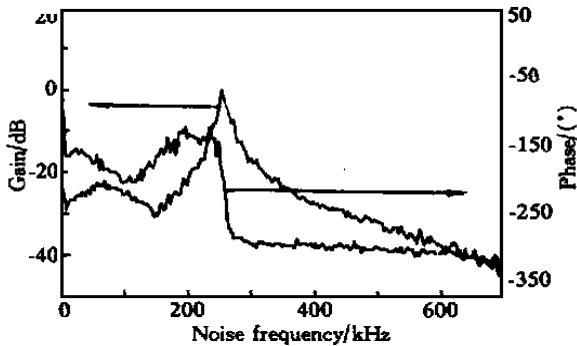


Fig. 5 The transfer function from A to B in Fig. 3 was measured by the network analyzer (HP4395A)

我们设计了一个比例积分微分 (PID) 控制电路, 它被置于 D_2 光探测器和电反馈驱动电路之间, 以改善整个反馈网络的性能。比例积分微分控制电路使用了三级同相运算放大, 为反馈回路提供足够大的增益, 并且加入滤波电路以形成相位超前, 在 600 kHz 获得 40° 最大相位超前。从 D_1 光探测器测得自由运转和加入电反馈的激光强度噪声, 如图 6 所示。

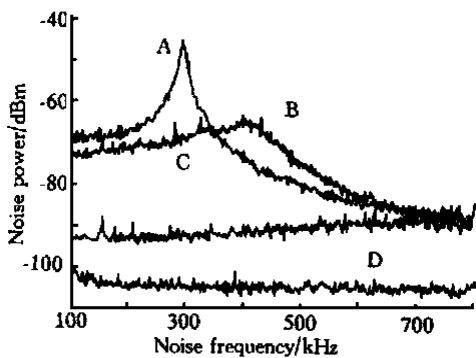


Fig. 6 Noise power spectra of laser. A: the noise output of the free running laser system. B: the noise output with feedback control. C: a superposition of electronic noise and quantum noise of an equivalent Poissonian photocurrent. D: the electronic noise floor of the detection system. Power on D_1 photodetector is 0.8 mW. Power on D_2 photodetector is 1.2 mW

图 7 给出了理论计算和实验获得的强度噪声谱, 可以看出在低频端实验和理论拟合较好。通过

光电负反馈在低于弛豫振荡频率区域和在 300 kHz 弛豫振荡峰处分别使输出光噪声降低 4 dB 和 25 dB。虽然由于在 400 kHz 到 600 kHz 的开环增益接近 -1, 而使噪声略被放大, 但整个反馈回路是稳定的, 而且获得较为平滑的输出噪声谱。如果比例积分微分电路去掉相位超前部分, 可以观察到在弛豫振荡峰处和它的高次谐波都将发生自激振荡。

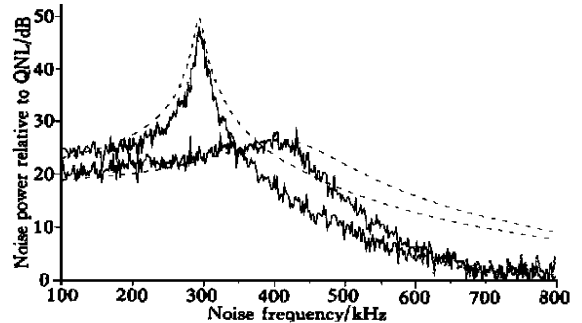


Fig. 7 Laser intensity noise spectra of experiment and theory

结论 我们从理论和实验上分析了激光二极管抽运的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 环形单频激光器的强度噪声特性, 设计了新型的光电反馈回路, 由于设计中着重考虑了反馈回路的增益和相位特性, 使系统能稳定运转, 特别是使弛豫振荡噪声峰值得到大幅度降低, 为设计低噪声单频全固化激光器提供了有用的技术参考。

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] 张 靖, 张宽收, 陈艳丽 等. 激光二极管抽运的环形单频激光器的强度噪声特性研究. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1311~1316
- [3] Becher C, Boller K J. Intensity noise properties of $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ microchip lasers pumped with an amplitude squeezed diode laser. *Opt. Commun.*, 1998, **147**(4/6): 366~374
- [4] Yang S T, Imai Y, Oka M *et al.*. Frequency stability, 10 W continuous-wave, laser-diode end-pumped, injection-locked $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1676~1678
- [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] Rowan S, Campbell A M, Skeldon K *et al.*. Broadband intensity stabilization of a diode-pumped monolithic miniature $\text{Nd}:\text{YAG}$ ring laser. *J. Mod. Opt.*, 1994, **41**(6): 1263~1269

- [7] Harb C C, Bachor H A, Schilling R *et al.*. Suppression of the intensity noise in a diode-pumped Nd :YAG nonplanar ring laser. *IEEE. J. Quan. Electron.*, 1994, **QE-30** (12): 2907~2913
- [8] Willke B, Uehara N, Gustafson E K *et al.*. Spatial and temporal filtering of a 10 W Nd :YAG laser with a Fabry-Pérot ring-cavity premode cleaner. *Opt. Lett.*, 1998, **23** (21): 1704~1706
- [9] 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. *中国激光*, 2001, **A28** (3): 197~200

Suppression of Intensity Noise of LD-Pumped Single-Frequency Ring Nd :YVO₄ Lasers by Opto-Electronic Feedback

Zhang Jing Ma Hongliang Wang Runlin Zhang Kuanshou Xie Changde Peng Kunchi

(*Institute of Opto-Electronic Research, Key Laboratory for Quantum Optics,*

Ministry of Education, Shanxi University, Taiyuan 030006)

(Received 5 June 2000; revised 11 August 2000)

Abstract The characteristic of the intensity noise of LD pumped single-frequency ring Nd :YVO₄ lasers is theoretically and experimentally investigated. The resonant relaxation oscillation (RRO) in the noise spectrum of laser output is strongly suppressed by a self-designed negatively optoelectronic feedback system. The intensity noise around the peak of RRO (300 kHz) is reduced about 25 dB.

Key words: ring single-frequency laser; intensity noise; negative feedback