

# 非平面环形腔激光器的强度噪声及其抑制

梁旭 王云祥 邱琪 邓珠峰 苏君 郭勇

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 采用全量子理论对单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器的强度噪声特性进行了研究,通过理论分析和仿真发现,单块非平面环形腔激光器的弛豫振荡主要由真空起伏、偶极起伏和内腔损耗引起,抽运噪声和自发辐射对弛豫振荡的影响相对较小。同时,从理论上对强度噪声的光电负反馈抑制进行了分析和仿真,为实验上噪声抑制电路的设计提供了一定的理论基础。参考此理论电路,设计了可以获得较好的相位超前和低噪声宽带增益放大的噪声抑制电路,在实验上获得了良好的噪声抑制效果。当弛豫振荡峰为 311 kHz 时,弛豫振荡峰处的强度噪声被抑制了 39 dB,在整个频谱范围内获得了低于 -115 dB/Hz 的噪声水平。

**关键词** 激光器;非平面环形腔激光器;强度噪声;噪声抑制;光电负反馈

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1202006

## Intensity Noise Properties and Suppression of Nonplanar Ring Oscillator

Liang Xu Wang Yunxiang Qiu Qi Deng Zhufeng Su Jun Guo Yong

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** The intensity noise properties of the monolithic Nd:YAG nonplanar ring oscillator are investigated via full quantum theory. By theoretical analysis and simulation, it is obtained that the relaxation oscillation is influenced mainly by the vacuum fluctuation, dipole fluctuation and cavity loss. The influence from the pump noise and spontaneous emission noise is relatively small. Meanwhile, the optoelectronic negative feedback of intensity noise is theoretically analyzed, which can provide a theoretical basis for the design of the noise suppression circuit. Based on this theory, the noise suppression circuit is designed which has better phase advance, low noise, wide bandwidth and adequate gain. Experimentally, a satisfied noise suppression result is achieved. For the noise with a relaxation oscillation frequency of 311 kHz, the experimental result shows that the relaxation oscillation noise peak value is reduced about 39 dB, and the intensity noise level is lower than -115 dB/Hz in the entire spectrum.

**Key words** lasers; nonplanar ring oscillator; intensity noise; noise suppression; optoelectronic negative feedback

**OCIS codes** 140.3580; 140.3560; 270.2500; 140.3425

## 1 引言

激光二极管(LD)抽运的单块非平面环形腔激光器由于具有线宽窄、噪声低、可调谐、功率稳定、体积小等特点,因而被广泛应用于空间相干光通信、光控相控阵雷达、自适应光学系统的波面检测、引力波探测、时间或频率基准和产生压缩态激光等领域<sup>[1~5]</sup>。然而,由于即使抽运源处于量子噪声极限,

LD 抽运的固体激光器依然会有很严重的弛豫振荡,并且在低于弛豫振荡峰的频率段,噪声也没有下降到量子噪声水平<sup>[6]</sup>。因此,对于那些对激光噪声特性要求比较高的领域,进行强度噪声特性的研究和抑制仍是很有必要的。

近些年来,国内外对激光的噪声特性和抑制技术都做了大量的理论研究。澳大利亚的 T. C.

**收稿日期**: 2012-07-06; **收到修改稿日期**: 2012-08-28

**基金项目**: 中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2010J059)资助课题。

**作者简介**: 梁旭(1986—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: chinaliangxu@163.com

**导师简介**: 邱琪(1965—),男,博士,教授,主要从事光通信及光电子技术等方面的研究。E-mail: qqiu@uestc.edu.cn

Ralph 等<sup>[7]</sup>建立了典型的四能级激光系统的量子动力学分析模型, B. C. Buchler 等<sup>[8]</sup>采用该模型对 Nd:YAG 激光器的噪声特性进行了理论分析, 从理论上证明了通过反馈控制抽运功率来抑制激光噪声的可行性。国内在这方面做的较多的是山西大学<sup>[9]</sup>, 他们主要采用量子理论模型对 LD 抽运的全固化单频激光器的强度噪声特性进行了研究。

对于非平面环形腔激光器噪声抑制技术的实验研究主要有光电反馈法、模清洁剂法、振幅调制器法、注入锁定法等<sup>[6,10~12]</sup>。T. J. Kane<sup>[13]</sup>采用光电反馈法对 1320 nm 的非平面环形腔激光器进行了噪声抑制, 弛豫振荡频率在 140 kHz 处的强度噪声降低了 37 dB, 从 5 Hz 到 1 MHz 的频域范围内噪声总体降低了 21 dB。此外, 澳大利亚的 C. C. Harb 等<sup>[6]</sup>、德国的 I. Freitag 等<sup>[14]</sup>也对非平面环形腔激光器展开了深入的研究。目前做得比较好的是德国的 Innolight 公司, 他们对非平面环形腔激光器的噪声抑制技术进行了改进, 在整个频谱范围获得了低于 -140 dB/Hz 的噪声水平。国内起步较晚, 进行强度噪声抑制技术研究的主要有山西大学、北京理工大学、中国计量科学研究院等单位<sup>[15~17]</sup>, 其中北京理工大学<sup>[17]</sup>对 1319 nm 的单块非平面环形腔激光器进行了噪声抑制研究, 在弛豫振荡峰和低频区

域分别获得了 45 dB 和 20 dB 的抑制效果。

虽然上述报道都取得了很好的实验效果, 但对于单块非平面环形腔激光器噪声特性及抑制理论的研究报道却不多, 并且实验也没有给出激光器的相对强度噪声 (RIN) 值, 因此难以科学地评价激光器的噪声水平。本文采用全量子理论对单块非平面环形腔激光器的噪声特性进行了研究, 同时从理论上对强度噪声的光电负反馈抑制也进行了分析和仿真, 为实验上噪声抑制电路的设计提供了一定的理论基础。设计了可以获得较好的相位超前和宽带宽增益放大的噪声抑制电路, 并通过采用仿真和实验相结合的方法, 在实验上获得了良好的噪声抑制效果。

## 2 强度噪声理论分析

根据全量子理论<sup>[7,9]</sup>, LD 抽运的单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器可以采用四能级结构模型来描述。其基本途径是通过解具有与各种外部量子力学热库耦合的激活原子和光学谐振腔模的量子 Langevin 方程, 在稳态解附近对量子 Langevin 方程做线性化处理, 就可以得到激光输出的强度噪声谱。因此受各种噪声源影响的强度噪声谱可以表示为

$$V_f = V_{\text{vac}} + \frac{1}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \{ [4\kappa_m(\omega^2 + \gamma_i^2) - 8\kappa_m \kappa \gamma_t \gamma_l (r-1)] V_{\text{vac}} + [4\kappa_m \kappa \gamma_t^2 r(r-1)] V_p + [4\kappa_m \kappa \gamma_t^2 (r-1)] V_{\text{spont}} + [4\kappa_m \kappa (\omega^2 + \gamma_i^2)] V_{\text{dipole}} + [4\kappa_m \kappa_1 (\omega^2 + \gamma_i^2)] V_{\text{losses}} \}, \quad (1)$$

式中  $\gamma_i$  为上能级的自发辐射速率,  $\kappa_m = \frac{cT}{nL}$  为输出镜耦合损耗引起的衰减速率,  $\kappa_1 = \frac{c\delta_{\text{cav}}}{nL}$  为内腔损耗引起的衰减速率,  $\kappa = \kappa_m + \kappa_1$  为总的腔衰减速率,  $c$  为光速,  $n$  为 Nd:YAG 晶体的折射率,  $L$  为激光谐振腔长,  $T$  为输出镜耦合损耗,  $\delta_{\text{cav}}$  为内腔损耗。  $r = \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{th}}}$  为归一化因子, 其中  $P_{\text{in}}$  为输入抽运功率,  $P_{\text{th}}$  为阈值功率。  $\gamma_l = \gamma_t r + \Gamma$  为弛豫振荡的阻尼速率,  $\Gamma$  为抽运速率,  $\omega$  为频率变量,  $\omega_r = \sqrt{2\kappa\gamma_t(r-1)}$  为弛豫振荡的频率。

从(1)式可以看出, 激光强度噪声主要由输出耦合镜的真空噪声  $V_{\text{vac}}$ , 抽运光的强度噪声  $V_p$ , 自发辐射噪声  $V_{\text{spont}}$ , 偶极起伏噪声  $V_{\text{dipole}}$  以及由内腔损耗引入的噪声  $V_{\text{losses}}$  构成。在弛豫振荡频率  $\omega_r$  处激光强度噪声达到极大值, 且由于一般情况下除  $V_p$

外其他各噪声源均处于量子噪声极限<sup>[9]</sup>, 而抽运光的强度噪声  $V_p$  由抽运的 LD 决定, 从而可以通过控制抽运光的强度噪声  $V_p$  达到降低激光强度噪声的目的。

将单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器的相关参数代入(1)式, 就可以模拟出输出激光的强度噪声谱。其中不同抽运功率下的强度噪声谱如图 1 所示 (彩图请见网络电子版, 下同), 不同噪声源单独作用下的强度噪声谱 ( $P_{\text{in}} = 1.5 \text{ W}$ ) 如图 2 所示, 图中的纵坐标用  $10\lg V_f$  表示, 横坐标为频率  $f$ , 则 0 dB 表示散粒噪声基准 (SNL)。

从图 1 可以看出, 随着抽运功率的增加, 弛豫振荡峰向高频方向移动, 激光强度噪声峰值相对减小。从图 2 中各个噪声源独立作用下的强度噪声谱可以看出, 各个噪声源均对弛豫振荡有贡献, 其中对弛豫振荡影响较大的为真空起伏噪声、偶极起伏噪声和

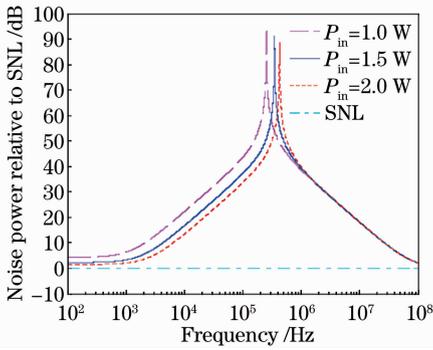


图1 理论上不同抽运功率下的强度噪声谱  
Fig. 1 Theoretical intensity noise spectra at different pump powers

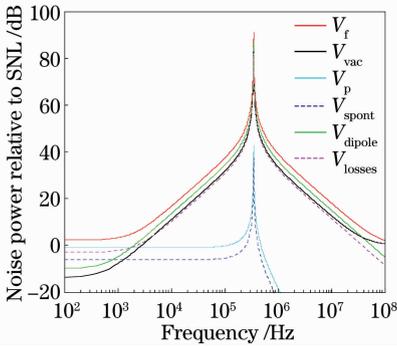


图2 理论上不同噪声源下的强度噪声谱  
Fig. 2 Theoretical intensity noise spectra with various noise sources

由内腔损耗引入的噪声,抽运光的强度噪声和自发辐射噪声对弛豫振荡影响相对较小。且从整个频谱范围看,单块非平面环形腔激光器噪声主要由真空起伏噪声、偶极起伏噪声和由内腔损耗引入的噪声构成,当频率远高于弛豫振荡频率时强度噪声逐渐趋于散粒噪声极限。

### 3 强度噪声实验及结果

实验研究的单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器采用波长为 808 nm 的 LD 抽运,输出波长为 1064 nm。当抽运功率为 2 W 时,最大输出功率达到 846 mW,光-光转换效率为 42.3%,斜率效率为 53.7%。采用延时自外差法对其线宽进行测试,获得了小于 500 Hz 的线宽。

对于激光强度噪声的测量采用平衡探测法<sup>[18]</sup>,其实验装置如图 3 所示。将入射到分束器 BS1 上的光分出一小部分用于强度噪声测量。先将这小部分光用 BS2 按 50:50 分成两部分,分别入射到两个相同类型的低噪声光电探测器 PD1 和 PD2 上,再将两探测器的光电流信号相加后接入频谱仪,即得到

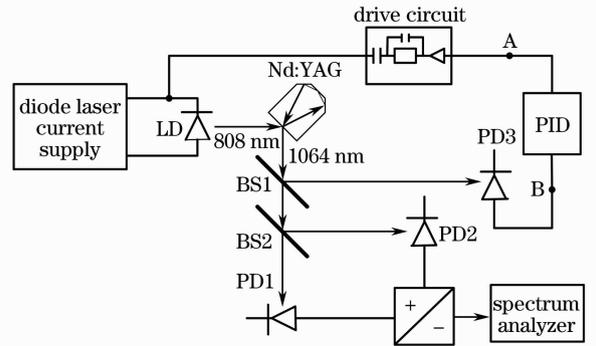


图3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup  
激光的强度噪声;将两信号相减后接入频谱仪即得到散粒噪声基准<sup>[18]</sup>。

采用平衡探测法,测得的不同抽运功率下的相对强度噪声<sup>[19]</sup>如图 4 所示。其中左边的曲线表示抽运功率为 1.0 W,输出功率为 350 mW 的强度噪声谱;中间的曲线表示抽运功率为 1.5 W,输出功率为 610 mW 的强度噪声谱;右边的曲线表示抽运功率为 2.0 W,输出功率为 846 mW 的强度噪声谱。从图中可以看出,该激光器的强度噪声特性与图 1 采用全量子理论得到的强度噪声谱基本一致。考虑到实际情况中的功率损耗,两者可以较好地吻合。

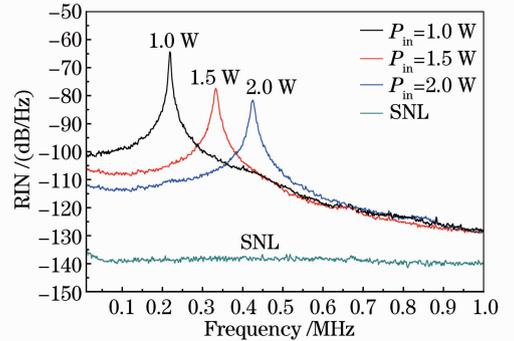


图4 实验上不同抽运功率下的强度噪声  
Fig. 4 Experimental intensity noise spectra at different pump power

### 4 强度噪声抑制

#### 4.1 噪声抑制的理论分析

根据张靖等<sup>[15]</sup>的研究,光电负反馈下的强度噪声为

$$V_s = \frac{(1 - \epsilon)A + (B/\epsilon)}{\left| (\omega_r^2 - \omega^2) - \sqrt{4\kappa_m \kappa \gamma_i^2 r(r-1)} H(\omega) + i\omega\gamma_1 \right|^2}, \quad (2)$$

式中

$$A = V_f [(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2] + 4\kappa_m \kappa \gamma_1^2 r(r-1) \times |H(\omega)|^2 [(1 - \eta_D) / (\epsilon \eta_D)], \quad (3)$$

$$B = |\epsilon \omega \gamma_1 + \epsilon(\omega_r^2 - \omega^2) - \sqrt{4\kappa_m \kappa \gamma_1^2 r(r-1)} H(\omega)|^2, \quad (4)$$

$H(\omega)$  为反馈电路的传递函数,  $\eta_D$  为探测器效率,  $\epsilon$  为分光比。

由于在弛豫振荡峰处有一个  $\pi$  的相位跃变<sup>[16]</sup>, 为了防止反馈回路产生自激振荡, 同时又能使激光强度噪声获得较好的抑制, 需要在反馈回路中引入一相位超前电路来改善反馈控制环路的性能。考虑如图 5 所示的一阶相位超前电路, 其相位超前传递函数为

$$H(s) = g \frac{\alpha(Ts + 1)}{\alpha Ts + 1}, \quad (5)$$

式中  $g$  为传递函数的线性增益,  $s = i\omega$ ,  $\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  和  $T = R_1 C$  是由反馈回路特性所确定的参量。

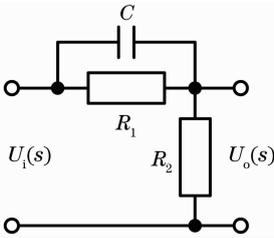


图 5 相位超前电路

Fig. 5 Circuit of a phase advance

通过 Matlab 仿真模拟出的光电负反馈下的输出激光的强度噪声谱如图 6 所示。其中曲线  $a$  为激光器自由运转时的强度噪声谱, 曲线  $b$  为只有线性增益时的强度噪声谱, 曲线  $c$  为既有线性增益又有相位超前时的强度噪声谱。

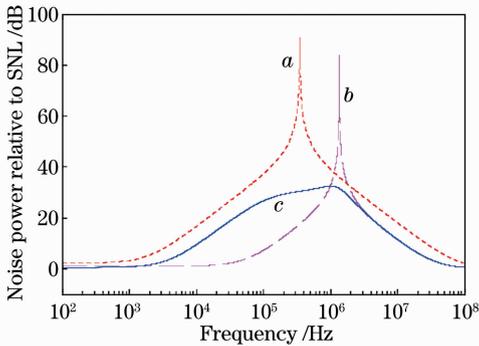


图 6 理论上光电负反馈下输出激光的强度噪声谱

Fig. 6 Theoretical intensity noise spectra with negative feedback

从图 6 可以看出, 引入相位超前不仅可以防止自激振荡, 还可以很好地抑制激光强度噪声, 其抑制

幅度可达 60 dB。

#### 4.2 噪声抑制实验与结果

采用图 3 所示的光电负反馈电路进行强度噪声抑制, 光电探测器 PD3 接收光信号并转换为电信号, 然后通过电流电压转换电路转变为电压。再经过比例积分微分 (PID) 电路处理, 最后经由驱动电路直接注入到 LD 上。其中驱动电路由一个电流缓冲器后面接一个并联小电阻的电容, 再串联一个大电容组成, 这样可以实现对反馈信号的交流耦合而不影响 LD 的直流输出。

根据理论分析, 设计了可以获得较好的相位超前和宽带增益放大的 PID 电路, 该电路由一个比例微分 (PD) 电路外加三级同相运算放大器构成, 具有低噪声、宽带的特性, 能够为反馈电路提供足够的增益。其中 PD 电路以图 5 为基础, 主要实现相位超前补偿功能。采用 Multisim 软件对 PD 电路进行仿真, 得到的增益和相移传递函数随频率变化的曲线如图 7 所示。从图中可以看出, 该电路可以获得较大的增益, 且在 10 kHz 到 5 MHz 都有较大的相位超前, 其中在 225 kHz 附近获得了 70.7° 的相位超前。

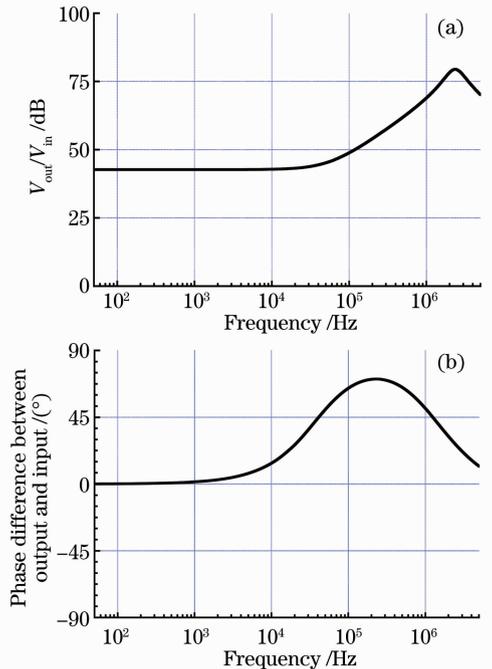


图 7 PID 电路增益 (a) 和相移传递函数 (b) 随频率的变化曲线

Fig. 7 (a) PID circuit gain response and (b) phase response as a function of frequency

采用图 3 所示的包含 PID 的反馈电路进行噪声抑制实验, 当抽运功率为 1.5 W, 输出功率为

610 mW时所得到的强度噪声特性曲线如图8所示。其中上面的曲线(NE off)为激光器自由运转时的强度噪声谱,中间的曲线(NE on)为采用反馈控制电路抑制后的强度噪声谱,最下面的曲线(SNL)为散粒噪声基准。

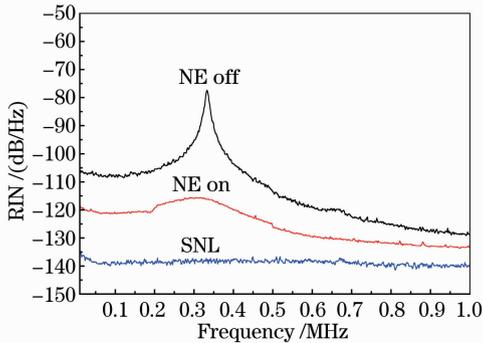


图8 实验上抑制前后的强度噪声特性曲线

Fig. 8 Experimental intensity noise spectra with and without feedback control

从图8中可以看出,在0~1 MHz频段内,激光器的强度噪声都得到了很好的抑制,其中弛豫振荡峰和低频区域分别被抑制了13 dB和39 dB,整个频谱范围内噪声水平低于-115 dB/Hz。同时采用此电路对不同抽运功率下的强度噪声进行抑制,均获得了较好的抑制效果,可见该电路可以在较宽的频率范围内使用。

## 5 结 论

采用全量子理论分析了单块非平面环形腔激光器的强度噪声特性,并从实验上得到了验证。同时通过理论上对强度噪声的光电负反馈抑制进行的分析和仿真发现,只有当相位超前和增益放大相匹配时才会获得最佳抑制效果。以此为理论基础设计的噪声抑制电路,最终在实验上获得了良好的抑制效果,也为以后噪声抑制电路的设计提供了参考。考虑到输出激光的RIN受LD强度噪声及外部环境的影响较大,将进一步进行理论分析和电路优化,以期获得更好的噪声抑制效果。

## 参 考 文 献

- 1 T. J. Kane, R. L. Byer. Monolithic unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
- 2 Zhu Ren, Zhou Jun, Liu Jiqiao *et al.*. Solid state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102011  
朱 韧, 周 军, 刘继桥等. 可调谐单频非平面环形腔固体激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102011
- 3 Gao Chunqing, Gao Mingwei, Lin Zhifeng *et al.*. LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers[J].

- Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1704~1709
- 高春清, 高明伟, 林志锋等. LD抽运单块非平面环形腔单频激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1704~1709
- 4 I. Freitag, D. Golla, A. Tünnemann *et al.*. Diode-pumped solid-state laser as light sources of Michelson-type gravitational-wave detectors[J]. *Appl. Phys. B*, 1995, **60**: S255~S260
- 5 M. L. Eickhoff, J. L. Hall. Optical frequency standard at 532 nm[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1995, **44**(2): 155~158
- 6 C. C. Harb, M. B. Gray, H. A. Bachor *et al.*. Suppression of the intensity noise in a diode-pumped Neodymium:YAG nonplanar ring laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(12): 2907~2913
- 7 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
- 8 B. C. Buchler, E. H. Huntington, C. C. Harb *et al.*. Feedback control of laser intensity noise[J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **57**(2): 1286~1294
- 9 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Chen Yanli *et al.*. Intensity noise properties of LD pumped single-frequency ring lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1311~1316  
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[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1311~1316
- 10 B. Willke, N. Uehara, E. K. Gustafson *et al.*. Spatial and temporal filtering of a 10 W Nd:YAG laser with a Fabry-Perot ring-cavity premode cleaner[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1704~1706
- 11 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
- 12 S. T. Yang, Y. Imai, M. Oka *et al.*. Frequency-stabilized, 10 W continuous-wave, laser-diode end-pumped, injection-locked Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1676~1678
- 13 T. J. Kane. Intensity noise in diode-pumped single-frequency Nd:YAG lasers and its control by electronic feedback[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(4): 244~245
- 14 I. Freitag, A. Tünnemann, H. Welling. Intensity stabilised Nd:YAG ring laser with 1.5 W single-frequency output power at 1.357  $\mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(9): 777~778
- 15 Zhang Jing, Ma Hongliang, Wang Runlin *et al.*. Suppression of intensity noise of LD-pumped single-frequency ring Nd:YVO<sub>4</sub> lasers by opto-electronic feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1031~1035  
张 靖, 马红亮, 王润林等. 光电负反馈抑制全固化单频激光器的强度噪声[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1031~1035
- 16 Li Ye, Cao Jianping, Deng Yongkai *et al.*. Study on the properties and suppression of the intensity noise in semi-nonplanar monolithic lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1050~1054  
李 烨, 曹建平, 邓勇开等. 半非平面单块激光器强度噪声及其抑制的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1050~1054
- 17 Zhang Xiuyong, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Suppression of the intensity noise of monolithic non-planar ring oscillator laser[J]. *Optical Technology*, 2008, **34**(5): 774~777  
张秀勇, 高明伟, 高春清. 单块非平面环形激光器的强度噪声抑制研究[J]. *光学技术*, 2008, **34**(5): 774~777
- 18 H. A. Bachor, T. C. Ralph. A Guide to Experiment in Quantum Optics[M]. Germany: Wiley-VCH, 2004. 204~210
- 19 R. Q. Hui, M. O' Sullivan. Fiber Optic Measurement Techniques[M]. Amsterdam: Academic Press, 2009. 261~266