

文章编号: 1001-3806(2016)01-0113-05

# 半导体抽运 Nd:YAG 激光器强度噪声抑制的研究

梁迎磊, 杨苏辉\*, 赵长明, 张海洋  
(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 为了降低半导体抽运固体激光器的弛豫振荡噪声, 提高其输出功率的稳定性, 采用光电负反馈的方法来抑制半导体抽运的固体激光器的强度噪声, 并对激光器强度噪声的理论特性进行了分析。根据理论分析结果设计了比例-积分-微分反馈控制电路, 通过运用该反馈电路对激光器进行强度噪声抑制实验, 得到了比较理想的实验数据, 即当抽运功率为 700mW、弛豫振荡峰频率为 300kHz 时, 弛豫振荡峰值处和低频区域强度噪声分别降低了 45dB 和 15dB; 当抽运功率为 550mW、弛豫振荡峰值为 250kHz 时, 弛豫振荡峰值处和低频区域强度噪声分别降低了 40dB 和 10dB。结果表明, 该反馈控制电路能够有效地降低半导体抽运固体激光器的强度噪声, 提高激光器输出功率的稳定性。

**关键词:** 激光器; 强度噪声抑制; 光电负反馈; 弛豫振荡

**中图分类号:** TN248.1      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.025

## Research of intensity noise suppression in laser diode pumped Nd:YAG lasers

LIANG Yinglei, YANG Suhui, ZHAO Changming, ZHANG Haiyang  
(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to reduce the relaxation oscillation noise of a diode pumped solid-state laser and improve its stability of output power, the intensity noise was suppressed by means of optoelectronic negative feedback. Theoretical characteristics of laser intensity noise were analyzed. According to the results of theoretical analysis, a proportion-integration-differentiation (PID) feedback control circuit was designed. By carrying out feedback circuit to suppress the laser intensity noise, ideal experimental data were obtained. When pumped power is 700mW, peak frequency of relaxation oscillation is 300kHz, intensity noise at relaxation oscillation peak and low frequency decreases to 45dB and 15dB respectively. When pumped power is 550mW, relaxation oscillation peak frequency is 250kHz, intensity noise at relaxation oscillation peak and low frequency decreases to 40dB and 10dB respectively. The results shows that the feedback control circuit can effectively reduce intensity noise of a diode pumped solid state laser and improve the stability of laser output power.

**Key words:** lasers; intensity noise suppression; photoelectric negative feedback; relaxation oscillation

## 引言

半导体抽运的固体激光器具有转化效率高、结构紧凑、使用寿命长、光束质量好等优点。它在高密度存储、高精度光学测量、光谱学、空间光通信、激光雷达等方面都有着广泛的应用。在很多应用中, 要求激光器的输出功率稳定, 所以对其强度噪声进行抑制是非常必要的。近些年来, 人们通过采用注入锁定<sup>[1-2]</sup>、光电反馈<sup>[3-4]</sup>、模清洁剂<sup>[5-6]</sup>等技术实现了对弛豫振荡噪声的抑制。ZHANG 等人利用光电负反馈方法对 1064nm 环形 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器进行了强度噪声抑制, 闭环后弛豫振荡峰 300kHz 处取得了 25dB 的抑制效果, 在低频

区域取得了 4dB 的抑制效果<sup>[7]</sup>。ZHAO 等人研究了半导体抽运 1319nm 单频激光器的强度噪声, 并通过光电反馈系统使弛豫振荡噪声下降了 30dB 左右, 在低频段也表现出一定的强度噪声抑制效果<sup>[8]</sup>。LI 等人在弛豫振荡峰至高频区域获得了 60° 的最大相位超前, 闭环后在弛豫振荡峰 200kHz 和低频区域分别取得了 40dB 和 15dB 的抑制效果<sup>[9]</sup>。LIANG 等人采用负反馈对 Nd:YAG 晶体激光器进行了强度噪声抑制试验, 在弛豫振荡峰 311kHz 附近, 获得了 39dB 的抑制效果<sup>[10]</sup>。

反馈回路通过提供较高的增益和较大的相位超前, 能取得较好的噪声抑制效果, 但是以往研究经验表明, 反馈电路容易引起振荡, 造成电源输出的不稳定。本文中通过研究半导体抽运固体激光器强度噪声的特性, 设计了反馈回路, 通过计算机仿真模拟优化电路参量, 最终在保证反馈电路稳定的前提下, 取得相位增益最优匹配, 对不同抽运功率下激光器的强度噪声均取

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61275053)

作者简介: 梁迎磊(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光器研究。

\* 通讯联系人。E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

收稿日期: 2014-12-10; 收到修改稿日期: 2015-01-23

得了较满意的抑制效果。

## 1 理论分析

一般来说,半导体抽运固体激光器的强度噪声主要包括低频技术噪声和中频弛豫振荡噪声<sup>[11]</sup>。低频技术噪声由外部干扰、机械振动等原因引起。中频弛豫振荡噪声是引起半导体抽运固体激光输出功率起伏的最主要因素,它是谐振腔内的辐射与激活物质相互作用的结果<sup>[12]</sup>。弛豫振荡是大多数激光器特别是固体激光器的基本特性。

从速率方程出发,利用一级微扰近似方法可得到弛豫振荡噪声的频率近似为<sup>[13]</sup>:

$$f_{RO} \approx \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_{21}}{\tau_r} \left( \frac{W_{03}}{W_{03,th}} - 1 \right)} \quad (1)$$

式中,  $\Omega$  是角速率,  $W_{03}$  是受激吸收跃迁几率,  $W_{03,th}$  为  $W_{03}$  的阈值,  $A_{21}$  为上能级  $E_2$  到下能级  $E_1$  的自发辐射几率,  $\tau_r$  为总的腔内光子寿命。设  $r = P_p/P_{p,th} = W_{03}/W_{03,th}$  为归一化抽运功率因子,  $P_p$  和  $P_{p,th}$  分别为半导体激光器的抽运功率和抽运阈值功率,  $\tau_{sp} = 1/A_{21}$  为  $Nd^{3+}$  上能级自发辐射寿命,那么弛豫振荡噪声频率还可以写成:

$$f_{RO} \approx \frac{[(r-1)/(\tau_r \tau_{sp})]^{1/2}}{2\pi} \quad (2)$$

对于半导体抽运单块非平面环形腔激光器来说,总的腔内光子辐射寿命为  $\tau_r = nl/[c(T + \delta_{cav})]$ <sup>[14]</sup>,  $l$  为谐振腔的几何长度(等于腔长),  $T$  为输出耦合镜透过率,  $c$  是光速,  $\delta_{cav}$  为腔内损耗,  $n$  为  $Nd:YAC$  晶体的折射率。那么弛豫振荡噪声频率和腔的参量及抽运功率因子的关系表达式为:

$$f_{RO} \approx \frac{[c(r-1)(T + \delta_{cav})/(nl\tau_{sp})]^{1/2}}{2\pi} \quad (3)$$

根据参考文献[15],半导体抽运单块非平面环形腔激光器的弛豫振荡噪声包括来自输出耦合镜引入的真空噪声  $V_{vac}$ , 抽运光  $P_p$  引入的强度噪声  $V_p$ , 自发辐射  $\tau_{sp}$  引入的噪声  $V_{spont}$ , 偶极起伏噪声  $V_{dipole}$ , 内腔损耗  $L$  引入的噪声  $V_{loss}$ 。因此激光器的强度噪声谱可由下式来表示:

$$V_i = \left\{ 1 + \frac{4k_m^2(\omega^2 + \gamma_1^2) - 8k_m k_r \gamma_1(r-1)}{(\omega_{re}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2} \right\} V_{vac} + \frac{4kk_m \gamma_r^2 r(r-1)}{(\omega_{re}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2} V_p + \frac{4kk_m \gamma_r^2 r(r-1)}{(\omega_{re}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2} V_{spont} + \frac{4kk_m(\gamma_r^2 + \omega^2)}{(\omega_{re}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2} V_{dipole} +$$

$$\frac{4k_1 k_m (\gamma_1^2 + \omega^2)}{(\omega_{re}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2} V_{loss} \quad (4)$$

式中,  $\gamma_r$  为上能级自发辐射速率,  $k_m = cT/(nL)$  为输出镜耦合损耗引起的衰减速率,  $k_1 = c\delta_{cav}/(nL)$  为内腔损耗引起的衰减速率,  $k = k_m + k_1$  为总的衰减速率,  $\gamma_1 = \gamma_r r + \Gamma$  为弛豫振荡的阻尼速率,  $\Gamma$  为抽运速率,  $\omega$  为频率变量,  $\omega_{re} = \sqrt{2k\gamma_r(r-1)}$  为弛豫振荡的频率<sup>[10]</sup>。

一般而言,除抽运光  $P_p$  引入的强度噪声  $V_p$  外,其它各种噪声均处于量子噪声极限。抽运光  $P_p$  引入的强度噪声  $V_p$  是由抽运源的强度噪声决定的。根据(4)式,可以得到抽运光  $P_p$  引入的强度噪声  $V_p$  的传递函数为:

$$F(\omega) = \frac{\sqrt{4kk_m \gamma_r^2 (r-1)}}{(\omega_{re}^2 - \omega^2) + i\omega\gamma_1} \quad (5)$$

该函数为 2 阶传递函数,类似于简谐阻尼振子的数学表达式,如果阻尼速率  $\gamma_1 < \omega_{re}$  时,传递函数将出现弛豫振荡。根据表 1 中所给出的半导体抽运  $Nd:YAG$  激光器的参量,计算出该传递函数的振幅和相位响应曲线如图 1 所示。

Table 1 Parameters of a diode pumped Nd:YAG laser

optical cavity length	$l/mm$	29.90
transmission of output coupling mirror	$T$	2%
intracavity loss	$\delta_{cav}$	4%
refractive index	$n$	1.83
spontaneous emission rate from upper laser level	$\gamma_r/s^{-1}$	$4.10 \times 10^3$
total cavity decay rate	$k/s^{-1}$	$3.27 \times 10^8$
decay rate of output coupling mirror	$k_m/s^{-1}$	$1.09 \times 10^8$
max pump power	$P_{max}/W$	0.30
decay rate of intracavity loss	$k_1/s^{-1}$	$2.18 \times 10^8$

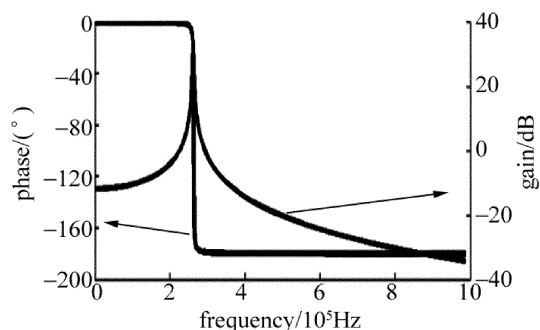


Fig. 1 Amplitude and phase of pump noise transfer function

从该图中可以看出,该函数在弛豫振荡峰值处有一个  $\pi$  相位跃变。因此在设计反馈回路时,要考虑到抽运源引入的简谐阻尼振子,以防止反馈回路产生自激振荡<sup>[7]</sup>。

## 2 实验装置和实验结果

设计反馈电路对自行研制的单块非平面环形腔单

频固体激光器的弛豫振荡噪声进行抑制。实验中所使用的半导体激光器驱动源为集成双温控系统的高精度电流源,输出电压自适应负载 3V,输出电流范围为 0A ~ 3A,输出纹波小于 10mA,温控系统的控制精度为 0.01℃,这样可以更精确地控制半导体激光器的输出波长使其输出波长峰能够始终对应晶体的吸收峰。当温度为 25℃ 时,半导体激光器输出光的中心波长为 808nm<sup>[14]</sup>,正好对应晶体的吸收峰,因此将半导体激光器的温度设定在 25℃。实验原理图如图 2 所示,中心波长为 808nm 的抽运光经过透镜系统后,会聚在 Nd:YAG 晶体上,产生波长为 1064nm 的单频激光,1064nm 激光通过耦合器耦合入光纤中,经过光隔离器滤除光反馈,再经过分束器,最后分为两束光。其中一束约几毫瓦的光信号被光电探测器 (photoelectric detector, PD) PD<sub>1</sub> 接收,经过光电转换、信号滤波,再经过比例-积分-微分 (proportion-integration-differentiation, PID) 控制和驱动电路,最后反馈到半导体激光器驱动源上。

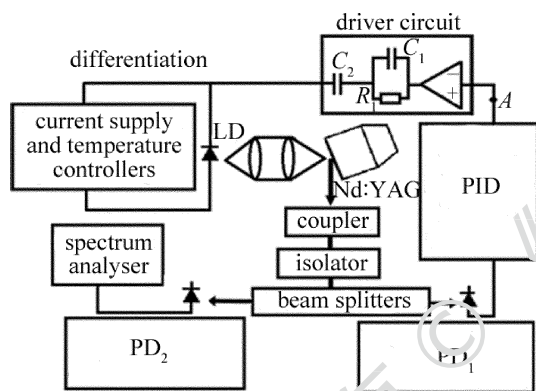


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

其余的大部分激光被光电探测器 PD<sub>2</sub> 接收,PD<sub>2</sub> 将光信号转换为电信号并输出到频谱分析仪,用频谱分析仪观测激光器的强度噪声频谱。图 3 中给出了在不同抽运功率下自由运转激光器的强度噪声谱,从左到右分别是  $r=1.1$ ,  $r=2$ ,  $r=3$ 。从图中可以看出,随着抽运功率的升高,弛豫振荡峰频率向高频方向移动,但是弛豫振荡振幅减小,激光器输出的强度噪声频

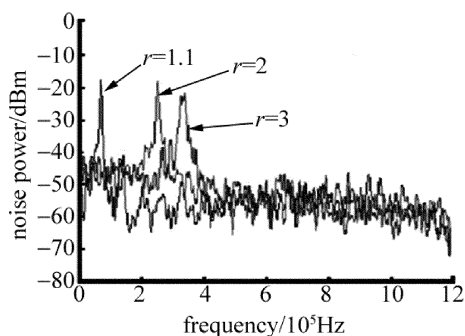


Fig. 3 Intensity noise spectra at different pumped power

率较低,主要集中在 100kHz ~ 600kHz 之间,在 800kHz 以上频率区域,噪声已基本上接近于量子噪声极限了。

实验中,PD<sub>1</sub> 采用 InGaAs 光电探测器,这种探测器对 1064nm 的激光的响应度很高,约为 0.6A/W。光电探测器将接收到的光信号转换为电信号,然后再通过频率转折点设在 100Hz 左右的高通滤波电路,抑制电路中的低频噪声,隔离电路中的直流,以免影响到半导体激光器驱动电源的正常运行。由于电路需要工作在较宽的频带范围内,所以,滤波电路应采用低噪声、低失真、大带宽的宽带运算放大器。

反馈电路的关键部分是 PID 控制电路,它由比例、积分、微分 3 个单元组成,它的主要功能是为反馈电路提供足够的增益,同时也实现合适相位超前。经过 PID 控制电路处理以后的反馈信号,由驱动电路反馈到半导体激光器上。驱动电路由一个高效的电流缓冲器 (BUF634) 后接一个并联 4.7nF 的 50Ω 的电阻,再接一个 4.7μF 的大电容,这样可以使反馈信号的交流部分耦合到半导体激光器上而不影响半导体激光器的直流驱动电源,从而不影响半导体激光器的输出功率。

根据半导体抽运 Nd:YAG 晶体激光器的强度噪声特性,即抽运噪声的传递函数在弛豫振荡峰值处有一个相位跃变,相当于引入了简谐阻尼振子,容易使反馈电路发生自激振荡。因此在设计 PID 反馈电路的时候,需要使用相位超前电路来破坏反馈电路中产生自激振荡的条件,采用超前补偿的方法来防止电路中产生自激振荡。综上所述,整个 PID 反馈电路需要在较宽的带宽范围实现较大增益和相位超前,因此采用 3 级同相低噪声、低失真、宽带宽运算放大器组成 PID 反馈电路。其中每一级原理图均如图 4 所示,该电路既能起到相位超前的作用,又能够为反馈电路提供足够大的增益。图 5 为采用 MULTISIM 软件计算的该 PID 反馈回路的开环增益  $10\lg(V_{out}/V_{in})$  和相位转移随频率变化的曲线。从图中可以看到,该反馈回路在 100kHz 到 1MHz 内均实现了很大的增益,并且在强度

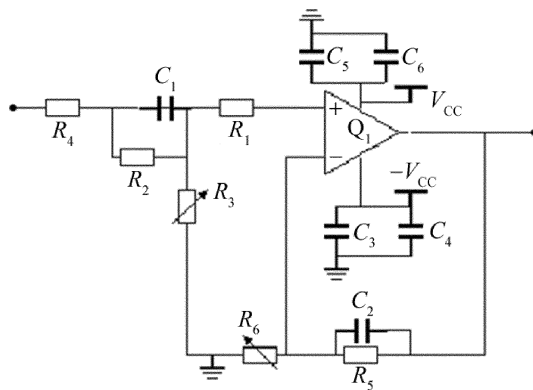


Fig. 4 Schematic diagram of PID feedback control



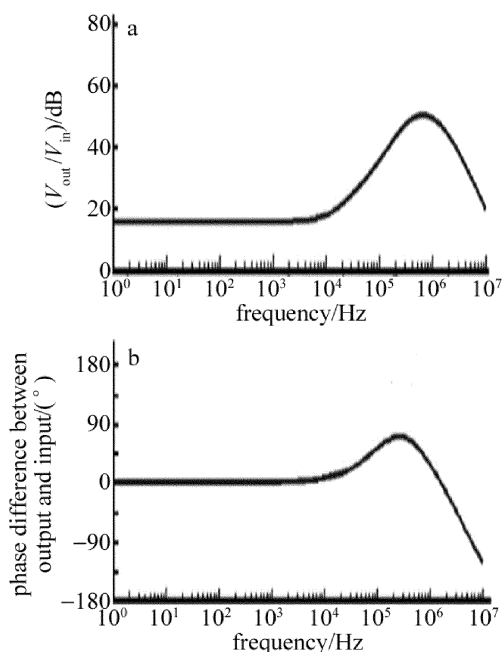


Fig. 5 a—gain as a function of frequency of the feedback circuit b—phase as a function of frequency of the feedback circuit

噪声范围内均实现了较大的相位超前,其中在弛豫振荡峰值 300kHz 附近获得了 65° 的相位超前,同时也获得了较大的增益。

从图 2 中的 A 点处断开,从 A 点的上方注入测试信号,信号经过整个系统后,再从 A 点的下方测量输出信号。测量整个系统的开环增益  $10\lg(V_{out}/V_{in})$  和相位转移随频率的变化的曲线,如图 6 所示。测量结果表明,该系统在 100kHz 到 1MHz 内实现了很大的增益,并且在弛豫振荡峰值附近至高频区域附近获得了 65° 的相位超前。在低频区域,输出信号与输入信号同

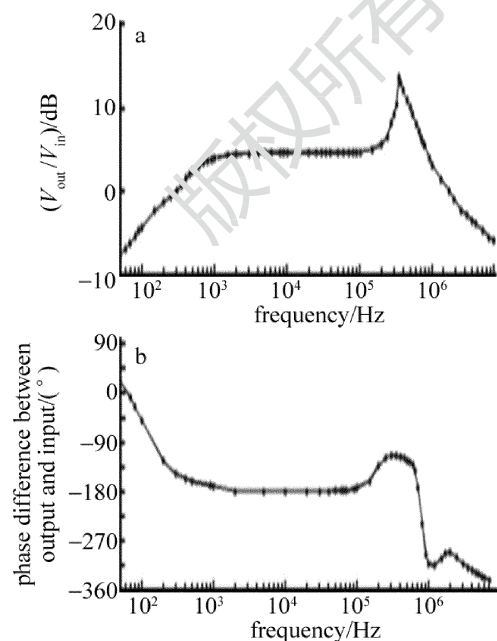


Fig. 6 a—system gain as a function of frequency b—phase as a function of frequency

相时,增益幅度小于 1,在高频区域增益幅度衰减很快,当系统增益达到 1 时,相位超前作用使得此处的相位仍未达到同相,所以整个电是稳定的,不会产生自激振荡。

采用探测器  $PD_1$  对信号进行探测,通过 PID 控制电路进行处理,最后通过驱动电路最终反馈到半导体的驱动电源上。当抽运功率约为 700mW 时,弛豫振荡峰值频率为 300kHz 左右,实验结果如图 7 所示,其中 A 为自由运转激光器的强度噪声谱,B 为加入反馈电路后的强度噪声谱。通过对比可以看出,在加入反馈电路后,在弛豫振荡峰值附近强度噪声降低了约 45dB,在低频区域降低了约 15dB。通过测试,采用该反馈电路在其它抽运功率下强度噪声抑制也取得了比较满意的效果,如图 8 所示。当抽运功率为 550mW、弛豫振荡峰值为 250kHz 时,通过 PID 反馈电路以后,强度噪声在弛豫振荡峰值附近和低频区域分别降低了 40dB 左右和 10dB 左右。

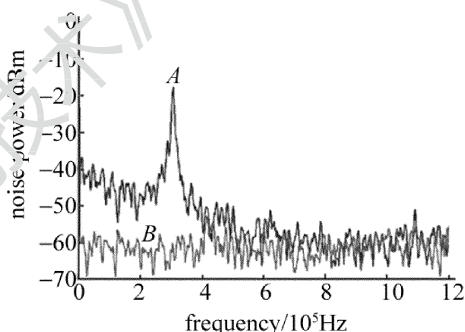


Fig. 7 Noise power spectra at 700mW pump power (A—free running; B—with feedback)

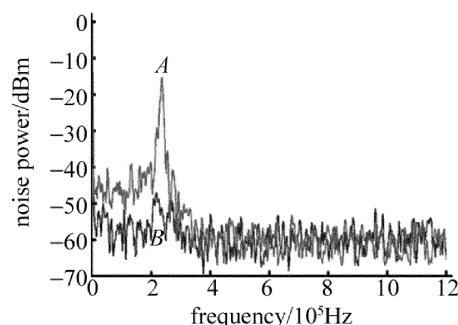


Fig. 8 Noise power spectra at 550mW pump power (A— free running; B—with feedback)

### 3 结 论

本实验中通过运用自行研制的 PID 反馈电路,进行了在不同抽运功率下强度噪声的抑制实验,均取得了良好的抑制效果。弛豫振荡峰值频率为 300kHz 时,在弛豫振荡峰值处,强度噪声降低了 45dB,在低频区域,强度噪声降低了 15dB;弛豫振荡峰值频率为 250kHz 时,在弛豫振荡峰值处,强度噪声降低了

40dB,在低频区域,强度噪声降低了10dB。该反馈回路设计简单、稳定性好、便于实际应用,并且能有效地抑制强度噪声,极大地提高固体激光器的输出品质,为研究双频固体激光器强度噪声的抑制提供了一定的理论参考。

# 参 考 文 献

- [1] YANG S T, IMAI Y, OKA M, *et al.* Frequency stability,10W continuous-wave,laser-diode end-pumped,injection-locked Nd:YAG laser [J]. Optics Letters,1996,21(20):1676-1679.
- [2] FARINAS A D, GUSTAFSON E K, BYER R L. Frequency and intensity noise in an injection-locked solid-state laser[J]. Journal of the Optical Society of America,1995,B12(2):328-334.
- [3] HARB C C, BACHOR H A, SCHILLING R, *et al.* Suppression of the intensity noise in a diode-pumped Nd:YAG non-planar ring laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(12):2907-2913.
- [4] ROWAN S, CAMPBELL A M, SKELDON K, *et al.* Broadband intensity stabilization of a diode-pumped monolithic miniature Nd:YAG ring laser[J]. Journal of Modern Optics, 1994,41(6):1263-1269.
- [5] WILLKE B, UEHARA N, GUSTAFSON E K, *et al.* Spatial and temporal filtering of a 10W Nd:YAG laser with a Fabry-Perot ring-cavity premode cleaner[J]. Optics Letters, 1998,22(11):1704-1707.
- [6] CHEN Y L,ZHANG J,LI Y M, *et al.* Reduction of intensity of single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser using mode cleaner[J]. Chinese Journal of Lasers,2001,28(3):197-200 (in Chinese).
- [7] ZHANG J,MA H L,WANG R L,*et al.* Suppression of intensity noise of LD-pumped single-frequency ring Nd:YVO<sub>4</sub> laser by opto-electronic feedback[J]. Acta Optica Sinica,2001,21(9):1031-1034 (in Chinese).
- [8] ZHAO Y,GAO C Q,CAO Y L,*et al.* Study on laser-diode-pumped 1319nm single frequency laser tuning and noise suppression [J]. Laser Technology,2004,28(5):466-468(in Chinese).
- [9] LI Y, CAO J P, DENG Y K, *et al.* Study on the properties and suppression of the intensity noise in semi-nonplanar monolithic lasers[J]. Chinese Journal of Lasers,2005,32(8):1050-1054 (in Chinese).
- [10] LIANG X,WANG Y X, QIU Q,*et al.* Intensity noise properties and suppression of nonplanar ring oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers,2012,39(12):6-10(in Chinese).
- [11] REN C,ZHANG S L, Abnormal intensity noise of LD-pumped microchip Nd:YAG laser[J]. Journal of Applied Optics,2012,33(3):609-613 (in Chinese ).
- [12] CHEN M,WEI X Y,WU N L,*et al.* Theoretical research on relaxation oscillation in solid-state laser with relaxation oscillation pumping [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(3):311-316 (in Chinese).
- [13] ZHOU B K. Laser principle [M]. 5th ed. Beijing:National Defense Industry Press,2008.6 (in Chinese ).
- [14] GAO L,WANG J F, YANG S H, *et al.* Development of the LD-pumped monolithic Nd:YAG laser power supply[J]. Laser Technology, 2006,30(5):664-666(in Chinese).
- [15] ZHANG J,MA H L,WANG R L,*et al.* Intensity noise properties of LD pumped single-frequency ring lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2000,20(10):1311-1316(in Chinese).