

# 频率稳定的非平面环形腔激光器

冯 滔<sup>1,2</sup> 张雪洁<sup>1</sup> 任志远<sup>1</sup> 孙明营<sup>1,2</sup> 朱健强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 研究了激光二极管端面抽运非平面环形腔(NPRO)激光器,获得了 1.254 W 的 1064 nm 单频可调谐激光输出,斜率效率为 51.5%,在 1 h 测试时间内的功率稳定度为  $\pm 0.8\%$ 。对输出激光的光束质量进行了测量,两方向的光束质量因子分别为  $M_x^2 = 1.16$  和  $M_y^2 = 1.05$ ,采用拍频法测量表明激光线宽小于 2 kHz。通过对激光晶体的温度控制实现了 18 GHz 的频率变化,在无跳模情况下,连续调谐系数约为  $-2.9 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ 。通过光纤延迟自拍法对激光频率的短期稳定度进行了测试,获得激光器在 100 ms 积分时间内的频率稳定度为  $4.7 \times 10^{-12}$ 。

**关键词** 激光器;单频激光器;非平面环形腔;频率调谐;频率稳定度

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1014001

## Frequency Stabilization Laser Based on Non-Planar Ring Oscillator

Feng Tao<sup>1,2</sup> Zhang Xuejie<sup>1</sup> Ren Zhiyuan<sup>1</sup> Sun Mingying<sup>1,2</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A tunable single frequency non-planar ring oscillator laser is studied. The output power of the 1064 nm single frequency laser is 1.254 W and the slope efficiency is 51.5%. The power stability is  $\pm 0.8\%$  within 1 h. The beam qualities of two orientations are measured, which shows the beam quality factors are  $M_x^2 = 1.16$  and  $M_y^2 = 1.05$ , respectively. The laser linewidth is less than 2 kHz measured by beat frequency measurement method. Besides, the frequency tuning of the single frequency laser is also studied by adjusting the temperature of the crystal. The maximum tuning range is about 18 GHz with a tuning coefficient of  $-2.9 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ . Meanwhile, the short-term frequency stability is obtained by self-beat-frequency method. The results show that the short-term frequency stability is  $4.7 \times 10^{-12}$  within 100 ms integral time.

**Key words** lasers; single frequency laser; non-planar ring oscillator; frequency tuning; frequency stability

**OCIS codes** 140.3425; 140.3560; 140.3570; 140.3600

## 1 引 言

单频激光器由于具有良好的频谱特性,在精密计量、光频标、光通信、高分辨光谱学等领域中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。其中,自 Kane 等<sup>[4]</sup>提出单块非平面环形腔(NPRO)激光器之后,由于其具有单块一体化结构特有的稳定性高、结构紧凑、线宽窄等优

点,国内外对这种结构的激光器开展了大量研究。在最初 Kane 等设计的结构中,非平面角为  $90^\circ$ ,具有大的加工释放公差,但需要较大的磁场。随后,Trutna 等<sup>[5]</sup>提出了非平面角约为  $1^\circ$  的近非平面环形腔结构,大大降低了激光器对施加磁场的要求,但是加工公差要求极其严格。中国计量科学研究院<sup>[6]</sup>

收稿日期: 2013-04-08; 收到修改稿日期: 2013-05-14

作者简介: 冯 滔(1987—),男,博士研究生,主要从事全固态激光技术、单纵模激光等方面的研究。

E-mail: fengtao1987@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

在上述两种结构的基础上,提出了非平面角为  $45^\circ$  的半非平面环形腔结构,在降低所需磁场要求的同时也改善了对晶体加工公差精度要求。在理论方面,Nilsson 等<sup>[7]</sup>提出了分析和设计单块非平面环形腔的偏振匹配理论,北京理工大学<sup>[8]</sup>对偏振膜系的选择进行了相关研究。实验方面,已经实现了调 Q 输出<sup>[9-10]</sup>、调谐输出<sup>[11]</sup>、对强度噪声和频率噪声的抑制<sup>[12]</sup>,北京理工大学采用激光二极管(LD)抽运的单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器,获得了 1.876 W 的 1064 nm 单频激光输出,对应的光-光转换效率为 53.4%<sup>[13]</sup>。但是这些报道都没有对该结构的激光器进行输出激光频率稳定性的测试。

本文报道了 LD 抽运的可调谐单频非平面环形腔激光器的实验结果。采用 LD 端面抽运 NPRO 结构的 Nd:YAG 激光晶体,获得了 1064 nm 的可调谐单频激光输出。同时利用光纤延迟自拍法对输出激光进行了短期频率稳定度的测量,得到了实验样机在 100 ms 积分时间内的频率稳定度。

## 2 分析方法

目前通用的单块 NPRO 晶体结构如图 1 所示,具有 3 个光学内全反射面及一个输出和输入耦合面。单块激光介质处于一定磁场  $H$  中,晶体不仅作为激光增益介质,同时也兼作法拉第旋光器;3 个内全反射面既是环形激光谐振腔反射镜,也是相位补偿波片;前表面镀特殊偏振膜,既为输入输出耦合面,同时兼做部分偏振器。晶体的磁致旋光性,内全反射的相位延迟性和耦合膜系的部分偏振性使它构成稳定的具有光学单向器特征的激光谐振腔,消除增益空间烧孔,满足单向运转,实现单纵模输出。腔内起振光线沿 A、B、C、D 4 点形成非平面环形腔的结构。

NPRO 单向行波运转的关键是其本身的光学单向器特性。由法拉第旋光产生的光学单向器对于

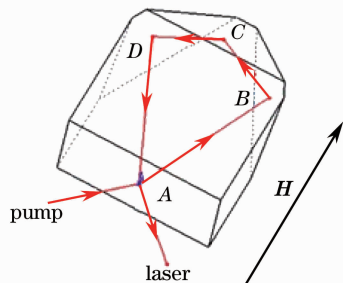


图 1 NPRO 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of monolithic NPRO

环形腔中两个传输方向本征模具有不同的偏振损耗,偏振态匹配理论就是应用琼斯矩阵计算单块非平面环形腔激光器的本征偏振态的变化关系,得到选定腔的两个传输方向的偏振损耗,从而可根据偏振损耗确定腔的几何结构参数。如图 2 所示,AE, CE,  $\theta_A$  和  $\beta$  4 个参数确定了激光晶体的环路结构,其中  $\theta_A$  决定了整个谐振腔的像散,二面角  $\beta$  反映了谐振腔的非平面度,AE 和 CE 决定了法拉第磁旋效应作用的距离和谐振腔的光程长。输入、输出耦合面(即 A 点所在的平面)的镀膜参数  $R_s$ 、 $R_p$  决定了同向传输的两个本征模——s 偏振光和 p 偏振光的损耗差。

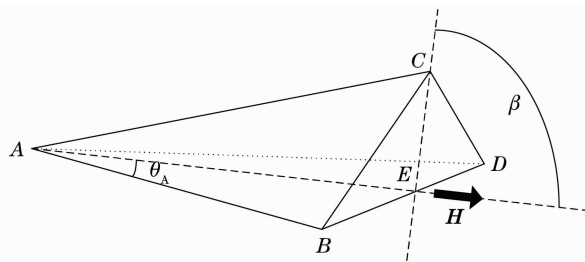


图 2 NPRO 的结构参数标记示意图

Fig. 2 Notation for characterizing the NPRO

根据文献<sup>[7]</sup>的理论和分析,设计晶体环路结构参数为: $\overline{AE}=10$  mm,  $\overline{CE}=1.06$  mm,  $\theta_A=22.86^\circ$ ,  $\beta=45^\circ$ ,输入输出耦合面的激光反射率分别为  $R_s=97\%$ ,  $R_p=80\%$ 。在该参数下,两方向损耗较小的两个模式之间的损耗差大于 0.01%,符合单向运转的条件。

## 3 实验研究

### 3.1 1064 nm 单频激光输出

LD 抽运单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器的实验系统采用如图 3 所示的结构。激光器的抽运源是中心波长为 808 nm 的光纤耦合半导体激光器,最大驱动电流为 4 A,最大输出功率  $P_0$  为 4 W,阈值驱动电流约为 0.7 A。光纤芯径为 105  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.22,单块 Nd:YAG 晶体的外形尺寸为 13 mm $\times$ 11 mm $\times$ 3 mm。由于镀膜过程中的问题,实际膜参数为  $R_s=97\%$ ,  $R_p=90\%$ ,与理论计算的最佳值存在偏差。激光晶体通过热沉由热电制冷器(TEC)及温控仪控温,控温精度为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。单块晶体放在由两块平行而反向放置的永久磁铁产生的磁场中,磁场方向平行于晶体的 AE 方向,强度约为 0.2 T。该激光器阈值约为 190 mW,当 LD 抽运功率为 2.58 W 时,此时得到最大功率为 1.254 W 的 1064 nm 连续激光输出,斜率效率为 51.5%,如图 4 所示。

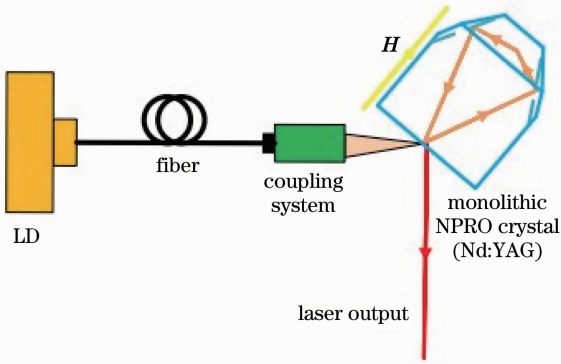


图3 NPRO激光器实验系统示意图

Fig. 3 Experimental setup of NPRO laser

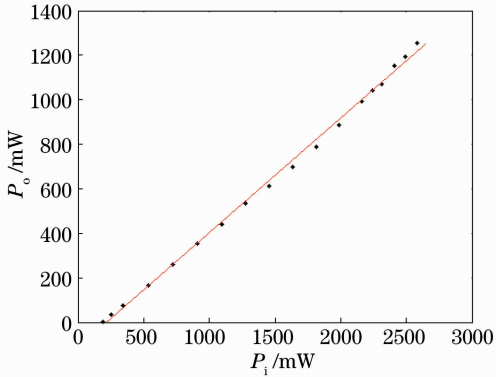


图4 激光器的功率输出曲线

Fig. 4 Output power versus pump power

对输出激光的功率稳定性进行了测试,图5是在输出功率为1.25 W情况下的激光功率稳定性曲线,该激光器在1 h测试时间内的功率稳定度为 $\pm 0.8\%$ 。利用扫描法布里-珀罗(F-P)干涉仪(Thorlabs SA200-8B)监测激光器输出频谱,干涉仪的自由光谱区约为1.5 GHz,当输出功率达到1254 mW时仍保持很好的单纵模振荡,图6是测量的单频激光频谱图。

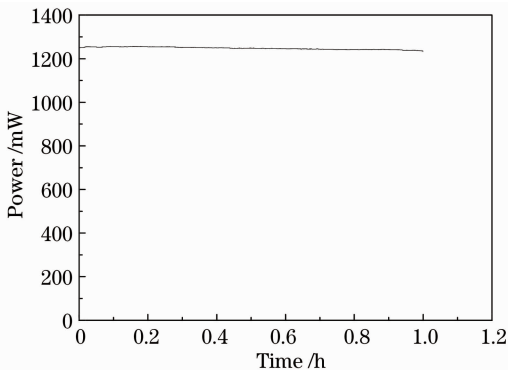


图5 激光器输出功率稳定性曲线

Fig. 5 Stability curve of output power of NPRO laser

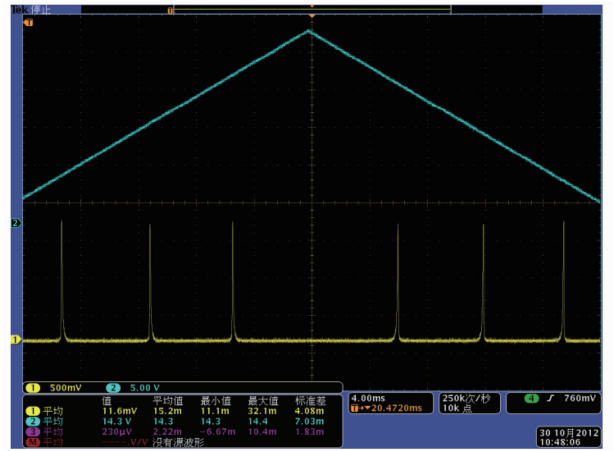


图6 激光器的单频激光频谱图

Fig. 6 Spectrum of NPRO single frequency laser

使用激光光束质量分析仪(Spiricon SP620U)测量该激光器的输出激光光束质量,如图7所示。由图可知,单频激光的水平方向和垂直方向的光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.16$ 和 $M_y^2 = 1.05$ ,激光输出均为基横模运转且光束质量接近衍射极限。

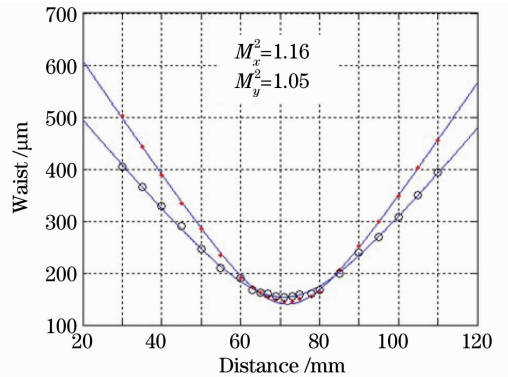


图7 激光器的光束质量

Fig. 7 Beam quality of NPRO laser

此外,采用两台单频激光器进行拍频的方法测量了激光线宽。所用参考光源为Innolight公司的单频激光器,线宽小于1 kHz,由光电探测器(Thorlabs DET02AFC)接收拍频信号,然后连接到频谱仪(Agilent N9320A)观察探测器的响应信号,测试结果表明激光器的单频线宽小于2 kHz。

### 3.2 NPRO激光器的温度调谐特性

在保证激光器单频运转的情况下,改变单块激光晶体的温度,等效改变了谐振腔的腔长,从而实现了激光波长的调谐。采用高精度波长计(Highfinesse WS6-200)测得的单频激光波长调谐特性如图8所示,当温控系统的温度从17℃调整到30℃时,输出激光的调谐范围为0.0679 nm,即18 GHz。在调谐过程中,输出激光经历了几次跳模,根据图8,在无

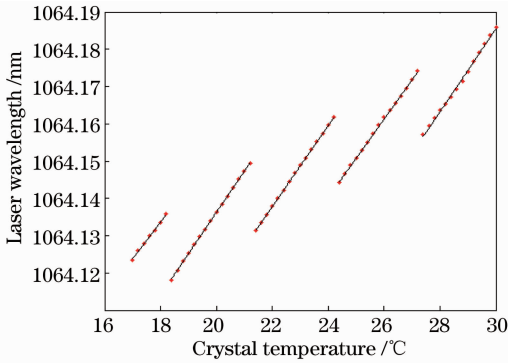


图 8 激光器的温度调谐曲线

Fig. 8 Wavelength tuning curve versus crystal temperature

跳模情况下,连续调谐系数约为 $-2.9 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ 。

### 3.3 NPRO 激光器的短期频率稳定度

频率稳定度是描述在一定的时间间隔  $\tau$  内,激光频率在参考频率  $\nu_s$  附近的漂移。如漂移量为  $\Delta\nu(\tau)$ ,则稳定度为<sup>[14]</sup>

$$S_\nu(\tau) = \frac{\Delta\nu(\tau)}{\nu_s} \quad (1)$$

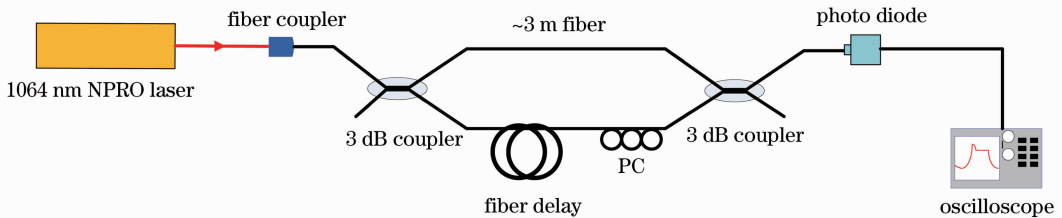


图 9 短期频率稳定度测量实验装置简图

Fig. 9 Experimental setup of short-term frequency stability measurement

实验中,采用一根 1 km 的长光纤进行延迟,延迟时间为  $5 \mu\text{s}$ ,图 10 为积分时间为 100 ms 时的自拍频信号。从时域中可以较为清晰地分辨出拍频信号及其变化,信号的频率即光纤延时时间内的频率漂移。频域最左端为零频直流信号,通过对频域信号进行平滑处理,得出该信号的 3 dB 宽度为 1.85 kHz,可以认为在积分时间内,激光器的频率漂移量为 1.85 kHz。

取样  $N = 100$  次,得到当积分时间为 100 ms 时,拍频信号的频率漂移量  $\Delta$  如图 11 所示。

根据测量得到的自拍频信号频率漂移量以及激光器的波长参数,代入(2)式得到在积分时间为 100 ms 时待测激光器的频率稳定度为  $4.7 \times 10^{-12}$ 。

## 4 结 论

通过 LD 端面抽运 NPRO 单频固体激光器的实验研究,获得了 1064 nm 可调谐单频输出,并对相关激光参数进行了测量。激光器最大单频输出为

在时域上,目前国内外通常采用 Allen 方差<sup>[15]</sup>来表征频率稳定度,它的物理意义是描述相邻两次测量的频率差值的方差。频率稳定度的 Allen 方差表达式为

$$S_\nu(\tau) = \frac{\sqrt{\sigma_\nu^2(\tau)}}{\bar{f}} = \frac{1}{\bar{f}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)^2}{2N}} \quad (2)$$

式中  $\sigma_\nu(\tau)$  表示拍频信号频率漂移量的 Allen 方差,  $\tau$  为积分时间,  $\bar{f}$  为激光平均频率,  $(\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)$  表示积分时间  $\tau$  内拍频信号的频率漂移量,  $N$  为取样次数。

光纤延迟自拍频的实验原理如图 9 所示。待测激光经光纤准直器耦合进入光纤,通过 3 dB 耦合器分为两束光,其中一束光经过一根长光纤延迟后,与另一束光拍频由光电探测器 (Thorlabs DET01CFC) 采集,将信号输入到示波器中进行观察。图中 PC 表示偏振控制器,用来使两束光的偏振达到匹配。

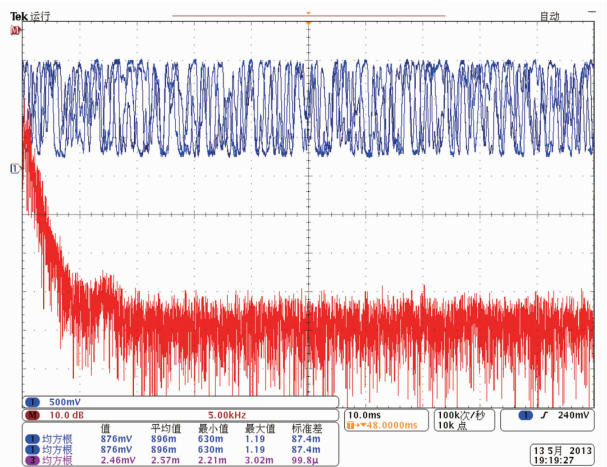


图 10 光纤长度 1 km 时稳定度测量

Fig. 10 Frequency stability measurement with fiber of 1 km

1.254 W,斜率效率为 51.5%,在 1 h 测试时间内的功率稳定度为  $\pm 0.8\%$ 。两方向的光束质量分别为

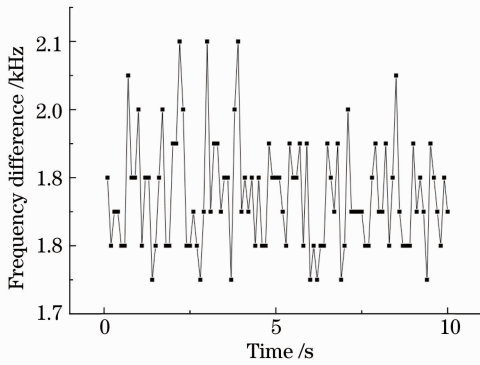


图 11 自拍频信号频率漂移量

Fig. 11 Value of self-beat-frequency shift

$M_x^2 = 1.16$  和  $M_y^2 = 1.05$ , 均接近衍射极限, 线宽小于 2 kHz。通过温度调谐实现了 18 GHz 的调谐范围, 在无跳模情况下, 连续调谐系数约为  $-2.9 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ 。同时对激光器频率的短期稳定度进行了系统的研究测试, 获得激光器在 100 ms 积分时间内的频率稳定度为  $4.7 \times 10^{-12}$ 。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Zhishen, Wu Dong, Zhang Kailin, *et al.*. A mobile incoherent Mie-Rayleigh doppler wind lidar with a single frequency and tunable operation of an injection Nd:YAG laser [J]. *Science in China*, 2003, 46(3): 309–317.
- 2 Hitz Breck. Fiber laser generates 1.6 W in single longitudinal mode; potential applications in telecommunications and in sensing [J]. *Photonics Spectra*, 2005, 39(12): 110–111.
- 3 Rudolf Letterer, Klaus Wailmeroth. Single-frequency Nd:YAG laser development for space communication [C]. *SPIE*, 1991, 1522: 154–157.
- 4 T J Kane, R L Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Opt Lett*, 1985, 10(2): 65–67.
- 5 W R Trutna, Jr., D K Donald, *et al.*. Unidirectional diode-laser-pumped Nd:YAG ring laser with a small magnetic field [J]. *Opt Lett*, 1987, 12(4): 248–250.

- 6 Zang Erjun, Cao Jianping, Li Chengyang. Research on half non-planar monolithic solid ring laser [J]. *Advanced Measurement and Laboratory Management*, 2004, 1: 19–22.
- 7 臧二军, 曹建平, 李成阳. 半非平面单块固体环形激光器研究 [J]. *现代测量与实验室管理*, 2004, 1: 19–22.
- 7 Alan C Nilsson, Eric K Gustafson, Robert L Byer. Eigenpolarization theory of monolithic nonplanar ring oscillators [J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1989, 25(4): 767–790.
- 8 Sun Wenfeng, Yang Suhui, Li Lei, *et al.*. Study on optimum output coupling of unidirectional non-planar ring laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(Suppl.): 471–473.
- 9 孙文峰, 杨苏辉, 李磊, 等. 单向非平面环形腔单频激光器输出耦合面偏振膜系的研究 [J]. *中国激光*, 2004, 31(增刊): 471–473.
- 9 S Spiekermann, M Bode, C Fallnich, *et al.*. Actively Q-switched miniature Nd:YAG ring laser in single-frequency operation [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(23): 2246–2247.
- 10 I Freitag, A Tünnermann, H Welling. Passively Q-switched Nd:YAG ring lasers with high average output power in single-frequency operation [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(10): 706–708.
- 11 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.
- 12 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.
- 12 Liang Xu, Wang Yunxiang, Qiu Qi, *et al.*. Intensity noise properties and suppression of nonplanar ring oscillator [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1202006.
- 13 梁旭, 王云祥, 邱琪, 等. 非平面环形腔激光器的强度噪声及其抑制 [J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1202006.
- 13 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.
- 14 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.
- 14 Wang Qingpu, Zhang Xingyu, Liu Zejin, *et al.*. Principles of Laser [M]. Shandong: Shandong University Press, 2003. 100–141.
- 15 王青圃, 张行愚, 刘泽金, 等. 激光原理 [M]. 山东: 山东大学出版社, 2003. 100–141.
- 15 Zhang Hui, Jin Yuwen, Li Yan. Time domain characterize of frequency stability — Allan variance [J]. *Industrial Measurement*, 2001, (S1): 192–193.
- 16 张晖, 金玉雯, 李延. 频率稳定度的时域表征——阿仑方差 [J]. *工业计量*, 2001, (S1): 192–193.

栏目编辑: 宋梅梅