

# 小型化、低噪声内腔倍频 Nd:YAP/KTP 单频激光器

杨文海 王雅君 李志秀 郑耀辉

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要** 通过理论分析和实验讨论了内腔倍频 Nd:YAP/KTP 单频激光器的强度噪声特性, 并通过减小输出耦合镜对 1080 nm 基频光的透射率和优化谐振腔参数等办法, 使基频光在环形谐振腔内的损耗降低为 0.9%, 从而减小了真空起伏引入的强度噪声。在输出耦合镜对 1080 nm 基频光透射率为 0.2% 时, 获得了最高输出功率为 420/60 mW 的 540/1080 nm 双波长输出单频激光器, 其强度噪声在 1.5 MHz 之后达到散粒噪声极限。

**关键词** 激光器; 强度噪声; 内腔损耗; 小型化

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0502002

## Compact and Low-Noise Intracavity Frequency-Doubled Single-Frequency Nd:YAP/KTP Laser

Yang Wenhai Wang Yajun Li Zhixiu Zheng Yaohui

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Shanxi, Taiyuan 030006, China)

**Abstract** The intensity noise characteristics of a compact and low-noise intracavity frequency-doubled single-frequency Nd:YAP/KTP laser is analyzed theoretically and experimentally. By reducing the transmission rate at 1080 nm of the output coupling mirror, optimizing the parameters of the resonator, and so on. The intracavity losses decrease to 0.9%. As a result, the intensity noise of the output beam, which induced from vacuum fluctuations, is reduced to a lower level. When the transmission rate at 1080 nm of the output coupling is 0.2%, an output power of 420/60 mW at 540/1080 nm dual wavelengths single-frequency laser is manufactured, and its intensity noise is reduced to shot noise limit above 1.5 MHz.

**Key words** lasers; intensity noise; intracavity loss; compact

**OCIS codes** 140.3430; 140.3560; 140.3570; 140.3580; 140.3515

## 1 引言

全固态单频激光器以其噪声低、体积小、稳定性高、光束质量好等优点, 在量子光学实验中得到了广泛应用<sup>[1-8]</sup>。例如, 全固态单频激光器是抽运光学参量振荡器(OPO)和光学参量放大器(OPA)产生连续变量非经典光场的优质光源<sup>[9-10]</sup>。为了满足量子信息网络和量子计算对多组份纠缠光场的需求<sup>[11-13]</sup>。近年来, 本课题组研制了系列高功率输出的双波长内腔倍频 Nd:YAP/KTP 单频激光

器<sup>[14-16]</sup>, 同时抽运多个 OPA 或者 OPO 腔, 分别制备了四组份和八组份纠缠光束<sup>[17-20]</sup>; 在瓦级输出的情况下, 该激光器的强度噪声在 4 MHz 处达到散粒噪声极限(SNL), 为了进一步降低输出激光的强度噪声, 在光路中插入了模式清洁剂, 使激光器的强度噪声在 2 MHz 处达到噪声极限, 从而提高 OPA 和 OPO 输出光束的纠缠度和压缩度<sup>[21]</sup>。此外, 在光学精密测量、光学信息传输、引力波探测和遥感技术等研究领域, 研究者正在寻求一种比相干光束(噪

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2013-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(61008001, 61227015), 国家 973 计划(2010CB923101), 山西省自然科学基金(2011021003-2)

作者简介: 杨文海(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。

E-mail: baiduyangwenhai@163.com

导师简介: 郑耀辉(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事光量子器件与全固态激光技术等方面的研究。

E-mail: yhzhen@sxu.edu.cn(通信联系人)

声水平达到噪声极限)更“安静”的低噪声光源。因此,在这些研究领域里,低于噪声极限的非经典光存在着潜在的应用前景<sup>[22-24]</sup>。比如,在光学精密测量的研究领域,压缩光可以提高光谱测量的信噪比、分辨率和成像质量等<sup>[25-26]</sup>。为了满足以上应用需求,展开小型化连续变量量子纠缠源、压缩源样机的研制工作,该光源的噪声水平可以低于噪声极限几个毫分贝。纠缠源和压缩源研制工作的首要任务是设计一台小型化、低噪声双波长输出的单频激光器。

本文通过优化谐振腔参数、选取不同透射率的输出耦合镜等办法,使基频光在环形谐振腔内的损耗降低为 0.9%,从而减小了腔内真空起伏引入的噪声,改善了输出激光的强度噪声特性。并通过理论计算对比了输出镜不同透射率情况下,激光器强度噪声的特性。通过理论和实验分析,获得了最高输出功率为 420/60 mW 的 540/1080 nm 双波长输出单频激光器,在输出耦合镜对 1080 nm 光透射率为 0.2%、没有模式清洁剂插入的条件下,其强度噪

声在 1.5 MHz 之后达到噪声极限。激光器的光路部分面积仅为 81 mm × 30 mm,外形尺寸仅为 180 mm × 90 mm。这种小型化、低噪声的单频光源非常适合实际应用,尤其适合在基于单频激光器的非经典光源样机中使用。

## 2 强度噪声理论分析及计算

在全固态激光器系统中,抽运光的强度噪声、腔内损耗和输出耦合镜等会引入真空起伏,这导致激光器的强度噪声在低频段较高,一般在几兆赫兹处才能达到噪声极限,20 世纪 80 年代发展的传递函数理论,通过解量子朗之万方程求出了各种噪声源对激光器强度噪声的影响<sup>[27-28]</sup>。其中以激光二极管(LD)作为抽运源的全固态激光器,其强度噪声  $V_f$  主要来源于真空起伏噪声  $V_{vac}$ 、抽运源自身噪声  $V_p$ 、激光上能级自发辐射噪声  $V_{spont}$ 、偶极起伏噪声  $V_{dipole}$  和腔内损耗引入的噪声  $V_{loss}$ ,与以上噪声源有关的输出激光的强度噪声谱可以表示为<sup>[29]</sup>

$$V_f = \left[ 1 + \frac{4\kappa_m(\omega^2 + \gamma_l^2) - 8\kappa_m\kappa G\alpha_f^2\gamma_l}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma_l^2} \right] V_{vac} + \left[ \frac{2\kappa_m G^2 \alpha_f^2 \Gamma}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma_l^2} \right] V_p + \left[ \frac{2\kappa_m G^2 \alpha_f^2 \gamma_l J_3}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma_l^2} \right] V_{spont} + \left\{ \frac{2\kappa_m G J_3 [(\gamma_l + \Gamma)^2 + \omega^2]}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma_l^2} \right\} V_{dipole} + \left\{ \frac{4\kappa_m \kappa_l (\gamma_l^2 + \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma_l^2} \right\} V_{loss}, \quad (1)$$

式中  $\omega$  为噪声的频率,  $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{\tau t_c} \sqrt{\frac{P_{pump}}{P_{th}} - 1}}$  为弛豫振荡(RRO)频率,  $\tau$  为上激光能级的自发辐射寿命,  $t_c$  为腔内的光子寿命,  $P_{pump}$  为抽运功率,  $P_{th}$  为阈值抽运功率。  $2\kappa = 2(\kappa_m + \kappa_l)$  为谐振腔总的损耗(其中  $\kappa_m$  为输出耦合镜透射率引入的损耗,  $\kappa_l$  为腔内晶体和其他腔镜引入的总损耗),  $\alpha^2 = (\Gamma - \gamma_l J_3) / 2\kappa$  为每个原子所对应的内腔光子数,  $J_3 = 2\kappa / G$  为上能级粒子数分布概率,  $\Gamma = P_{abs} / h\nu_P N$  为抽运速率,其中  $P_{abs}$  为吸收的抽运功率,  $\nu_P$  为抽运光频率,  $N$  为增益介质所利用的  $N_d$  离子数。  $\gamma_l = G\alpha^2 + \gamma_i + \Gamma$  为弛豫振荡的衰减速率,  $\gamma_i = \omega_r^2 / 2\kappa (P_{pump} / P_{th} - 1)$  为激

光上能级的自发辐射速率<sup>[30-32]</sup>。

通过测量实际激光器的阈值功率和谐振腔参数,利用(1)式可计算出与单频激光器强度噪声谱相关的参数,如表 1 所示。通过表 1 中参数可计算出输出耦合镜在不同透射率情况下的强度噪声谱,如图 1 所示。从图 1 可以看出,在相同的实验条件下,随着输出耦合镜对基频光透射率的增加,输出激光的强度噪声逐渐增大,因此,为了获得低噪声单频激光器,在满足实验需求的条件下,应尽可能地降低输出镜对基频光的透射率。

表 1 与强度噪声相关参数

Table 1 Parameters related to intensity noise

Transmission rate of output coupling mirror	$\Gamma / \%$	0.2
Total cavity decay rate	$2\kappa / s^{-1}$	$1.15 \times 10^7$
Spontaneous emission rate from upper level	$\gamma_l / s^{-1}$	$1.52 \times 10^5$
Intracavity photon number per atom of laser mode	$\alpha^2$	$5.62 \times 10^{-11}$
Frequency of RRO	$f_{RRO} / kHz$	150
Occupation probability of upper laser level	$J_3 / \text{per atom}$	$7.18 \times 10^{-8}$
Coupling rate of lasing transition to laser mode	$G / s^{-1}$	$1.6 \times 10^{14}$
Pumping rate	$\Gamma / s^{-1}$	86.2

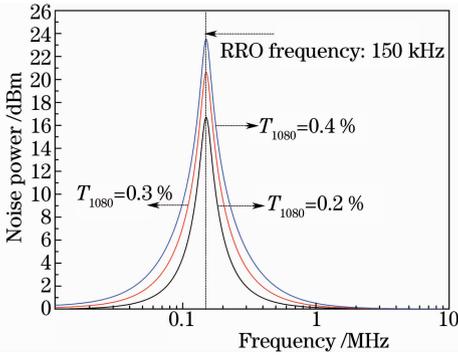


图 1 输出耦合镜透射率对输出激光强度噪声的影响

Fig.1 Transmissivity of output mirror versus intensity noise of output laser

### 3 实验装置与结果分析

#### 3.1 实验装置

图 2 所示为 LD 单端面抽运的内腔倍频双波长输出 Nd:YAP/KTP 单频激光器的实验装置图。该激光器采用“8”字形环形谐振腔结构,由两面平面镜  $M_1$  [ $S_1$ :低反(AR)803 nm; $S_2$ :高透(HT)803 nm,高反射(HR)1080 nm)和  $M_2$  ( $S_1$ :HR1080 nm)和两面曲率半径为 50 mm 的平凹镜  $M_3$  (凹面  $S_1$ :HR1080 nm)和  $M_4$  (凹面  $S_1$ :HT540 nm,  $T_{1080} = 0.2\%$ ;平面  $S_2$ :AR540/1080 nm)组成,增益介质采用 b 轴切割的 Nd:YAP 晶体( $S_1, S_2$ :AR803/1080 nm),掺杂原子分数为 0.6%,尺寸为  $\phi 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。腔内插入了光学单向器(由  $\lambda/2$  波片 HWP1 和放置于永磁体中的 TGG 旋光晶体组成)迫使基频光在腔内单向运转,获得稳定的单频激光输出<sup>[33]</sup>。其中,  $b_1, b_2$  为经 PBS 均分后能量相等的两束激光,SA 为频谱仪,LD(北京凯普林光电科技有限公司,型号:K81S09F)中心波长为 803 nm,最高输出功率为 10 W,光纤芯径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径  $NA = 0.22$ 。实验中,采用自制的高精度 LD 电流驱动源和温度控制仪为 LD 提供驱动电流以及 4 路温度控制(LD、Nd:YAP、KTP 和腔体),LD 输出的抽运光经过焦距分别为 30 mm 和 50 mm 的平凸透镜组成的望远系统进行整形,在增益介质前表面处获得直径为 667  $\mu\text{m}$  的光斑。倍频晶体选用 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  10 mm 的 KTP 晶体,采用 II 类非临界相位匹配,匹配温度为 73  $^{\circ}\text{C}$ 。为了使输出的  $\pi$  偏振光获得最佳的倍频转换效率,将 KTP 晶体光轴与 Nd:YAP 晶体光轴成 45 $^{\circ}$ 角放置。谐振腔总长度为 286 mm,其中两面凹镜间距为 52.7 mm。激光器输出的少量基频光分为两束,一束注入 F-P 腔用来监视激光器的单频情况,一束注入到自零拍探测系统(由一片半波片

HWP2、一块分光棱镜和一对自制的高增益低噪声探测器组成,探测器带宽为 0~5 MHz),对激光器的强度噪声进行测量。

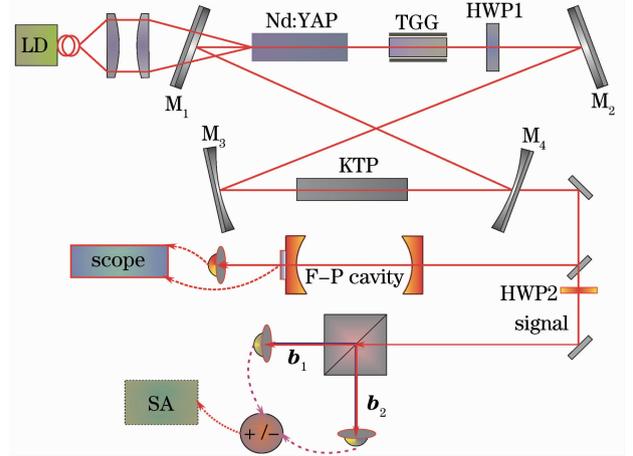


图 2 实验装置

Fig.2 Experimental setup

#### 3.2 结果分析

通过理论和实验分析全固态激光器强度噪声特性,理论和实验均表明输出耦合镜对 1080 nm 基频光透射率  $T_{1080} = 0.2\%$  时,输出激光的强度噪声最低。此外,通过选取镀膜损耗较小的腔镜、缩小谐振腔尺寸等办法,减小了额外的内腔损耗及输出耦合镜引入的真空起伏噪声。经过以上优化设计,在谐振腔总腔长为 286 mm (光路部分面积仅为 81 mm  $\times$  30 mm、外形尺寸仅为 180 mm  $\times$  90 mm)、激光器的内腔损耗缩减为 0.9% 时,获得了最高输出功率为 420/60 mW 的 540/1080 nm 激光输出,其强度噪声在 1.5 MHz 之后达到噪声极限。输出功率最大时,采用扫描 F-P 腔法监视激光器的纵模模式,F-P 腔的透射曲线如图 3 所示,表明激光器处于稳定的单频运转状态。采用自零拍探测系统对强度噪声进行测量,在两个高增益探测器注入功率均

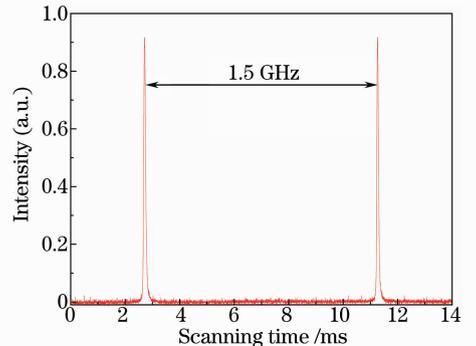


图 3 输出激光 F-P 腔单频扫描曲线

Fig.3 Single frequency scanning curve of output with a F-P cavity

为  $75 \mu\text{W}$  时,测得激光器的强度噪声在  $1.5 \text{ MHz}$  之后达到噪声极限,结果如图 4 所示。

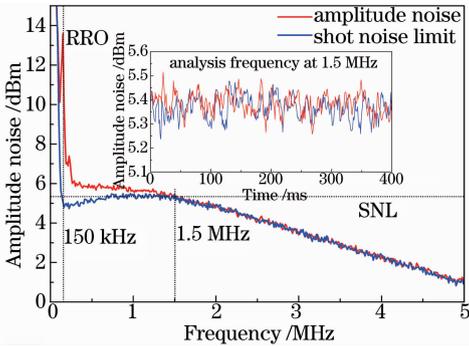


图 4 输出激光强度噪声曲线

Fig. 4 Measurement of the lasing intensity noise

## 4 结 论

通过理论和实验分析了 Nd:YAP/KTP 内腔倍频单频激光器强度噪声的特性,通过优化谐振腔腔长、选取镀膜较好和透射率较低的腔镜,降低了激光器的内腔损耗和输出耦合镜引入的真空起伏噪声,从而减小了输出激光的强度噪声,理论和实验结果基本一致。通过以上优化,在谐振腔总腔长为  $286 \text{ mm}$ (光路部分面积仅为  $81 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ )和输出耦合镜对  $1080 \text{ nm}$  基频光透射率  $T_{1080} = 0.2\%$  时,获得了最高输出功率为  $420/60 \text{ mW}$  的  $540/1080 \text{ nm}$  双波长输出单频激光器,其强度噪声在  $1.5 \text{ MHz}$  之后达到噪声极限。由于该激光器强度噪声特性好,结构紧凑(外形尺寸仅为  $180 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ ),满足小型实用化非经典光源产生装置对激光器的要求。目前,用该激光器作为连续变量量子纠缠源样机的抽运源,在没有模式清洁剂插入的条件下,获得了可长期稳定运转的  $4 \text{ dBm}$  纠缠光束输出。

## 参 考 文 献

- 1 Y J Wang, Y H Zheng, C D Xie, *et al.*. High-power low-noise Nd:YAP/LBO laser with dual wavelength outputs[J]. IEEE J Quantum Electronic, 2011, 47(7): 1006–1013.
- 2 H Vahlbruch, M Mehmet, S Schelkowski, *et al.*. Observation of squeezed light with 10-dB quantum-noise reduction[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(3): 033602.
- 3 S L Braunstein, P V Loock. Quantum information with continuous variables[J]. Rev Mod Phys, 2005, 77(2): 513–577.
- 4 Y M Lian, C D Xie, K C Peng. Continuous variable multipartite entanglement and optical implementations of quantum communication networks[J]. New J Phys, 2007, 9(9): 314.
- 5 Zheng Yaohui, Li Fengqin, Zhang Kuanshou, *et al.*. Progress of all-solid-state single-frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1635–1642.  
郑耀辉, 李凤琴, 张宽收, 等. 全固态单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1635–1642.
- 6 Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin, *et al.*. All-solid-state

- high-efficiency high-power Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser of single-frequency operation[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(6): 739–742.
- 郑耀辉, 卢华东, 李凤琴, 等. 全固态高输出功率单频 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 739–742.
- 7 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Single-end pumping, sing-frequency Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO laser with output power of  $21.5 \text{ W}$ [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602011.  
郑耀辉, 王雅君, 彭堃堦. 输出功率为  $21.5 \text{ W}$  的单端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO单频激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602011.
- 8 Feng Tao, Zhang Xuejie, Ren Zhiyuan, *et al.*. Frequency stabilization laser based on non-planar ring oscillator[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1014001.  
冯涛, 张雪洁, 任志远, 等. 频率稳定的非平面环形腔激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1014001.
- 9 L A Wu, M Xiao, H J Kimble. Squeezed states of light from an optical parametric oscillator[J]. J Opt Soc Amer B, 1987, 4(10): 1465–1475.
- 10 X J Jia, X L Su, Q Pan, *et al.*. Experimental demonstration of unconditional entanglement swapping for continuous variables[J]. Phys Rev Lett, 2004, 93(25): 250503.
- 11 X Su, W Wang, Y Wang. Continuous variable quantum key distribution based on optical entangled states without signal modulation[J]. Europhys Lett, 2009, 87(2): 20005.
- 12 N C Menicucci, P Van Loock, M Gu, *et al.*. Universal quantum computation with continuous-variable cluster states[J]. Phys Rev Lett, 2006, 97(11): 110501.
- 13 J Yoshikawa, Y Miwa, A Huck, *et al.*. Demonstration of a quantum nondemolition sum gate[J]. Phys Rev Lett, 2008, 101(25): 250501.
- 14 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Thermal lens determination in solid-state laser by using astigmatic cavity[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908006.  
郑耀辉, 王雅君, 彭堃堦. 一种利用像散腔测量热透镜焦距的方法[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908006.
- 15 Y H Zheng, Y J Wang, K C Peng. A high-power single-frequency  $540 \text{ nm}$  laser obtained by intracavity frequency doubling of an Nd:YAP laser[J]. Chin Phys Lett, 2012, 29(4): 044208.
- 16 Li Xiaoying, Jing Jietai, Pan Qing, *et al.*. Design of LD pumped type II noncritical phase-matching intracavity frequency-doubled Nd:YAP/KTP ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(10): 865–869.  
李小英, 荆杰泰, 潘庆. LD抽运 II 类非临界位相匹配内腔倍频单频 Nd:YAP/KTP 激光器的设计[J]. 中国激光, 2001, 28(10): 865–869.
- 17 X L Su, A H Tan, X J Jia, *et al.*. Experimental demonstration of quantum entanglement between frequency-nondegenerate optical twin beams[J]. Opt Lett, 2006, 31(8): 1133–1135.
- 18 X L Su, A H Tan, X J Jia, *et al.*. Experimental preparation of quadripartite cluster and greenberger-horne-zeilinger entangled states for continuous variables[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(7): 070502.
- 19 Su Xiaolong. Generation of Quadripartite Entangled Optical Field and Quantum Key Distribution with Continuous Variables[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2007. 49–80.  
苏晓龙. 连续变量四组份纠缠光场产生和量子保密通信[D]. 太原: 山西大学, 2007. 49–80.
- 20 X L Su, Y P Zhao, S H Hao, *et al.*. Experimental preparation of eight-partite cluster state for photonic qumodes[J]. Opt Lett, 2012, 37(24): 5178–5180.
- 21 Y Wang, H Shen, X L Jin, *et al.*. Experimental generation of  $6 \text{ dB}$  continuous variable entanglement from a nondegenerate optical parametric amplifier[J]. Opt Express, 2010, 18(6): 6149–6155.

- 22 Y H Zheng, Z Q Wu, M R Huo, *et al.*. Generation of a continuous-wave squeezed vacuum state at  $1.3\ \mu\text{m}$  by employing a home-made all-solid-state laser as pump source[J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(9): 094206.
- 23 J L Liu, Q Liu, H Li, *et al.*. Low noise continuous-wave single-frequency  $1.5\text{-}\mu\text{m}$  laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Chin Phys B*, 2011, 20(11): 114215.
- 24 X Ding, S M Zhang, H M Ma, *et al.*. Continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chin Phys B*, 2008, 17(1): 211–216.
- 25 Peng Kunchi. Generation and application of squeezed state light sub-shot-noise-limit optical measurement and quantum information [J]. *Physics*, 2001, 30(5): 300–305.  
彭堃堃. 光场压缩态的产生及其在亚散粒噪声光学测量和量子信息中的应用[J]. *物理*, 2001, 30(5): 300–305.
- 26 Yin Wen, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, *et al.*. Remote sensing image fusion based on sparse representation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428003.  
尹雯, 李元祥, 周则明, 等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0428003.
- 27 C W Gardiner, M J Collett. Input and output in damped quantum systems: quantum stochastic differential equations and the master equation[J]. *Phys Rev A*, 1985, 31(6): 3761–3774.
- 28 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.  
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.
- 29 H D Lu, J Su, C D Xie, *et al.*. Experimental investigation about influences of longitudinal-mode structure of pumping source on a Ti:sapphire laser[J]. *Opt Express*, 2011, 19(2): 1344–1353.
- 30 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.
- 31 Chen Yanli, Zhang Jing, Li Yongmin, *et al.*. Reduction of intensity noise of single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser using mode cleaner[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(3): 197–200.  
陈艳丽, 张靖, 李永民, 等. 利用模清洁剂降低单频Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的强度噪声[J]. *中国激光*, 2001, 28(3): 197–200.
- 32 C C Harb, T C Ralph, E H Huntington, *et al.*. Intensity-noise dependence of Nd:YAG lasers on their diode-laser pump source [J]. *J Opt Soc Am B*, 1997, 14(11): 2936–2945.
- 33 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Wang Runlin, *et al.*. All-solid-state Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser of single-frequency operation [J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(8): 694–696.  
张靖, 张宽收, 王润林, 等. 全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器[J]. *中国激光*, 2000, 27(8): 694–696.

栏目编辑:宋梅梅