

文章编号: 0258-7025(2010)05-1166-06

紧凑稳定的可调谐钛宝石激光器

卢华东 苏 静* 李凤琴 王文哲 陈友桂 彭堃堦

(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 通过对钛宝石激光器谐振腔的像散补偿、稳区、模式匹配和调谐元件设计等问题的分析, 设计了短腔长、稳定性好的连续单频可调谐钛宝石激光器。利用自行研制的 4 W 连续单频绿光激光器作为抽运源, 在波长为 780 nm 处获得了 670 mW 的连续功率输出, 其长期功率稳定性优于 $\pm 0.4\%$, 输出激光的光束质量因子 $M^2 < 1.1$ 。利用自行设计的锁相环路和电子伺服系统(PI 电路)对激光器进行锁定, 锁定后在整个波长调谐范围(750~810 nm), 钛宝石激光器 10 s 内的频率稳定性均优于 ± 188 kHz, 15 min 内的频率稳定性优于 ± 3.28 MHz。

关键词 激光器; 钛宝石激光器; 稳频; 单频; 可调谐

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1166

Compact, Stable, Tunable Ti:Sapphire Laser

Lu Huadong Su Jing Li Fengqin Wang Wenzhe Chen Yougui Peng Kunchi

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

Abstract By implementing astigmatism compensation of the laser resonator, selecting stable operation conditions as well as optimizing the mode match between light fields and tuning elements, we design and build a stable single-frequency continuous-wave (CW) all-solid-state Ti:sapphire laser with short cavity length. The pump source is a homemade CW single-frequency green laser. Under the pump power of 4 W, the output power of 670 mW at the wavelength of 780 nm is obtained. The intensity fluctuation of the output laser is less than $\pm 0.4\%$ during 1 h, and the beam quality factor $M^2 < 1.1$. After the laser resonator is locked on a confocal reference cavity with an electronic servo-system, the frequency stabilities are better than ± 188 kHz and ± 3.28 MHz over 10 s and 15 min respectively in the totally tunable range from 750 nm to 810 nm.

Key words lasers; Ti:sapphire laser; frequency stabilization; single-frequency; tunable

1 引 言

掺钛蓝宝石激光器的激光输出光谱覆盖了 700~1000 nm 的红光和近红外波段^[1], 是迄今为止调谐范围最宽的固体激光器。作为原子冷却与原子俘获的优质光源, 连续单频钛宝石激光器在冷原子物理以及量子光学研究中发挥着重要的作用。其中 780 nm 和 795 nm 激光波长对应于铷原子跃迁线, 可以用来俘获铷原子并将之冷却; 同时, 通过光学参量振荡器(OPO)技术也可将 780 nm 激光下转换, 获得

1560 nm 纠缠光束, 此波长位于光通信的第三个窗口, 与当前的通信网络系统匹配兼容, 可用于量子保密通信的研究。

1988 年, Schulz^[2] 实现了氩离子抽运下连续钛宝石激光器的单频运转, 其波长调谐范围为 750~850 nm, 在自由运转的情况下获得的 10 s 内的频率稳定性优于 2 MHz。1991 年 Harrison 等^[3] 利用腔内倍频的 Nd:YAG 激光器作为抽运源获得功率仅为 150 mW 的全固态钛宝石激光器。1996 年, Tsunekane 等^[4] 利用 6.3 W 的单横模绿光激光器作

收稿日期: 2009-08-09; 收到修改稿日期: 2009-08-30

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(60821004)和山西大学博士启动基金资助课题。

作者简介: 卢华东(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态可调谐激光器器件方面的研究。E-mail: lu_sxu@163.com

导师简介: 彭堃堦(1936—), 男, 中国科学院院士, 主要从事量子光学和固体激光器器件方面的研究。

E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

*通信联系人, E-mail: jingsu@sxu.edu.cn

利用 $ABCD$ 矩阵^[13]，可以计算出钛宝石激光器谐振腔总长度不同时，激光器的稳区以及振荡光在钛宝石晶体中心处的腰斑大小与 l_1 的关系如图 2、3 所示。

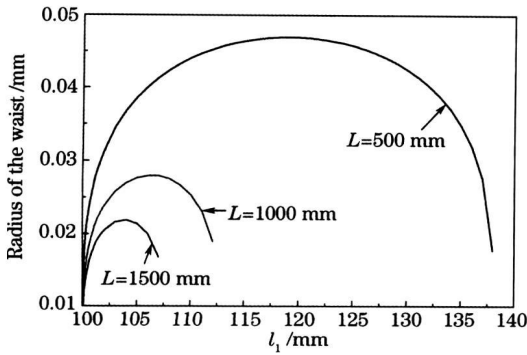


图 3 不同腔长下，振荡光在钛宝石晶体中心处腰斑随两凹面镜之间距离 l_1 的变化关系

Fig. 3 Relationship between waist at the center of the Ti:sapphire crystal and distance between two concave mirrors with different cavity lengths l_1

从图 2、3 中可以看到，谐振腔的长度越短，激光器的稳区范围越宽，振荡光在钛宝石晶体中心处的腰斑也越大，从而有效地增大了振荡光在钛宝石晶体中的模体积，提高晶体的利用效率。因此，在保证钛宝石激光器单频输出并且在一定波长范围内连续调谐的前提下要尽量减少腔内元件数目，缩短激光器腔长，以提高激光器的转换效率和稳定性。实验中钛宝石激光器的腔长被缩短至 544 mm，只相当于现在使用的连续单频钛宝石激光器腔长的一半^[2,13]。

图 4 为利用补偿后的折叠角以及 $ABCD$ 矩阵计算得到的子午面和弧矢面上的振荡光斑束腰、稳

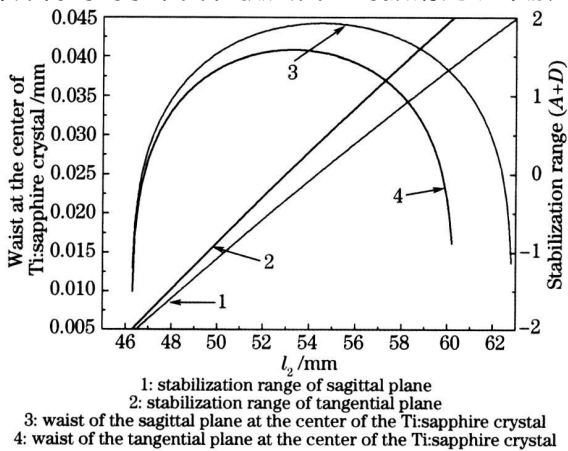


图 4 补偿后得到的腔长为 500 mm 的稳区和腰斑曲线
Fig. 4 Curve of stabilization range and waist of the laser with cavity length of 500 mm when it is compensated

区随 l_2 的变化关系。从图 4 中可以看出，利用 (1) 式计算得到的补偿角只能使子午面和弧矢面在激光器稳区的下沿重合。为了保证激光输出的稳定性，激光器要尽量工作在稳区的中央。因此选择 l_2 为 51 mm，此时振荡光在钛宝石晶体中心处束腰半径约为 $42 \mu\text{m}$ 。

为了使抽运光和振荡光在整个增益介质钛宝石晶体中最大程度地交叠，振荡光斑与抽运光斑的尺寸比例应大致为 1.67^[14]。抽运源输出的激光经过两个导光镜反射后，首先经由 f_1 准直为平行光，然后再经 f_2 聚焦到约 $25 \mu\text{m}$ 后注入到激光谐振腔中。通过调节谐振腔前面插入的 532 nm 半波片来调整抽运光的偏振方向使得增益晶体 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 能够充分吸收抽运光的能量。

在大多数有关钛宝石激光器波长调谐的研究报道中，为了达到更宽的调谐范围，无论调谐元件选取的是双折射滤波片 (BF) 还是棱镜均需三片以上配合使用。针对原子冷却与量子信息存储研究中对钛宝石激光器的特殊要求，即在满足一定的可调谐范围 (覆盖 780 ~ 795 nm)，采取减少调谐元件，改变元件参数的设计，进而压窄线宽，增加钛宝石激光器件的稳定性。实验中，利用光轴与晶体表面的夹角为 34.2° ，旋转角为 51° ，厚度分别为 5 mm 和 10 mm 的两片双折射滤波片作为调谐元件，根据透射率公式^[15~17] 得到了如图 5 所示的透射率随激光波长变化的曲线。可以看到当激光波长为 780 nm 时，透射率达到 99.92%。

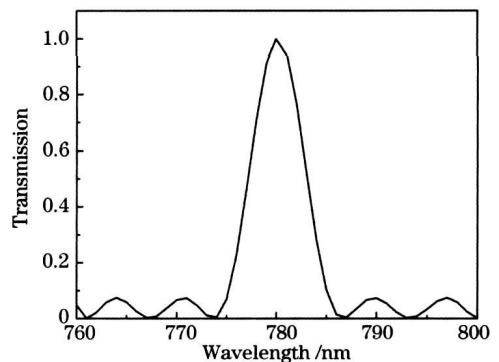


图 5 两片组合双折射滤波片在 760~800 nm 范围内的波长调谐特性曲线

Fig. 5 Two-plate BF transmission curve

2.2 稳频系统

为了进一步提高钛宝石激光器的稳定性，在钛宝石谐振腔之外加入了由频标、锁相环路、PI 电路所组成的稳频系统。其中频标采用共焦 F-P 腔，为

了使其更加稳定,减少频率漂移,在设计制作过程中共焦 F-P 腔的腔体采用膨胀系数极低的殷钢管制成,同时使用精密控温系统对其控温^[18]。将共焦 F-P 腔的一个腔镜固定在 PZT 上,当激光输出的一小部分注入到此参考腔中时,其透射的信号经探测器探测转换为电信号,然后通过自行设计的锁相环路结合 PI 电路,适时地跟踪激光器频率与参考 F-P 腔频率之间的误差信号,并将误差信号转变为执行信号反馈给激光器的 PI 电路,通过控制系统自动调节腔长,使激光工作频率稳定地在 F-P 腔的标准频率上运转。

3 实验结果

在实验中,为了比较钛宝石激光器的抽运源模式对激光输出功率以及稳定性的影响,自制了两台全固态连续绿光激光器^[19,20]作为钛宝石激光器的抽运源,其中一台以单横模模式运转,而另一台以单频即单纵模的模式运转。单横模绿光激光器采用的是三镜折叠腔结构,最高输出功率12.9 W,其功率稳定性为 $\pm 0.83\%$;而单频的绿光激光器采用四镜环形腔结构,在 LD 抽运功率为30 W时,获得了最高功率达4 W的高偏振度的单频绿光激光输出,其功率稳定性为 $\pm 0.28\%$ 。

根据前面分析计算得到的钛宝石激光器腔型以及各元件参数,当输出镜的透射率为2.6%时,利用单频绿光激光器作为抽运源得到的输出功率曲线如图6曲线a所示,可以看到其阈值功率为1.9 W,在抽运功率为4 W时,最大输出功率670 mW,斜率效率31.9%。图6曲线b为单横模绿光激光器抽运钛宝石激光器得到的输出功率曲线,其阈值功率为

5.61 W,在抽运功率为8.89 W时,最大输出功率达到906 mW,斜率效率为26.3%。同时分别测试了两种激光器作为抽运源时钛宝石激光输出的长期功率稳定性曲线,如图7所示。很明显,利用单频绿光激光器作为抽运源所得到的钛宝石激光输出更加稳定,其30 min内的稳定性优于 $\pm 0.4\%$,而利用单横模绿光激光器作为抽运源所得到的钛宝石激光输出在30 min内的稳定性为 $\pm 1.9\%$ 。利用 Spiricon 公司生产的 M²-200 分析仪得到了激光器在最大输出功率时的光束质量因子 $M^2 < 1.1$,像散仅为0.04。通过调节调谐元件即双折射滤波片组的角度,使输出激光波长在750~810 nm范围内连续可调,输出波长与功率关系曲线如图8所示。

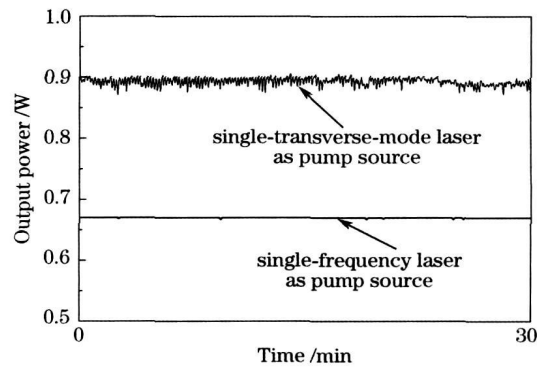


图7 钛宝石激光器30 min内的输出功率稳定性曲线
Fig. 7 Power fluctuation of the CW Ti:sapphire laser in 30 min

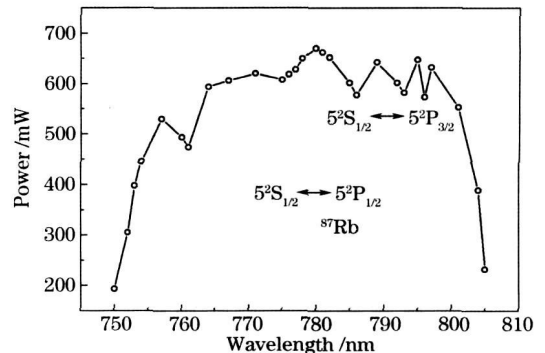


图8 钛宝石激光器输出功率随波长变化的关系曲线
Fig. 8 Tuning curve for the single-frequency CW Ti:sapphire laser

激光器经稳频系统被锁定在参考 F-P₁ 腔的中心频率上。图9(a)是鉴频曲线,峰峰间频率宽度为 ± 3.75 MHz。图9(b)是自由运转状态下记录到的 F-P₁ 的透射强度起伏,透射强度最大起伏相应于鉴频曲线峰值之间的频率宽度,由此可知,1 mV起伏对应于375 kHz的频率起伏。图9(c)是激光器锁

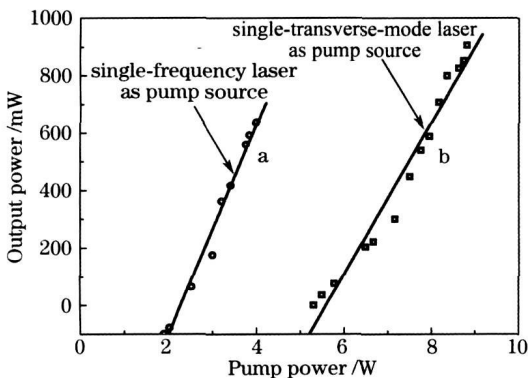


图6 钛宝石激光器的输出功率随抽运功率变化的关系图

Fig. 6 Ti:sapphire output power at 780 nm as a function of pump power

定后透射强度最大起伏所对应的频率宽度,从结果中可以知道,激光器锁定后的频率起伏为 ± 188 kHz^[21~23]。激光器在自由运转和锁定情况下的频率漂移如图9(d),(e)所示,可以看到,自由运转情况下,10 s内激光器的频率稳定性优于

± 3.75 MHz,而在激光器被锁定以后,10 s内激光器的频率稳定性优于 ± 188 kHz。最后,还测试了激光器被锁定后的长期频率稳定性,如图9(f)所示,可以知道在15 min内,激光器的频率稳定性优于 ± 3.28 MHz。

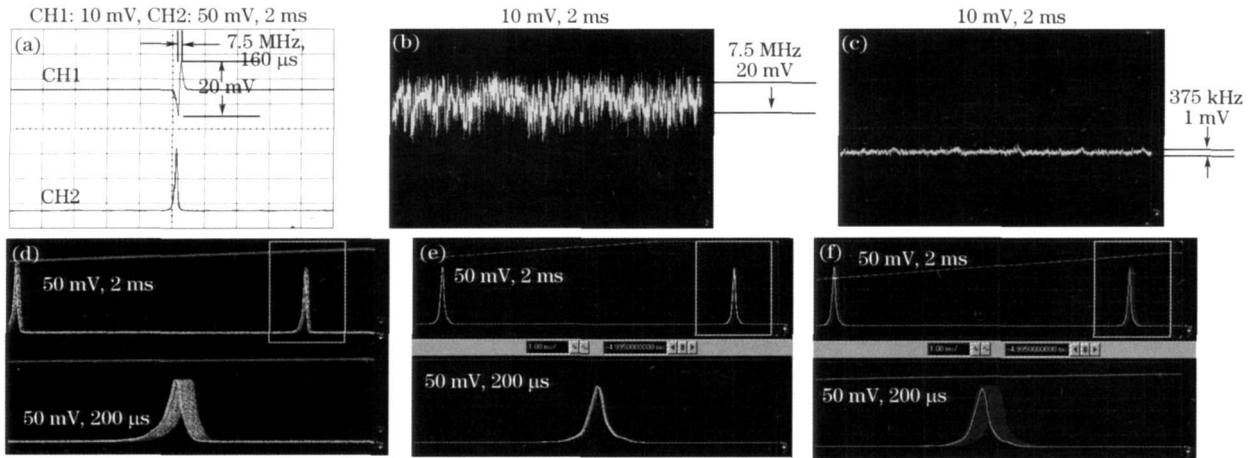


图9 钛宝石激光器的频率稳定性。(a)鉴频曲线;(b)自由运转时激光器的强度波动;(c)激光器锁定后的强度波动;

(d)自由运转时10 s的频率漂移;(e)锁定后10 s的频率漂移;(f)锁定到参考腔上后15 min的频率漂移

Fig. 9 Frequency stabilization of the laser. (a) the curve of frequency discrimination; (b) the intensity fluctuation when the laser is freely running; (c) the intensity fluctuation when the laser is locked to the reference cavity; (d) the frequency drift of the laser when it is freely running (10 s); (e) the frequency drift when it is locked to the reference cavity (10 s); (f) the frequency drift when it is locked to the reference cavity (15 min)

4 结 论

报道了连续输出的全固态可调谐钛宝石激光器。通过对钛宝石激光器谐振腔的像散补偿、稳区、模式匹配和调谐元件设计等问题的分析,在保证激光器单频可调谐运转下缩短了激光器腔长,减少了调谐元件。通过比较单横模与单频绿光激光器分别作为抽运源得到的钛宝石激光器输出功率曲线以及长期稳定性曲线,选用了能够使钛宝石激光器输出稳定性更高的4 W连续单频绿光激光器作为抽运源,得到了输出功率达670 mW的连续单频可调谐钛宝石激光器,其长期功率稳定性优于 $\pm 0.4\%$,输出激光的光束质量因子 $M^2 < 1.1$ 。利用自主设计的锁相环路和电子伺服系统对激光器进行锁定,经锁定后在10 s内,其频率漂移优于 ± 188 kHz;15 min内频率稳定性优于 ± 3.28 MHz。

参 考 文 献

- 1 P. F. Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:³⁺Al₂O₃ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(1): 125~133
- 2 Peter A. Schulz. Single-frequency Ti:³⁺Al₂O₃ ring laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 1039~1044
- 3 James Harrison, Andrew Finch, Peter F. Moulton *et al.*. Low-threshold, CW, all-solid-state Ti:³⁺Al₂O₃ laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8): 581~583
- 4 Masaki Tsunekane, Noboru Taguchi. High-power, efficient, low-noise continuous-wave all-solid-state Ti:³⁺sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(23): 1912~1914
- 5 Elizabeth A. Cummings, Malcolm S. Hicken, Scott D. Bergeson. Demonstration of a 1-W injection-locked continuous-wave titanium:sapphire laser [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(36): 7583~7587
- 6 Yong Ho Cha, Yong Woo Lee, Kwang-Homko *et al.*. Development of a 756 nm, 3 W injection-locked CW Ti:³⁺sapphire laser [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(36): 7810~7813
- 7 Thomas F. Johnston, William P. Proffitt. Broadband Optical Diode for a Ring Laser [P]. United States Patent, 4272158, 1979
- 8 Wang Junmin, Liang Xiaoyan, Li Ruining. A broadband optical diode used in a tunable Ti:³⁺Al₂O₃ ring laser [J]. *Laser & Infrared*, 1993, **21**(1): 31~33
- 9 王军民, 梁晓燕, 李瑞宁. 一种可用于可调谐环形Ti:³⁺Al₂O₃激光器的宽带单向器 [J]. *激光与红外*, 1993, **21**(1): 31~33
- 10 Sun Yan, Lu Huadong, Su Jing. Continuous-wave single-frequency, all-solid-state Ti:³⁺Al₂O₃ laser [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2008, **14**(3): 344~347
- 11 孙燕, 卢华东, 苏静. 全固态单频钛宝石激光器 [J]. *量子光学学报*, 2008, **14**(3): 344~347
- 12 Herwig W. Kogelnik, Erich P. Ippen, Andrew Dienes *et al.*. Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **QE-8**(3): 373~379
- 13 D. M. Kane. Ti:³⁺sapphire laser cavity mode and pump-laser

- mode calculations [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18): 3849 ~ 3856
- 12 Lū Baida. Laser Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 386 ~ 388
吕百达. 激光光学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 386 ~ 388
- 13 Wang Junmin, Liang Xiaoyan, Peng Kunchi *et al.*. CW frequency-stabilized ring Ti:sapphire laser with four mirrors [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(10): 773 ~ 777
王军民, 梁晓燕, 彭堃堃等. 四镜环形腔连续稳频钛宝石激光 [J]. 中国激光, 1994, **A21**(10): 773 ~ 777
- 14 Anthony J. Alfrey. Modeling of longitudinally pumped CW Ti:sapphire laser oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(4): 760 ~ 766
- 15 Xinglong Wang, Jianquan Yao. Transmitted and tuning characteristics of birefringent filters [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22): 4505 ~ 4508
- 16 Zhao Yonghua, Liu Yupu, Zhang Yinghua. Design of BF tunable broadband solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(9): 641 ~ 644
赵永华, 刘玉璞, 张影华. 宽调谐固体激光器的 BF 设计 [J]. 中国激光, 1995, **A22**(9): 641 ~ 644
- 17 Lu Zhangxian, Tang Duoqiang, Hu Hongzhang *et al.*. Synthetical design of tunable birefringent filters for Ti:sapphire laser [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 1999, **10**(6): 498 ~ 500
陆樟献, 唐多强, 胡鸿璋等. 用于钛宝石激光器的可调谐双折射滤波片的综合设计 [J]. 光电子·激光, 1999, **10**(6): 498 ~ 500
- 18 Fagang Zhao, Qing Pan, Kunchi Peng. Improving frequency stability of laser by means of temperature-controlled Fabry-Perot cavity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6): 334 ~ 336
- 19 Li Fengqin, Yu Lin, Shen Yumei *et al.*. All-solid-state CW 12.9 W TEM₀₀ mode green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1332 ~ 1336
李凤琴, 于琳, 申玉梅等. 输出功率 12.9 W 的全固态连续 TEM₀₀ 模绿光激光器 [J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1332 ~ 1336
- 20 Yaohui Zheng, Huadong Lu, Kunchi Peng *et al.*. Four watt long-term stable intracavity frequency-doubling Nd:YVO₄ laser of single-frequency operation pumped by a fiber-coupled laser diode [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5336 ~ 5339
- 21 K. C. Peng, L. A. Wu, H. J. Kimble. Frequency-stabilized Nd:YAG laser with high output power [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(7): 938 ~ 940
- 22 Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO₄/LBO red laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323 ~ 327
常冬霞, 刘侠, 王宇等. 连续波 Nd:YVO₄/LBO 稳频倍频红光全固态激光器 [J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 323 ~ 327
- 23 Liu Guohong, Li Yongmin, Wang Yaoting *et al.*. All solid state continuous wave stabilized single frequency 1053-nm Nd:YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1732 ~ 1734
刘国宏, 李永民, 王垚廷等. 全固态高功率连续单频稳频 1053-nm Nd:YLF 激光器 [J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1732 ~ 1734