

文章编号: 0258-7025(2010)09-2328-06

全固态连续单频可调谐钛宝石激光器腔内 损耗及最佳透射率的研究

卢华东 苏 静* 彭堃焯

(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 从理论和实验分析讨论了全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的输出功率与最佳耦合透射率以及腔内损耗之间的关系,并根据实验数据确定的腔内损耗和最佳透射率,设计和优化激光器,使其输出功率和稳定性都得到较大提高。当抽运功率为 8 W,输出耦合镜的透射率为 3.1%时,可调谐钛宝石激光器的输出功率达到 2 W (792 nm),斜率效率为 37.6%,1h 内的功率稳定性优于 $\pm 0.5\%$,波长调谐范围 720~820 nm,激光器被锁定后,10 s 内其频率稳定性优于 ± 134 kHz,15 min 内的频率稳定性优于 ± 3.3 MHz。

关键词 激光器; 钛宝石激光器; 腔内损耗; 最佳透射率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2328

Study on Intracavity Losses and Output Coupler Transmission of All-Solid-State Tunable Ti:Sapphire Laser

Lu Huadong Su Jing Peng Kunchi

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

Abstract The dependences of all-solid-state tunable Ti:sapphire laser output power on the resonator intracavity losses and output coupler transmission were analyzed theoretically and tested in experiment. According to the experimentally tested intracavity losses and transmission, the design of the laser was optimized and higher and more stable output powers were obtained. With the pump power of 8 W, the output power of 2 W at the wavelength of 792 nm with slope efficiency of 37.6% was obtained. The intensity fluctuation of the output laser was less than $\pm 0.5\%$ during 1 h, and the tunable range was from 720 to 820 nm. When the laser was locked, the frequency stability was better than ± 134 kHz over 10 s and ± 3.3 MHz in 15 min in the totally tunable range from 720 to 820 nm.

Key words lasers; Ti:sapphire laser; intracavity losses; optimized output coupler transmission

1 引 言

掺钛蓝宝石激光器(Ti:sapphire laser)是迄今为止调谐范围最宽(700~1000 nm)、质量优良的固体激光器^[1~3]。在激光器的设计研制过程中,腔内往返损耗是一个重要参数。它与激光器净增益的关系是决定激光器运转状况的主要因素。此外,准确地确定腔

内往返损耗对稳频、选模等各种激光技术应用也有重要的影响^[4]。

目前测量固体激光器腔内损耗最常用的方法是 Findlay-Clay 分析法^[5]。该方法首先测量不同透射率输出镜下的抽运阈值,再利用输出镜透射率与抽运阈值的值的关系,通过计算得到激光器的腔内损耗值。而对

收稿日期: 2010-01-28; 收到修改稿日期: 2010-03-07

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(60821004)、山西省青年科技研究基金(2009021004)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件方面的研究。E-mail: lu_sxu@163.com

导师简介: 彭堃焯(1936—),男,教授,博士生导师,主要从事量子光学和固体激光器件等方面的研究。

E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jingsu@sxu.edu.cn

于连续单频可调谐钛宝石激光器的抽运源,即高功率连续单频绿光激光器,为了能够使其单纵模运转,其阈值电流和最佳输出电流相差较小,从而导致较难准确测量钛宝石激光器的阈值。因此使用 Findlay-Clay 分析法通过测量透射率与阈值之间的关系来测量腔内损耗会带来较大的误差。为了准确测量连续单频钛宝石激光器的腔内损耗以及研究其对激光器最佳透射率的影响,本文在理论上分析了激光器的输出功率与透射率以及腔内损耗之间的关系,得到了最佳透射率表达式;在实验中,利用输出功率为 5.2 W 的单频绿光激光器作为抽运源,通过调节谐振腔内插入石英片的角度从而改变腔内插入损耗,分别测量了输出耦合镜不同透射率下的最大输出功率,依据实验结果得到了连续单频可调谐钛宝石激光器的腔内损耗并利用激光器的有关参数以及最佳透射率,计算了激光器在抽运功率为 5.2 W 时的最佳透射率;实验测得的结果与理论分析的结果基本吻合且稳定性较好。

2 理论分析

端面抽运的环形谐振腔钛宝石激光器的阈值^[3]可表示为

$$P_{th} = \frac{1}{\eta_t} \frac{\pi h \nu_p}{2\sigma\tau} (T + L_{CAV} + L_{XTL} + \Delta L) \times (\omega_0^2 + \omega_p^2) [1 - \exp(-\alpha l)]^{-1}, \quad (1)$$

式中 η_t 为传输效率,即入射在增益介质上的抽运光功率与抽运源输出的光功率之比; $h\nu_p$ 为抽运光子能量, σ 为受激发射截面, τ 为激光上能级寿命, T 为输出耦合镜的透射率, L_{CAV} 为往返损耗, ΔL 为腔内插入损耗, $L_{XTL} = 1 - \exp(-\alpha l_{eff}/F_{OM})$ 为增益介质钛宝石晶体对红外的寄生吸收损耗,在以行波方式运行的单频激光器中, l_{eff} 等于晶体的实际长度 l , F_{OM} 为晶体的品质因子, α 为晶体对抽运光的吸收系数,总的内腔损耗为 $L = L_{CAV} + L_{XTL} + \Delta L$; ω_0 和 ω_p 分别为振荡光和抽运光的腰斑大小; $1 - \exp(-\alpha l)$ 为增益介质钛宝石晶体对抽运光的吸收效率。

而激光器的斜率效率^[3]可表示为

$$\eta_s = f_{ovl} \eta_t (\nu_0/\nu_p) \left(\frac{T}{T + L_{CAV} + L_{XTL} + \Delta L} \right) \times [1 - \exp(-\alpha l)], \quad (2)$$

式中 f_{ovl} 为抽运光和振荡光的交叠度,是影响输出功率和斜率效率的重要因素; ν_0/ν_p 为量子数亏损。

利用(1),(2)式,可以将激光器的输出功率表示为

$$P_{out} = \eta_s (P_p - P_{th}) = f_{ovl} \eta_t (\nu_0/\nu_p) \left(\frac{T}{T + L_{CAV} + L_{XTL} + \Delta L} \right) [1 - \exp(-\alpha l)] \times \left\{ P_p - \frac{1}{\eta_t} \frac{\pi h \nu_p}{2\sigma\tau} (T + L_{CAV} + L_{XTL} + \Delta L) (\omega_0^2 + \omega_p^2) [1 - \exp(-\alpha l)]^{-1} \right\}, \quad (3)$$

令

$$k_1 = \frac{1}{\eta_t} \frac{\pi h \nu_p}{2\sigma\tau} (\omega_0^2 + \omega_p^2) [1 - \exp(-\alpha l)]^{-1}, \quad (4)$$

$$k_2 = f_{ovl} \eta_t (\nu_0/\nu_p) [1 - \exp(-\alpha l)]. \quad (5)$$

输出功率可以简化为

$$P_{out} = k_2 \left(\frac{T}{T + L} \right) P_p - k_1 k_2 T. \quad (6)$$

从(3)式可以看出,激光器最大的输出功率不仅取决于抽运光和振荡光的腰斑大小,而且决定于晶体本身的参数、腔内损耗以及透射率等因素。

利用(6)式可以得到最大功率激光输出的最佳透射率

$$T_{opt} = \sqrt{\frac{P_p L}{k_1}} - L, \quad (7)$$

将 k_1 的值代入(7)式,有

$$T_{opt} = \sqrt{\frac{P_p (L_{CAV} + L_{XTL} + \Delta L)}{\frac{1}{\eta_t} \frac{\pi h \nu_p}{2\sigma\tau} (\omega_0^2 + \omega_p^2) [1 - \exp(-\alpha l)]^{-1}}} - (L_{CAV} + L_{XTL} + \Delta L), \quad (8)$$

从(8)式可以看出,确定晶体本身参数以及抽运光和振荡光的腰斑之后,当抽运功率一定时,钛宝石激光器的最佳透射率直接决定于腔内损耗的大小。因此,如何测量钛宝石激光器的腔内损耗是决定该激光器高效运转的关键。

通常情况下,腔内损耗不易直接测量得到。Patel^[6]在CO₂激光器的谐振腔内插入平板透明介质,通过调整反射损耗的方法测算了腔损耗。刘祖国等^[7]采用了类似的方法测量了氩离子激光器的腔损耗及饱和参量等参数。为了确定钛宝石激光器的腔内损耗,本文也在激光谐振腔中插入熔融石英片,通过改变熔融石英片的放置角度从而改变谐振腔内的插入损耗。在行波腔中,π偏振的腔模在腔中单次通过熔融石英片时,其反射率的2倍^[8](忽略了反射高阶项)即可认为是增加的腔内插入损耗,可表示为^[9]

$$\begin{cases} \Delta L = 2R \\ R = \left(\frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right)^2, \\ n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中θ₂为折射角。利用(9)式可以得到熔融石英片插入损耗ΔL与入射角θ₁的关系

$$\Delta L = \frac{2 \left(n_1 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1 n_1^2}{n_2^2}} - \cos \theta_1 n_2 \right)^2}{\left(n_1 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1 n_1^2}{n_2^2}} + \cos \theta_1 n_2 \right)^2}, \quad (10)$$

可以发现,改变入射角即改变了腔内插入损耗,因此利用熔融石英片不同的入射角度对应不同的反射损耗来达到改变腔内插入损耗的目的。图1为利用(10)式得到的腔内插入损耗与入射角的关系。

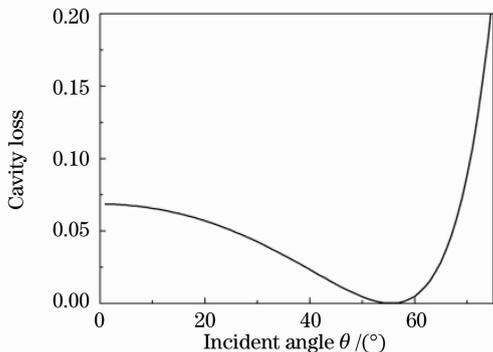


图1 腔内插入损耗和入射角之间的关系
Fig. 1 Curve between losses and incident angle for silicon plate

3 实验系统描述

全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的实验装置如图2所示,其中抽运源采用的是经激光二极管(LD)抽运Nd:YVO₄,LBO腔内倍频,输出功率达5.5 W的单频绿光激光器^[10]。抽运源输出的激光经过两个导光镜反射后,首先经由f₁准直成平行光,然后再经f₂聚焦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,使得增益介质Ti:Al₂O₃能够充分吸收抽运光的能量。增益介质钛宝石晶体的尺寸为φ4 mm×20 mm,晶体对532 nm波长的吸收系数为1.0 cm⁻¹,F_{OM}值大于275,两端面均为布儒斯特角(60.4°)切割,c轴垂直于晶体中的通光方向,以使π偏振抽运光和振荡光几乎无损耗地透射,同时自动抑制σ偏振。连续单频钛宝石激光器谐振腔采用四镜环形谐振腔结构,其中M₆为输出镜。在谐振腔内分别插入调谐元件双折射滤波片(BRF)和单向器(OD)使激光器输出波长连续可调谐。为了分析计算钛宝石谐振腔中的往返损耗,将一厚度为0.2 mm的熔融石英片放置在一个角度可以改变的旋转平台上,通过调节标准具放置的角度可以改变腔内插入损耗。

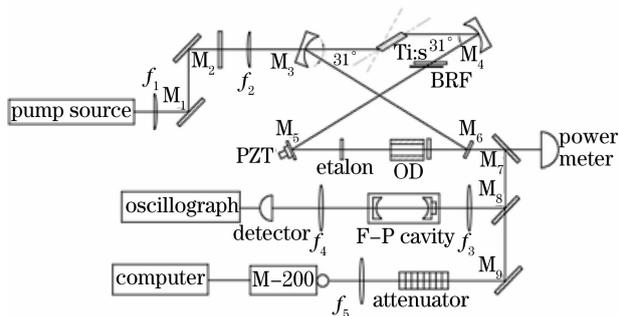


图2 连续单频可调谐钛宝石激光器的实验装置图
Fig. 2 Schematic of the CW single-frequency tunable Ti:sapphire laser

4 实验结果与分析

首先利用激光器输出功率(3)式和表1所列的激光器参数理论计算了抽运功率为5.2 W,腔内损耗不同时,激光器的输出功率随透射率的变化关系,如图3所示。可以看到,在抽运功率为5.2 W,腔内损耗一定时,总存在一个透射率,使得该激光器的输出功率最大;而且,随着激光器腔内损耗的增大,输出耦合镜的最佳透射率先增大后减小。

表 1 连续单频可调谐钛宝石激光器的有关参数

Table 1 Parameters of CW single-frequency tunable Ti:sapphire laser

η_i	0.9	n	1.76
f_{ovl}	1	F_{OM}	275
λ_p/nm	532	α_p/cm^{-1}	1.0
λ_0/nm	780	l/cm	2
$\omega_p/\mu\text{m}$	35	σ/cm^2	3.5×10^{-19}
$\omega_0/\mu\text{m}$	50	$\tau/\mu\text{s}$	3.15
L_{CAV}	—	P_p/W	5.2

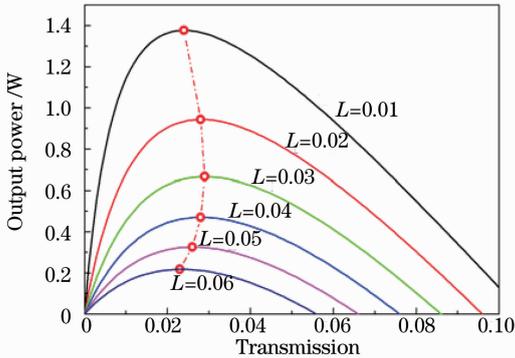


图 3 在抽运功率为 5.2 W 时,不同腔内损耗下,输出功率随输出耦合镜透射率的变化曲线

Fig. 3 Relationship between output power and transmission of output coupler with different cavity losses

通过改变熔融石英片放置的角度,依次测量了不同输出耦合镜透射率下的激光器输出功率,测量

表 2 熔融石英片放置角度不同时,各透射率下的激光器输出功率

Table 2 Output power versus transmission with different incident angles of silicon plate

Angle / (°)	56	58	60	62	64	66	68
$\Delta L / \%$	0.00467	0.135	0.488	1.133	2.159	3.68	5.842
$T / \%$							
	1.8	1.006	0.959	0.865	0.742	0.652	0.637
	2.2	1.07	1.051	0.95	0.767	0.761	0.618
	2.6	1.2	1.091	1.03	0.887	0.741	0.574
	3.1	1.126	1.117	1.07	0.865	0.671	0.561
	3.7	0.985	0.951	0.907	0.85	0.634	0.558
	4.0	0.925	0.907	0.838	0.755	0.488	0.393

从(8)式可以看出,当激光器的腔内损耗以及谐振腔的基本参数确定以后,可以理论计算出一定抽运功率下的激光器最佳透射率,即当抽运功率为 5.2 W,熔融石英片以 56°放置时,该激光器的最佳透射率为 2.88%;以此为参考,在实验中采用透射率为 2.6%的输出耦合镜,获得了最大功率为 1.2 W 的激光输出。

结果如表 2 所示,其中 Angle 一行所示为熔融石英片的放置角度, ΔL 一行所示为熔融石英片的放置角度不同时相对应的插入损耗, T 所对应的一列为激光器采用的透射率, P 为不同透射率下,插入损耗不同时激光器的最大输出功率。从图 4 熔融石英片放置的角度不同时输出功率随透射率变化的关系中可以看到,随着插入损耗的增大,谐振腔输出耦合镜的最佳透射率先增大后减小,这与理论分析结果相一致。采用表 2 中所列的不同腔内损耗对应着不同的最佳透射率这一实验结果,利用(7)式经过多次计算后取平均值推算出了该激光器的腔内损耗为 0.0247。

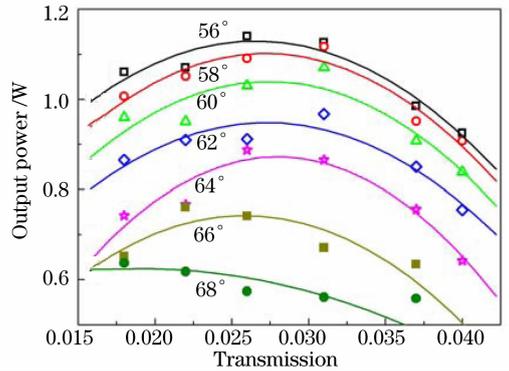


图 4 熔融石英片放置角度不同时输出功率与透射率的关系

Fig. 4 Output power versus transmission with different incident angles of silicon plate

进一步理论计算了插入熔融石英片放置角度不同时激光器的最佳透射率,并与实验所测最佳透射率对比,如表 3 所示。可以看出,理论计算的结果和实验测得的结果吻合较好。由于实验中使用了 6 种透射率不同的输出耦合镜,而每种透射率之间的差值均大于 0.3%,因此,实验测量得到的最佳透射率与理论计算得到的值之间存在一定的偏差。

表3 熔融石英片放置角度不同时,激光器最佳透射率的实验值和理论值

Table 3 Experimental and calculated optimal transmission with different incident angles of silicon plate

Angle / (°)	56	58	60	62	64	66	68
	$T / \%$						
Experimental optimal transmission	2.6	3.1	3.1	3.1	2.6	2.2	1.8
Calculated optimal transmission	2.88	2.89	2.90	2.86	2.70	2.29	1.50

利用输出功率达 8 W 的单频绿光激光器作为抽运源对钛宝石晶体进行抽运,为了能获得稳定的单纵模运转,熔融石英片垂直于光传输方向放置在谐振腔中,即入射角为 0° ,可知其 $\Delta L = 6.85\%$ 。根据(8)式计算得到该激光器输出耦合镜的最佳透射率为 3.16%。因此,在实验上利用 3.1% 的输出耦合镜透射率已经获得了最大功率为 2 W 的单频 792 nm 激光输出,斜率效率为 37.6%,其波长调谐范围。由原来的 50 nm 延伸到 100 nm,该激光器的输出功率和波长的关系如图 5 所示。

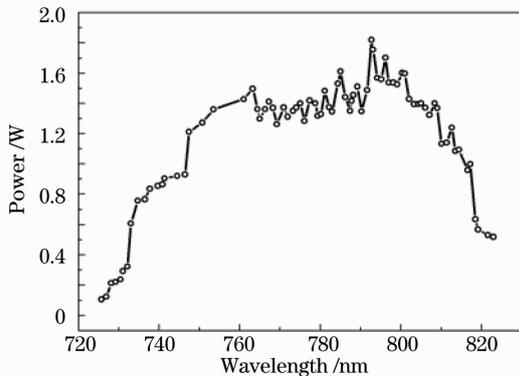


图5 连续单频可调谐钛宝石激光器的调谐曲线
Fig. 5 Tuning curve for the CW single-frequency Ti:sapphire laser

可以看出,激光器在 720~820 nm 范围内连续调谐。另外还测量了激光器的功率稳定性如图 6 所示。在 1 h 内激光器的功率稳定性优于 $\pm 0.5\%$;

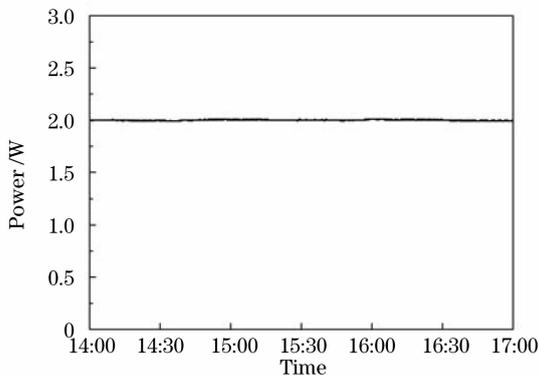


图6 1 h 内的功率稳定性曲线

Fig. 6 Stability of output power over 1 h

图 7 是通过扫描自由光谱(FSR)区为 750 MHz,精细度为 140 的共焦法布里-珀罗(F-P)腔干涉仪得到钛宝石激光器的单频曲线。从图 7 可以看出激光器单频运转。激光器经稳频系统被锁定在参考 F-P 腔的中心频率上,经锁定后,激光器在 10 s 内的频率稳定性优于 ± 134 kHz^[11~14],15 min 内的频率稳定性优于 ± 3.3 MHz^[15]。

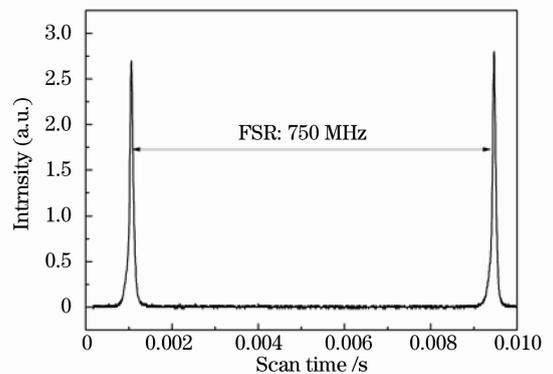


图7 扫描 F-P 腔的透射峰曲线

Fig. 7 Spectrum of scanning F-P cavity

5 结 论

在理论上计算了全固态连续单频可调谐钛宝石激光器输出耦合镜最佳透射率,并进行了实验研究,得到了在抽运功率一定的情况下,随着腔内损耗的增大,输出耦合镜的最佳透射率先增大后减小这一结果,实验结果和理论分析结果一致。在此基础上,通过改变谐振腔内插入损耗来测量不同输出耦合镜透射率下的输出功率,通过公式计算得到了钛宝石激光器腔内往返损耗为 0.0247,输出耦合镜的最佳透射率为 2.88%。在抽运功率为 5.2 W,透射率为 2.6% 时,激光器的最大输出功率为 1.2 W,斜率效率为 34.9%;抽运功率为 8 W,透射率为 3.1% 时,最大输出功率达 2 W,斜率效率为 37.6%。其功率稳定性 1 h 内小于 $\pm 0.5\%$,激光器经稳频系统被锁定后,10 s 内其频率稳定性优于 ± 134 kHz,15 min 内其频率稳定性优于 ± 3.3 MHz。

参 考 文 献

- 1 P. F. Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(1): 125~133
- 2 Peter A. Schulz. Single-frequency Ti:Al₂O₃ ring laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 1039~1044
- 3 J. Harrison, A. Finch, P. F. Moulton *et al.*. Low-threshold, CW, all-solid-state Ti:Al₂O₃ laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8): 581~583
- 4 Shujing Liu, Feng Song, Hong Cai *et al.*. Investigation of the roundtrip cavity loss in LD pumped Er:Yb-phosphate glass microchip lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(10): 1~4
- 5 D. Findlay, R. A. Clay. The measurement of internal losses in 4-level lasers[J]. *Phys. Lett.*, 1966, **20**: 277~278
- 6 P. S. Patel. Power coupling from a CO₂ laser by a rotatable reflector[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(5): 943~945
- 7 Liu Zhiguo, Liu Yuzhao. Measurement of losses, gain and satisfied parameter of argon ions laser[J]. *Laser*, 1982, **9**(10): 673~675
刘志国, 刘玉照. Ar⁺激光器损耗增益及饱和参数的测量[J]. *激光*, 1982, **9**(10): 673~675
- 8 Wang Junmin, Li Ruining, Xie Changde *et al.*. Measurements of optimized output transmissivities of CW Ti:sapphire lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(11): 1572~1575
王军民, 李瑞宁, 谢常德等. 连续钛宝石激光器最佳输出透射率的测量[J]. *光学学报*, 1995, **15**(11): 1572~1575
- 9 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics [M]. Beijing: Peking University Press, 1982, 248~250
赵凯华, 钟锡华. *光学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1982, 248~250
- 10 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
- 11 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
- 12 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
- 13 Wang Yaoting, Zhou Qianqian, Li Yuanji *et al.*. All-solid-state CW Nd:YAG blue laser of single frequency operation with 770 mW output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1714~1718
王垚廷, 周倩倩, 李渊骥等. 输出 770 mW 的全固态连续单频蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1714~1718
- 14 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
- 15 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