

# 利用弛豫振荡频率和输出功率测量单频 钛宝石激光器的腔内损耗

卢华东

(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** 提出了一种利用弛豫振荡频率测量单频激光器腔内损耗的简单方法。通过对单频激光器的弛豫振荡频率, 输出功率以及腔内损耗之间关系的分析, 理论得到了单频激光器腔内损耗的表达式; 通过在实验上测量单频钛宝石激光器的输出功率和相应功率下的弛豫振荡频率, 利用理论计算公式以及钛宝石激光器的相关参数即可获得激光器的腔内损耗值。

**关键词** 激光器; 钛宝石激光器; 腔内损耗; 弛豫振荡频率; 输出功率

**中图分类号** TN248.1      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/CJL201340.0402002

## Intracavity Losses Measurement of the Ti:Sapphire Laser with Relaxation Resonant Oscillation Frequency and Output Power

Lu Huadong

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

**Abstract** A simple method to measure the intracavity losses of the single frequency laser utilizing the resonant relaxation oscillation (RRO) frequency and output power is presented. By analyzing the dependence of the RRO frequency on the output power, the theoretical function of the intracavity losses is presented. Substituting the measured output power and RRO of the single frequency Ti:sapphire laser into the theoretical function, its intracavity losses is obtained.

**Key words** lasers; Ti:sapphire laser; intracavity losses; resonant relaxation oscillation frequency; output power

**OCIS codes** 140.3560; 140.3590; 120.2920; 270.2500

## 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<sup>[1]</sup>, 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, 连续单频可调谐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<sup>[2]</sup>; 同时, 通过 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<sup>[3]</sup>, 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。在单频钛宝石激光器的设计研制过程中, 需要对激光器的腔内损耗进行测量, 因为腔内往返损耗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; 同时, 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。为了进一步使钛宝石激光系统能够更高效地吸收抽运光能量从而提高激光输出功率和斜效率, 以及提高钛宝石激光器输出功率的稳定性, 需要对单频钛宝石激光器的腔内损耗进行细致的研究。

**收稿日期**: 2012-11-15; **收到修改稿日期**: 2012-12-06

**基金项目**: 国家重大科学研究计划(2010CB923101)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(60821004)、国家自然科学基金委重大科研仪器设备研制专项(61227902)、国家自然科学基金(61227015)和山西大学博士启动基金资助课题。

**作者简介**: 卢华东(1981—), 男, 讲师, 主要从事全固态可调谐激光器方面的研究。

E-mail: lu\_sxu@163.com

1966年, Findlay等<sup>[4]</sup>提出了一种测量四能级激光系统腔内损耗的办法。该方法首先测量不同输出耦合镜透射率下的抽运阈值, 再利用输出耦合镜透射率与抽运阈值的关系, 通过计算得到激光器的腔内损耗值。这种方法需要更换几组不同透射率的输出耦合镜, 且需要输出耦合镜透射率的变化比较大, 才能对激光器的腔内损耗进行准确测量。Findlay-Clay分析法在更换输出耦合镜透射率的时候, 难免改变激光器的腔型结构, 给腔内损耗的测量带来较大的误差, 而且难以测量已经调试和封装好的激光器。1973年, Pater<sup>[5]</sup>在CO<sub>2</sub>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量了激光器的腔内损耗。2010年, 本课题组<sup>[6]</sup>利用该方法测量了钛宝石激光器的腔内损耗。该方法为了达到调整反射损耗的目的, 需要改变平板透明介质在激光谐振腔内的放置角度, 这样不仅会引起激光在谐振腔内传输时的偏折, 影响激光器的运转效率和运转状态, 而且对于调试和封装好的激光器同样无能为力。2007年, 宋峰等<sup>[7]</sup>通过测量激光器输出功率和抽运功率的关系, 再利用速率方程进行数值拟合, 进而确定激光器的腔内损耗。但使用这种方法必须对增益介质在工作时的能级跃迁过程有一个全面的了解。

为了准确而且方便地测量激光器的腔内损耗, 本文提出了一种基于激光器弛豫振荡频率和输出功率来获得单频激光器腔内损耗的简单方法。首先从理论上研究单频激光器的腔内损耗与输出功率以及弛豫振荡频率之间的关系, 然后在实验上测量单频钛宝石激光器的输出功率和在相应功率下的弛豫振荡频率, 最后将测量结果以及钛宝石激光器的相关参数代入腔内损耗的计算公式中即可获得激光器的腔内损耗值。

## 2 理论分析

自由运转的全固态连续单频激光器在稳定运转时, 其输出光场均会存在一定的强度噪声起伏。1996年, Ralph等<sup>[8]</sup>提出了一种描述激光器强度噪声的量子理论模型。该理论模型指出激光器强度噪声的来源主要有输出耦合镜引入的真空起伏、抽运源的强度噪声、自发辐射噪声、偶极起伏噪声以及由腔内损耗引起的噪声。这五种噪声源均会激发弛豫振荡, 而引起弛豫振荡最主要的因素是真空起伏、偶极起伏和腔内损耗引起的噪声。激光器的弛豫振荡(RRO)频率 $f_{\text{RRO}}$ <sup>[9]</sup>可以表示为

$$f_{\text{RRO}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(\kappa_m + \kappa_l)G}{\kappa_m N h \nu_0}} \sqrt{P_{\text{out}}}, \quad (1)$$

式中 $h\nu_0$ 为激光光子能量,  $P_{\text{out}}$ 为激光器的输出功率。G描述原子跃迁与激光腔模之间耦合的受激辐射速率, 它正比于原子跃迁的受激辐射截面<sup>[10]</sup>:

$$G = \frac{\sigma_s \rho l}{nL}, \quad (2)$$

式中 $\sigma_s$ 为受激辐射截面,  $\rho$ 为掺杂离子浓度,  $n$ 为增益晶体的折射率,  $c$ 为光速,  $l$ 为增益介质钛宝石晶体的长度,  $L$ 为激光器谐振腔长度。

$N$ 为增益介质中有效利用的原子个数, 可以表示为

$$N = \rho V_{\text{bmode}} = \frac{1}{2} \pi \rho a \omega_0^2, \quad (3)$$

式中 $\omega_0$ 为激光谐振腔的腔模半径;

$2\kappa_m$ 和 $2\kappa_l$ 为输出耦合镜和腔内损耗引起的腔衰减速率, 分别表示为

$$2\kappa_m = \frac{Tc}{L}, \quad (4)$$

$$2\kappa_l = \frac{\delta_c c}{L}, \quad (5)$$

式中 $T$ 为输出耦合镜的透射率,  $\delta_c$ 为激光器谐振腔的腔内损耗。

将(2)~(5)式代入(1)式, 可以得到激光器腔内损耗的表达式:

$$\delta_c = \frac{2\pi^3 L \omega_0^2 n T h \nu f_{\text{RRO}}^2}{\sigma_s c P_{\text{out}}} - T = \left( \frac{2\pi^3 L \omega_0^2 n h \nu_0 f_{\text{RRO}}^2}{\sigma_s c P_{\text{out}}} - 1 \right) T. \quad (6)$$

令

$$k = \frac{2\pi^3 L \omega_0^2 n h \nu_0}{\sigma_s c}, \quad (7)$$

则(6)式可以简化为

$$\delta_c = \left( k \frac{f_{\text{RRO}}^2}{P_{\text{out}}} - 1 \right) T. \quad (8)$$

从(6)~(8)式可以看出, 对于一个确定的激光器而言,  $k$ 值是确定的, 这是因为激光器谐振腔的腔长 $L$ 、增益晶体折射率 $n$ 、增益介质处的腔膜半径 $\omega_0$ 、输出激光的光子能量 $h\nu_0$ 以及在该波长处的受激发射截面 $\sigma_s$ 和输出耦合镜的透射率 $T$ 均为确定值。在此基础上, 测量单频激光器的输出功率和在该功率下激光器的弛豫振荡频率, 即可很方便地计算出单频激光器的腔内损耗值。

## 3 实验装置

为了利用该方法测量单频激光器的腔内损耗,

本文对连续单频可调谐钛宝石激光器进行了测量。测量全固态连续单频可调谐钛宝石激光器腔内损耗的实验装置如图 1 所示,其中,被测量光源钛宝石激光器的抽运源采用的是经 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>、LBO 腔内倍频、输出功率达 10 W 的单频绿光激光器<sup>[11]</sup>。抽运源输出的激光首先经由透镜 F<sub>1</sub> (焦距  $f_1 = 200$  mm)准直成平行光,经由两个导光镜 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 传输,然后再经透镜 F<sub>2</sub> (焦距  $f_2 = 100$  mm)聚焦后注入到激光谐振腔中。连续单频钛宝石激光器谐振腔采用四镜环形谐振腔结构, M<sub>3</sub> 是曲率半径为 100 mm 的凹凸镜,镀有 532 nm 高透膜和 780 nm 高反膜; M<sub>4</sub> 是曲率半径为 100 mm 的平凹镜,镀有 780 nm 高反膜; M<sub>5</sub> 和 M<sub>6</sub> 为平面镜,其中 M<sub>5</sub> 镀有 780 nm 高反膜, M<sub>6</sub> 对 780 nm 的透射率为 2.95%。通过调节谐振腔前面插入的 532 nm 半波片(HWP)来调整抽运光的偏振方向使得增益介质钛宝石晶体(Ti:S)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  $\Phi 4$  mm $\times$ 20 mm,晶体对 532 nm 波长的吸收系数为  $1.05$  cm<sup>-1</sup>,品质因数(FOM)值大于 275,两端面均布氏角(60.4°)切割,c 轴(晶轴)垂直于棒的轴线,即晶体中的通光方向,并在由两个通光面的法线所决定的平面内,这样可以使  $\pi$  偏振抽运光和振荡光几乎无损耗地透射,同时自动抑制  $\sigma$  偏振。布氏角切割的增益介质钛宝石晶体置于凹凸镜 M<sub>3</sub> 和凹面镜 M<sub>4</sub> 之间,圆截面的高斯光束变为椭圆截面,从而导致腔模在子午面和弧矢面内产生一个光程差,即像散。当这个光程差足够大时,谐振腔可能处于非稳定状态。当凹凸镜 M<sub>3</sub> 和凹面镜

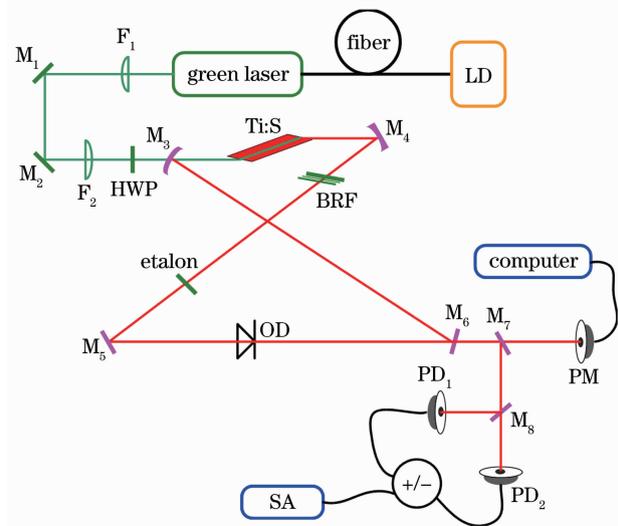


图 1 测量钛宝石激光器腔内损耗的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of measuring the intracavity losses of the Ti:sapphire laser

M<sub>4</sub> 在谐振腔内的放置角度(凹凸镜 M<sub>3</sub> 和凹面镜 M<sub>4</sub> 的法线和传输光线之间的夹角)为 15.8°时,两凹面镜产生的像散就能很好地补偿由于钛宝石晶体因布氏角切割而引起的像散,这样不仅增大了激光器工作的稳区,而且提高了激光器的运转效率<sup>[12]</sup>。在谐振腔内还分别插入了粗调谐元件双折射滤波片(BRF),细调谐元件标准具(Etalon)和单向器(OD)。

输出的激光经分束镜 M<sub>7</sub> 分成两部分,一小部分被注入自零拍探测系统进行强度噪声测量,其余的注入功率计中以测量激光器的输出功率。自零拍探测系统由 50/50 分束器 M<sub>8</sub> 和包含有一级低噪声放大的探测器 PD<sub>1</sub> 以及 PD<sub>2</sub> 组成,探测器的型号为 S3399,对 780 nm 波长的光子效率为 58%。探测器输出的信号进行加减后由频谱分析仪记录,相减为量子噪声极限(QNL),相加后为激光器的强度噪声。

## 4 实验结果与分析

通过调节双折射滤波片,钛宝石激光器工作在 780 nm 附近,此时,经测量激光器的阈值功率为 1.38 W,在抽运功率为 7.20 W 时,输出功率为 1.07 W,钛宝石激光器的斜效率为 18.4%。为了测量钛宝石激光器的腔内损耗,还需要测量激光器在特定功率下的弛豫振荡频率。为此,通过自零拍探测系统测量激光器在特定输出功率下的强度噪声。图 2 显示的是钛宝石激光器在输出功率为 1.07 W 时的强度噪声,其弛豫振荡频率为 750 kHz,在 2.5 MHz 时,激光器的强度噪声达到量子噪声极限。而在低频段,钛宝石激光器的强度噪声主要由抽运源的强度噪声支配,处于抽运噪声水平<sup>[13]</sup>。利用同样的方法,测量了钛宝石激光器在不同输出功率下

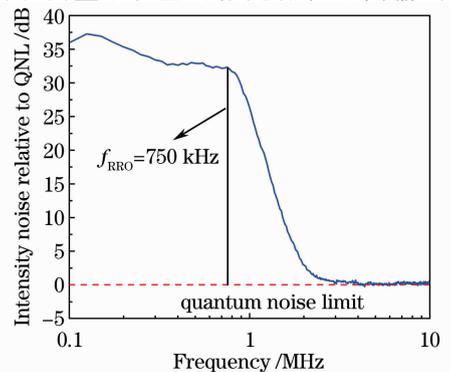


图 2 钛宝石激光器在输出功率为 1.07W 时的强度噪声谱

Fig. 2 Intensity noise of the Ti:sapphire laser with output power of 1.07 W

的强度噪声进而确定激光器在不同输出功率下的弛豫振荡频率。图 3 给出了弛豫振荡频率的平方  $f_{\text{RRO}}^2$  与激光器输出功率  $P_{\text{out}}$  的关系。从图 3 中可以看出,激光器弛豫振荡频率的平方和激光器输出功率是呈线性关系的,与(1)式所示二者的关系完全吻合。

该测量方法是一种间接测量,激光器腔内损耗的大小直接决定于激光器的输出功率和在该功率下的弛豫振荡频率。因此,输出功率以及弛豫振荡频率测量的准确性直接决定于激光器腔内损耗的准确性。为了保证利用该方法测量腔内损耗的准确性,在激光器的抽运功率为 7.20 W 时,多次测量激光器的输出功率和弛豫振荡频率,测量结果如表 1 所示。利用表 1 中的测量数据以及列于表 2 中的激

表 1 输出功率和弛豫振荡频率测量结果

Table 1 Measured results of the output power and RRO frequency

$n$	1	2	3	4	5	Average	$u(\bar{x})$
$P_{\text{out}}/\text{W}$	1.07	1.05	1.03	1.07	1.08	1.06	0.0089
$f_{\text{RRO}}/\text{kHz}$	750	725	700	750	800	745	16.585
$\delta_c/\%$	—	—	—	—	—	4.64	0.11

表 2 钛宝石激光器的有关参数

Table 2 Parameters of the Ti:sapphire laser

$L/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$\omega_0/\mu\text{m}$	$\omega_p/\mu\text{m}$	$n$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda_0/\text{nm}$	$\lambda_p/\text{nm}$	$\sigma_s/\text{cm}^2$	$\tau/\mu\text{s}$	$T/\%$	$\eta_t$	$f_{\text{ovl}}$
874	20	48	28	1.76	1.05	780	532	$3.8 \times 10^{-19}$	3.15	2.95	0.84	0.85

测量存在误差,因而需要评定不确定度。为了确定利用该方法测量腔内损耗的标准不确定度,引入标准不确定度公式,表示为

$$u(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (9)$$

式中  $u(\bar{x})$  为各测量量的标准不确定度,  $x_i$  表示每次测量结果,  $\bar{x}$  为多次测量结果的平均值,  $n$  为测量的次数。利用(9)式计算出输出功率和弛豫振荡频率的标准不确定度分别为 0.0089 W 和 16.585 kHz, 这样,就能确定激光器腔内损耗的标准不确定度为 0.11%。最后激光器腔内损耗结果为  $(4.64 \pm 0.11)\%$ 。

为了验证使用该方法测量腔内损耗的准确性,将测量到的激光器腔内损耗值以及激光器的相关参数(表 2)代入钛宝石激光器的阈值及斜效率的表达式中,理论预言激光器的阈值功率,斜效率及不同抽运功率下的输出功率,并和实际测量结果进行比较。

连续单频环形腔钛宝石激光器的阈值  $P_{\text{th}}$  表达式<sup>[14]</sup>为

$$P_{\text{th}} = \frac{1}{\eta_t} \frac{\pi h \nu_p}{2\sigma_s \tau} (T + \delta_c) (\omega_0^2 + \omega_p^2) \times [1 - \exp(-\alpha l)]^{-1}, \quad (10)$$

光器的相关参数代入(8)式中即可计算出钛宝石激光器的腔内损耗为 4.64%。

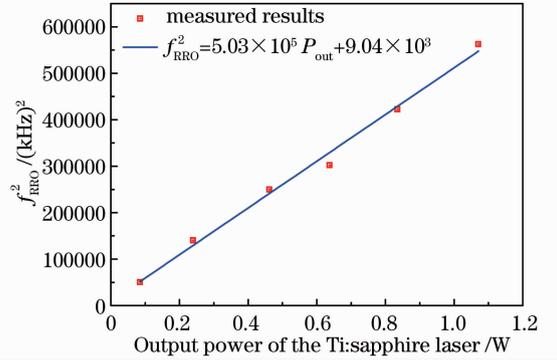


图 3 钛宝石激光器的弛豫振荡频率与输出功率的关系  
Fig. 3 RRO frequency of the Ti:sapphire laser versus output power

式中  $\eta_t$  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,  $\tau$  为激光上能级寿命,  $\alpha$  为晶体对抽运光的吸收系数,  $\omega_0$  和  $\omega_p$  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。

而激光器的斜效率<sup>[14]</sup>  $\eta_s$  可以表示为

$$\eta_s = f_{\text{ovl}} \eta_t \left( \frac{\nu_0}{\nu_p} \right) \left( \frac{T}{T + \delta_c} \right) [1 - \exp(-\alpha l)], \quad (11)$$

式中  $f_{\text{ovl}}$  为抽运光和振荡光的交叠度,是影响输出功率和斜效率的重要因素;  $\nu_0/\nu_p$  为量子数亏损,其中  $\nu_0 = c/\lambda_0$  以及  $\nu_p = c/\lambda_p$ 。

利用(10)式和(11)式,可以将激光器的输出功率表示为

$$P_{\text{out}} = \eta_s (P_p - P_{\text{th}}). \quad (12)$$

从(10)~(12)式可以看出,只要知道激光器的腔内损耗值,就很容易理论预言激光器的功率输出情况。利用(10)~(12)式,测量到的腔内损耗值以及激光器的相关参数,得到了如图 4 所示的激光器输出功率曲线(实线),并和实验测量结果进行比较。经计

算,激光器的阈值功率为 1.38 W,斜率效率为 18.8%。而在实际测量中,激光器的阈值功率为 1.38 W,斜率效率为 18.4%。而且从图 4 中可以看出,在不同的抽运功率下,激光器输出功率的理论值和实际测量值也比较相近。从比较的结果可以看出,理论预言与实际测量非常吻合,进一步证明了使用该方法测量激光器腔内损耗的准确性。

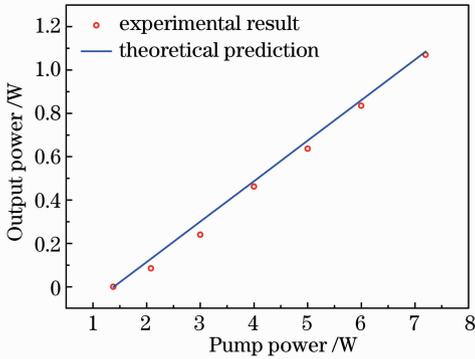


图 4 钛宝石激光器的输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 4 Output power of the Ti:sapphire laser versus pump power

## 5 结 论

提出了一种基于激光器弛豫振荡频率测量激光器腔内损耗的方法。首先利用包含有输出功率项的弛豫振荡频率表达式获得了激光器腔内损耗的计算公式。然后在实验上对连续单频钛宝石激光器的腔内损耗进行了测量。在抽运功率为 7.2 W 时,激光器在 780 nm 处的输出功率为 1.07 W,此时,通过测量激光器的强度噪声确定了激光器在该功率下的弛豫振荡频率为 725 kHz。最后将测量到的输出功率和弛豫振荡频率代入激光器腔内损耗的计算公式中计算出了钛宝石激光器的腔内损耗为 4.64%,测量的标准不确定度为 0.11%。最后,利用测量到的腔内损耗值对激光器的阈值功率和斜率效率进行理论预测,并和实际测量结果进行比较,二者很好地吻合,进一步证明了该方法测量激光器腔内损耗的准确性。该腔内损耗测量方法简单方便,只要确定了激光器的谐振腔长度,增益介质的折射率,增益介质处的腔模半径,输出激光的光子能量以及增益介质在该波长处的受激发射截面和输出耦合镜的透射率等参数,通过测量输出功率和激光器在相应功率下

的弛豫振荡频率即可很方便地得到激光器的腔内损耗值。

## 参 考 文 献

- 1 P. F. Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(1): 125~133
- 2 Zhang Jing, Tao Hua, Wei Dong *et al.*. A laser diode system stabilized on the saturated absorption lines of rubidium atoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 197~201  
张靖,陶桦,卫栋等. Rb 原子饱和吸收稳频半导体激光器系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 197~201
- 3 Jinxia Feng, Xiutao Tian, Yongmin Li *et al.*. Generation of a squeezing vacuum at a telecommunication wavelength with periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(22): 221102
- 4 D. Findlay, R. A. Clay. The measurement of internal losses in 4-level lasers[J]. *Phys. Lett.*, 1966, **20**(3): 277~278
- 5 P. S. Pater. Power coupling from a CO<sub>2</sub> laser by a rotatable reflector[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(5): 943~945
- 6 Lu Huadong, Su Jing, Peng Kunchi. Study on intracavity losses and output coupler transmission of all-solid-state tunable Ti:sapphire laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2328~2333  
卢华东,苏静,彭莹莹. 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[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2328~2333
- 7 Song Feng, Cai Hong, Liu Shujing *et al.*. A Method to Measure the Intracavity Losses of LD-Pumped Solid-State Lasers [P]. Chinese Patent: 200710058008.3, 2008  
宋峰,蔡虹,刘淑静等. LD 抽运固体激光器腔内损耗测量方法及使用该装置[P]. 中国专利: 200710058008.3, 2008
- 8 T. C. Ralph, C. C. Harb, H. A. Bachor. Intensity noise of injection locked lasers: quantum theory using a linearized input/output method[J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **54**(5): 4359~4369
- 9 C. C. Harb, T. C. Ralph, E. H. Huntington *et al.*. Intensity noise properties of injection-locked lasers[J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **54**(5): 4370~4382
- 10 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
- 11 Yaohui Zheng, Fengqin Li, Kunchi Peng *et al.*. High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd:YVO<sub>4</sub> as a polarizing beam splitter [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(2): 309~312
- 12 Lu Huadong, Su Jing, Peng Kunchi *et al.*. Compact, stable, tunable Ti:sapphire laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1166~1171  
卢华东,苏静,彭莹莹等. 紧凑稳定的可调谐钛宝石激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1166~1171
- 13 Huadong Lu, Jing Su, Changde 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
- 14 J. Harrison, A. Finch, J. H. Flint *et al.*. Broad-band rapid tuning of a single-frequency diode-pumped neodymium laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1123~1130