

# 腔内双棒串接的基模动态稳定腔研究<sup>\*</sup>

刘 崇 葛剑虹 项 震<sup>†</sup> 陈 军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2007 年 10 月 19 日收到 2008 年 2 月 25 日收到修改稿)

为了获得大功率高亮度的激光光源,设计并实现了一种使用双棒串接的基模动态稳定谐振腔.通过补偿热致双折射效应以及合理地设计腔内参数,在使用闪光灯抽运的条件下获得了 61 W 的基模连续输出.使用等效热透镜的方法分析了谐振腔参数对激光器性能的影响,解释了输出镜和全反镜的距离对激光器性能所起的不同作用.

关键词:动态稳定腔,双棒,谐振腔模式

PACC:4260B,4260D

## 1. 引 言

大功率高亮度的固体激光器一直是激光技术中的一个重要课题<sup>[1,2]</sup>.棒状介质的 Nd:YAG 激光器在多模输出的情况下虽然可以获得上千瓦的功率<sup>[3]</sup>,但是在基模运转的条件下,激光器的输出功率则大大降低,主要原因是随着抽运功率的增加基模体积变得很小,导致增益介质中的大部分能量都被浪费.虽然可以通过对谐振腔的设计,在某一抽运功率下获得比较大的基模体积,但是如果设计不当会使得腔内模式和输出功率对腔镜的失调和轻微的扰动变得非常敏感,而无法在实际工作中应用. Magni 及其合作者<sup>[4-6]</sup>在谐振腔设计方面做了大量的研究,提出了一种“动态稳定腔”(dynamic stable resonators)的设计方法,解决了上述问题.利用这种方法既可以获得大的基模体积,同时谐振腔又具有比较高的机械稳定性.但是这样设计出的谐振腔腔长比较长,而且需要特殊曲率半径的腔镜,不利于实际应用.同时,增益介质的热致双折射效应会对腔内振荡光束产生部分退偏,限制了激光功率的进一步增加.

本文提出了一种新颖的动态稳定腔的设计方法,使用双棒在谐振腔内串接,中间加入望远镜系统和 90°石英旋光器来补偿热致双折射效应.通过在腔内加入辅助透镜的方法获得比较大的基模体积,这

样谐振腔的两个腔镜都可以使用平面镜,同时,通过选择辅助透镜的焦距可以方便地控制谐振腔的长度.使用双氙灯连续抽运的 Nd:YAG 激光器,实验上获得了 61 W 的基模偏振输出,并从理论和实验上分析了谐振腔参数对激光器输出功率等性能的影响.本文的实验和理论分析虽然是针对闪光灯抽运的激光器,但是对于激光二极管抽运的情况同样具有重要的意义.

## 2. 动态稳定腔的原理

所谓的动态稳定腔需满足以下条件<sup>[4]</sup>(1)基模具有比较大的模体积,增益介质被最大限度地充满,从而尽可能提高抽取效率.(2)增益介质内部的光束半径在一个动态的范围内对热透镜的光焦度不敏感,这样即使输入功率有些轻微扰动或者由于散热不均匀导致热透镜的光焦度有些扰动,也不会给腔内激光振荡的模式和输出功率带来很大影响.(3)腔镜具有最低的失调灵敏度,保证谐振腔具有较高的机械稳定性.下面简要介绍动态稳定腔的工作原理和设计方法.

对于一般的激光谐振腔而言,随着热透镜焦距的变化,谐振腔会经过两个稳定区,分别记为 I 区和 II 区.激光棒内部的基模光束半径  $w_L$  随热透镜光焦度  $X$  的变化关系如图 1 所示,即所谓的 U 型曲线.在稳定区的边界上,  $w_L$  趋向于无穷大,在稳定区

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(批准号:10376033)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail:xiangzhen@zju.edu.cn

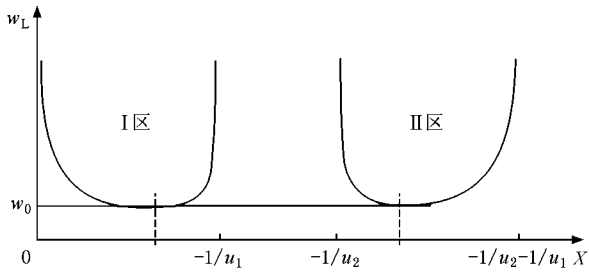


图 1 增益介质内部光束半径随热透镜光焦距的变化关系

的中间,  $w_L$  存在一个极小值, 即最小高斯光束半径, 记为  $w_0$ . 根据上述的动态稳定腔条件, 要使光束半径在一个动态的范围内对热透镜的光焦距不敏感, 激光器就需要工作在  $w_0$  附近, 因为这时  $w_L$  随  $X$  的变化关系最为平坦. 同时, 在激光器的工作点上, 要尽可能地增加基模的光束半径, 即通过谐振腔的设计增大  $w_0$  的值. 另外, 要使激光器工作在 I 区中, 因为此时谐振腔的两个腔镜通过热透镜而相互成像<sup>[6]</sup>, 从而保证了腔镜具有最低的失调灵敏度.

### 3. 实验装置和实验结果

实验中使用抽运条件相同的双棒在腔内串接来补偿热致双折射效应<sup>[7]</sup>, 这样的增益介质就在最大程度上降低了退偏带来的损耗. 另外, 腔内加入了一个辅助透镜来增大基模体积, 同时使得谐振腔的两个腔镜都可以使用平面镜, 方便了实际工作. 所设计的动态稳定腔如图 2(a) 所示, 使用的激光腔体为陶瓷腔漫反射结构, 双氙灯连续抽运方式工作. 两个腔镜均为平面镜, 输出镜 OC 的反射率为 60%, 腔内两个激光棒串接, 中间的  $4f$  成像系统和  $90^\circ$  石英旋光器用来补偿热致双折射效应<sup>[7]</sup>, 透镜 F1 和 F2 的焦距都是 200 mm, 在输出镜一侧放置了偏振片以获得偏振输出. 辅助透镜 F3 的焦距为  $f_3 = 75$  mm, 到热透镜主平面的距离为  $\Delta_1 = 302.5$  mm. 输出镜到辅助透镜的距离为  $d_1 = 300$  mm, 全反镜 HR 到热透镜主平面的距离为  $d_2 = 370$  mm.

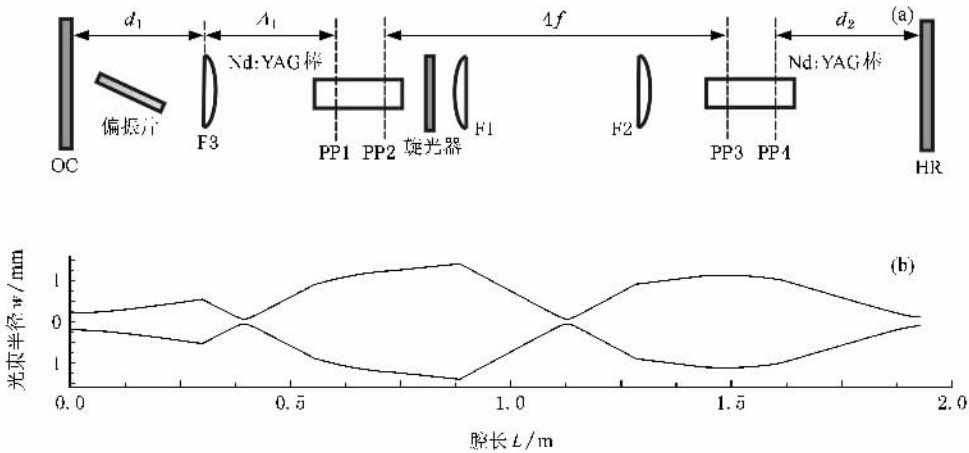


图 2 动态稳定谐振腔结构示意图及腔内光束半径分布 (a) 动态稳定谐振腔结构示意图 (b) 腔内光束半径分布

图 2(b) 给出了使用矩阵光学的方法计算得到的腔内光束半径的分布, 计算中设两个激光棒热透镜的焦距均为 250 mm. 从图 2(b) 可以看出, 由于谐振腔的不对称性, 两个激光棒内部的光束半径也出现不对称, 在热透镜的 4 个主平面(平面 PP1—PP4) 上的光束半径分别为 1.03, 1.19, 1.13 和 1.08 mm, 平均值为 1.1 mm. 由于谐振腔的设计获得了比较大的基模体积, 在抽运的电功率为 13.97 kW 时得到线性偏振的基模输出功率为 61 W, 输出效率为 9.2%,  $x$  方向和  $y$  方向上光束的衍射倍率因子分别为  $M_x^2$

$= 1.4$ ,  $M_y^2 = 1.6$ . 如果移除腔内的辅助透镜, 在相同抽运功率的条件下, 增益介质中的基模半径只有 0.4 mm, 获得的基模输出功率为 12.4 W. 由此可见, 设计的动态稳定腔获得了比较理想的实验效果.

### 4. 分析和讨论

#### 4.1. 谐振腔的等效方法

矩阵光学的方法可以用来分析谐振腔的稳定性、腔内光束半径等特性, 但是图 2(a) 所示的谐振

腔中含有比较多的元件,其中热透镜的光焦距还随着抽运功率的变化而变化,整个谐振腔的光学矩阵比较复杂.为了更加直观地分析谐振腔的特性,需要对上述谐振腔进行等效,等效的过程如图3所示.首先将图3(a)中的两个激光晶体的热透镜效应等效为薄透镜,如图3(b)所示.理论研究表明<sup>[7]</sup>,如果两

个热透镜的焦距相同,热透镜和其中间的 $4f$ 成像系统可以等效为一个薄透镜,等效薄透镜的焦距等于热透镜焦距的一半,这样就可以把图3(b)中两个参考平面之间的部分等效为一个薄透镜,最终的等效腔如图3(c)所示.这样的谐振腔就可以方便地使用一般的动态稳定腔理论<sup>[8]</sup>来进行分析.

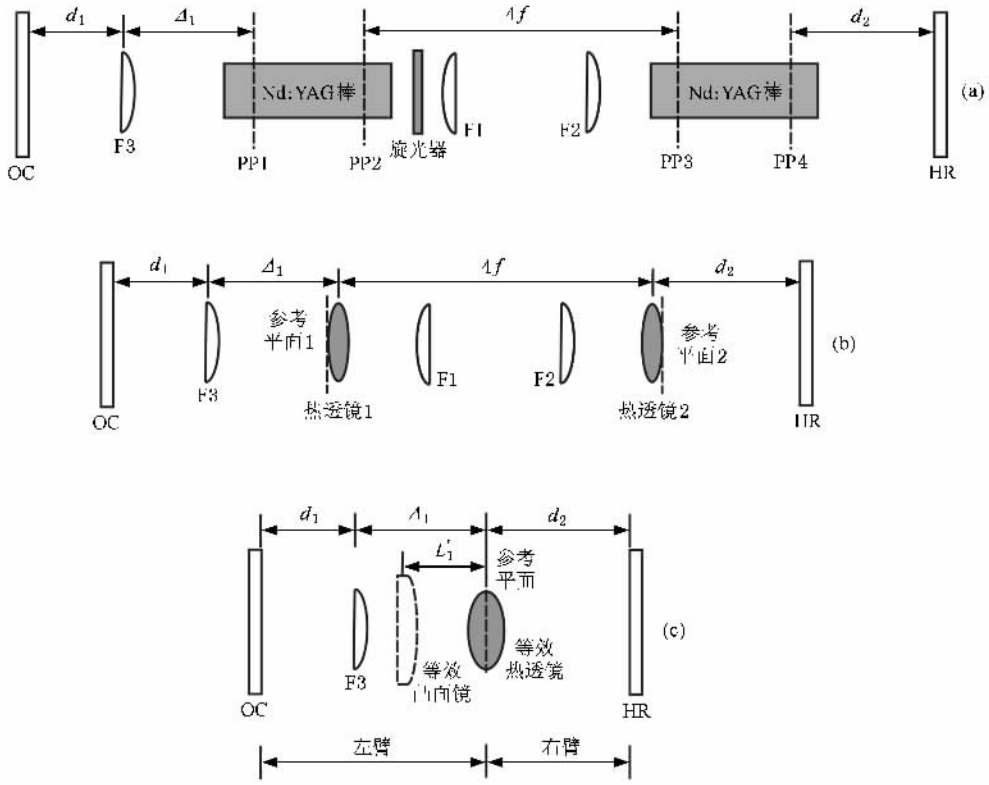


图3 谐振腔等效过程示意图 (a)内含双棒串接的动态稳定腔 (b)晶体的热透镜效应使用薄透镜来等效 (c)最终的等效腔示意图

在图3(c)中,可以以热透镜为界把谐振腔分为左右两臂,对于含有OC和辅助透镜F3的左臂而言,根据Kogelnik<sup>[9]</sup>的成像关系,可以等效为一个凸面镜,其等效腔长 $L'_1$ 和等效曲率半径 $R'_1$ 可表示如下:

$$L'_1 = \Delta_1 + \frac{f_3 d_1}{f_3 - d_1}, \quad (1)$$

$$R'_1 = \frac{f_3^2}{f_3 - d_1}.$$

对于含有全反镜的右臂而言,其等效腔长 $L'_2$ 和等效曲率半径 $R'_2$ 分别为

$$\begin{aligned} L'_2 &= d_2, \\ R'_2 &= \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

这样,热透镜处的基模光束半径 $w_0$ 可以表示为<sup>[8]</sup>

$$w_0^2 = (2\lambda/\pi) \max(|u'_1|, |u'_2|), \quad (3)$$

式中 $u'_1$ 和 $u'_2$ 为引入的参数,

$$\begin{aligned} u'_1 &= L'_1 \left( 1 - \frac{L'_1}{R'_1} \right) \\ &= \frac{f_3 - \Delta_1}{f_3^2} [ \Delta_1 (f_3 - d_1) + f_3 d_1 ], \end{aligned} \quad (4)$$

$$u'_2 = L'_2 \left( 1 - \frac{L'_2}{R'_2} \right) = d_2. \quad (5)$$

由(3)式可知,参数 $u'_1$ 和 $u'_2$ 中较大的值决定了激光器工作点上基模光束半径的大小,从而最终决定激光器的输出功率.

为了保证高的机械稳定性,需要两腔镜在动态工作点上由热透镜相互成像<sup>[8]</sup>,其条件为

$$1/f_{\text{min}} = 1/L'_1 + 1/L'_2, \quad (6)$$

式中 $f_{\text{min}}$ 是在动态工作点上等效热透镜的焦距.由此可见,等效参数 $L'_1$ 和 $L'_2$ 决定了激光器的动态工作点.

### 4.2. 参数 $d_1$ 和 $d_2$ 对谐振腔性能的影响

对于如图 2 所示的谐振腔,如果两个腔镜均为平面镜,那么设计谐振腔所需要确定的参数还剩下 4 个,即腔镜的距离  $d_1, d_2$  以及辅助透镜的焦距  $f_3$  和距离  $\Delta_1$ . 一般而言,如果选择较小的  $f_3$ ,那么可以设计的腔长就会较短,反之腔长变长,但是对激光器的性能(如输出功率和机械稳定性)的影响不大. $\Delta_1$  也是如此.如果选定了  $f_3$  和  $\Delta_1$ ,剩下的待定参数就只有  $d_1$  和  $d_2$ .由以上讨论可知,对于动态稳定腔而言,基模光束半径  $w_0$  和谐振腔的动态工作点是决定谐振腔性能的两个最为重要的参数.下面分析改变腔长参数  $d_1$  和  $d_2$  时对基模半径和动态工作点的影响,从而优化谐振腔参数来达到最佳的功率输出.

根据(1)–(5)式,可以得到  $L'_1$  和  $u'_1$  随  $d_1$  以及  $L'_2$  和  $u'_2$  随  $d_2$  的变化曲线如图 4 所示,图中所用到  $\Delta_1$  和  $f_3$  的值分别为  $\Delta_1 = 302.5 \text{ mm}$ ,  $f_3 = 75 \text{ mm}$ .对图 4(a)分析可以发现,  $u'_1$  随  $d_1$  的变化较  $u'_2$  随  $d_2$  的变化更为显著,而且对于给定的  $d_2$ (一般情况下  $d_2 < 500 \text{ mm}$ ),在很大的范围内都满足  $u'_1 > u'_2$ .所以根据(3)式可知,对于如图 2 所示的谐振腔,  $u'_1$  决定了晶体内的光束半径  $w_0$ ,即可以通过  $d_1$  的变化来改变  $w_0$ .图 5 示出了在  $d_2$  给定的情况下计算得到的晶体中光束半径  $w_0$  随  $d_1$  的变化关系,计算中选择  $d_2 = 462.5 \text{ mm}$ .从图 5 可以看出,当  $d_1 < 119 \text{ mm}$  时,有  $u'_1 < u'_2$ ,此时的  $w_0$  由右臂决定,由于  $d_2$  给定,所以  $w_0$  也保持不变;当  $d_1 > 119 \text{ mm}$  时,有  $u'_1 > u'_2$ ,根据(3)式此时的  $w_0$  由左臂决定.

对图 4(b)的分析发现,当  $d_1 > 100 \text{ mm}$  时,  $L'_1$  随  $d_1$  的变化比较缓慢,基本上保持不变,而  $L'_2$  随  $d_2$  的变化则比较显著.由(6)式可知,右臂是保证两腔镜相互成像的主要因素,调节  $d_2$  可以改变激光器的动态工作点.

### 4.3. 实验结果的验证

从以上的理论分析可以得到如下的结果:改变  $d_1$  的值会影响晶体内的光束半径,进而影响激光器的输出功率,但是改变  $d_1$  的值对动态工作点的影响很小.改变  $d_2$  的值则改变了激光器抽运功率的动态工作点,但并不影响晶体内光束半径.

为了验证上述结果,实验中测量了激光器基模

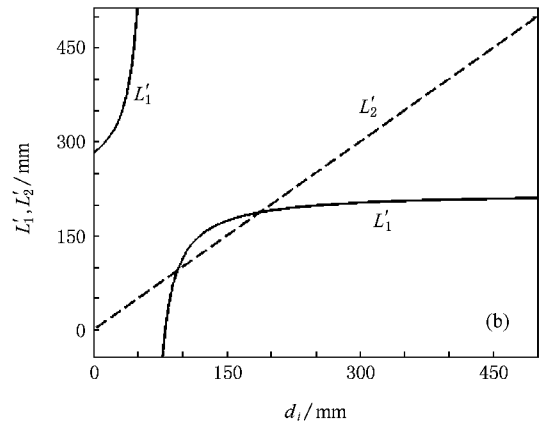
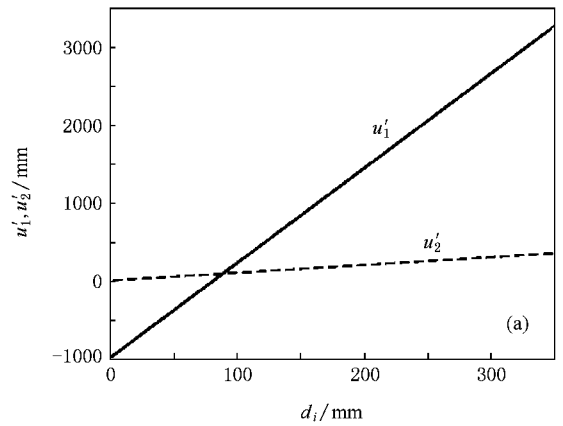


图 4 等效腔参数随腔镜位置的变化 (a)  $u'_1$  和  $u'_2$  随距离  $d_i$  ( $i = 1, 2$ ) 的变化 (b)  $L'_1$  和  $L'_2$  随距离  $d_i$  ( $i = 1, 2$ ) 的变化

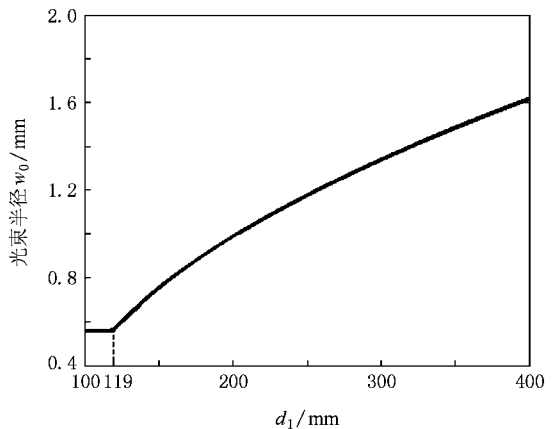


图 5 在  $d_2$  给定的情况下,晶体中光束半径  $w_0$  随  $d_1$  的变化

输出功率和最佳工作点处的抽运功率随  $d_1$  和  $d_2$  的变化,如图 6 所示.从图 6(a)可以看出,当  $d_2$  固定为  $462.5 \text{ mm}$  时,输出功率随  $d_1$  的变化存在一个最大值.如果  $d_1$  过小,会造成基模体积小,导致输出功率减小;如果  $d_1$  过大,虽然基模体积增大,但是动态

工作范围减小,输出功率也会减小.所以在实验中要根据输出功率的结果选择最佳的  $d_1$  值.而图 6(a) 中激光器的最佳工作点随  $d_1$  的增加变化不大,只是略微有些增加.这是由于  $d_1$  的变化改变了两腔镜由热透镜相互成像的条件.在图 6(b) 中  $d_1$  固定为 210

mm,从图中可以看出,随着  $d_2$  的增加激光器最佳工作的抽运功率明显下降,但是基模输出功率几乎不变,只是略微有些减小.这是由于抽运功率的下降使得腔内振荡光束的增益减小.由此可见,实验结果与上述理论分析得出的结果符合很好.

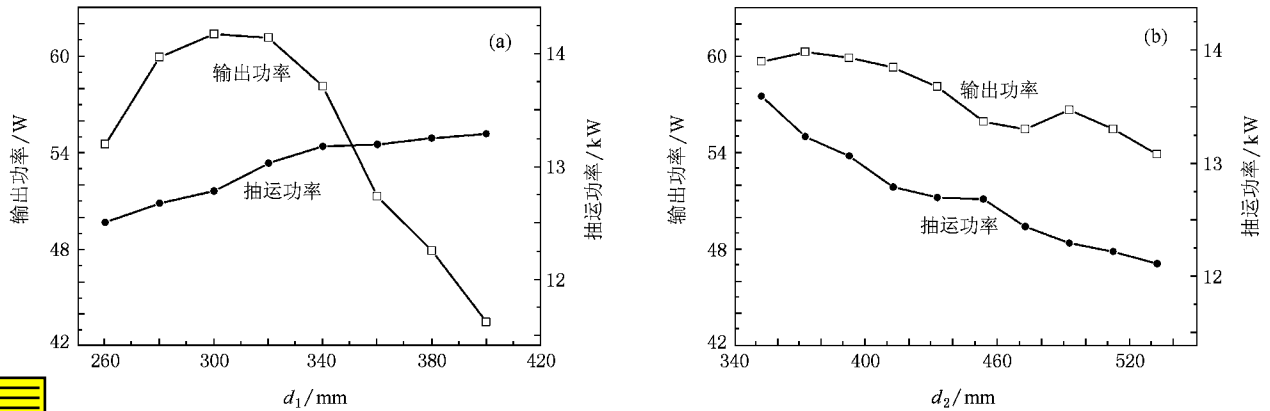


图 6 激光器的输出功率和抽运功率的工作点随腔镜位置的变化 (a) 随  $d_1$  的变化 (b) 随  $d_2$  的变化

## 5. 结 论

设计并实现了一种新颖的可以获得大功率高亮度激光输出的动态稳定腔,腔内使用双棒串接补偿了热致双折射效应,并通过腔内辅助透镜增大了基模体积,通过合理的设计谐振腔参数,在使用闪光灯抽运的条件下获得了 61 W 的基模连续输出.

使用等效热透镜的方法分析了谐振腔参数对激光器性能的影响,改变输出镜的位置会影响晶体内的光束半径,而对动态工作点的影响很小,改变全反镜的位置则改变了激光器的动态工作点,但并不影响晶体内光束半径.上述设计方法不仅适用于闪光灯抽运的激光器,对于激光二极管抽运的情况同样具有重要的意义,相应的理论和实验工作是进一步研究的方向.

- [1] Bo Y, Geng A C, Bi Y, Sun Z P, Yang X D, Li R N, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1171 (in Chinese) [薄 勇、耿爱丛、毕 勇、孙志培、杨晓东、李瑞宁、崔大复、许祖彦 2006 物理学报 **55** 1171]
- [2] Wu D E, Zhou R, Zhang X H, Ding X, Yao J Q, Yan C F, Zhang G Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1196 (in Chinese) [武丁二、周睿、张晓华、丁 欣、姚建铨、颜彩繁、张光寅 2006 物理学报 **55** 1196]
- [3] Bo Y, Geng A C, Bi Y, Sun Z P, Yang X D, Peng Q J, Li H Q, Li R

- N, Cui D F, Xu Z Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 771
- [4] Magni V 1986 *Appl. Opt.* **25** 107
- [5] Magni V 1987 *J. Opt. Soc. Am. A* **4** 1962
- [6] Magni V, Valentini G, Silverstri S 1991 *Opt. Quantum Electron.* **23** 1105
- [7] Lü Q, Kugler N, Weber H, Dong S, Müller N 1996 *Opt. Quantum Electron.* **28** 57
- [8] Hua R, Wada S, Tashiro H 2004 *Opt. Commun.* **232** 333
- [9] Kogelnik H 1965 *Bell Syst. Tech. J.* **44** 455

# Investigation on a TEM<sub>00</sub>-mode dynamic stable resonator with two Nd :YAG rods<sup>\*</sup>

Liu Chong Ge Jian-Hong Xiang Zhen<sup>†</sup> Chen Jun

( *State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China* )

( Received 19 October 2007 ; revised manuscript received 25 February 2008 )

## Abstract

In order to achieve high power , high brightness lasers , a TEM<sub>00</sub>-mode dynamic stable resonator with two Nd :YAG rods is constructed. The thermal induced birefringence is compensated by two identically pumped rods. The laser output 61 W is achieved in cw mode under lamp pumped regime. The influence of the cavity parameters on the laser output properties is investigated using the equivalent thermal lens method. It turns out that the distance of the output coupler and the high reflectivity mirror from the laser rods play different roles on the laser properties .

**Keywords** : dynamic stable resonators , two-rod , cavity mode

**PACC** : 4260B , 4260D

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics ( Grant No. 10376033 ).

<sup>†</sup> E-mail : xiangzhen@zju.edu.cn