

文章编号: 0258-7025(2004)09-1117-04

大功率连续 Nd:YAG 激光器热透镜 焦距测量

李 强, 王志敏, 王智勇, 房明星, 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 阐明了一种利用腔的临界稳定条件来测量灯抽运大功率连续 Nd:YAG 激光器有效热透镜焦距的简单方法。通过测量特殊临界稳定点的输出功率,可计算出激光棒的有效平均热焦距,以及径向和切向的热透镜焦距 f_r 和 f_θ 。此方法简单可行,特别适用于高功率激光器热焦距的测量。此方法利用腔的临界稳定点,是在有激光输出时测量的,比无激光输出时更接近实际情况,与探测光束法比较测量偏差为 $\pm 10\%$,小于非稳腔法 $\pm 20\%$ 的测量偏差,测量值更准确。为优化设计大功率激光器提供了准确的设计参数。

关键词 激光技术;Nd:YAG 激光器;热焦距测量;临界稳定点

中图分类号 TN 241 文献标识码 A

Thermal Lens Focal Length Measurement of High Power Lamp Pumped CW Nd:YAG Laser

LI Qiang, WANG Zhi-min, WANG Zhi-yong, FANG Ming-xing, ZUO Tie-chuan

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract A simple method using resonator critical stable point is applied to measure the thermal lens focal length of a flashlamp-pumped continuous wave (CW) Nd:YAG ($\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) laser. By measuring output power at special critical stable point, the laser rod thermal lens focal length can be calculated. The method can also be used to obtain the thermal lens radial and tangent focal length, f_r and f_θ , respectively. This method is simple and practical, it is applicable especially for the measurement of thermal focal length of high power laser. Because of using the critical point of the resonator with laser on, this method is closer real case than without laser, the measurement is more accurate. The measuring deviation of the method comparing with probe beam method is within the order of $\pm 10\%$. It is less than that of the unstable-resonator method that is in the order of $\pm 20\%$.

Key words laser technique; Nd:YAG laser; thermal lens focal length; critical stable point

1 引 言

对于设计优化大功率激光器系统,激光晶体的热焦距是一个重要的参数。对激光器热透镜的测量,人们进行了大量的研究,提出了多种测量激光器热透镜的方法,如:探测光束法^[1~3]、相干测量法^[4]、非稳腔法^[5~8]、横模拍频法^[9]、利用光斑半径、发散角和热焦距的关系式间接测量^[10,11]。这些方法都

是测量热透镜焦距的平均值。而对热透镜补偿,测得径向热焦距 f_r 和切向热焦距 f_θ 更有实际意义。

本文提出了一种简单的测量大功率灯抽运连续激光器热透镜的新方法。在大功率激光输出时,利用谐振腔的临界稳定条件计算有效热透镜的焦距。简单的平行平面谐振腔的临界稳定点是对增益介质的热透镜敏感的函数。激光输出功率是抽运灯输入功率的函数,通过监测激光输出功率,记录由于有效

收稿日期:2003-07-14;收到修改稿日期:2003-09-12

基金项目:国家自然科学基金(10276003)和北京市重点技术创新项目(jc1z2001-1019)资助课题。

作者简介:李 强(1965—),男,四川乐山人,北京工业大学激光工程研究院教授,主要从事激光、光电子技术的研究。E-mail:ncltlq@bjpu.edu.cn

热焦距使谐振腔通过特殊临界稳定的点,可以确定有效热焦距。这种方法不仅可以测量与激光器结构有关的平均有效热焦距具体值,而且可以测得对应的径向热焦距 f_r 和切向热焦距 f_θ 。这种方法不需要特殊的仪器,且操作简单。

2 灯抽运的谐振腔模型分析

由于灯抽运的功率沉积在整个棒上,从而形成热透镜。稳定工作时的激光棒的热分布依赖于抽运灯、聚光腔和棒的几何结构,棒对抽运光的吸收系数,以及激光的输出功率。环绕棒的循环水冷却激光棒,在激光棒内产生径向的温度梯度,棒中心温度最高,热产生的折射率沿半径方向呈抛物线分布,激光棒可认为是正类透镜元件。

连续大功率 YAG 激光器一般为高阶横模结构,模型分析很复杂,但高阶横模的光斑半径 W_m 及发散角 θ_m 与基模有对应关系^[12]

$$W_m = M\omega_0 \quad \theta_m = M\theta_0$$

其中 M 为高阶模系数, ω_0, θ_0 为基模的光斑半径及发散角

$$W_{mf} = M\omega_{of} \leq r_f$$

r_f 为棒的有效孔径, W_{mf}, ω_{of} 分别为棒主面上高阶模和基模的光斑半径。

为了简化分析,激光腔的特性用最低阶横模模型来表征。

根据谐振腔理论^[1],腔的稳定条件 $-1 \leq G_1 G_2 \leq +1$, G_1 和 G_2 为谐振腔的 G 参数。对于内部有光学元件的谐振腔,激光棒可以近似为一个焦距为 f 的球面薄透镜, G 参数可表示为

$$G_1 = \frac{a_1}{a_2} \left[1 - \frac{L_2}{f} - \frac{1}{R_1} \left(L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f} \right) \right] \quad (1)$$

$$G_2 = \frac{a_2}{a_1} \left[1 - \frac{L_1}{f} - \frac{1}{R_2} \left(L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f} \right) \right] \quad (2)$$

a_1 和 a_2 为镜子的孔径, R_1 和 R_2 为镜子的曲率半径, L_1 和 L_2 为主面离镜的距离。

激光棒(长度为 l) 看作一个薄透镜和两块长度为 h 的各向同性介质, $h = l/2n_0$, h 为透镜主面到棒端面的距离^[13], n_0 为激光棒的折射率。

为简化分析和实验,谐振腔选择为对称平行平面腔,平面镜有相同的孔径并分别与 Nd:YAG 棒等间距放置。因此

$$a_1 = a_2, R_1 = R_2, \text{ 且 } L_1 = L_2 = L$$

式中, L 为主面离镜的距离。

方程(1)和(2)简化为

$$G_1 = G_2 = 1 - \frac{L + (l/2)[1 - (1/n_0)]}{f} \quad (3)$$

因此腔的稳定性只与腔内透镜焦距及腔长有关。

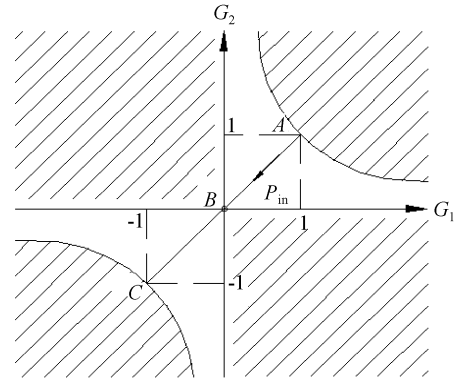


图 1 光学谐振腔的稳定图

阴影部分表示非稳区。点 A, B, C 分别对应着平行腔、共焦腔、共心腔

Fig. 1 Stability diagram of an optical resonator

Shaded areas indicate regions of unstable operation. Points A, B, C correspond to plane parallel, confocal, and concentric resonators, respectively

图 1 为光学谐振腔的稳定性图。直线上的点代表了有不同焦距内置透镜对称腔对应的位置。热焦距是输入功率的函数,随着功率的增加,等效腔从平行腔过渡到共焦腔,最后到共心腔。离开这一区域,谐振腔是不稳定的。在图 1 中, B 点对应于 $G_1 \times G_2 = 0$, 这点是谐振腔稳定区的临界稳定点。根据方程(3)可以得到有效热焦距

$$f = L + (l/2)[1 - (1/n_0)] \quad (4)$$

在这一临界稳定点,半腔长将等于热透镜焦距 f 。对一定的腔长,随着输入功率的增加,输出功率的增量在这一临界稳定点明显下降。用这种方法,对不同的腔长,可测量不同抽运功率下的热透镜焦距。

实际上,临界稳定点不只是一个点。当仔细调整输入功率时,它可能是一个区域。热透镜焦距可以表示为^[14]

$$f_i = \frac{AK}{P_{in} n_0} \left[\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dt} + n_0^2 \beta C_{r,\theta} + \frac{r_0 \beta (n_0 - 1)}{n_0 l} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中, K 为棒的热导率, A 为棒的横截面积, β 为棒的热膨胀系数, $C_{r,\theta}$ 为棒的径向、切向弹性系数, dn/dt 为棒的折射率随温度的变化率。

这里有两个焦距 f_r 和 f_θ 。对于 YAG 晶体,一般

$f_r/f_\theta = 1.2 \sim 1.5$ 。这样不仅能测量到平均热焦距，而且能得到 f_r 和 f_θ 。

3 实验方法

在实验中，采用双氙灯抽运漫反腔， $\phi 9 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 棒(掺钕浓度为 0.8%)。激光电源为灯提供最大功率 16 kW。激光器用双循环水冷进行冷却，实验温度及稳定度为 $20^\circ\text{C} (\pm 1^\circ\text{C})$ 。本实验采用的是输出耦合效率为 20.5% 的平行平面腔，并且在紧接激光棒处两端分别放置直径为 8.5 mm 的光阑，用以抑制谐振腔在稳定区临界稳定点输出功率的波动。

用 Ophir 型 5000 W-SH 功率计探测输出激光的功率，通过检测增加灯的输入功率而输出激光功率没有线性增加来确定腔的临界稳定点。每次测量抽运功率由低到高，再由高到低，实验结果取平均值。实验中，对每一腔长，腔镜进行严格准直，以保证对于每次测量的斜率效率一致。对一定范围内的对称腔长，描画激光输出功率与灯抽运功率的函数曲线来获得实验结果。图 2 给出了 5 个腔长抽运功率与输出功率关系的测量结果。从图 2 可以发现，随着抽运功率的增加，输出功率线性增加，随后出现一个拐点，接着出现一平缓区，之后，输出功率又会线性增长，最后由于到达谐振腔的不稳区输出功率下降。当达到第一个拐点时，就进入了临界稳定点，这时有与抽运功率有关的有效热焦距 f_r 。当第二个拐点出现时，离开临界稳定点，这时有与抽运功率有关的有效热焦距 f_θ 。平均有效热焦距在平缓区的中

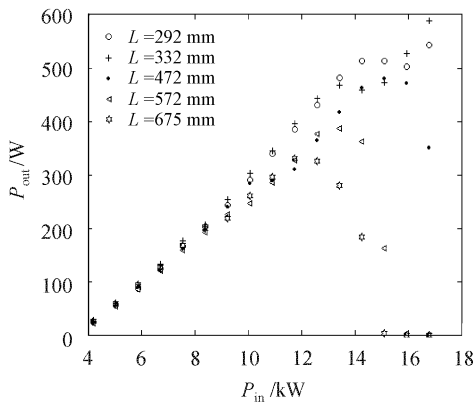


图 2 平平腔腔长为 584~1344 mm 时输出功率随抽运功率的变化测量结果

Fig.2 Measurement results for the output laser power versus the pump power with a plane parallel resonator at resonator lengths of 584 to 1344 mm

心。利用方程(4)，可计算出径向和切向有效热透镜焦距 f_r, f_θ ，及平均有效热透镜焦距 f ，图 3 给出了测量结果。

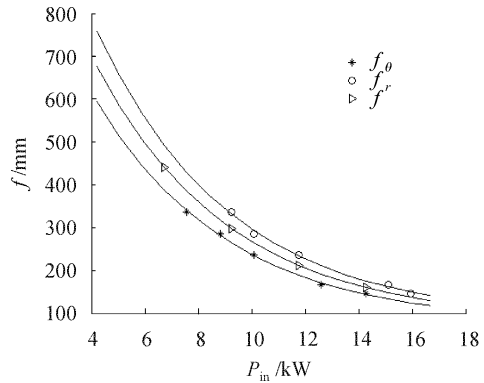


图 3 YAG 棒的热透镜焦距随输入功率变化曲线

Fig.3 Measured thermal lens focal length of YAG crystal rod as a function of lamp input power. Each point represents the calculated effective focal length of YAG crystal

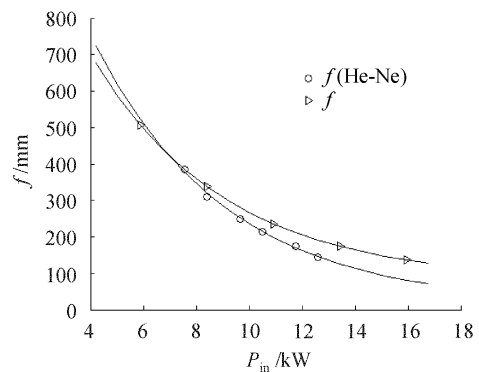


图 4 YAG 棒的有效焦距长度随输入功率的变化曲线用(△)和(○)表示的曲线分别为用探测光束法和临界稳定法测得的热焦距

Fig.4 Effective focal length of YAG crystal as a function of lamp input power

The average focal length of experimental values are obtained by resonator critical stable points (△) and values obtained with a He-Ne laser (○)

为了验证这一方法的准确性，在相同条件下，采用探测光束法^[2]对热透镜焦距进行了比较测量，见图 4。采用临界稳定点方法得到的平均有效热焦距值比探测光束法测到的值略大。而这两种方法偏差为 $\pm 10\%$ ，要小于非稳腔法^[1]的 $\pm 20\%$ 。

4 结 论

提出了一种新的测量大功率灯抽运连续 Nd:

YAG 激光器的平均热透镜焦距的方法。本方法运用了稳定腔的临界稳定点,所以比非稳腔法更为精确。这是一种测量 f_r 和 f_θ 的最简单的方法。此方法还可以用于间接测量激光脉冲形成时动态热透镜,以及大功率半导体激光抽运连续 Nd:YAG 激光器的热透镜焦距。

参 考 文 献

- 1 W. Koehner. Thermal lensing in a Nd:YAG laser rod [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(11):2548~2553
- 2 K. P. Driedger, W. Krause, H. Weber. Average refractive powers of an alexandrite laser rod [J]. *Opt. Commun.*, 1986, **57**(6):403~406
- 3 D. Sumida, D. Rockwell, M. Mangir. Energy storage and heating measurements in flashlamp pumped Cr, Nd:GSGG and Nd:YAG [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(6):985~994
- 4 C. Pfistner, R. Weber, H. P. Weber *et al.*. Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(7):1605~1616
- 5 D. G. Lancaster, J. M. Dawes. Thermal-lens measurement of a quasi steady-state repetitively flashlamp-pumped Cr, Tm, Ho:YAG laser [J]. *Optics and Laser Technology*, 1998, **30**(2):103~108
- 6 Liu Junhai, Lu Jianren, Lu Junhua *et al.*. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers by a simple direct approach [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**(3):181~183
- 7 Feng Song, Chaobo Zhang, Xin Ding *et al.*. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(12):2145~2147
- 8 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Study on thermal lens of Nd:YAG laser pumped by a laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9):777~781
张行愚,赵圣之,王青圃等. 激光二极管端面抽运的固体激光器热透镜效应的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9):777~781
- 9 B. Ozygus, Qincheng Zhang. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers using primary degeneration modes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(18):2590~2592
- 10 Guo Ruixiang, Li Fengqin, Xie Changde *et al.*. Method for indirect measuring thermal focal length of laser crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):721~724
郭蕊香,李凤琴,谢常德等. 一种间接测量全固化激光器热焦距的方法[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):721~724
- 11 Zheng Jia-an, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Thermal lens measurement of LD-end-pumped solid state laser with stable resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):717~720
郑加安,赵圣之,王青圃等. 稳腔固体激光器运转时热透镜焦距的测量[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):717~720
- 12 W. H. Carter. Spot size and divergence for Hermite Gaussian beams of any order [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(7):1027~1029
- 13 V. Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1):107~117
- 14 W. Koehner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. New York, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995