

# LD 端面泵浦 Nd : YAG 激光器中的热透镜焦距\*

杨永明<sup>1,2</sup> 文建国<sup>1</sup> 王石语<sup>1</sup> 蔡德芳<sup>1</sup> 过 振<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2 西安建筑科技大学理学院, 西安 710055)

**摘 要** 采用热透镜焦距的理论计算与实验测量相比较的研究方法, 得到一种端泵固体激光器出激光时的在线测量方法. 通过建立热透镜等效腔模型以及腔型分析求解得出腔内光束束腰半径, 用刀口法测出 DPL 腔外的远场发散角, 根据发散角与透镜变换前后的束腰关系, 得出 LD 端面泵浦 Nd : YAG 激光器中的热透镜焦距. 结果表明, 通过上述方法所得结果与理论计算的热透镜焦距吻合, 证实此方法准确、可行.

**关键词** 二极管泵浦固体激光器(DPL); 端面泵浦; 热透镜

**中图分类号** TN248.1      **文献标识码** A

## 0 引言

半导体二极管端面泵浦固体激光器(DPL)随着泵浦功率的增大, 晶体热效应越来越严重, 直接影响激光器的输出特性<sup>[1~3]</sup>. 对于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、相干测量法、非稳腔法和横模拍频法. 这些方法都是测量热透镜焦距的平均值. 2001 年郑加安提出了一种稳腔固体激光器运转时热透镜焦距的测量方法<sup>[4]</sup>, 但误差较大. 而采用扫描狭缝法测热透镜焦距, 其测量和数据处理较为麻烦. 2003 年, 陈德东, 杨爱粉等人在侧泵中用 He-Ne 光采用直测法在激光器未出激光的情况下测出了热透镜焦距<sup>[5]</sup>, 许多在侧泵下能用的方法, 在端泵下不能用. 2004 年 3 月, 李强等人提出了利用谐振腔的临界稳定条件计算有效热透镜焦距的方法<sup>[6]</sup>. 同年 9 月他又提出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. 2004 年 4 月, 黄峰等人对其热透镜效应进行了计算分析, 在此基础上运用传播圆-变换圆

的图解分析法进行热稳腔的分离参数设计, 得出了热透镜焦距<sup>[7]</sup>. 本文介绍一种适用于端泵 DPL, 在出激光时在线测量热透镜焦距的方法. 这种方法不需要特别的仪器, 且操作简单, 准确性高.

## 1 热效应理论

温度梯度产生的热透镜表达式为

$$f_1 = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph} (dn/dT)} \left( \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right) \quad (1)$$

式中致热功率  $P_{ph}$  可表示为

$$P_{ph} = P_{in} \times (1 - \eta) = P_0 \times T_0 \times (1 - \eta) \quad (2)$$

式中,  $P_0$  为 LD 的总泵浦功率;  $P_{in}$  为输入晶体的泵浦功率;  $T_0$  为耦合系统的透过率;  $\eta$  为激光器的总斜率效率.  $dn/dT$  是 Nd : YAG 晶体折射率与温度的变化率,  $L$  是晶体长度.  $\alpha$  为晶体的吸收系数.

热应力双折射引起的热透镜焦距为  $f_2$ , 端面形变引起的热透镜焦距为  $f_3$ , 利用薄透镜组合透镜焦距公式将温度梯度、热应力双折射和端面形变所求的热焦距组合, 得到端面泵浦 DPL 的综合热透镜焦距为<sup>[8,9]</sup>

$$f = \frac{1}{1/f_1 + 1/f_2 + 1/f_3} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph}} \left\{ \frac{1}{[1 - \exp(-\alpha l)] dn/dT + [1 - \exp(-\alpha l)] 2n_0^3 d_0 C_{r,\varphi} + [1 - \exp(-\alpha r_0)] d_0 r_0 2(n_0 - 1)} \right\} \quad (3)$$

式中  $K_c$  为热导率,  $\alpha$  为介质的吸收系数,  $d_0$  为热膨胀系数,  $P_{ph} = \pi \omega_p^2 I_{oh} / 2$  为泵浦光功率的致热部分,  $Q$  为介质内单位时间单位体积产生的热量;  $n_0$  为介质

折射率,  $\omega_p$  为泵浦光束中按  $1/e^2$  定义的光束宽度,  $r_0$  为晶体棒半径,  $l$  为晶体棒长.

把  $\phi 4 \times 10$  的 Nd : YAG 介质各参数: 热导率  $K_c = 0.014 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{k})$ ; 吸收系数  $\alpha = 0.71/\text{mm}$ ; 折射率温度系数  $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ; 热膨胀系数  $d_0 = 7.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ; 折射率  $n_0 = 1.823$ ; 光弹性系数  $C_{r,\varphi} = 0.017$  代入式(3), 又因为温度梯度产生的

\*国防科技固体激光技术重点实验室基金项目 NO: 51456050104DZ0101)  
Tel: 029-88202574      Email: yang19368@sina.com  
收稿日期: 2005-07-27

热透镜效应、应力双折射热透镜效应和端面效应热分别占总热透镜效应的百分比为：85%、14.4%和0.6%<sup>[6]</sup>，可以得到

$$f = \frac{1}{1/f_1 + 1/f_2 + 1/f_3} = \frac{\pi K_c \omega_0^2}{P_{ph}} \cdot \left( \frac{1}{8.58 \times 10^{-6} (85.01\% + 14.38\% + 0.6\%)} \right) \quad (4)$$

## 2 DPL 的热透镜焦距

当把 Nd:YAG 晶体置于冷却套中，晶体的泵浦面镀 808 nm 增透膜和 1064 全反膜，假定输出镜为平面镜，当 Nd:YAG 晶体受到 LD 的端面泵浦时，在激光晶体上便会有热效应出现。因为激光晶体与整个腔长相比显得很小，热透镜可放在晶体轴线的任意一处，对计算结果影响不大。当把晶体的热透镜放在激光晶体的泵浦端面上时腔型结构如图 1(a)。当把热效应和晶体的泵浦面综合考虑时，可将总的热效应等效为一个凹面反射镜，热效应严重时热透镜焦距变短，凹面反射镜的曲率半径变小。于是便有图 1(b) 的等效腔腔型结构。

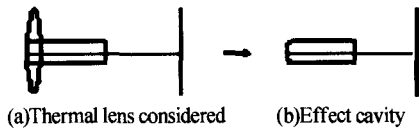


图 1 考虑热透镜的谐振腔  
Fig. 1 Oscillation cavity including thermal lens

这样，对图 1(b) 的腔型结构的计算就简化为一个凹面反射镜和平面镜所构成的谐振腔的计算。假定  $R_1$  为热透镜等效球面反射镜的曲率半径， $R_2$  为谐振腔输出镜的曲率半径， $L$  为谐振腔腔长， $\theta$  为激光发散角， $\lambda$  为激光波长，其振荡光的光斑直径在腔内的分布如图 2。

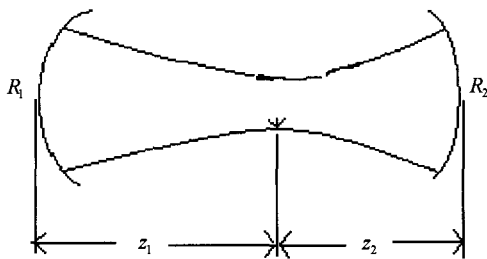


图 2 腔内振荡光分布图  
Fig. 2 Oscillation light's distribution in the cavity

热透镜可等效为薄透镜，而且晶体棒长相对于腔长而言很小，等效热透镜可放在晶体棒中任意位置，为了便于计算将其放在晶体左端面，见图 3。计算等效腔的传输矩阵 ABCD 为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-2L/R_2+4L^2/(R_2 f)-4L/f & -2L^2/R_2+2L \\ -2/R_2-2/f+4L/(R_2 f) & 1-2L/R_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

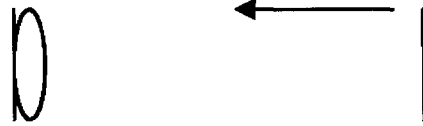


图 3 含有热透镜的平平腔  
Fig. 3 P-P cavity with a thermal lens

稳定腔内的束腰半径的计算公式为

$$\omega_0^4 = \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \frac{L(R_1-L)(R_2-L)(R_1+R_2-L)}{(R_1+R_2-2L)^2} \quad (6)$$

通过式(6)可计算出稳定腔内的光束束腰半径  $\omega_0$ ，当  $R_2$  趋于无限大时

$$\omega_0^4 = \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^2 L(R_1-L) \quad (7)$$

热透镜等效凹面镜的曲率半径  $R_1$  与热透镜焦距  $F$  之间有如下关系

$$R_1 = 2(n_0 - 1)F \quad (8)$$

$$\omega_0^4 = \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^2 L[(2n_0 - 1)F - L] \quad (9)$$

另外，上面的谐振腔还可等效为一个含薄透镜的平平腔。沿图 3 箭头方向考察振荡光的传输，相当于振荡光在谐振腔中先后经过了两次热透镜，这两个薄透镜紧靠在一起，每个薄透镜的焦距为  $F$ ，根据薄透镜的组合理论，可看作一个组合透镜，焦距为  $F'$ ， $F' = 2F$ 。则腔内光与腔外光的透镜变换如图 4。

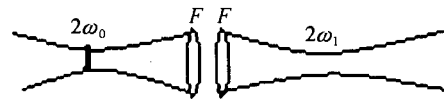


图 4 光束的透镜传输  
Fig. 4 Beam of light's lens transfer

$$F' = F/2 \quad (10)$$

$$\theta_1 = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{L}{F'}\right)^2 + \frac{1}{F'^2} \left(\frac{\pi\omega_0}{\lambda}\right)^2} \quad (11)$$

将式(8)代入式(9)得

$$\theta_1 = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{2L}{F}\right)^2 + \frac{4}{F^2} \left(\frac{\pi\omega_0}{\lambda}\right)^2} \quad (12)$$

而  $\theta_1$  可以通过刀口法测出，实验时可在腔外找出如图 5 的三个任意点加以测量，通过测出三点的

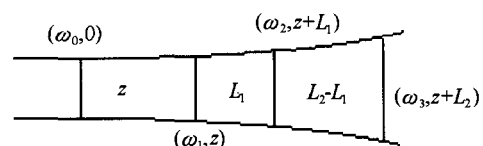


图 5 三点法描述腔外光场分布  
Fig. 5 Oscillation cavity's light distribution using three points

斑大小,根据国际标准,当高斯光的发散角小于 0.8 弧度时,高斯光的光斑直径  $d$  可以用多项式拟合.

$$d(z)^2 = A + B \cdot Z + C \cdot Z^2 \quad (13)$$

根据测量发散角的国际标准有

$$\theta = \sqrt{C} \quad (14)$$

陈德东、杨爱粉利用式(11)测出了侧泵下,激光器未出光时的热透镜焦距<sup>[5]</sup>,本文利用式(14),测出了端泵 DPL 远场发散角,然后根据式(9)得出振荡光腔内的束腰半径,再根据光束传输理论,据式(12)得出了热透镜焦距,此方法可在线连续测量,实验要求不高.

### 3 实验装置

实验测量激光发散角采用刀口方法,测量激光光束不同位置的光斑半径,曲线拟合方程如式(13),用式(14)计算光束的发散角.

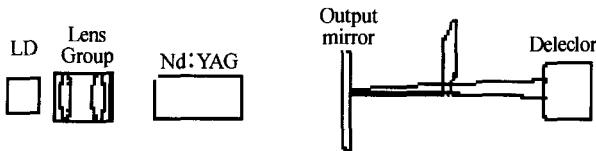


图 6 测量热透镜实验装置

Fig. 6 The setup of measuring the thermal lens

### 4 实验结果

通过上述实验方法得到 DPL 激光输出发散角,由式(12)计算出热透镜焦距.理论估算值由(4)式得到.

从图 7 可见,随着泵浦功率的增大,热透镜焦距越来越短,热效应越来越明显,热透镜焦距理论值与实验值吻合.

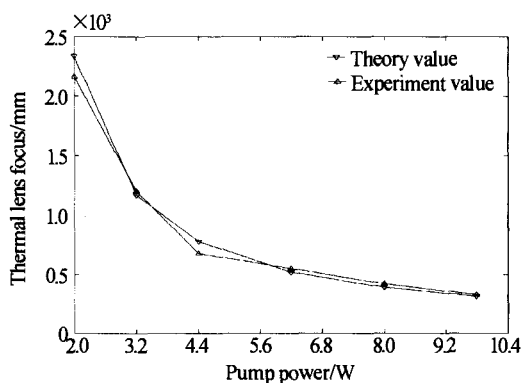


图 7 泵浦电流与热透镜焦距的曲线

Fig. 7 Pumped current VS thermal lens

### 5 结论

实验结果可见,此方法作为 LD 端泵固体激光

器在线测量热透镜焦距的方法切实可行.为进一步研究声光调 Q 激光器腔内热效应问题铺平了道路,在固体激光器的热透镜焦距测量这一研究热点问题上进行了有益的探讨.

### 参考文献

- 1 郑加安,赵圣之,王青圃,等.晶体热效应对 LD 端面泵浦固体激光器优化设计的影响.光子学报,2001,30(6):724~729  
Zheng J A, Zhao S Z, Wang Q P, et al. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(6): 724~729
- 2 李隆,田丰,赵致民,等. LD 端面泵浦折叠腔 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 激光器.光子学报,2004,33(4):396~399  
Li L, Tian F, Zhao Z M, et al. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(4): 396~399
- 3 李隆,张伟,田来科,等.在研究端面泵浦双 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器中热效应对腔稳定性的影响.光子学报,2004,33(1):4~7  
Li L, Zhang W, Tian L K, et al. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(1): 4~7
- 4 郑加安,赵圣之,王青圃.稳腔固体激光器运转时热透镜焦距的测量.中国激光,2001,28(8):717~720  
Zheng J A, Zhao S Z, Wang Q P. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(8): 717~720
- 5 陈德东,杨爱粉.激光二极管 bar 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器热效应研究.应用光学,2003,24(4):23~26  
Chen D D, Yang A F. Journal of Applied Optics, 2003, 24(4): 23~26
- 6 李强,王志敏,王智勇.测量 Nd:YAG 激光器热透镜的焦距的方法.光电子·激光,2004,15(3):263~266  
Li Q, Wang Z M, Wang Z Y. Opto-Electronic, 2004, 15(3): 263~266
- 7 黄峰,汪岳峰,牛燕雄. LD 端面泵浦的高重频 Nd:YAG 激光器的热效应研究.红外与激光工程,2004,33(4):358~361  
Huang F, Wang Y F, Niu Y X. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4): 358~361
- 8 杨永明,过振,王石语.干涉条纹法测量 LD 端面泵浦 Nd:YAG 热透镜焦距.光子学报,2005,34(2):202~204  
Yang Y M, Guo Z, Wang S Y. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(2): 202~204
- 9 W·克希耐尔.固体激光工程.北京:科学出版社,2002. 357~364  
Koechner W. Solid-State Laser Engineering. Beijing: Science Press, 2002. 357~364

## The Thermal Lens Focus Of The End-pumped Nd : YAG Laser

Yang Yongming<sup>1,2</sup>, Wen Jianguo<sup>1</sup>, Wang Shiyu<sup>1</sup>, Cai Defang<sup>1</sup>, Guo Zheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied Physics, Xidian University, Xi'an 710071

<sup>2</sup> Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055

Received date: 2005-07-27

**Abstract** A new method to measure the thermal lens of the solid state laser is presented while laser is outputted by the comparison with the theory result and the experiment. The thermal lens can be achieved by experiment at first, then calculated out by the theory analysis. The thermal lens resonance cavity model is set up at first, then the waist of the laser is calculated and the DPL's far field divergence angle can be measured by the edge of knife method. In the end, using the laser's spread and lens' transfer theory, the focus of the thermal lens is known. This is a new method to measure the focus of the thermal lens of the end-pumped Nd : YAG Laser. The result shows that the theory value is in good agreement with the experiment value. It shows that this method is correct and can be operated easily. Because the experiment is done when the DPL outputs laser, the focus of the thermal lens is gotten according to the circumstance of the laser and the precision is high.

**Keywords** Laser-diode pumped solid-state laser(DPL); End-pump; Thermal lens



**Yang Yongming** an associate professor, was born on September 13 of 1968 in Shaanxi Province, China. He received the B. S. degree in Physics from Shaanxi Normal University in 1989 and the M. S. degree in physics from Shaanxi Normal University in 1994. Now he is working towards on the Ph. D. degree in optic engineering at School of Technical Physics, Xidian University. His research interest focuses on the fields of thermal effects in diode pumped solid-state lasers.