

文章编号: 0258-7025(2009)11-3031-04

一种测量端面抽运 Nd-GdVO₄ 晶体热透镜 焦距的方法

项震付 鑫 葛剑虹*

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 在半导体激光端面抽运工作条件下, 激光晶体会产生剧烈的热透镜效应。利用 532 nm 激光作为探测光, 观测探测光束通过晶体后的远场图像可以很好地评估热透镜效应程度大小。利用现有的热透镜理论结果建立了光束干涉模型, 对远场光环现象进行了解释, 并且分析得到了基于远场光环的热焦距计算公式。使用谐振腔稳定性法测量了热透镜焦距, 并将测量结果与基于远场光环的热焦距计算结果作对比, 验证了光线干涉模型的合理性及计算热焦距公式的准确性。

关键词 测量; 热透镜; 光束干涉模型; 热焦距

中图分类号 TN 248.1; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.3031

A Method for Measuring Thermal Lens Focal Length of End-Pumped Nd:GdVO₄ Crystals

Xiang Zhen Fu Xin Ge Jianhong

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

Abstract Thermal lens effects are severe for Nd:GdVO₄ laser crystals with an end-pumping scheme. A 532 nm laser is used as a probe beam in experiments. By detection of the far-field image of the probe beam, the thermal effect could be measured. A model is presented using beam interference theory. Based on this model, the phenomenon at far-field is explained and a new formula for calculating the thermal focal length is formed. Thermal lens measurements are also performed using a resonator stability method. The results agree well with the beam interference model and the thermal focal length formula.

Key words measurement; thermal lens; beam interference model; thermal focal length

1 引言

半导体激光端面抽运方式是激光器设计中常用的结构^[1,2]。由于其抽运密度大, 因此会产生非常强烈的热效应, 尤其是热透镜效应^[2], 这会对输出激光的质量产生严重影响^[3~5]。对于热透镜效应的评估主要体现在对热透镜焦距的测量上。因此, 如何准确、便捷地测量热透镜焦距成为激光器设计中必须考虑的一个重要环节。

目前测量热焦距的方法主要有直接探测法、谐振腔稳定性法、波前畸变探测法^[1]等多种方法^[5~8],

这些方法不同程度地存在精度不高或操作复杂的缺点。在热透镜效应研究过程中, 通过理论分析及实验验证, 对热透镜效应所产生的现象进行剖析, 提出了一种准确、简便而又能实时测量热焦距的方法。

2 端面抽运晶体的热效应理论

2.1 光程差分析

分析晶体的热透镜现象, 必须首先分析晶体中的热分布。通过对泊松(Poisson)方程的求解, 可以得到激光棒中温度沿径向的分布公式^[1]

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-06-16

作者简介: 项震(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光器及激光探测方面的研究。E-mail: xiangzhen@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jianhong@zju.edu.cn

$$\Delta T(r, z) = T(r, z) - T(r_0, z) = \begin{cases} \frac{P_h}{4\pi K_c} \frac{\alpha \exp(-\alpha z)}{\eta_a} \left[1 - \frac{r^2}{\omega_{p0}^2} + \ln\left(\frac{r_0^2}{\omega_{p0}^2}\right) \right], & 0 < r \leq \omega_{p0} \\ \frac{P_h}{4\pi K_c} \frac{\alpha \exp(-\alpha z)}{\eta_a} \left[\ln\left(\frac{r_0^2}{r^2}\right) \right], & \omega_{p0} < r < r_0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $P_h = \xi \eta_a P_{in}$ 为激光棒内的总热量, ξ 为热产生系数, P_{in} 为注入的抽运功率, K_c 为热导率, α 为晶体对抽运光的吸收系数, $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha l_0)$ 为晶体对抽运光的吸收效率, l_0 为晶体长度, r_0 为激光棒半径, ω_{p0} 为抽运光束半径。

温度的分布不均会使晶体产生折射率梯度效应、端面效应、热致双折射效应这 3 种主要的热透镜效应, 使探测光束经过晶体后, 其光程差(OPD)在激光晶体截面径向上的分布产生不均。探测光束光程差的计算公式为^[1]

$$\varphi(r) = \int_0^{l_0} \left[\frac{\partial n}{\partial T} + (n-1)(1+\mu) + n^3 \alpha_T C_{r,\theta} \right] \Delta T(r, z) dz. \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式即可得到光程差在晶体截面上的分布公式

$$\varphi(r) = \begin{cases} \frac{P_h}{4\pi K_c} \left[\frac{\partial n}{\partial T} + (n-1)(1+\mu) \alpha_T + n^3 \alpha_T C_{r,\theta} \right] \left[1 + \ln\left(\frac{r_0^2}{\omega_{p0}^2}\right) - \frac{r^2}{\omega_{p0}^2} \right], & 0 < r \leq \omega_{p0} \\ \frac{P_h}{4\pi K_c} \left[\frac{\partial n}{\partial T} + (n-1)(1+\mu) \alpha_T + n^3 \alpha_T C_{r,\theta} \right] (2 \ln r_0 - 2 \ln r), & \omega_{p0} < r < r_0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中 n 为晶体折射率, μ 为泊松比, α_T 为晶体热膨胀系数, $C_{r,\theta}$ 为激光棒在径向和切向方向上的光弹系数, $\partial n / \partial T$ 为热光系数。

依据(3)式做出光程差随半径的变化曲线, 可清晰表示光束通过晶体后, 其光程差在激光晶体横截面上的分布情况, 如图 1 所示。

由(1)式及图 1 可以看出, 在激光棒半径 $0 < r < \omega_{p0}$ 区域, 光程差是成二次曲线分布的, 而在 $\omega_{p0} < r < r_0$ 区域, 光程差成对数函数分布。热透镜对通过两个区域的光线会产生不同的透镜效应。

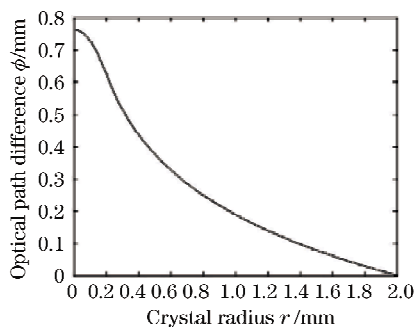


图 1 光线通过晶体产生的光程差随晶体半径的变化曲线

Fig. 1 OPD distribution on the cross section of laser crystal

2.2 热透镜焦距的计算

光程差曲线为分段函数, 因此也可以得出如下形式的光程差表达式

$$\varphi(r) = \begin{cases} \varphi_1(r) = ar^2 + b, & 0 < r \leq \omega_{p0} \\ \varphi_2(r) = c \ln r + d, & \omega_{p0} < r < r_0 \end{cases}, \quad (4)$$

通过已有的热焦距公式^[1]

$$f_T = -\frac{r^2}{\varphi(r) - \varphi(0)}, \quad (5)$$

可以得到

$$f_T(r) = \begin{cases} -\frac{1}{a}, & 0 < r \leq \omega_{p0} \\ -\frac{r^2}{c \ln r + d - b}, & \omega_{p0} < r < r_0 \end{cases}. \quad (6)$$

可以看出, r 值所取区域不同, 热透镜焦距也表现为不同的形式。半径 $r < \omega_{p0}$ 区域内热焦距为常数, 热透镜也可以等效为一个薄透镜, 而在 $\omega_{p0} < r < r_0$ 区域, 热焦距是随半径变化的函数。

3 实验装置及结果

3.1 实验装置

实验装置如图 2 所示, 使用波长 808 nm 的半导体激光对 Nd:GdVO₄ 晶体进行端面抽运, 晶体中抽

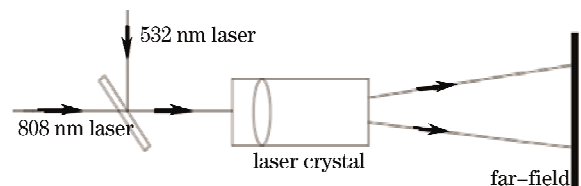


图 2 测量热焦距的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for measuring the focal length of thermal lens

运光束的束腰半径为 0.2 mm。使用 532 nm 激光作为探测光束,通过晶体后,观察远场图像。实验中得到的图像如图 3 所示,远场图像为一圈圈的同心亮环。随着抽运功率的增加,光环数量增多,整体半径增大,且中心有明显的条纹吞吐现象。

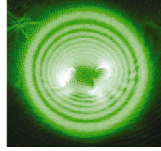


图 3 抽运功率 30 W 时的远场图像

Fig. 3 Far-field image with 30 W pump power

3.2 实验现象解释

经过晶体后,探测光束的光程差分布发生变化,光束的传播方向也随之发生改变。为了分析光线经过晶体后其传播方向的变化,做出图 1 中光程差曲线的法线斜率随激光晶体半径的变化曲线(如图 4

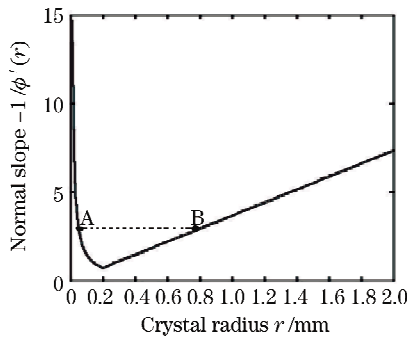


图 4 光程差曲线的法线斜率随激光晶体半径的变化曲线

Fig. 4 Normal slope of OPD versus the radius of laser crystal

所示)。

在图 4 中可找到一系列的点,其特点如下:在 $r < w_{p0}$ 区域内的 A 点,在 $w_{p0} < r < r_0$ 区域会找到一个 B 点与之对应, A, B 两点光程差为波长的整数倍,且法线方向一致。因此,在探测光束半径相对抽运光束半径较大的情况下,抽运光束半径内外的探测光束会发生传播方向一致、光程差相差为波长整数倍的情况,在远场表现为干涉增强的一组同心的光环条纹,这样就建立了一个系统模型,将其称之为光束干涉模型。

3.3 热焦距的计算

基于光线干涉模型,可得到一种新的热焦距计算方法。

将(4)式中的 a, b, c, d 视为未知数,光线沿光程差曲线的法线方向传播,利用法线斜率与远场光环的几何关系可以得到

$$-\frac{1}{\phi'_1(r)} = -\frac{1}{\phi'_2(r')} = \frac{S}{R}, \quad (7)$$

其中, R 为远场亮环的半径, r, r' 分别为 $r < w_{p0}$, $w_{p0} < r < r_0$ 区域上光线满足干涉增强的半径取值, S 为远场距离。

A, B 两点的光程差之差的表达式为

$$ar^2 + b - c \ln r' - d = l\lambda, \quad (8)$$

式中的 l 取整数,为干涉级次。

选取清晰的 3 条亮环,内环定义为 m 环,干涉级次设为 p ,另外两环与之级次相差 x, y ,设其远场半径分别为 $R_m, R_{m|x}, R_{m|y}$,代入(7)式并将求得的 r, r' 半径值代入(8)式可得

$$\begin{aligned} \frac{R_m^2}{4aS^2} + c \ln R_m + b - d - c \ln(-cS) &= p\lambda, \\ \frac{R_{m|x}^2}{4aS^2} + c \ln R_{m|x} + b - d - c \ln(-cS) &= (p+x)\lambda, \\ \frac{R_{m|y}^2}{4aS^2} + c \ln R_{m|y} + b - d - c \ln(-cS) &= (p+y)\lambda. \end{aligned} \quad (9)$$

考虑到激光输出光束半径很小,因此可以只考虑 $r < w_{p0}$ 区域的热焦距,计算(9)式,可以得到 a 的取值

$$a = \frac{1}{4S^2} \frac{(R_{m|x}^2 - R_m^2) \ln(R_{m|y}/R_m) - (R_{m|y}^2 - R_m^2) \ln(R_{m|x}/R_m)}{x\lambda \ln(R_{m|y}/R_m) - y\lambda \ln(R_{m|x}/R_m)}. \quad (10)$$

进而得到 f_T 的计算公式

$$f_T = -\frac{1}{a} = 4S^2 \frac{y\lambda \ln(R_{m|x}/R_m) - x\lambda \ln(R_{m|y}/R_m)}{(R_{m|x}^2 - R_m^2) \ln(R_{m|y}/R_m) - (R_{m|y}^2 - R_m^2) \ln(R_{m|x}/R_m)}. \quad (11)$$

如果考虑 $r = w_{p0}$ 处光程差及光程差导数连续,即 $aw_{p0}^2 + b = c \ln w_{p0} + d, 2aw_{p0} = c/w_{p0}$ 时,也可以计算出 c, b, d 的取值,在此不再累赘。

3.4 实验验证

使用谐振腔稳定性法^[1]测量热透镜焦距,选取一组输入功率值作为参考点进行理论分析及实际测

量,并将测量结果与理论分析结果作比较,做出实验结果对比图如图 5 所示。

实验结果表明,利用干涉光环计算热焦距与谐振腔稳定性法测得的热焦距值符合很好。在功率较小时相差比较大,这是因为功率小时光环不明显,光环半径测量误差较大。随着功率增大,二者趋于一致,证明了利用远场光环计算热焦距公式的可行性。

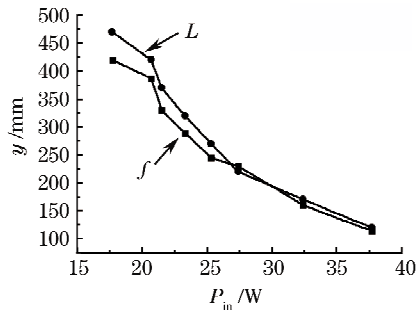


图 5 实验结果对比图。 f 为基于干涉模型得到的热焦距计算值曲线, L 为使用谐振腔稳定性法测得的热焦距曲线

Fig. 5 Experimental results figure. f is the calculated curve of thermal focal length based on interference model, L is the thermal focal length curve using the resonator stability method

4 结 论

半导体激光端面抽运状态下的激光晶体,抽运光束半径内外两个区域的热透镜效应是不相同的,只有抽运光束半径内热透镜可以等效为一个薄透镜。探测光束半径相对抽运激光半径较大的时候,通过两个区域的光束会发生干涉现象,表现在远场为一组同心亮环。通过对亮环半径的测量,可以得到比较精确的热焦距值。实验装置简单,结果精度

高,可以作为一种测量热焦距的新方法。

参 考 文 献

- 1 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007. 207~228
姚建铨,徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京:科学出版社,2007. 207~228
- 2 Zhang Shuaiyi, Huang Chunxia, Yu Guolei *et al.*. Thermal effect of laser crystal by laser diode end-pumped[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 333~337
张帅一,黄春霞,于果雷等. 激光二极管端面抽运激光晶体的热效应[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 333~337
- 3 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO₄ slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
邵杰,李小莉,冯宇彤等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 板条激光器及其热效应[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 497~501
- 4 Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd:YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646
史彭,李金平,李隆等. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 643~646
- 5 Li Bin, Li Yongda, Chen Jinqiang *et al.*. The influence of thermal-lens effect on laser beam focusing [J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(6): 44~47
李斌,李永大,陈金强等. 热透镜效应对激光光束聚焦的影响[J]. 光学仪器, 2007, **29**(6): 44~47
- 6 Zou Jing, Zhao Shengzhi, Yang Kejian *et al.*. Determining the thermal lens focus of LD end-pumped Nd:GdVO₄ solid-state with CCD detecting method [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(4): 422~428
邹晶,赵圣之,杨克建等. CCD 测量 LD 端面抽运 Nd:GdVO₄ 固体激光器热焦距[J]. 激光技术, 2006, **30**(4): 422~428
- 7 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Study on thermal lens of Nd³⁺: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. 激光二极管抽运的激光热透镜效应的研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(9): 777~781
- 8 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