

·简报·

LD 侧面泵浦固体激光棒新的热透镜焦距计算<sup>\*\*</sup>赵存华<sup>1,3\*\*</sup>, 樊仲维<sup>2,3</sup>, 王培峰<sup>1,3</sup>, 何铁英<sup>3</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院光电研究院, 北京 100085; 3. 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

**摘要:**在全固体激光器中,由于热沉积,因而产生热透镜效应。本文推导了一种半导体二极管(LD)计算侧面泵浦固体激光棒热透镜焦距的计算公式,并把它与通常使用的计算式进行了比较,发现这2个公式的曲线在基本吻合的情况下有一近似常值的差(约5~15mm)。理论分析了差异的原因,实验验证了我们推导的计算式比通常使用的计算式有更高的精度,能够更好地应用于固体激光器的设计。

**关键词:**固体激光器;热透镜;焦距

**中图分类号:** TN248.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2005)08-1004-03

## New Thermal Lens Equation of LD Side-pumped Solid-state Laser Rod

ZHAO Cun-hua<sup>1,3\*\*</sup>, FAN Zhong-wei<sup>2,3</sup>, WANG Pei-feng<sup>1,3</sup>, HE Tie-ying<sup>3</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanism and Physics, CAS, Changchun 130033, China; 2. Academy of Optoelectrics, CAS, Beijing 100085, China; 3. Beijing Guoke Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** It is unavoidable to thermal sink in all solid-state lasers. In general, the Koechner's equation is used to calculate focal length of thermal lens of diode laser side-pumped solid-state laser rod. We deduced another thermal lens equation and compared with the conventional equation. We discovered the curves of the two equations are identical and have a constant difference (approximately 5 ~ 15 mm). We theoretically analyzed the different reason, and testified experimentally that our equation was more accurate.

**Key words:** solid-state lasers; thermal lens; focal length

## 1 引言

在半导体二极管(LD)泵浦固体激光器中,激光棒内热沉积是在所难免的,它导致激光棒内温度分布不均、热应力和受热形变现象,因而产生热透镜效应<sup>[1]</sup>。为了设计出更好的固体激光器,应对固体激光棒的热沉积进行计算,以便采用相应的方法来弥补热透镜效应,如激光棒端面研磨成曲面法<sup>[2]</sup>、引入透镜

法<sup>[3]</sup>或反射镜法<sup>[4]</sup>等。因此,激光棒热透镜的计算尤其显得重要。本文就目前通用的热透镜计算式与我们推导的热透镜计算式作了深入的比较,得出我们的计算式是有更高的精度,并通过实验得以验证。

## 2 热焦距两种计算式的比较

## 2.1 第1种计算公式

通常,LD侧面泵浦固体激光棒热透镜焦距 $f_1$ 的计算式为<sup>[1]</sup>

\* 收稿日期:2004-09-03 修订日期:2005-03-21

\* 基金项目:国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2002AA311020);北京市科学技术委员会重大资助项目(H020420070110)

\*\* E-mail: zhaocunhua@yahoo.com.cn

$$f_1 = \frac{KA}{P_a} \left[ \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + C_r \cdot n_0^3 + \frac{r_0(n_0 - 1)}{L} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中:  $K$  是热导率;  $A$  是热扩散系数;  $A$  是激光棒横截面积;  $C_r$  是固体激光棒的弹光系数;  $P_a$  是棒内总热耗散热量;  $n_0$  是运行时棒心折射率;  $r_0$  是激光棒半径;  $L$  是激光棒长。

### 2.2 第 2 种计算式

激光棒在运行时,其折射率在热致温度梯度、热应力作用下按半径平方成抛物线型变化,即有<sup>[1]</sup>

$$n(r) = n_0 \left[ 1 - \frac{Q}{2K} \left( \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 C_r \right) r^2 \right] \quad (2)$$

式(2)经过改造符合梯度折射率光学公式。式(2)平方后得:

$$n^2(r) = n_0^2 (1 - \alpha r^2) \quad (3)$$

其中,

$$\alpha = \frac{Q}{n_0 K} \left( \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 C_r \right) \quad (4)$$

由于激光在运行时,端面效应的存在,则在激光棒两端面附加曲率为

$$\alpha_0 = \frac{l(r)}{r^2} = \frac{\alpha n_0 Q}{4K} \quad (5)$$

由梯度折射率光学可知<sup>[5]</sup>,两端面存在曲率  $\alpha_0$ 、 $-\alpha_0$  的梯度折射率棒,其焦距  $f_2$  为

$$f_2 = \frac{1}{2(n_0 - 1)\alpha_0 \cos(L) + n_0 \sin(L)} \quad (6)$$

其中,各参数的物理意义同(1)式。

### 2.3 两种计算式的比较

比较式(1)和式(6)确定的 LD 侧面泵浦固体激光棒热透镜计算式间的差异。选用山东中晶的规格 3 mm × 65 mm 掺杂浓度为 1.0 at % 的 Nd<sup>3+</sup>:YAG 棒。取参数  $K=0.11 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ ,  $A=7.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{K}$ ,  $C_r=0.0165$ ,  $n_0=1.82$ ,  $dn/dT=7.3 \times 10^{-6} \text{ /K}$ ,  $r_0=1.5 \text{ mm}$ ,  $L=65 \text{ mm}$ ,  $A=1.5^2$ 。用总输入功率 180 W 的 3 排 LD 做为泵浦源,经计算得图 1 所示。从图可以看出,式(1)和(6)的曲线基本上吻合,两者相差很小的常数,大概是 5~15 mm 之间。

为什么会有这种差异?由式(1)和(6)的推导方式可知,其差别是由多种因素引起的,首先,在式(1)推导过程中,对于径向梯度折射率薄板,有

$$n(r) = n_0 \left[ 1 - \frac{2r^2}{b^2} \right] \quad (7)$$

其等效焦距近似为

$$f = \frac{b^2}{2n_0 L} \quad (8)$$

其前提是相对于棒长而言,有很长的焦距。显然

式(7)、(8)是对于长厚度的 Nd<sup>3+</sup>:YAG 棒是极粗略的近似。

其次,在式(1)推导过程中,其前两项和第 3 项合成式(1)时也是近似的耦合,而不是简单的把第 3 项于分母内,而应按光焦度的合成公式,有

$$= \frac{1}{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - d} \quad (9)$$

而应用梯度折射率光学的公式刚好避免了以上 2 种近似,所以式(6)比式(1)有更高的精度。

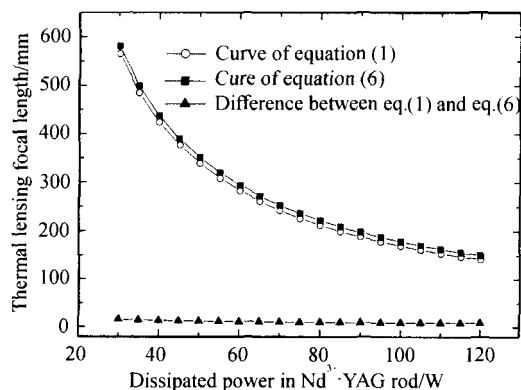


图 1 式(1)和式(6)的比较

Fig. 1 Schematics contrast between equation (1) and equations(6)

### 3 实验结果

利用临界稳定条件测量方法<sup>[6]</sup>,用平-平腔,18%的输出耦合效率,单循环水冷却,水温控制在  $20 \pm 1$  °C,电流输入为额定 25 A。用 LM-20A 激光功率计测得功率变化,进而测得其热透镜焦距为 290 mm。

在掺 Nd:YAG 激光工作物质中,热产生率为<sup>[7,8]</sup>

$$h = 1 - \eta_p \left[ (1 - \eta_a) \eta_r \frac{\lambda_p}{\lambda_f} + \eta_i \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \right] \quad (10)$$

其中:  $\eta_p$  是泵浦量子效率,它代表单泵浦光子转化为激光光子的效率;  $\eta_i$  是激光抽运效率,它是受激发射的离子数比上上能级释放的总离子数;  $\eta_r$  是辐射量子效率,它是自发发射离子数比上上能级非受激发射的离子总数;  $\lambda_p$  是泵浦光的波长;  $\lambda_l$  激光波长;  $\lambda_f$  荧光波平均波长。测量时,激光在运行状态,大于阈值不远。当远远大于阈值时,  $\eta_h = 32\%$ ,而在非运行状态时,  $\eta_h = 37 \sim 43\%$ <sup>[7]</sup>。我们取  $\eta_h = (0.32 + 0.37)/2 = 34.5\%$ 。可算出棒内总消耗热量  $P_a = 62 \text{ W}$ 。将其代入式(1)可得  $f_1 = 273.5 \text{ mm}$ ,代入式(6)可得  $f_2 = 284.2 \text{ mm}$ 。显然,实测值 290 mm 与式(6)所得值吻合较好。可以算出,式(1)的误差为 5.7%,式(6)的误差仅为 2%。

### 4 结 论

推导了计算 LD 侧面泵浦 Nd<sup>3+</sup>:YAG 热透镜焦距的公式,并把它与通常使用的热透镜计算式进行比较,发现 2 个公式基本吻合,我们的公式比通常使用的公式计算出的热透镜焦距长 5~15 mm。分析了 2 种公式存在差异的原因,得出了我们的计算公式比常用公式有更高的精度,并通过实验证明了这一结论。

#### 参考文献:

[1] Walter Koehler. Solid-State Laser Engineering[M]. Springer-Verlag:New York Inc. 1976. 352-353.

[2] CAI De-fang, WANG Shi-yu, WEN Jiang-guo, et al. Research on laser crystalline thermal effects and coolant technology[A]. Thesis of Chinese Opt-Electron Technology Confere[C]. 2000. 253-256. (in Chinese)

[3] LIU Jun-hai, LU Jian-ren, LU Jun-hua, et al. Design of resonators for high-power laser diode end-pumped CW solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Lasers (中国激

光), 2000, 27(1): 7-10. (in Chinese)

[4] Cousins A K, Scalable A. Aspherical corrective mirror for end-pumped solid-state laser[A]. SPIE[C]. 1993, 43-55.

[5] 乔亚天. 梯度折射率光学[M]. 北京:科学出版社, 1991. 293-294.

[6] LI Qiang, WANG Zhi-min, WANG Zhi-yong. A novel method for measuring thermal lens focal length of a CW high power Nd: YAG laser[J]. Journal of Optoelectronics Lasers (光电子·激光), 2004, 15(3): 263-266. (in Chinese)

[7] Fan T Y. Heat generation in Nd: YAG and Yb: YAG[J]. IEEE of Quantum Electron, 1993, 29(6): 1457-1459.

[8] Sébastien Chenais, Francois Balembois, Frederic Druon, et al. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers Part : Theoretical analysis and wavefront measurements[J]. IEEE of Quantum Electron, 2004, 40(9): 1217-1243.

#### 作者简介:

赵存华 (1975 - ), 男, 在读硕士研究生, 主要从事光学设计和全固态激光器的研究。

(上接第 999 页)

精度也完全符合要求。另外,圆检测的设定参数优化将做进一步的研究。

#### 参考文献:

[1] Daugman J. How iris recognition works[J]. IEEE Transaction on circuits and systems for video technology, 2004, 14(1): 21-30.

[2] Wildes P. Iris recognition: An emerging biometric technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(9): 1348-1363.

[3] Boles W. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1998, 46(4): 1185-1188.

[4] XUE Bai LIU Wei-yao, WANG Jir-tao, et al. Research on iris image preprocessing algorithm[J]. Journal of Optoe-

lectronics · Laser (光电子·激光), 2003, 14(7): 3-6. (in Chinese)

[5] Chen Tehchuan, Chung Kouliang. An efficient randomized algorithm for detecting circles[J]. Computer Vision and Image Understandings. 2001, 83: 172-191.

[6] Libor Masek. Recognition of human iris patterns for biometric identification [D]. Australia: School of Computer Science and Software Engineering, The University of Western Australia. 2003.

[7] HU Zheng-ping, WANG Cheng-fu, YU Lina. Iris location improved Randomized hough transform[J]. Yi Qi Yi Biao Xue Bao, 2003, 24(5): 477-479. (in Chinese)

#### 作者简介:

张鹏飞 (1974 - ), 男, 黑龙江省人, 博士研究生, 主要从事信号处理, 模式和识别研究。