

固体激光器中多块热沉夹持晶体散热时接触热导研究

刘海强 过 振 王石语 林 林 李兵斌 蔡德芳

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 采用圆棒状工作物质的固体激光器中,通常用 2 块带有半圆型凹槽的金属热沉夹持晶体散热。装配压强在晶体与热沉接触面上的不均匀分布,造成二者间接触热导沿圆周变化,在晶体中产生非轴对称的温度分布。提出采用 3 块或 4 块热沉夹持圆棒晶体散热,利用截断高斯模型和塑性形变模型计算晶体与热沉间接触热导,建立了接触散热模型,并用有限元法得到晶体温度分布。结果表明,2 块热沉夹持圆棒晶体散热时,晶体侧面压强、接触热导沿圆周变化明显,在热沉凹槽底部达到最大,在 2 块热沉结合面处为零,晶体端面温度沿周向变化较大。采用 3 块热沉时,晶体侧面压强、接触热导及温度分布的周向均匀性提高,端面中心温度降低,采用 4 块热沉时,晶体侧面压强、接触热导及温度分布的周向均匀性最好,端面中心温度最低。

关键词 激光器;固体激光器;有限元法;接触热导;热效应

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0502006

Research on Thermal Contact Conductance Using Multi-Piece Heat Sink to Hold Crystal and Dissipate Heat in Solid-State Laser

Liu Haiqiang Guo Zhen Wang Shiyu Lin Lin Li Bingbin Cai Defang

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract A pair of metal heat sinks with half-round groove is always used to hold the crystal rod and dissipate heat in solid-state lasers working with round-rod material. The nonuniformly distributing of assembling pressure on the contact surfaces of the crystal rod and heat sinks makes the thermal contact conductance change along the circumference direction, and causes distribution of temperature inside the crystal rod non-axisymmetric. Two methods of using three or four heat sinks to hold the crystal rod are presented. The relationship between thermal contact conductance and assembly pressure is discussed using the truncated-Gaussian model and the plastic-deformation model. Distributions of the temperature inside the crystal are obtained by the finite element method based on the contact heat-dissipating model. The results show that the pressure and the thermal contact conductance on the side-face of the crystal change obviously along the circumference direction when using a pair of metal heat sinks, which reach maximum in the bottoms of the sink grooves and minimum in the joining directions of the surfaces of heat sinks. And the end-face temperature of the crystal changes largely along the circumference direction. In the method of using three heat sinks, the uniformity of pressure, thermal contact conductance and temperature distribution inside the crystal are greatly improved, and central value of the end-face temperature is reduced. When using four heat sinks, the result is the best and the central end-face temperature is the lowest.

Key words lasers; solid-state laser; finite element method; thermal contact conductance; thermal effect

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3580; 140.6810

1 引 言

自从 1960 年梅曼发明世界上第一台激光器以来,固体激光器在军事、加工、医疗以及科研等领域

获得了广泛的应用。在此期间,人们做了大量的研究工作来提高固体激光器光束质量和输出功率等指标,对其热效应的研究就是其中很重要的一个方

收稿日期: 2010-12-31; **收到修改稿日期**: 2011-01-24

作者简介: 刘海强(1983—),男,博士研究生,主要从事激光二极管抽运固体激光器热效应方面的研究。

E-mail: liuhaiqiang001@163.com

导师简介: 过 振(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: zhguo@xidian.edu.cn

面^[1~5]。传统的固体激光器一般采用圆柱状掺杂晶体作为工作物质,由两块带有半圆型凹槽的金属热沉夹持,通过水流或热电制冷(TEC)的方式带走工作物质中的热耗。由于晶体棒和热沉的接触面具有一定的粗糙度,二者间的接触热导^[6~8]是有限的,具有不均匀的分布,影响了激光晶体的散热及其热效应。本文以激光二极管(LD)端面抽运固体激光器为例,研究了采用多块热沉夹持圆棒晶体散热时晶体棒与热沉间的接触热导,采用有限元软件计算了3种方式下晶体的温度场分布。研究结果对于固体激光器热效应、散热元件的设计及接触热导的研究具有重要的参考价值。

2 多块热沉夹持激光晶体散热模型

2.1 粗糙表面模型

实际中存在的表面,都不是绝对平整光滑的,而具有形状误差、表面波纹度和表面粗糙度等因素。图1为粗糙表面轮廓图。大量研究表明对于通常机械加工表面,轮廓微凸体高度服从高斯分布^[6~8]。图1中 x 为轮廓取样方向, $h(x)$ 为 x 处的轮廓高

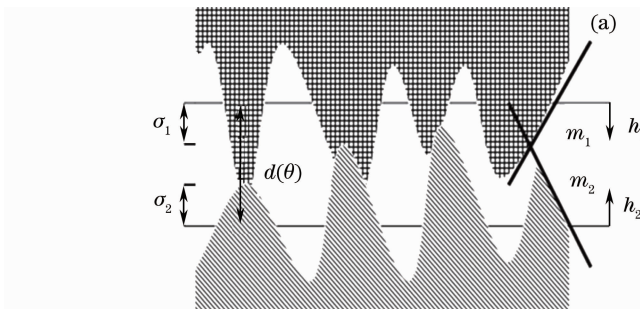


图2 (a)粗糙表面接触模型和(b)等效后的粗糙表面接触模型

Fig. 2 (a) Contact models of rough surface and (b) equivalent rough-smooth surface

度,常常将硬度相对较大的接触面看成刚性光滑平面,硬度相对较小的接触面看成粗糙面,形成等效粗糙-刚性光滑接触面模型如图2(b)所示。等效均方根粗糙度 σ 、等效平均绝对值斜率 m 的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}. \quad (3)$$

2.2 激光晶体的3种夹持方式

以LD端面抽运Nd:YAG激光器为例,圆棒状的激光晶体常常采用两块金属热沉夹持散热,并通过紧固螺栓或顶丝结合在一起如图3(a)所示。由于晶体棒侧面受到不均匀的径向装配压力,晶体与热沉接触面的压强在与热沉凹槽底部接触处最大,在2块热沉结合面处降到最小值零。为了改善压强在晶体侧面分布的均匀性,设计使用3块、4块热沉

度, $\Phi(h)$ 可表示为

$$\Phi(h) = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp[-h^2/(2\sigma^2)]. \quad (1)$$

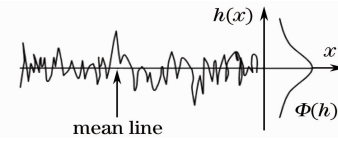


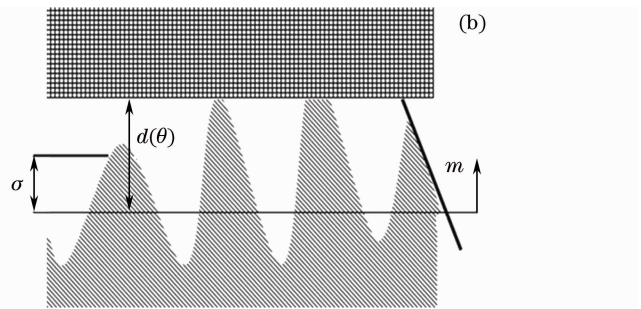
图1 高斯型粗糙面轮廓

Fig. 1 Gaussian profile of rough surface

具有一定粗糙度的两个表面相互接触时,只在某些微观点处发生接触,其余部分被空气填充,如图2(a)所示。表面1($i=1$ 为晶体棒)和表面2($i=2$ 为热沉)的结构参数 h_i 、 σ_i 、 m_i 分别为轮廓高度、轮廓均方根粗糙度、轮廓平均绝对值斜率, h_i 可通过粗糙度测量仪器测量得到, σ_i 和 m_i 的计算公式为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l h_i^2(x) dx}, \quad m_i = \frac{1}{l} \int_0^l \left| \frac{d(\theta)h_i(x)}{dx} \right| dx, \quad (2)$$

式中 l 为粗糙度测量仪器的采样长度, $d(\theta)$ 为接触面间的平均间隙厚度。



来夹持晶体散热,如图3(b)、(c)所示。3种夹持方式中,晶体棒受单块热沉夹持时的名义受力面积分别为 $S_1 = 2RL$, $S_2 = \sqrt{3}RL$, $S_3 = \sqrt{2}RL$,顶丝的装配压力分别为 F , $\sqrt{3}F/2$, $\sqrt{2}F/2$,则晶体棒受到侧面压强的最大值相等,其中 $R = 2 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ mm}$ 为晶体半径和晶体长度。若在两块热沉的结合面处方向角 θ 为0,3种装配方式下晶体棒侧面受到单块热沉的装配压强分别为

$$\begin{cases} p_1(\theta) = F/S_1 |\sin \theta| & (\theta \in [0, \pi]) \\ p_2(\theta) = (\sqrt{3}F/2)/S_2 |\sin(\theta + \pi/6)| & (\theta \in [0, 2\pi/3]) \\ p_3(\theta) = (\sqrt{2}F/2)/S_3 |\sin(\theta + \pi/4)| & (\theta \in [0, \pi/2]) \end{cases} \quad (4)$$

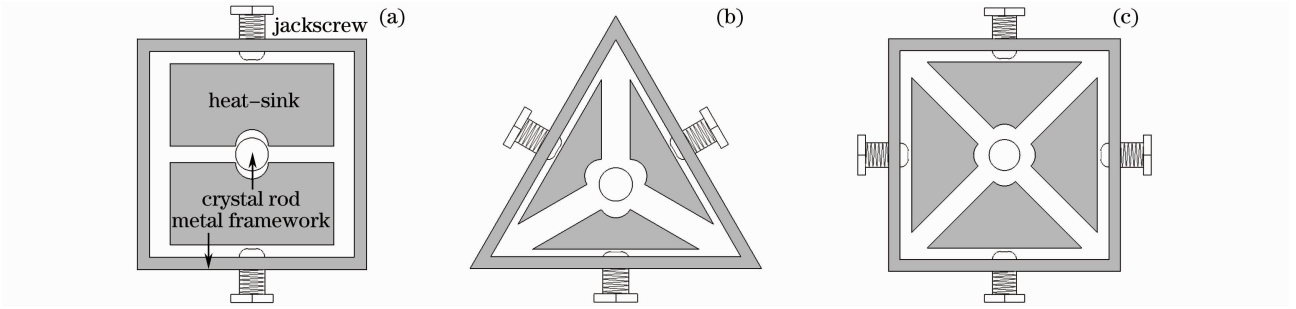


图3 激光晶体的3种夹持方式。(a)采用2块热沉夹持晶体,(b)采用3块热沉夹持晶体,(c)采用4块热沉夹持晶体
Fig. 3 Three methods for holding crystal rod. (a) using two heat sinks, (b) using three heat sinks,

(c) using four heat sinks

2.3 接触热导模型

实际装配过程中,常常在晶体棒与热沉间夹一薄层热界面物质,致使晶体棒与热沉间多了一层接触热阻。当晶体棒与热沉的均方根粗糙度非常小时,可以用热沉直接夹持晶体棒,如图3所示。忽略掉间隙气体的传导、对流及辐射,只在两个粗糙面的微观接触点处存在热传导作用。粗糙面为(1)式高斯模型的截断模型,取无量纲截断高度 z_i 的值3,用塑性形变模型计算接触热导 $h_c(\theta)$ 的计算公式为^[7]

$$h_c(\theta) = \frac{2k_s n(\theta) a(\theta)}{[1 - \sqrt{p(\theta)/H_{mic}}]^{3/2}}, \quad (5)$$

式中

$$n(\theta) = \frac{1}{16} \left(\frac{m}{\sigma} \right)^2 \frac{\exp[-\lambda^2(\theta)]}{\operatorname{erfc}[\lambda(\theta)/\sqrt{2}]}, \quad (6)$$

$$a(\theta) = \sqrt{1 - \frac{\operatorname{erfc}(z_i/\sqrt{2})}{\operatorname{erfc}[\lambda(\theta)/\sqrt{2}]} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{\sigma}{m}} \times \exp\left[\frac{\lambda^2(\theta)}{2}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{\lambda(\theta)}{\sqrt{2}}\right], \quad (7)$$

$$\lambda(\theta) = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}\left[\frac{2p(\theta)}{H_{mic}} + \operatorname{erfc}\left(\frac{z_i}{\sqrt{2}}\right)\right], \quad (8)$$

$n(\theta)$, $a(\theta)$, $\lambda(\theta)$ 分别为方向角 θ 处单位名义接触面积上微观接触点密度、接触点平均半径、接触表面间无量纲平均分割距离。Nd:YAG晶体的热导率 $k_1 = 14 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,热沉的热导率 $k_2 = 140 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, $k_s = 2k_1 k_2 / (k_1 + k_2)$ 。平均间隙厚度 $d(\theta)$ 的计算公式为 $d(\theta) = \lambda(\theta)\sigma$ 。 H_{mic} 为铝合金热沉维氏硬度,其值60 HV等效为600 MPa,等效轮廓均方根粗糙度和轮廓平均绝对值斜率分别为 $2 \mu\text{m}$ 和0.12。

计算过程中可以用公式来代替余误差函数 $\operatorname{erfc}(x)$ 的反函数 $\operatorname{erfc}^{-1}(x)$,进而得到 $\operatorname{erfc}(x)$ 的代替式,在 $10^{-9} \leq x \leq 1.9$ 范围内的最大相对误差小于2.8%^[8]。其代替式为

$$\operatorname{erfc}^{-1}(x) = \begin{cases} \frac{1}{0.218 + 0.735x^{0.173}} & (10^{-9} \leq x \leq 0.02) \\ \frac{1.05(0.175)^x}{x^{0.12}} & (0.02 \leq x \leq 0.5) \\ \frac{1-x}{0.707 + 0.862x - 0.431x^2} & (0.5 \leq x \leq 1.9) \end{cases} \quad (9)$$

2.4 晶体中的热传导方程

3种夹持方式下,通过循环水流或TEC的方法使热沉温度为 20°C ,晶体棒与热沉间存在接触热导。端面抽运时,晶体棒内部热耗分布为^[9]

$$q_v(r, \theta, z) = \frac{2p_{in}\eta\alpha}{\pi\omega_p^2} [1 - \exp(-\alpha L)] \times \exp(-2r^2/\omega_p^2) \exp(-\alpha z), \quad (10)$$

式中 p_{in} 、 η 、 α 、 ω_p 分别为抽运功率、量子效率、晶体对抽运光吸收系数、抽运光半径,其取值分别为:20 W, 0.241, 0.5 mm, 0.4 mm。激光晶体内部的温度分布 $T(r, \theta, z)$ 遵循泊松热传导方程

$$\frac{\partial T(r, \theta, z)}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \theta, z)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(r, \theta, z)}{\partial^2 \theta} + \frac{\partial^2 T(r, \theta, z)}{\partial^2 z} = -\frac{q_v(r, \theta, z)}{k_1}. \quad (11)$$

由于空气的对流换热系数十分小,且晶体端面面积远小于侧面面积,认为晶体端面绝热,定义边界条件为

$$\frac{\partial T(r, \theta, z)}{\partial z} \Big|_{z=0, L} = 0. \quad (12)$$

3 模拟结果

3.1 晶体侧面的压强

按照图3的装配结构,方法一、二、三分别采用2块、3块、4块热沉来夹持圆棒激光晶体散热,根据(4)式来计算晶体棒侧面的装配压强分布,如图4所

示。当 F 为 100 N, 采用 2 块热沉时, 在晶体侧面方向角 θ 为 0 处达到最小压强 0, 方向角 θ 为 $\pi/2$ 处达到最大压强 2.5 MPa; 采用 3 块热沉时, 在晶体侧面方向角 θ 为 0 处达到最小压强 1.25 MPa, 方向角 θ 为 $\pi/3$ 处达到最大压强 2.5 MPa; 采用 4 块热沉时, 在晶体侧面方向角 θ 为 0 处达到最小压强 1.77 MPa, 方向角 θ 为 $\pi/4$ 处达到最大压强 2.5 MPa。

从图 4 可以看出, 相对于 2 块热沉, 采用 3 块和 4 块热沉夹持圆棒晶体散热时, 晶体棒侧面压强不存在为 0 的点, 在圆周上分布 3 个和 4 个周期, 均匀性得到改善。

3.2 接触热导计算结果

晶体棒侧面存在如图 4 中的压强分布, 根据 (5)~(8) 式来计算晶体棒与热沉间的接触热导, 如图 5 所示。采用 2 块热沉时, 接触热导在晶体侧面 θ 为 0 处达到最小值 0, 在 θ 为 $\pi/2$ 处达到最大值

$1.130 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 采用 3 块热沉时, 接触热导在 θ 为 0 处达到最小值 $0.695 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, θ 为 $\pi/3$ 处达到最大值 $1.130 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 采用 4 块热沉时, 接触热导在 θ 为 0 处达到最小值 $0.885 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, θ 为 $\pi/4$ 处达到最大值 $1.130 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

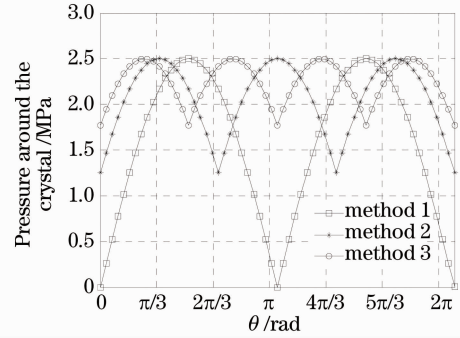


图 4 晶体棒与热沉间压强沿周向的变化
Fig. 4 Change of pressure along the circumference direction

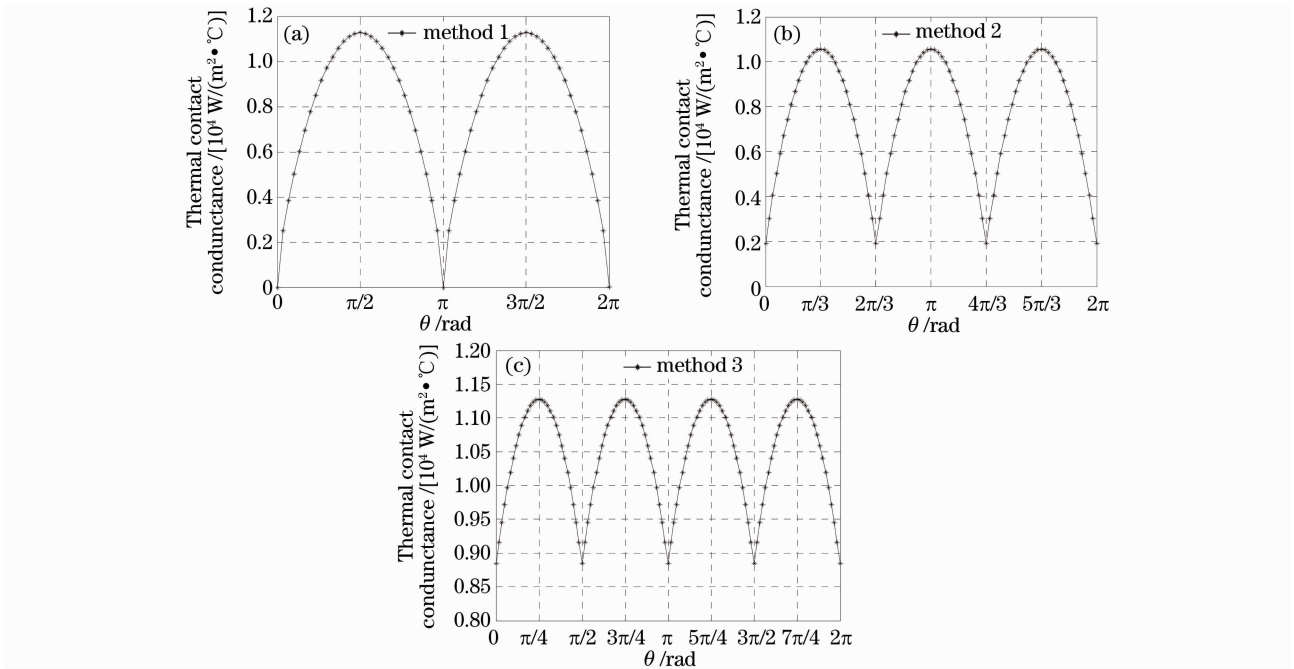


图 5 晶体棒与热沉间的接触热导沿周向的变化。(a)采用 2 块热沉夹持晶体,(b)采用 3 块热沉夹持晶体,(c)采用 4 块热沉夹持晶体

Fig. 5 Change of thermal contact conductance between the crystal and the heat-sink along the circumference direction. (a) using two heat sinks, (b) using three heat sinks, (c) using four heat sinks

与晶体棒侧面压强的分布相似, 采用 3 块和 4 块热沉夹持晶体时, 晶体与热沉间接触热导的最小值远大于 0, 最大值均为 $1.130 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 在圆周上分别存在 3 个和 4 个周期, 且分布比较均匀, 如图 5(b), (c) 所示。

3.3 晶体端面温度分布

当热沉温度为 20°C 时, 晶体中存在热耗 $q_v(r, \theta, z)$, 在晶体棒与热沉间分别施加图 5(a)~(c) 中的接触热导, 用有限元软件 ANSYS 求解热传导方程得到晶体中的温度分布。对于 LD 端面抽运

的固体激光器,热效应主要集中在端面附近,图 6(a)~(c)给出了 3 种方式下端面温度的分布,

可以看出端面温度呈非轴对称分布,中心温度依次降低,分别为 78.8 °C,76.2 °C,75.5 °C。

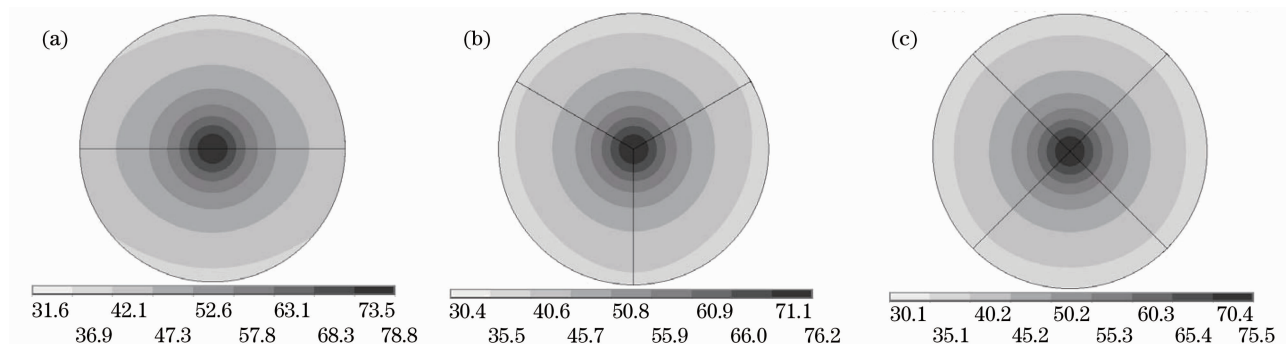


图 6 晶体棒端面温度沿周向和半径的变化。(a)采用 2 块热沉夹持晶体,(b)采用 3 块热沉夹持晶体,(c)采用 4 块热沉夹持晶体

Fig. 6 Change of the end-face temperatures along the circumference direction and radial direction (a) using two heat sinks, (b) using three heat sinks, (c) using four heat sinks

为了比较 3 种夹持方式下晶体棒温度分布的均匀性,图 7 给出了半径为 2 mm 处端面温度沿周向的变化,3 种方式下最低温和最高温的差值分别为 5.670 °C,1.310 °C,0.551 °C。可以看出,采用 2 块热沉夹持时,晶体棒温度沿圆周方向发生明显变化,采用 3 块热沉时,均匀性提高,采用 4 块热沉时,晶体棒温度沿周向分布最均匀。

侧面的压强、接触热导及端面温度沿圆周方向的变化幅度较大,压强和接触热导存在零值,晶体棒温度整体偏高。采用 3 块热沉时,晶体棒侧面的压强、接触热导及晶体中的温度分布沿周向的均匀性得到改善,端面中心温度降低;采用 4 块热沉夹持晶体时,晶体侧面压强、接触热导及温度分布沿周向变化很小,端面中心温度最低。

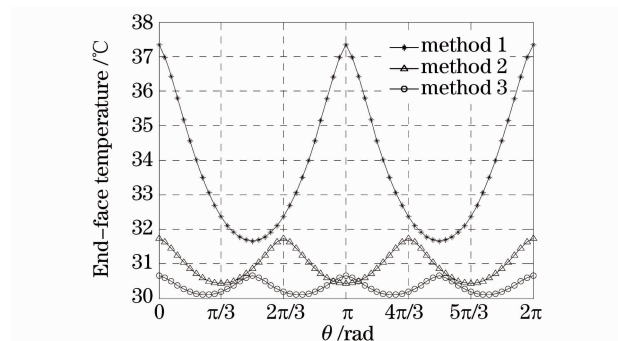


图 7 半径为 2 mm 处端面温度沿周向的变化

Fig. 7 Change of the end-face temperature along the circumference direction when $r=2$ mm

4 结 论

以 LD 端面抽运 Nd:YAG 激光器为例,分析了采用 2 块金属热沉夹持圆棒状激光晶体散热时,装配压强、晶体棒与热沉间的接触热导在晶体侧面的不均匀分布,计算了此状态下晶体棒中的温度分布。针对采用 2 块热沉夹持晶体时的散热不均问题,提出采用 3 块、4 块热沉来夹持晶体散热,计算了这两种状态下晶体棒侧面压强、接触热导及晶体中的温度分布,并与采用两块热沉时的结果做了比较。研究发现,采用 2 块热沉夹持圆棒晶体散热时,晶体棒

参 考 文 献

- Zhu Guangzhi, Zhu Xiao, Zhu Changhong *et al.*. Thermal effect study of LD edge-pumped slab lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 37~42
朱广志,朱 晓,朱长虹等. LD 侧边抽运板条激光器的热效应[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 37~42
- Yang Hao, Zhang Yinke, He Yanping. Thermal effect of end-pumped laser crystal with circular cross-section[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 49~53
杨 浩,张引科,贺艳平. 激光二极管端面抽运圆截面激光晶体的热效应[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 49~53
- Li Jian, Chen Feng, Zhang Haijuan *et al.*. Research of quasi-three-level thermal effect of laser-diode-pumped Nd:YAG crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2404~2408
李 健,陈 锋,张海娟等. 激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体准三能级的热效应研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2404~2408
- Song Xiaolu, Guo Zhen, Li Bingbin *et al.*. Influences of heat-dissipation methods on thermal distortion of laser rods[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 351~357
宋小鹿,过 振,李兵斌等. 散热方式对激光晶体热畸变效应的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 351~357
- Guan Jun, Li Jinping, Cheng Guanghua *et al.*. Experimental study on thermal lensing of end-pumped solid-state lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1804~1809
关 俊,李金萍,程光华等. 端面抽运固体激光器热透镜效应的实验研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(6): 1804~1809
- M. Grujicic, C. L. Zhao, E. C. Dusel. The effect of thermal contact resistance on heat management in the electronic packaging[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **246**(1-3): 290~302
- F. H. Milanez, M. M. Yovanovich, J. R. Culham. Effect of surface asperity truncation on thermal contact conductance[J].

IEEE Trans. Compon. Pack. Technol., 2003, **26**(1): 48~54
8 M. Bahrami, M. M. Yovanovich, J. R. Culham. Thermal joint
resistances of conforming rough surfaces with gas-filled gaps[J].
J. Thermophys. Heat Transfer, 2004, **18**(3): 318~325
9 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear

Optical Frequency Conversion Technology[M]. Beijing: Science
Press, 2007. 185~216
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. 185~216