

文章编号:1001-5078(2007)08-0731-04

LDA 侧面泵浦固体激光器介质瞬态温升过程分析

岱 钦^{1,2}, 李新忠^{1,2}, 王希军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130031;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:根据二极管泵浦光强分布特性, 考虑固体激光材料物性参数的温度相关性, 建立了二极管侧面泵浦固体激光介质内热源分布的数值模型, 从热传导方程入手, 针对三角均布侧泵结构, 采用有限元方法计算分析了激光棒内瞬态温升过程以及稳态温度分布情况。讨论了泵浦及冷却参数对瞬态温升过程及激光棒内温度梯度的影响。分析结果可为二极管泵浦固体激光器的优化设计提供参考。

关键词:热效应; 固体激光器; 有限元分析; 侧面泵浦

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

Analysis of Temperature Rise in LDA Side Pumped Solid State Laser Rod

DAI Qin^{1,2}, LI Xin-zhong^{1,2}, WANG Xi-jun¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The numerical model of thermal distribution in diode side-pumped solid state laser crystal is set up according to the diode pumped light intensity distribution. Starting with the heat conductivity equation, the transient and steady state temperature distribution of the laser crystal in symmetrical trigonal pumping design is simulated using finite element analysis method. The influence of the pumping and cooling parameters on the temperature gradient in laser crystal is discussed. This study is helpful to optimize the design of the diode side pumped solid state lasers.

Key words: thermal effect; solid state lasers; finite element analysis; side pumped

1 引 言

激光二极管(LD)相对于传统的闪光灯而言, 由于其辐射光谱和固体激光介质的吸收光谱能够很好地匹配, 使二极管泵浦固体激光介质的热效应大大降低。但对于高功率运转条件的二极管泵浦固体激光器来说, 热效应仍然是设计中的主要问题。激光器运转时, 介质会吸收一部分泵浦光能量而发热, 同时又因外部冷却使热扩散, 在介质内形成一定的温度梯度。这种非均匀温度场及相应的热聚焦作用,

影响激光光束质量和激光功率的提高。并且, 固体激光材料的物理特性参数具有温度相关性, 这也将影响到固体激光介质温度和热应力分布。因此, 激光器的热效应控制已经成为国内外研究高功率固体激光器的热点问题之一^[1-4]。

基金项目: 应用光学国家重点实验室应用光学基金(No. DA04Q05)。

作者简介: 岱 钦(1977-), 男, 在读博士研究生, 研究方向为大功率固体激光技术。E-mail: bdaiqin@163.com

收稿日期: 2007-01-26; **修订日期:** 2007-02-07

文中针对三角均布侧面泵浦 Nd:YAG 棒状激光器,考虑激光介质物性参数的温度相关性,采用有限元方法,模拟计算了激光介质内瞬态温升过程,分析了泵浦结构和冷却参数对温升过程及稳态温度分布的影响。分析结果为高功率二极管泵浦固体激光器优化设计提供参考。

2 晶体内的热分布和热传导模型

2.1 泵浦光强分布

对于闪光灯泵浦固体激光器,泵浦光通过优化的聚光腔到达激光介质表面,被认为是均匀分布或近似均匀分布的^[5-6]。在这种情况下,热负载均匀分布于激光介质中的近似下进行热效应分析是合理的。但对于二极管(LD)泵浦固体激光器来说,泵浦光强的空间分布为高斯型。所以激光介质中热负载分布用高斯函数来近似更能符合 LDA 泵浦固体激光器的实际情况。

要精确计算激光介质内的温度分布,有很多复杂因素,因此有必要对物理模型进行简化,提出两点假设:

(1) LDA 侧面泵浦固体激光器中泵浦光沿光轴(z 轴)方向均匀分布。通常采用多个 LDA 直线排列方式工作,形成条状阵列,相邻间距离很小,且泵浦光束在 z 轴方向上相互重叠。

(2) 忽略激光棒两个端面与空气对流的边界条件。从晶体侧面热传导流出的热量远大于两端面和空气热交换流出的热量,故可忽略从两端面流出的热量,假设晶体两端面绝热。

单向侧面泵浦激光棒截面如图1所示。

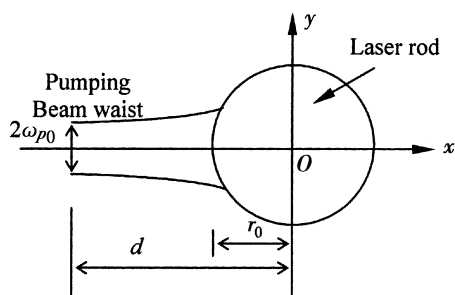


图1 单向侧面泵浦时 Nd:YAG 晶体横截面示意图

假设泵浦功率为高斯分布,泵浦光腰位置在 $(-d, 0)$,泵浦光强分布为^[7]:

$$I(x, y) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{I_0}{\omega_p^2} \exp\left(-\frac{2y^2}{\omega_p^2}\right) \quad (1)$$

式中, I_0 为沿晶体轴向单位长度的泵浦光强; ω_p 为泵浦光束半径; α 为晶体吸收系数。有关系式

$$\omega_p^2 = \omega_{p0}^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda_p (x-d)}{\pi \omega_{p0}^2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, ω_{p0} 为泵浦光腰半径; λ_p 为泵浦光波长。

将式(2)代入式(1)即可得到单向侧面泵浦光强分布。不同侧面的泵浦光强表达式可以通过旋转坐标得到。

2.2 热传导方程与温度分布

在各向同性介质中,热传导方程可表示为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q \quad (3)$$

其中, ρ 为介质密度; c 为介质比热; t 为时间; K 为介质的热传导率; Q 为热源强度。一般而言,晶体中的热源主要来源于激光跃迁的量子缺陷(quantum defect)^[8]。假设棒内热源只有激光内跃迁损耗,那么,不考虑热效应引起泵浦光束变化的情况下,热源分布表示为:

$$Q(x, y) = \eta \frac{\Delta I_{ab}(x, y)}{\Delta l} \quad (4)$$

式中, η 为吸收泵浦能量中转化为热的比值; Δl 为泵浦光通过晶体的距离。 ΔI_{ab} 为泵浦光在激光棒内经过一段距离 Δl 被介质吸收的光能,有:

$$\Delta I_{ab} = I_i (1 - e^{-a \Delta l}) \quad (5)$$

激光棒侧面和冷却液之间边界满足牛顿冷却条件,表示为:

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_0} = \frac{h}{K} [T_c - T(r_0)] \quad (6)$$

式中, h 为冷却液与激光棒表面之间的对流换热系数,它与冷却介质的性质、流量、有效流通面积等因素有关^[9]; T_c 为冷却液温度。

2.3 YAG 物性参数的温度相关性

YAG 激光材料的物性参数中的热传导率和热膨胀系数随温度的变化较明显。相比之下,其泊松比和杨氏模量对温度的依赖较小,在 140 ~ 298K 温度范围内,它们的变化分别小于 7% 和 2%^[10]。

Nd:YAG 激光介质热传导率 K 与温度有如下函数关系式^[10]:

$$K(T) = \frac{a}{(\ln(bT))^c} - \frac{d}{T} \quad (7)$$

其中, a, b, c, d 分别为常数: $a = 1.9 \times 10^6 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$;

$b = 5.33 \text{ K}^{-1}$; $c = 7.14$; $d = 331 \text{ W/cm}$ 。

3 模拟结果及分析

采用三角均布侧泵结构,即二极管从三个等角距方向侧面泵浦介质。运用有限元方法对 Nd:YAG 棒进行瞬态温度场的模拟。 η 取 0.5,吸收系数 $\alpha = 3.5 \text{ cm}^{-1}$,初始温度为 20°C , $T_c = 18^\circ\text{C}$ 。计算采用的 Nd:YAG 晶体的基本参数见参考文献[9]。

图 2 显示了在到达稳态的过程中,不同时刻、棒截面内沿 x 轴温度分布情况。可以看出,棒中心区域温升较快,表面温升较慢。达到稳态后(如图 3 所示),形成了中心温度高,表面温度低的分布。并且,由于考虑了 YAG 热传导率的温度相关性,由式(7)可看出,激光棒热传导率也将形成棒中心小、表面大的分布,最终将导致棒中心温度值比激光棒热传导率看作常数时计算的棒中心温度值略高。泵浦越强,激光棒中心温差会越明显。

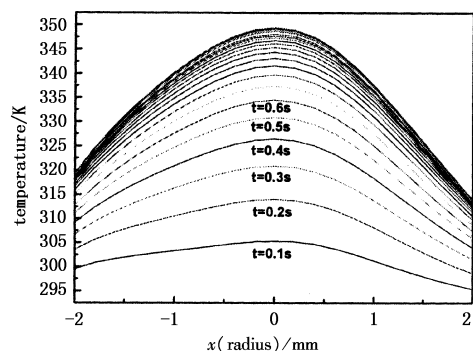


图 2 激光棒截面内瞬态温度分布

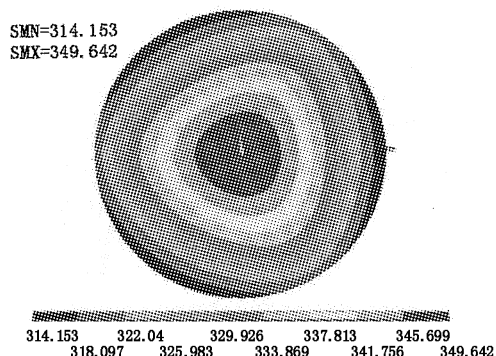


图 3 激光棒截面内稳态温度场的分布情况

3.1 界面对流交换系数对棒内温度分布的影响

图 4 和图 5 分别为对流换热系数取 $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 及 $3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 情况下计算的升温

和稳态温度分布图。可以看出,激光棒中心点温度达到稳态所需时间随着对流换热系数的增大而变短,分别为 2.02 s , 1.38 s 和 1.06 s (见图 4)。并且,当提高棒表面的对流换热系数,稳态情况下的棒整体温度得到了有效的降低。但是棒截面温度梯度几乎没有改变。可见,改变对流换热系数只是改变了棒整体温度,并不影响棒内温度场分布的均匀性。

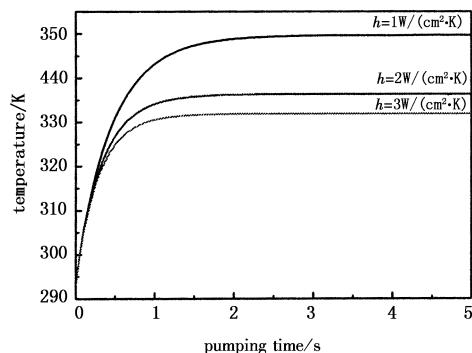


图 4 不同冷却条件下激光棒中心点的瞬态温升过程

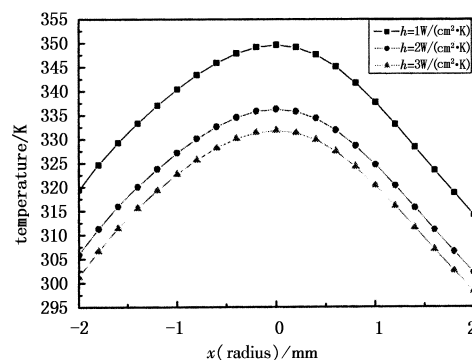


图 5 不同冷却条件下激光棒内沿 x 轴稳态温度场分布

3.2 泵浦功率对棒内温度分布的影响

图 6 和图 7 显示了不同输入功率下棒内中心点处的温升过程以及激光棒横截面内稳态温度分布情况。由图 6 可知,泵浦功率不同时,激光棒中心温度达到稳态所需的上升时间基本保持不变。但是泵浦功率对激光棒稳态温度分布有较大影响,由图 7 可

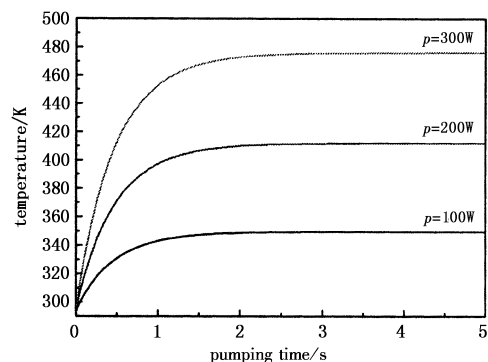


图 6 泵浦功率不同时激光棒中心点的瞬态温升过程

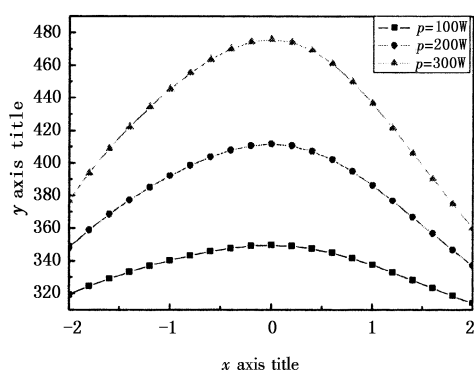


图7 泵浦功率不同时激光棒截面内沿 x 轴稳态温度分布

看出,泵浦功率越大,激光棒截面内中心与表面的温度差、温度梯度越大。由于激光晶体折射率依赖于温度,故温度梯度导致折射率梯度,使通过的激光束发生会聚,即产生热透镜效应。显然随着泵浦功率的增大,激光晶体热透镜效应会变得越来越严重。

3.3 泵浦距离对棒内温度分布的影响

泵浦光腰到棒中心距离 d 分别取2.5mm, 5mm, 7.5mm,瞬态分析结果如图8和图9所示。随着泵浦距离的增大,激光棒中心温度达到稳态所需时间保持不变,为2.02s(见图8)。但是稳态温度分布梯度随泵浦距离增大而变小,泵浦能量分布均匀性变好(见图9)。这是因为泵浦距离增大,泵浦区域增

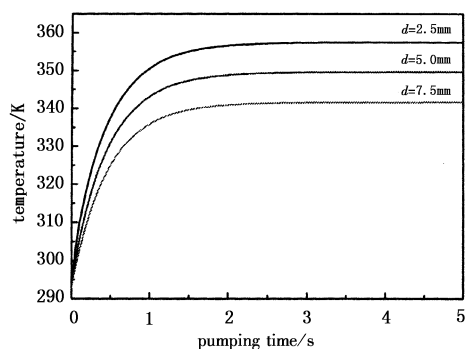


图8 泵浦距离不同时激光棒中心点的瞬态温升过程

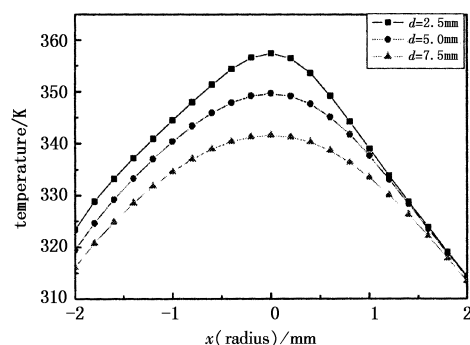


图9 泵浦距离不同时激光棒截面内沿 x 轴稳态温度分布

大,使泵浦的均匀性提高,温度梯度减小。但是泵浦距离过大,将导致泵浦能量利用率下降,因此泵浦距离 l 存在着一个最佳值。

4 讨论

侧面泵浦 Nd:YAG 晶体的有限元模拟结果表明,通过提高晶体侧面的热对流换热系数可以缩短激光棒温度达到稳态所需时间,但是对达到稳态后的温度梯度几乎不产生影响;泵浦功率对达到热平衡时间影响不大,但泵浦功率越大,激光棒热透镜效应越严重;泵浦光腰与激光棒中心距离越大,泵浦均匀性越好,但距离过大,将导致泵浦能量利用率下降。分析结果可为二极管泵浦固体激光器的优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 杨永明,周荣,过振,等. LD 端泵下 Nd:YAG 端面形变热效应研究[J]. 光子学报,2005,34(9):1297-1300.
- [2] 蔡志强,姚建铨,温午麒,等. LD 侧泵激光器抽运光和温度分布数值研究[J]. 光电子·激光,2004,15(11):1305-1310.
- [3] 杨鸿儒,左铁钊. 全固体小型 Yb:YAG 激光器热效应及输出特性研究[J]. 光子学报,2003,32(8):907-910.
- [4] S B Sutton, G F Albrecht. Simple analytical method to calculate the radial energy deposition profile in an isotropic diode-pumped solid-state laser rod[J]. Applied optics, 1996,35(30):5937-5948.
- [5] Roess D. Analysis of room temperature CW ruby lasers [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1966,2(8):208-214.
- [6] 丁丽明,杨福民, S R Bowman, 等. 聚光腔对光泵均匀性的影响[J]. 中国激光,1989,16(6):359-361.
- [7] Wenjie Xie, Siu-Chung Tam, Yee-Loy Lam, et al. Influence of the thermal effect on the TEM₀₀ mode output power of laser-diode side-pumped solid-state laser [J]. Applied optics, 2000,39(30):5482-5487.
- [8] R Weber, B Neuenschwander, H P Weber. Thermal effects in solid-state laser materials [J]. Optical Materials, 1999, 11:245-254.
- [9] W 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 孙文, 等译. 北京: 科学出版社, 2002. 357-365.
- [10] Brown D C. Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1998, 34(12): 2383-2392.