

LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的热效应分析*

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, 长春 130031; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 在高斯光强近似下对泵浦 LD 光强分布模型进行修正, 建立了 LDA 侧面泵浦固体激光介质内热源分布的数值模型。用有限元法计算模拟了三角均匀分布侧面泵浦结构激光棒瞬态温升过程及稳态温度分布情况。讨论比较了泵浦源的高斯强度近似和均匀强度近似下激光棒内温度分布情况, 并对激光棒的类热透镜的焦距进行实验测量。实验和数值计算说明了 LDA 泵浦结构和冷却场的非均匀分布使实际温度场偏离均匀泵浦时的二次曲线分布模型, 激光晶体热效应产生的类透镜会聚作用的不对称导致了激光器输出光束质量在 x, y 方向上的不同。

关键词: 半导体泵浦固体激光器; 温度场; 热效应; 数值模型; 有限元法

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

全固体激光器的应用不仅要求固体激光器具有高的激光输出功率, 还要求激光具有较高的光束质量。由于泵浦光场分布和冷却液体的共同作用, 使激光晶体内产生的温度场经常是非均匀分布的。由此产生的晶体热作用对激光光束质量的影响较大, 因此, 激光器的热效应控制是提高高功率固体激光器光束质量的重要手段之一^[1-5]。

由于激光二极管阵列(LDA)泵浦与灯泵浦在结构以及光强分布上的差异, 泵浦光在介质横截面内产生的温度分布不同^[6-7]。激光器运转时, 泵浦光场分布不均匀和激光棒冷却不均匀等原因导致激光棒内部形成非对称温度梯度分布, 进而产生热畸变或类热透镜效应, 使振荡的激光束的光束质量变差。因此, 在大功率 LDA 泵浦的固体激光器中, 应当首先对热效应的影响进行分析, 并采取相应的补偿措施, 以获得高光束质量激光输出。

实验研究中, 光束质量分析仪实测的光束质量因子 M_x^2, M_y^2 并不相同^[8-9], 可能是由激光晶体热效应对光束的会聚作用引起的。本文依据热传导方程和有限元分析方法, 模拟计算了 LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 激光介质内瞬态温升过程及稳态分布, 并进行了实验测量。

1 LDA 泵浦时的温度场和热传导模型

1.1 泵浦高斯光强修正

闪光灯泵浦固体激光器的泵浦光通过聚光腔到达激光介质表面, 这种光强被认为是均匀分布或近似均匀分布的^[10-12]。此时, 在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^[13]。而 LDA 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采用高斯函数近似, 更能符合 LDA 泵浦固体激光器的实际情况。

有很多复杂因素导致很难精确计算激光介质内的温度分布, 因此, 需要对物理模型进行简化, 提出几点假设:

(1) 泵浦光沿激光光轴(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, 相邻间距很小, 且泵浦光束在 z 轴方向上相互交叠。

(2) 假设热传导系数为常数。热传导系数是随温度变化的量, 但是在室温附近, 温度变化不是很大(80 °C)时, 热传导系数的变化较小^[14], 并且 YAG 晶体是均匀、各向同性的物质, 且不存在温度的跃变和物质的相变。

(3) 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其端面和空气热交换流出的热量, 故可忽略。

* 收稿日期: 2006-06-12; 修订日期: 2006-12-21

基金项目: 应用光学国家重点实验室应用光学基金资助课题(DA04Q05)

作者简介: 岱钦(1977—), 男, 内蒙古人, 在读博士研究生, 研究方向为 LD 泵浦高功率固体激光技术; bdaqin@163.com。

通讯作者: 王希军(1963—), 男, 吉林人, 研究员, 研究方向为固体激光技术; xjwang@ciomp.ac.cn。

三角均匀分布侧面泵浦激光棒截面如图 1 所示。其中 A, B, C 分别为三个泵浦源, D 为入水口, E 为出水口。假设泵浦光强为高斯分布, 即^[15]

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

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。若光腰位置在 $(-d, 0)$, ω_p 为

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

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。

1.2 热传导方程与温度场

在各向同性介质中, 热传导方程可表示为

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

式中: ρ 为介质密度; c 为介质比热容; T 为温度; 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^[16]。假设棒内热源只有内跃迁损耗, 则不考虑热效应引起泵浦光束变化时, 热源分布为

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

式中: η 为吸收泵浦能量中转化为热能的比值; 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距离 Δl 时被介质吸收的光能, 可表示为

$$\Delta I_{ab} = I_i [1 - \exp(-\alpha \Delta l)] \quad (5)$$

式中: I_i 为传播距离为 Δl 之前的光强; α 为晶体吸收系数。

激光棒侧表面和冷却液之间边界满足牛顿冷却方程, 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^[17]; T_c 为冷却液温度; r_0 为激光棒半径。

2 有限元模拟计算及分析

采用三角均匀分布侧面泵浦结构, 即二极管从三个等角距方向侧面泵浦激光介质(如图 1 所示)。运用有限元方法计算 Nd:YAG 激光棒的瞬态温度分布过程。取 $\eta=0.5$, $\alpha=3.5 \text{ cm}^{-1}$, 初始温度为 20°C , $h=1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $T_c=18^\circ\text{C}$ 。

图 2 为在到达稳态的过程中, 不同时刻的激光棒截面内沿 x 轴温度分布情况。由图 2 可以看出, 棒中心区域温升较快, 表面温升较慢; 达到稳态后, 形成了中心温度高、表面温度低的分布。图 3 为激光棒内稳态温度场分布, 由图 3 可看出, 达到稳态时, 激光棒径向温度分布不对称。

图 4 为在热源的高斯强度近似和均匀强度近似下的激光棒截面内温度场分布图, 其中, 热源高斯强度近似下取沿 x 和 y 两个轴方向温度场分布。假设热源均匀分布情况下, 计算得到的棒内温度呈径向二次曲线分布, 而热源高斯型分布近似下的温度分布不再是简单的径向二次曲线关系。相对于灯泵浦结构而言, LD 泵浦在泵浦结构以及光强分布上有很大的差异, 激光介质横截面内的温度分布不再是沿径向的二次曲线的变化关系; 激光棒内沿 x, y 轴的径向稳态温度分布也不相同, 这与 LD 泵浦结构引起的棒内非均匀热源分布有关。冷却场的分布也对激光棒温度分布有影响。假设激光棒截面底部入水, 顶部出水, 则冷却水从棒截面底部到顶部产生温度梯度, 形成非均匀冷却场(入水口和出水口的水温相差 3°C)。模拟结果如图 5 所示, 由图 5 可知在热源的均匀近似下, 冷却场的不均匀也会导致激光棒的温度分布偏离二次曲线关系。可见, 非均匀冷却场进一步

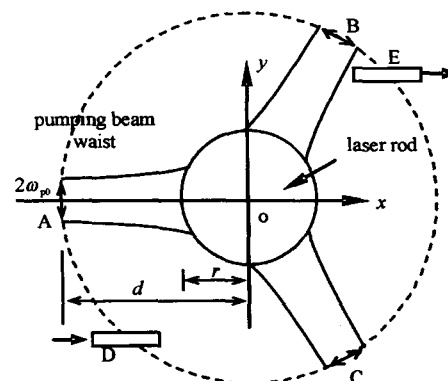


Fig. 1 Cross section of Nd:YAG crystal with single side-pumping geometry

图 1 侧面泵浦时 Nd:YAG 晶体横截面示意图

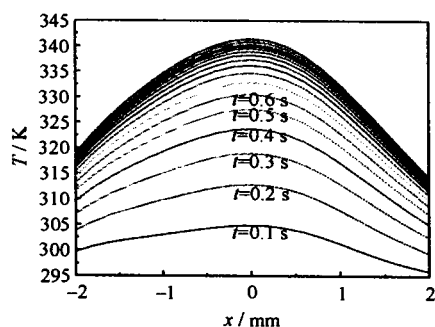


Fig. 2 Temperature grows to steady state on the cross-section of the laser rod

图2 激光棒截面内瞬态温度场分布

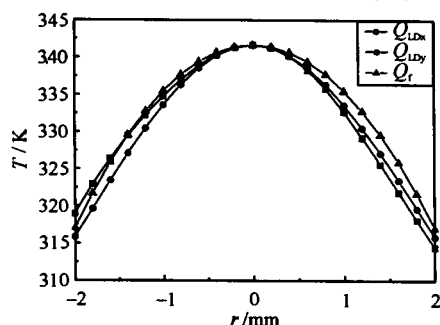


Fig. 4 Steady temperature fields of laser rod simulated by Gaussian model(Q_{LD}) and uniform heat source(Q_L)

图4 热源的高斯强度近似 Q_{LD} 和均匀强度近似 Q_L 下的激光棒截面内稳态温度场分布图

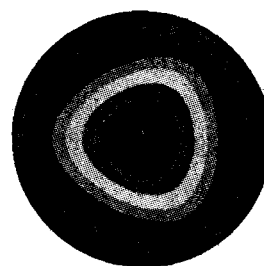


Fig. 3 Temperature distribution of laser rod at steady state

图3 激光棒内稳态温度场的分布示意图

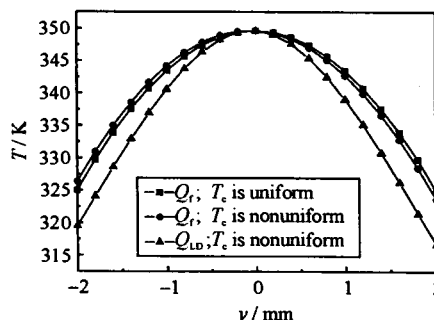


Fig. 5 Steady temperature fields of laser rod under different heat source and cooling fields

图5 不同热源和冷却场条件下激光棒内稳态温度场分布图

加剧了温度分布的不对称性,使激光棒温度分布变得更加复杂。

3 测量实验

常用的实验测量方法是直接测量光束横截面光强分布 $I(x, y, z)^{[18]}$, 由定义得到光斑半径 $\omega(z)$, 采用高斯光束的双曲线拟合方法^[19], 计算出光束 x, y 向的发散角 θ , 可求出热焦距数值。

高斯光强分布为

$$I(x, y, z) = I_0(z) \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)}\right] \quad (7)$$

式中: ω 为高斯光束半径; $I_0(z)$ 是 z 轴方向(光束传播方向) z 位置处光束截面中心的光强。

双曲线拟合公式为

$$\omega^2(z) = Az^2 + Bz + C \quad (8)$$

拟合求出系数 A, B, C 。则光束发散角为

$$\theta = \sqrt{A} \quad (9)$$

将泵浦时的 YAG 棒等效为透镜, 利用式(10)计算相应泵浦功率下 x, y 向的热焦距 f_x 和 f_y ^[20]

$$F(\theta_i, f_i) = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{l}{f_i}\right)^2 + \frac{1}{f_i} \left(\frac{\pi \omega_0}{\lambda}\right)^2} - \theta_i = 0 \quad (10)$$

式中: $i = x, y$; λ 为 He-Ne 激光波长; l 为 He-Ne 束腰与 YAG 中心的距离; ω_0 为入射 He-Ne 束腰半径。

激光棒类热透镜焦距及其变化测量实验装置如图 6 所示。探测器前端带有小孔光阑, 固定在 3 维位移台上, 位移台通过单片机编程控制, 3 维位移精度 x, y, z 轴均为 0.004 mm, 小孔光阑直径为 0.5 mm, 单片机控制光路调整、信号采集、A/D 转换以及数据传输, 再由 PC 机完成数据计算。

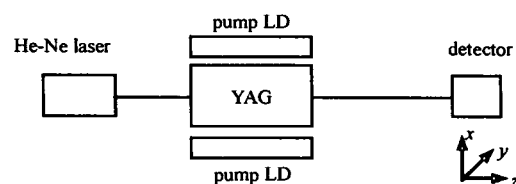


Fig. 6 Scheme of measuring experiment of thermal lens

图6 热透镜测量实验装置图

实验中,首先放置小孔光阑在 He-Ne 激光器输出端,根据光束经 YAG 晶体时透射和反射光斑的均匀程度,反复调整光路使晶体轴和 He-Ne 激光共轴。调整接收器光阑在光束中心,调整位移台的 z 移动轴,使其共轴;设计 2 维搜索单片机控制软件,在光束中心处固定 y 向调节,作 x 轴向扫描,确定出光强最大位置,确定 x 轴位置。同理确定 y 轴位置,记录下 x, y 位移轴的位置;然后,分别沿 x, y 位移轴对经过晶体类热透镜作用的光束进行扫描,测量泵浦功率变化时,在 x, y 方向的激光光强分布 $I(x, 0, z), I(0, y, z)$, 其中采样间距为 0.02 mm; 由得到的光强分布 $I(x, 0, z), I(0, y, z)$, 再分别利用式(8)拟合求出系数 A ; 利用式(9)和(10)得到热焦距随泵浦功率的变化情况如图 7 所示。由图 7 可以看出,激光棒热透镜效应对 He-Ne 激光 x, y 向截面光束会聚作用是不同的。也就是说,LD 泵浦结构和冷却场的作用使激光棒截面内的温度梯度分布不对称,故而 x, y 向截面内的热聚焦作用不同,He-Ne 光束的光强分布发生畸变,且泵浦越强,畸变越大。这将对固体激光模式产生破坏作用,这也是激光模式不稳定的因素之一。

4 讨 论

本文对侧面泵浦 Nd:YAG 晶体的温度分布进行了数值模拟。模拟结果表明:LDA 泵浦结构及光强分布特性使激光棒内温度场偏离闪光灯泵浦的径向二次曲线模型;即使对称泵浦条件下,激光光束在 x 和 y 方向也会受到不对称的热效应影响。这解释了对称泵浦下,激光束在 x 和 y 方向发散度不同的物理现象。因此,泵浦场和冷却场共同作用会加剧温度分布的 x 和 y 方向的不对称性,使激光器的工作条件恶化,激光束输出质量下降。

热焦距测试实验说明了热效应在水平和垂直方向对激光光束质量的影响是不同的。热效应产生的类透镜会聚作用不对称,是导致激光器输出光束 M_x^2 和 M_y^2 不同的原因之一。

参考文献:

- [1] 童立新, 高清松, 蒋建峰, 等. 高功率二极管泵浦模块热效应补偿研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(s0):125-128. (Tong L X, Gao Q S, Jiang J F, et al. Research of thermal effects compensation of high power diode laser module. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(s0):125-128)
- [2] Wyss E, Roth M, Graf T, et al. Thermo-optical compensation methods for high-power lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38(12):1620-1628.
- [3] Wu R, Phua P B, Lai K S. Linearly polarized 100-W output from a diode-pumped Nd:YAlO laser[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(3):431-434.
- [4] Xie W J, Hu W T, Xu J D, et al. Dynamical thermal lensing of high-power solid-state lasers[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(5):1439-1444.
- [5] 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. (Cai Z Q, Yao J Q, Wen W Q, et al. Simulation of absorbed power and temperature distribution in LD side pumped laser. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2004, 15(11):1305-1310)
- [6] 欧群飞, 陈建国, 冯国英, 等. 环形激光二极管抽运棒状激光器中瞬态温度和热应力分析[J]. 光学学报, 2004, 24(6):803-807. (Ou Q F, Chen J G, Feng G Y, et al. Analyses of transient temperature and thermal stress distribution in ring laser diode array pumped laser rod. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6):803-807)
- [7] Peng X Y, Xu L, Asundi A K. Thermal lensing effects for diode-end-pumped Nd:YVO₄ and Nd:YAG lasers[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(10):2454-2461.
- [8] Yu D L, Tang D Y. Experimental study of a high-power CW side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Optics and Laser Technology*, 2003, 35:37-42.
- [9] Sun Z P, Lia R N, Yong B, et al. Generation of 11.5 W coherent red-light by intra-cavity frequency-doubling of a side-pumped Nd:YAG laser in a 4 cm LBO[J]. *Opt Commu*, 2004, 241(1-3):167-172.
- [10] Huchital D A, Steinberg G N. Pumping of Nd:YAG with electrodeless arc lamps[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1976, 12(1):1-9.
- [11] Roess D. Analysis of room temperature CW ruby lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1966, 2(8):208-214.
- [12] 丁丽明, 杨福民, Bowman S R. 聚光腔对光泵均匀性的影响[J]. 中国激光, 1989, 16(6):359-361. (Ding L M, Yang F M, Bowman S R,

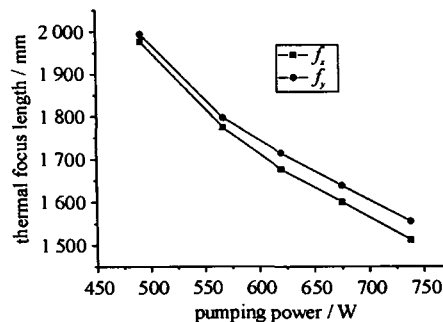


Fig. 7 Variation of YAG thermal lens focus with pumping power

图 7 YAG 类热透镜焦距随泵浦功率的变化

- et al. Effect of condensers on the homogeneity of optical pumping. *Chinese Journal of Lasers*, 1989, 16(6), 359-361)
- [13] 朱广志, 陈培峰, 邹雪芬, 等. 侧面泵浦激光器热透镜效应的有限元分析[J]. 激光技术, 2004, 28(2), 208-210. (Zhu G Z, Chen P F, Zou X F, et al. Finite element analysis of laser medium's thermal lens. *Laser Technology*, 2004, 28(2), 208-210)
- [14] Brown D C. Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(5), 861-873.
- [15] Xie W J, Tam S C, Lam Y L, et al. Influence of the thermal effect on the TEM₀₀ mode output power of a laser-diode side-pumped solid-state laser[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(30), 5482-5487.
- [16] Weber R, Neuenschwander B, Weber H P. Thermal effects in solid-state laser materials[J]. *Optical Materials*, 1999, 11(2-3), 245-254.
- [17] 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002; 358. (Koechner W. State laser engineering. Beijing: Science Press, 2002, 358)
- [18] 张新陆, 王月珠, 史洪峰. 激光二极管端面抽运室温 Tm, Ho:YLF 连续固体激光器[J]. 物理学报, 2006, 55(4), 1787-1792. (Zhang X L, Wang Y Z, Shi H F, Diode-end-pumped CW Tm, Ho:YLF solid-state laser working at room temperature. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(4), 1787-1792)
- [19] 游凝思, 霍玉晶. 实用化的光束质量测量系统[J]. 激光与红外, 1997, 27(4), 222-225. (You N S, Huo Y J. A practical measuring system on laser beam quality. *Laser and Infrared*, 1997, 27(4), 222-225)
- [20] 吕百达. 激光光学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992; 60-64. (Lü B D. Laser optics. Chengdu: Sichuan University Press, 1992; 60-64)

Analysis of thermal effect in LDA side pumping Nd:YAG solid state lasers

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, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The pump LD intensity distribution model under the Gaussian intensity approximate condition was revised, and the numerical model of the temperature field was established in the crystal cylinder of diode side-pumping solid state laser. The temperature field and warming process of the transient and steady state in the laser rod by symmetrical trigonal side-pumping were simulated using the finite element analysis method. The temperature field distributions in the laser crystal of the Gaussian intensity and uniform intensity hypothesis were presented and compared, and the thermal lens focus of the crystal cylinder was measured experimentally. It is concluded that the LDA pumping structure and the non-uniformity of the cooling field make the experiment results divergent from those of the simulation model of uniform pumping, and the non-uniformity of the lens-like focusing makes different beam quality along the x and the y axes.

Key words: Diode pumping solid state lasers; Temperature field; Thermal effect; Numerical model; Finite element analysis