

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0030-04

固体热容激光器 Nd:GKG 工作介质的瞬态温度分布

秘国江, 唐晓军, 杨文是, 张申金, 周寿桓

(华北光电技术研究所 固体激光技术国家重点实验室, 北京 100015)

摘要 考虑温度大幅度变化对工作介质比热容的影响, 在激光二极管阵列峰值抽运功率超过 10^4 W 的情况下, 对热容激光器片状 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ Nd:GKG 工作介质进行了温度分布的数值计算, 并与 HR-2 型红外热像仪对工作介质端面与侧面测量的温度数据进行了对比分析, 取得了一些有价值的结果。

关键词 激光技术; 固体热容激光器; Nd:GKG 工作介质; 瞬态温度分布; HR-2 型红外热像仪

中图分类号 O736; TN248.1 **文献标识码** A

Research of Transient Temperature Distribution of Nd:GKG Gain Medium in Solid-State Heat Capacity Laser

BI Guo-jiang, TANG Xiao-jun, YANG Wen-shi, ZHANG Shen-jin, ZHOU Shou-huan

(State Key Laboratory of Solid State Laser Technology, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract The transient temperature distribution of $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ plate Nd:GKG gain medium of the solid-state heat capacity laser pumped by a 10^4 W laser diode array is numerically calculated to analyze the influence of the large scale temperature variation on the specific heat of Nd:GKG crystal. Through comparing the calculated results with the experimental data, which is achieved with the HR-2 thermal infrared imager from the end face and the side face of the Nd:GKG crystal, valuable conclusions are obtained.

Key words laser technique; heat capacity laser; Nd:GKG gain medium; transient temperature distribution; HR-2 thermal infrared imager

1 引言

激光二极管阵列抽运的固体热容激光器大功率抽运下工作时间短 ($10 \sim 20\text{ s}$), 温度变化大 ($0 \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$)^[1], 增益介质处于非热稳态, 工作介质内部温度和热应力分布的研究非常重要。固体热容激光器工作介质一般为大尺寸 Nd:YAG 与 Nd:GKG, 比较而言, Nd:GKG 可获得更大的片状工作介质, 荧光寿命更长^[2], 可掺杂较高的离子浓度, 已成为固体热容激光器理想的工作介质。本文考虑温度大幅度变化对 Nd:GKG 工作介质比热容的影响, 利用有限差分法对热容激光器片状 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的 Nd:GKG 工作介质进行了温度分布数值计算, 并跟 HR-2 型红外热像仪测得的实验数据进行了对比分析, 取得了一些有价值的结果。

2 物理模型

激光二极管阵列面积 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 峰值抽运功率大于 10^4 W , 经微型柱面透镜组和大型耦合透镜 (Lens duct) 端面耦合进 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 片状 Nd:GKG。假设耦合棱镜输出光束均匀, 且在 10 mm 厚工作介质中沿光束方向平行分布。工作介质的侧面完全绝热, 则理想状况下温度沿光束方向呈一维分布。设激光介质的吸收系数为 α , 则抽运光在介质中经过一段距离 Δx 后将衰减为 $I_0 \exp(-\alpha \Delta x)$, 介质吸收的光能为 $I_0 [1 - \exp(-\alpha \Delta x)]$, 激光工作介质微元段内的热源强度可近似为

$$\dot{Q} = \eta_h I_0 [1 - \exp(-\alpha \Delta x)],$$

其中 η_h 为转化为热的光在吸收的抽运光中所占的比重。

2.1 温度分布和热力学基础

激光工作介质中,有内热源的一维非稳态导热微分方程式、边界条件和初始条件为^[3,4]

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

$$-\kappa \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = h(T - T_f), \quad (2)$$

$$T(x,0) = f(x), \quad (3)$$

其中 \dot{Q} 为晶体中单位体积抽运光产生的热源强度, T_f 为冷却流体(气体)的温度, κ, ρ, C_p 和 h 为晶体的导热系数、密度、热容和表面传热系数。Nd:GGG 室温下的相关参量如表1所示^[5]。

表 1 Nd:GGG 晶体室温下的相关参量

Table 1 Relative parameters of Nd:GGG crystal at room temperature

	Nd:GGG
Refractive index n	1.965
Thermal conductivity κ / (W/mK)	7.05
Density ρ / (10^3 kg/m ³)	7.08
Heat capacity C_p / [10^3 Ws/(kg · K)]	0.3812
Young modulus E / 10^6 kg · cm ⁻²	0.220
Poisson ratio ν	0.28
Coefficient of thermal expansion α / 10^{-6} K	9.5

2.2 Nd:GGG 工作介质比热容随温度的变化

根据爱因斯坦比热容公式,工作介质比热容随温度的改变为^[6]

$$C_p = \frac{3R(T_d/T)^2 \exp(T_d/T)}{[\exp(T_d/T) - 1]^2},$$

其中 T_d 为德拜温度,对于石榴石类工作介质为 750 K; T 为激光工作介质的绝对温度, R 为与工作介质有关的常数。在 273 K 以上, Nd:GGG 晶体比热容随温度的变化如图1所示。固体热容激光器工作过程中 Nd:GGG 晶体温度摆幅为 150 K 时,比热

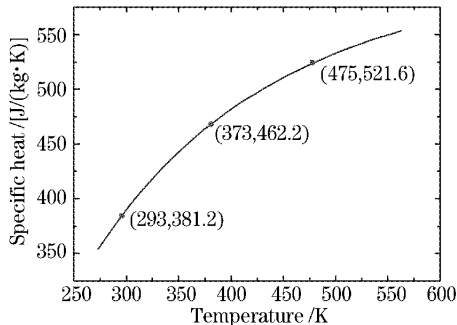


图 1 Nd:GGG 晶体比热容随温度的变化曲线

Fig. 1 Curve of the specific heat of Nd:GGG crystal versus the temperature

变化约 40%,因此数值计算中必须考虑温度对介质比热容的影响。

2.3 Nd:GGG 工作介质轴向温度计算分析

激光二极管阵列 808 nm 光单向端面抽运平均功率 660 W,抽运时间为 15 s。抽运阶段,工作介质侧面绝热。Nd:GGG 晶体两个端面室温暴露于静态空气中,表面传热系数为 40 W/(m² · K)时的 Nd:GGG晶体轴向温度分布如图2所示。图 2 中深线为考虑温度变化对工作介质比热的影响,浅线没有考虑。从图 2(a)可以看出,抽运阶段 Nd:GGG 晶体轴向温度沿抽运方向逐渐降低。随着抽运时间的增加, Nd:GGG 晶体的温度逐渐升高,两种曲线间隔逐渐增大,两端面的温差逐渐增大。

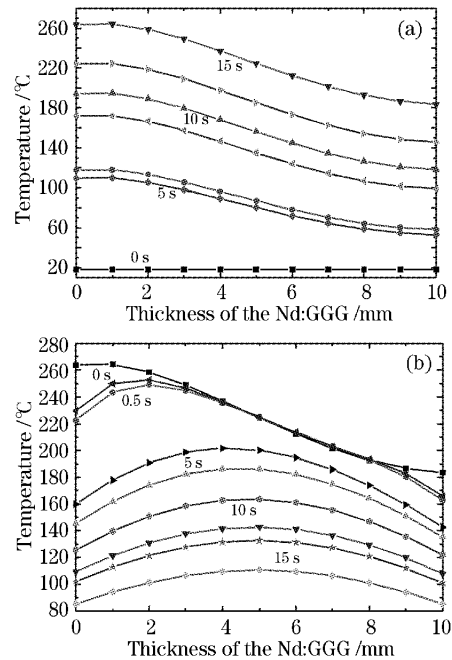


图 2 抽运(a)与冷却(b)阶段 Nd:GGG 晶体轴向温度分布曲线

Fig. 2 Temperature distribution along the thickness of Nd:GGG crystal in pumping state (a) and cooling state (b)

抽运结束后,工作介质两端面立即用压缩气体进行强制冷却,表面传热系数为 10³ W/(m² · K)时,轴向温度沿抽运方向温度如图 2(b)所示。Nd:GGG 工作介质两个端面的温度在极短时间内急剧下降。轴向晶体温度中间高两边低,并整体温度逐渐下降,随冷却时间的延长这一过程逐渐变缓。考虑比热随温度变化的影响,则工作介质降温较慢。

3 实验结果与数值计算对比分析

Nd:GGG 工作介质端面的温度由 HR-2型红外

热像仪测得。HR-2型红外热像仪距工作介质约1 m,温度分辨率 $\leq 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。首先对工作介质端面温度对时间的变化进行了测量。图3为测得的抽运阶段某一时刻Nd:GKG晶体端面温度分布的图像,可见整个端面上的温度较为平整,整体为中间高边缘低,温差为2~5 $^{\circ}\text{C}$,证实了数值计算模型的可行性。

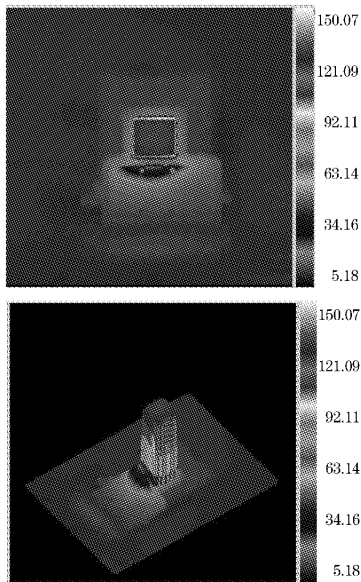


图3 Nd:GKG晶体端面温度分布

Fig. 3 Temperature distribution on the end face of Nd:GKG crystal

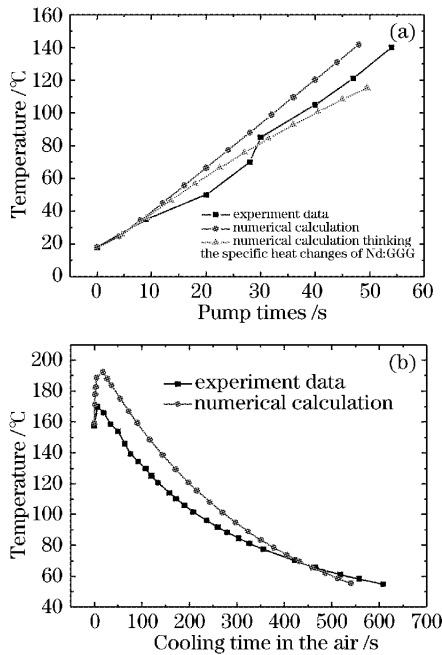


图4抽运阶段(a)与冷却阶段(b)晶体端面温度分布随时间的变化曲线

Fig. 4 Temperature variations on the end face of Nd:GKG crystal in pumping (a) and cooling state (b)

3.1 Nd:GKG工作介质端面的温度分析

激光二极管阵列抽运平均功率为127.3W时,端面(非抽运端面)温度随时间变化曲线如图4(a)所示,可见考虑工作介质比热容随温度的变化与实验值更符合。在静态18 $^{\circ}\text{C}$ 空气中进行自然冷却,表面传热系数为40 W/(m 2 ·K)时,端面温度随时间变化曲线如图4(b)所示。冷却开始后,在短时间内温度的升高由工作介质内的热传导引起。冷却阶段实验值偏低可能是由于Nd:GKG晶体侧面传热引起的。

3.2 Nd:GKG工作介质轴向的温度分析

激光二极管阵列抽运平均功率127.3 W,抽运时间为39 s时,测量的侧面温度分布如图5(a)所示。图5(b)为实验测量与计算模拟的对比,实验测量两端面温度梯度可达30.0 $^{\circ}\text{C}$ 。靠近抽运端面理论值比实验值偏高15.2 $^{\circ}\text{C}$,沿工作介质方向两者差距逐渐缩小。

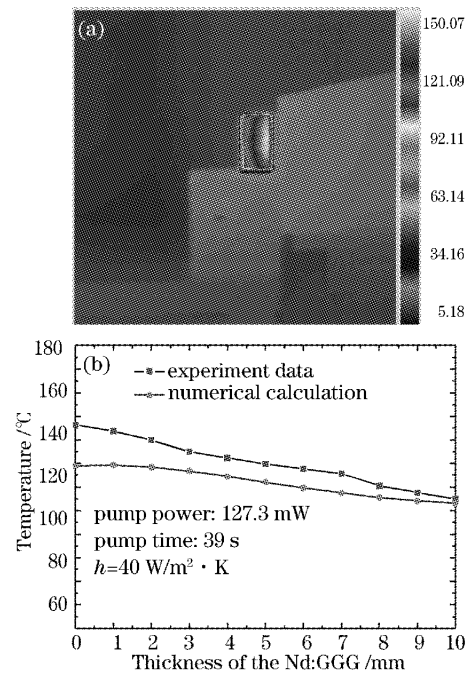


图5 抽运阶段晶体轴向温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along the thickness of Nd:GKG crystal

4 结 论

利用有限差分法,考虑温度大幅度变化对工作介质比热容的影响,对激光二极管阵列抽运的热容激光器片状Nd:GKG工作介质进行了非稳态热传导下温度分布计算并与实验结果作了对比分析。结果显示:抽运阶段,工作介质中沿抽运方向温度逐渐

降低,同一抽运时刻考虑工作介质比热容随温度变化的模拟计算数值与实验值符合更好;冷却阶段,工作介质两个端面附近的温度在极短时间内急剧下降,轴向工作介质温度迅速变化为中间高两边低,整体温度缓慢下降,在同一时刻不考虑工作介质比热容随温度变化的模拟计算数值偏低。

以上数值计算模拟与实验数据的对比,证明物理模型与数值计算的可靠性。在冷却开始阶段,可考虑逐步加大冷却气体(液体)的压强与流速,以减小 Nd:GGG 晶体瞬间内温度的急剧变化。

参 考 文 献

- 1 Jin Feng, Zhou Dingfu. High power solid-state heat capacity laser development [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(5): 534~538
- 2 金 锋,周鼎富. 高功率固体热容激光器 [J]. *激光技术*, 2004, **28**(5): 534~538
- 3 朱化南. 固体热容激光器 [J]. *地面防空武器*, 2003, (1): 49~53
- 4 朱化南. 固体热容激光器 [J]. *Land-based Air Defence Weapons*, 2003, (1): 49~53
- 5 Jan Sulc, Helena Jelinkova, Vaclav Kubecek *et al.*. Comparison of different composite Nd:YAG rods thermal properties under diode pumping [C]. *SPIE*, 2002, **4630**: 128~134
- 6 姚中鹏,王瑞君. 传热学 [M]第二版,北京:北京理工大学出版社,2003. 96
- 7 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16**(4): 605~625
- 8 Thomas J. Kane, John M. Eggleston, Robert L. Byer. The slab geometry laser-part II: thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **21**(8): 1195~1210