

# 复合 Nd : YAG 晶体大功率 1064 nm 固体激光器研究

郝 旺, 李 祎, 高兰兰

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘 要:**报道了采用 Comsol 多物理场仿真软件模拟计算三种结构 Nd : YAG 晶体的温度场分布,并通过实验,对比分析复合晶体与均匀掺杂 Nd : YAG 晶体的输出功率和转化效率。模拟结果表明,当泵浦功率为 18 W 时,尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm、3 mm × 3 mm × 16 mm、3 mm × 3 mm × 20 mm 的三种晶体的最高温度分别为 97.12 °C、89.08 °C 和 88.01 °C,复合晶体在降低晶体工作温度,减小热效应方面优势明显。采用相同的工作条件,当泵浦功率为 18 W 时,均匀掺杂 Nd : YAG 晶体 1064 nm 激光最大输出功率为 6 W,16 mm 长的复合晶体的输出功率为 9.3 W,且未出现饱和现象,光斑质量优于均匀掺杂晶体情况。理论和实验结果表明,复合晶体在降低热效应,提高光斑质量方面具有更高的实用性。

**关键词:**Nd : YAG;热透镜;复合晶体

**中图分类号:**TN248.1   **文献标识码:**A   **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.01.008

## Research on composited Nd : YAG crystal high power 1064 nm solid – state laser

HAO Wang, LI Yi, GAO Lan-lan

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The temperature field distributions of three Nd : YAG crystal structures were calculated by using the Comsol multiphysical field simulation software, and the output power and conversion efficiency of the composite crystal and the uniform doped Nd : YAG crystal were compared through the experiments. The simulation results show that the maximum temperatures of three crystals whose size are 3 mm × 3 mm × 10 mm, 3 mm × 3 mm × 16 mm and 3 mm × 3 mm × 20 mm are 97.12 °C, 89.08 °C and 88.01 °C respectively when pumping power is 18 W. The composite crystal has an obvious advantage in reducing the temperature of the crystal and reducing the thermal effect. When pumping power is 18 W, the maximum output power of uniform doped Nd : YAG crystals is 6 W, while the output power at 1064 nm with the 16 mm composite crystal is 9.3 W. Meanwhile, there is no saturation phenomenon for the composite crystal, and the beam quality is better than that of the uniform doped crystal. The theoretical and experimental results show that the composite crystal has a higher practicability in reducing the thermal effect.

**Key words:** Nd : YAG; thermal lens; composite crystal

**作者简介:**郝 旺(1997 -),男,本科在读,研究方向为全固体激光器技术及非线性频率变换技术。E-mail:1244608806@qq.com

**通讯作者:**高兰兰(1975 -),女,副教授,研究方向为全固体激光器技术及非线性频率变换技术。E-mail:gll\_75@163.com

**收稿日期:**2017-05-24;**修订日期:**2017-06-23

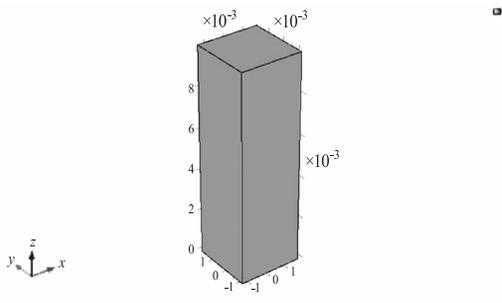
## 1 引言

在固体激光器激光晶体的工作过程中,由于量子亏损、下激光能级与基态之间能差转化为热量、激光猝灭等原因会产生大量的热量,进而导致激光晶体内部温度分布不均匀,产生热透镜、端面热变形等效应。当泵浦功率输入稳定时,晶体内部便会形成稳定的温度场,引起晶体的热透镜效应,进而影响晶体折射率、限制激光器输出功率,影响 Nd:YAG 激光器的性能<sup>[1]</sup>。通过键合技术将 Nd:YAG 晶体键合成为复合晶体,构成激光器的谐振腔,这种激光器具有高集成、高可靠性和峰值功率高,光斑质量好等优点<sup>[2-3]</sup>。

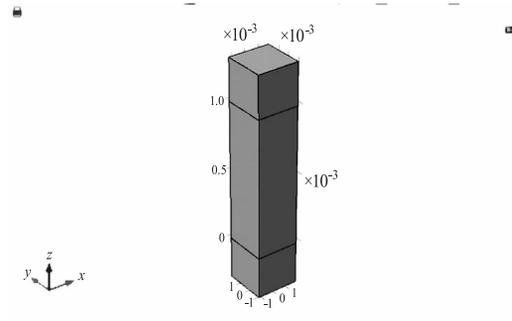
本文采用三种不同结构的 Nd:YAG 晶体,通过 Comsol 仿真软件对三种激光晶体在相同工作条件下的温度分布进行模拟<sup>[4]</sup>,结合实验数据验证理论模拟的正确性,研究表明复合晶体的散热效果优于均匀掺杂 Nd:YAG 晶体,激光器的输出功率提高 50%,光斑质量也更优化。理论和实验结果表明,复合晶体在高质量大功率激光输出方面更加有利<sup>[5]</sup>。

## 2 Comsol 模拟 Nd:YAG 晶体温度分布

本研究使用的 Nd:YAG 晶体有两种结构,一种为均匀掺杂 Nd<sup>3+</sup> 离子的 Nd:YAG 激光晶体(如图 1(a)所示),另一种为键合结构,即在均匀掺杂 Nd<sup>3+</sup> 离子的 Nd:YAG 激光晶体两端利用扩散结合的方式键合 3 mm 的 YAG 晶体(如图 1(b)所示)。由于 YAG 晶体对泵浦光无吸收,可以将复合晶体中的热量从掺杂部分扩散到非掺杂部分,再由制冷装置将热量散发,因此比均匀掺杂晶体的散热效果好很多,减少晶体的热膨胀,降低大量积累的热量对激光晶体折射率的影响<sup>[6]</sup>。为了对比这两种晶体的散热性能,对其在端面泵浦工作情况下,达到稳态时的温度分布进行了模拟。



(a) 均匀掺杂激光晶体



(b) 两端分别有长 3 mm 的未掺杂 YAG 的复合晶体

图 1 Nd:YAG 晶体结构

Fig. 1 Nd:YAG crystal structure

由热动力学分析可得,整个长方体晶体处于稳态时的热传导方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad (1)$$

其中:

$$Q = \frac{2\eta_h \cdot p_{in} \cdot \alpha}{\pi\omega_p^2} \cdot \exp(-2r^2/\omega_p^2) \exp(-\alpha \cdot z) \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

$x, y, z$  分别为 Nd:YAG 柱体的端面坐标和轴向坐标,激光晶体的坐标原点为晶体泵浦端面中心。

$Q$  为由泵浦光转化的热量; $\omega_p$  为泵浦光在晶体中传输的光束半径; $\eta_h$  为泵浦能量转化为热量的比例系数; $p_{in}$  为泵浦功率; $\alpha$  为 Nd:YAG 对泵浦光的吸收系数; $k$  为 Nd:YAG 的热导率。

方程中取  $\eta_h = 35\%$ ,  $p_{in} = 18 \text{ W}$ ,  $\alpha = 3.5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\omega_p = 200 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $k = 13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 激光晶体与空气接触的两个端面的热交换系数取  $h = 50 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 与金属底座接触的侧面热交换系数取  $h = 10000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 设  $T_e$  (环境温度) = 20 °C, 金属底座温度取  $T_c = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[7]</sup>。

## 3 模拟结果与实验数据

通过 Comsol 仿真软件的热传导模块对两种激光晶体在激光器工作达到稳态时的温度分布进行模拟,得到的模拟结果如图 2 和图 3 所示。

通过 Comsol 仿真软件模拟得到的结果如表 1 所示。

同时通过软件模拟得到了两种激光晶体在稳态工作时晶体内最高温度点的位置坐标,如表 2 所示。

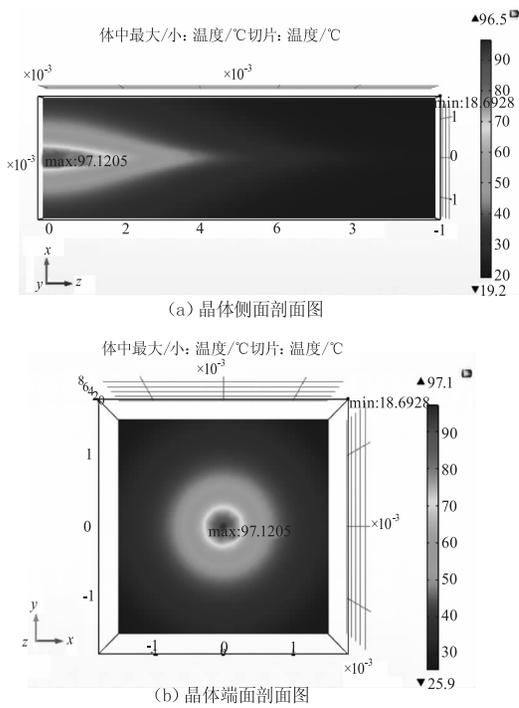


图2 均匀掺杂晶体稳态时的温度分布  
Fig.2 Temperature distribution of the uniformly doped crystal in the steady state

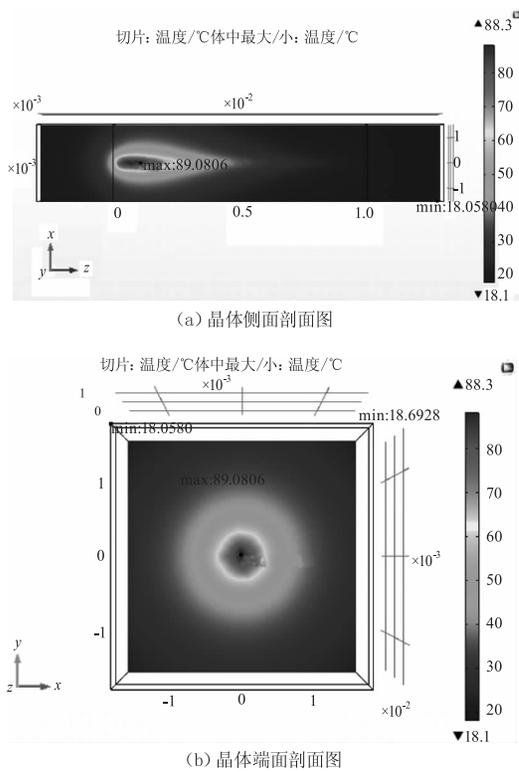


图3 键合 3 mm YAG 晶体的复合晶体稳态时的温度分布  
Fig.3 Temperature distribution of the composite crystal bonding 3 mm YAG crystal in the steady state

表1 两种晶体在激光器达到稳态时  
晶体内最高、低温度

Tab.1 The highest and lowest temperatures inside the crystals when the laser reaches steady state

晶体种类	最高温度/°C	最低温度/°C
均匀掺杂晶体	97.1205	18.6928
复合晶体(3 mm)	89.0806	18.0580

表2 两种晶体在激光器达到稳态时  
晶体内最高温度点坐标

Tab.2 The coordinates of highest and lowest temperature point inside the crystals when the laser reaches steady state

晶体种类	坐标(x,y,z)/mm
均匀掺杂晶体	(0.0065370, -0.0063914, 0)
复合晶体(3 mm)	(-0.0078764, 0.0014302, 1.0279)

实验中,利用波长 808 nm 半导体激光器作为泵浦源,其最大输出功率为 18 W,分别以 3 mm × 3 mm × 10 mm、3 mm × 3 mm × 16 mm 两种 Nd : YAG 激光晶体为工作物质进行实验,测量激光器达到稳态时 1064 nm 激光的输出功率,得到图 4 所示的功率输出曲线。

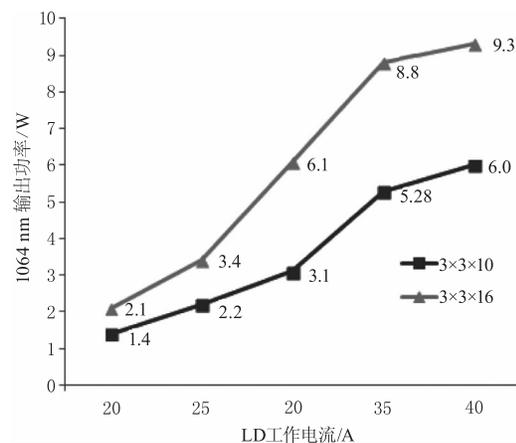


图4 两种激光晶体的输出功率曲线  
Fig.4 The output power vs LD working current for two kinds of laser crystal

从图4中可以看出,两端有 3 mm 键合纯 YAG 的 Nd : YAG 晶体在 LD 最大工作电流为 42.5 A(输出功率为 18 W)时,1064 nm 激光的最大输出功率为 9.3 W,均匀掺杂 Nd : YAG 的输出功率为 6 W,如果继续增加泵浦功率,均匀掺杂 Nd : YAG 晶体的光斑不再是 TEM<sub>00</sub> 模,说明晶体内部温度场已经严重影响激光器的工作性能。而复合晶体输出的均为

基模。

#### 4 拓展与探索

为了分析复合晶体的端面键合晶体对激光晶体在稳态工作时最高温度的影响,进行了第三种复合结构晶体的模拟,即将端面键合晶体的长度设置为5 mm(晶体结构如图5所示),利用 Comsol 仿真软件的热传导模块对其在激光器工作达到稳态时的温度分布进行模拟,得到的模拟结果如图6所示。

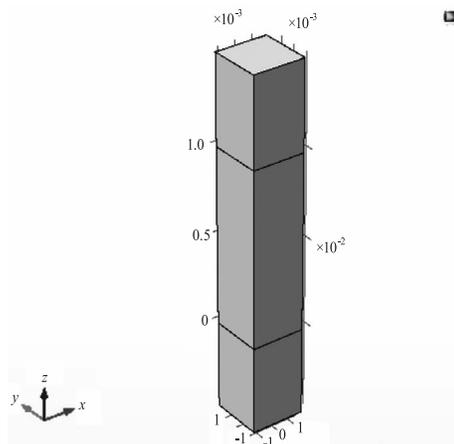


图5 两端分别有长5 mm的未掺杂YAG的复合晶体

Fig. 5 Composite crystal which has 5 mm not doped YAG on both ends

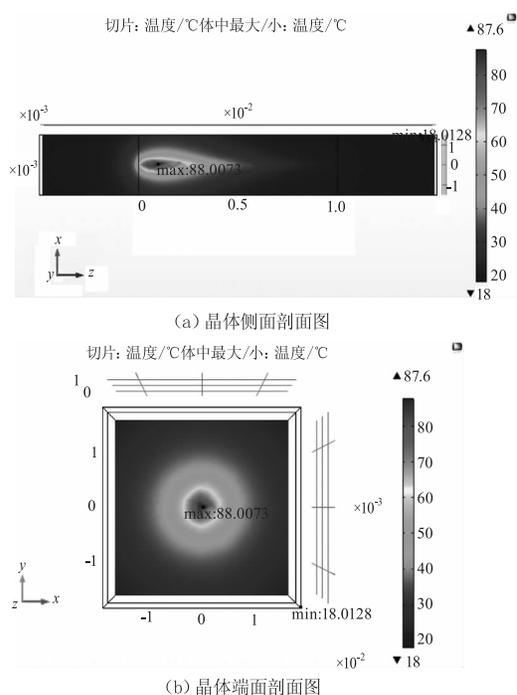


图6 键合5 mm YAG晶体的复合晶体稳态时的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of the composite crystal bonding 5 mm YAG crystal in the steady state

当延长复合晶体的端面键合晶体为5 mm时,激光器工作达到稳态时晶体的最高温度为88.01 °C,比端面键合晶体为3 mm的复合晶体的最高温

度下降1.07 °C,最高温度点的位置坐标为(0.02934, 0.0091596, 0.93665)(单位: mm),相比端面键合晶体为3 mm的复合晶体向泵浦端面方向(即z轴负半轴方向)移动0.09 mm。

#### 5 结论与分析

对比图2和图3的温度分布可以看出,均匀掺杂晶体的最高温度达到97.12 °C,最高温度在晶体泵浦端的端面位置,此处对泵浦光的吸收最强,且与空气接触散热效果差,故温度最高;复合晶体(3 mm)的最高温度达到89.08 °C,与均匀掺杂晶体相比温度下降大约8 °C,虽然泵浦端面吸收的热量也很多,但是在增加了YAG端帽后,散热效果得到改善,最高温度位置向晶体中心方向(即z轴正半轴方向)移动;复合晶体(5 mm)的最高温度达到88.01 °C,与复合晶体(3 mm)相比最高温度下降大约1 °C,晶体最高温度点位置移动0.09 mm,说明在泵浦功率一定的情况下,增加纯YAG端帽结构的长度,复合晶体的散热效果更好,如果增大泵浦功率,这种优势则更加明显。

由实验结果可得,复合晶体相较于均匀掺杂晶体,通过在泵浦端键合YAG晶体,有利于晶体的散热,降低了激光晶体工作时的热效应,使得激光器的输出功率更高,光斑质量更优化;通过对两种复合晶体的模拟结果的比较发现,增长键合YAG晶体的长度对降低激光晶体的最高温度有一定的效果。在实际应用中,通过在Nd:YAG晶体两端键合YAG晶体,可以有效降低激光晶体的热效应,提高激光器输出功率,故复合晶体具有更大的优势,更适合应用于大功率激光器。

#### 参考文献:

- [1] Frauchiger J, Peter Albers, Heinz P Weber. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end pumped CW Nd:YAG lasers[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1992, 28(4): 1046 - 1056.
  - [2] ZHAO Yuan, CAI Xiping, LIU Jianbo, et al. Diode-pumped solid state laser radar technology and its applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(1): 47 - 50. (in Chinese)
- 赵远,蔡喜平,刘剑波,等. 二极管泵浦固体激光雷达

- 技术及其应用[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1): 47-50.
- [3] LI Long, GENG Yingge, YU Genghua, et al. Thermal effect of Nd:YAG rod crystal end pumped by pulse LD [J]. Applied Laser, 2015, 35(5): 597-602. (in Chinese)  
李隆, 耿鹰鸽, 余庚华, 等. 脉冲激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 圆棒晶体热效应[J]. 应用激光, 2015, 35(5): 597-602.
- [4] WANG Gang, AN Lin. Comsol multiphysics engineering practice and theoretical simulation; physical field numerical analysis technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese)  
王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真: 多物理场数值分析技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [5] HU Zhiyong, SUN Weicheng, WANG Zhaoying, et al. Latest developments of thermally bonded planar waveguide lasers with a double clad fabric [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(2): 21-23.
- [6] LV Jingshu, YAN Ping, GONG Mali, et al. Thermal bonding and its application in laser system [J]. Optical Technique, 2002, 28(4): 355-359.
- [7] GAO Lanlan. Study on several key technologies of LD pumped all-solid-state laser [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2003: 66-72. (in Chinese)  
高兰兰. LD 泵浦全固体激光器几个关键技术的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003: 66-72.