

复合 Nd : YAG 晶体固体激光器热效应研究

李萌萌, 杨 飞, 赵上龙, 高兰兰

(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130000)

摘 要:通过使用 Comsol 有限元仿真软件中的热传导模块,对以下四种晶体在端面泵浦工作情况下晶体内部温度分布进行了模拟分析。其中包含:(1)3 mm×3 mm×10 mm 均匀掺杂 Nd : YAG 晶体;(2)两个端面分别键合 3 mm 长 YAG 晶体的 3 mm×3 mm×10 mm Nd : YAG 复合晶体;(3)侧面键合厚度 1 mm 的 YAG 晶体 5 mm×5 mm×10 mm 复合 Nd : YAG 晶体;(4)四个侧面分别键合厚度 1 mm 的 YAG 晶体,两个端面分别键合 3 mm 长的 YAG 晶体的 5 mm×5 mm×10 mm Nd : YAG 晶体。在泵浦功率为 30 W 时,四种晶体的最高工作温度分别为 153 ℃,114 ℃,157 ℃,115 ℃。结果表明,与侧面键合结构相比,端面键合是降低激光晶体的工作温度,减小热效应的有效方法。为研究侧面键合结构的适用条件,论文降低了晶体侧面的导热系数,模拟了在同样的泵浦功率条件下四种晶体的最高温度,分别为 212.014 ℃,149.158 ℃,186.741 ℃和 134.410 ℃。模拟结果表明在侧面散热条件比较差的条件下,侧面与端面双重键合是降低激光晶体热效应的最佳选择。在实验方面,采用 LDA 作为泵浦源,在泵浦功率为 18 W 时,得到侧面与端面双重键合的 Nd : YAG 的输出功率最高,为 12.1 W,转换效率为 67.2%,实验结果与理论模拟结果相符合。

关键词:Nd : YAG;复合晶体;热效应;换热系数

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.008

Study on thermal effect of composite Nd : YAG crystal solid state laser

LI Meng-meng, YANG Fei, ZHAO Shang-long, GAO Lan-lan

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: The temperature distribution inside the following four crystals under the working condition of end pump is simulated by using the heat conduction module in the Comsol software. The four crystals are respectively: (1) 3 mm×3 mm×10 mm uniformly doped Nd : YAG crystal; (2) 3 mm×3 mm×10 mm Nd : YAG composite crystal with 3 mm long YAG crystal bonded to two end faces; (3) 5 mm×5 mm×10 mm composite Nd : YAG crystal with YAG crystals whose thickness is 1 mm bonded to the side; (4) 5 mm×5 mm×10 mm Nd : YAG crystal with YAG crystals whose thickness is 1 mm bonded to each of the four sides and with 3 mm long YAG crystals bonded to each of the two end faces. When the pump power is 30 W, the maximum operating temperatures of the four crystals are 153 ℃, 114 ℃,

基金项目:吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20190552KJ)资助。

作者简介:李萌萌(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光及其与物质的相互作用。E-mail:2234335135@qq.com

通讯作者:高兰兰(1975-),女,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为激光及其与物质的相互作用,非线性光学。

E-mail:865781943@qq.com

收稿日期:2019-06-06

157 °C and 115 °C ,respectively. The results show that compared with the side bonding structure ,end face bonding is an effective method to reduce the operating temperature of the laser crystal and the thermal effect. In order to study the applicable conditions of the side bonding structure ,the thermal conductivity of the crystal side is reduced ,and under the condition of the same pump power ,the maximum temperatures of the four crystals is simulated ,which are 212.014 °C ,149.158 °C ,186.741 °C and 134.410 °C ,respectively. The simulation results show that under the condition of poor heat dissipation on the side ,the double bonding of the side and the end face is the best choice to reduce the thermal effect of the laser crystal. In the case of the pump power of 18W ,the Nd :YAG crystal with the YAG crystals bonded to each of sides and end faces experimentally have the highest output power of 12.1 W for the LDA pump source. The conversion efficiency can reach 67.2 % . The experimental results are consistent with the simulation results.

Keywords: Nd :YAG ;composite crystal ;thermal effect ;heat transfer coefficient

1 引言

1960 年,工程师梅曼使用红宝石制作出第一台激光器^[1],此后激光器件及其技术得到快速发展,Nd:YAG 激光器、钛蓝宝石激光器等应运而生,固体激光器进入了一个快速发展的时期^[2]。随着人们对大功率固体激光器的深入研究,固体激光器中激光晶体的热效应——这一限制提高激光器输出功率和光束输出质量的主要障碍,成为热门的研究方向^[3]。在固体激光器运行时,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,引起晶体的热透镜效应^[4-8]。而利用键合技术将 YAG 晶体与 Nd:YAG 晶体键合构成复合晶体,作为激光器的工作物质,可以有效减少激光晶体的热效应,使用复合晶体的激光器具有可靠性高、峰值功率高光斑质量好的优点^[9-12]。

本文采用四种不同结构的复合 Nd:YAG 晶体,其中首次提出了侧面键合 YAG 晶体和端面 & 侧面键合 YAG 晶体的复合晶体结构,并通过 Comsol 有限元分析仿真软件对四种激光晶体在相同工作条件下达到稳态时的温度场分布进行模拟仿真^[13-15],得到不同泵浦功率下的激光晶体内部的温度分布,并结合实验数据对模拟仿真的结果进行验证。结果表明,在理想的冷却条件下,在 Nd:YAG 晶体端面键合 YAG 晶体可以有效减少晶体的热效应;侧面导热系数比较小时,侧面及端面双重键合结构是降低晶体热效应的有效方法。

2 晶体温度分布模型建立

本研究中使用的 Nd:YAG 晶体有四种结构,一种为传统晶体,即内部均匀掺杂 Nd³⁺ 离子的 Nd:YAG 激光晶体(如图 1(a)所示);另外三种为复合晶体,

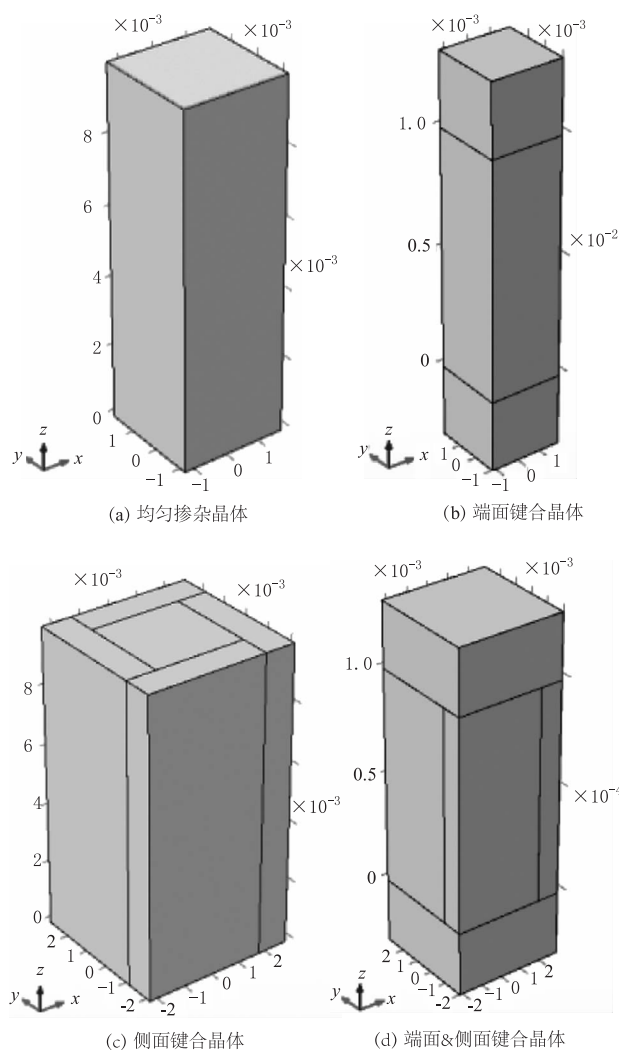


图1 Nd:YAG 晶体结构

Fig.1 Nd:YAG crystal structure

即在均匀掺杂 Nd³⁺ 离子的 Nd:YAG 激光晶体两端或侧面利用扩散键合的方式键合不掺杂的 YAG 晶体(如图 1(b)、(c)、(d)所示)。四种晶体结构如下:(1)3 mm × 3 mm × 10 mm 均匀掺杂 Nd:YAG 晶体;(2)两个端面分别键合 3 mm 长 YAG 晶体的 3 mm ×

3 mm × 10 mm Nd : YAG 复合晶体; (3) 侧面键合厚度 1 mm 的 YAG 晶体 5 mm × 5 mm × 10 mm 复合 Nd : YAG 晶体; (4) 四个侧面分别键合厚度 1 mm 的 YAG 晶体, 两个端面分别键合 3 mm 长的 YAG 晶体的 5 mm × 5 mm × 10 mm Nd : YAG 晶体。因为不掺杂的 YAG 晶体对泵浦光无吸收, 有利于将晶体中的热量从掺杂部分扩散至非掺杂部分, 再通过冷却装置将热量散发, 复合晶体的散热效果要优于传统晶体。此外, 由于复合晶体的内部最高温度点位于晶体内部, 而非传统晶体的端面, 对晶体端面镀膜的保护也得到有效的降低。为了比较四种结构的 Nd : YAG 晶体的散热性能, 在端面泵浦的条件下, 对其工作达到稳态时的内部温度分布进行模拟仿真。

通过热动力学分析可知, 整个晶体处于稳态时的热传导方程为:

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

泵浦光转化的热量为:

$$Q = \frac{2\eta_h \cdot p_{in} \cdot \alpha}{\pi\omega_p^2} \cdot \exp[-2(x^2 + y^2)/\omega_p^2] \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \quad (2)$$

其中, x, y, z 分别为 Nd : YAG 晶体的端面坐标和轴向坐标, 晶体的坐标原点位于泵浦端晶体键合面中心; ω_p 为泵浦光在晶体中传输的光束半径; η_h 为泵浦能量转化为热量的比例系数; p_{in} 为泵浦功率; α 为 Nd : YAG 对泵浦光的吸收系数; k 为 Nd : YAG 的热导率。

上述方程中取 $\eta_h = 35\%$, $\alpha = 3.5 \text{ cm}^{-1}$, $\omega_p = 200 \text{ } \mu\text{m}$, $k = 13 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, Nd : YAG 晶体与空气接触的热交换系数取 $h = 50 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 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 $T_c = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$, 泵浦功率分别取 $p_{in} = 30 \text{ W}$ 和 $p_{in} = 18 \text{ W}$ [16-20]。

3 模拟结果与实验数据

使用 Comsol 有限元仿真软件中的热传导模块对四种激光晶体在激光器中达到稳态时的温度场分布进行模拟。

当泵浦功率 $p_{in} = 30 \text{ W}$ 时, 获得的模拟结果如图 2 ~ 图 5 所示。

当激光器工作达到稳态时, 晶体内部的最高温度和最低温度如表 1 所示。

当把泵浦功率降低至 $p_{in} = 18 \text{ W}$ 时, 激光器工作达到稳态时, 晶体内部的最高温度和最低温度如表 2 所示。

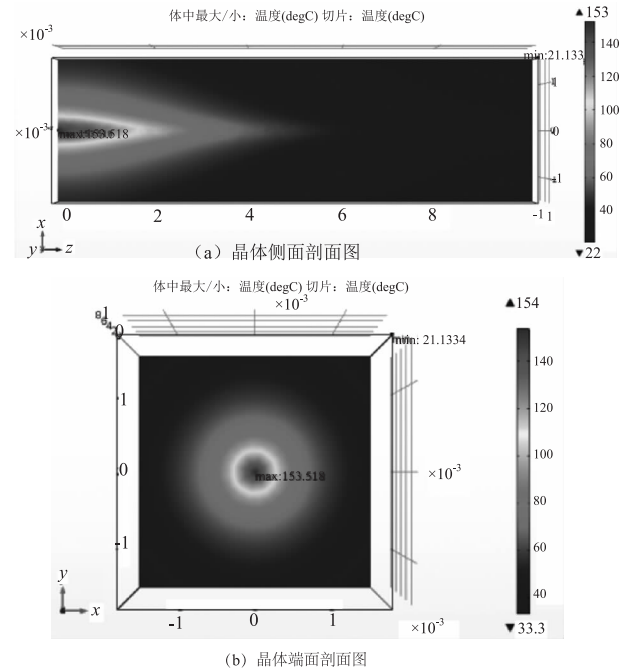


图2 晶体温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of the crystal

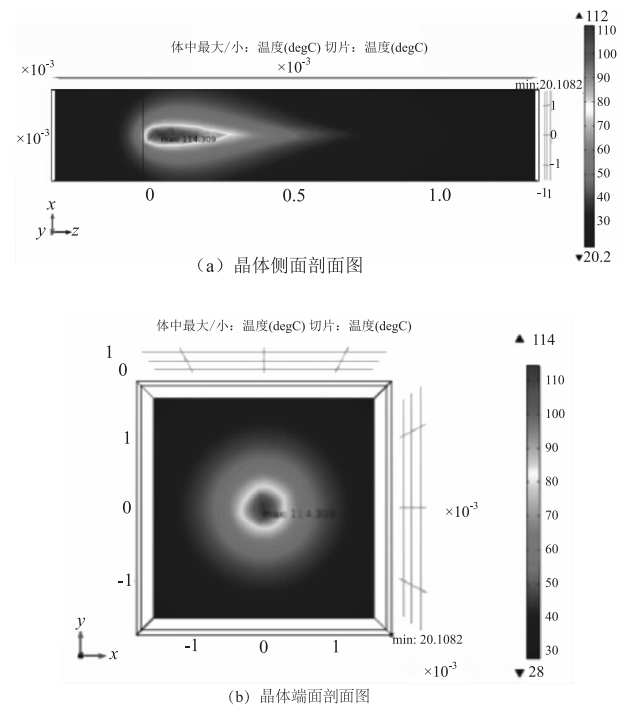


图3 晶体(2)稳态时的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of the crystal (2) at steady state

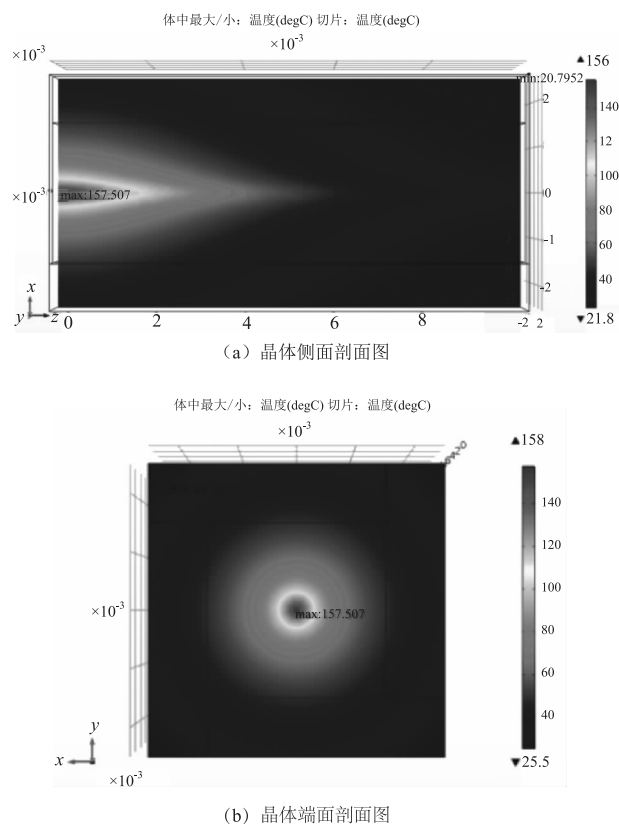


图4 晶体(3)稳态时的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of the crystal(3) at steady state

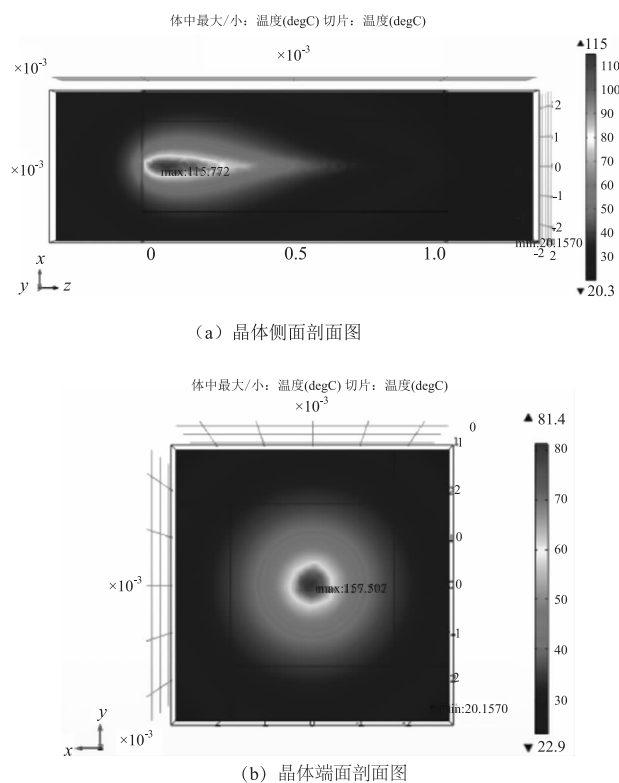


图5 晶体(4)稳态时的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of the crystal(4) at steady state

表1 四种晶体泵浦功率 $p_{in} = 30 \text{ W}$ 时
晶体内最高、低温度Tab. 1 Maximum and minimum temperatures in the
crystal for four crystal pump powers are $p_{in} = 30 \text{ W}$

晶体种类	最高温度/℃	最低温度/℃
晶体(1)	153.518	21.1334
晶体(2)	114.309	20.1082
晶体(3)	157.507	20.7952
晶体(4)	115.772	20.1570

表2 四种晶体在泵浦功率 $p_{in} = 18 \text{ W}$ 时
晶体内最高、低温度Tab. 2 The highest and lowest temperatures in the
crystal of the four crystals at pump power $p_{in} = 18 \text{ W}$

晶体种类	最高温度/℃	最低温度/℃
晶体(1)	100.111	20.6800
晶体(2)	76.5856	20.0649
晶体(3)	102.498	20.4772
晶体(4)	77.4632	20.0942

同时由 Comsol 模拟结果得到四种激光晶体在泵浦功率分别为 18 W 和 30 W 时,达到稳态工作时晶体内部的最高温度点 Z 轴坐标,如表 3 所示。

表3 四种晶体在激光器达到稳态时
晶体内最高温度点坐标Tab. 3 The maximum temperature point coordinates
in the crystal of the four crystals when the laser
reaches steady state

晶体种类	Z 坐标/mm
晶体(1)	0
晶体(2)	0.53969
晶体(3)	0
晶体(4)	0.69447

通过对比表 1 和表 2 的晶体最高温度可知,侧面键合晶体(3)的最高温度最高,在泵浦功率为 30 W 和 18 W 时,分别达到 157.507 °C 和 102.498 °C,说明侧面键合在一定情况下会阻碍激光晶体的散热。两种泵浦功率情况下,最高温度最低的均是端面键合晶体。说明端面键合是改善晶体散热的有效方法。对比端面键合,侧面键合和端面 & 侧面键合三种晶体结构,发现端面 & 侧面键合晶体的最高温度介于端面键合及侧面键合之间,且更接近于端面键合晶

体,原因是端面键合的有效性被侧面键合的阻碍所平衡,因此虽然第四种晶体在掺杂晶体外侧都键合了 YAG 晶体,但是散热效果并不理想。

从表 3 可以看出,均匀掺杂和侧面掺杂的晶体最高温度点位于晶体泵浦端的端面,由于该位置对泵浦光的吸收最强,并且与空气接触散热较差,故温度最高。我们采用波长为 808 nm 的半导体激光器作为泵浦源,泵浦功率为 18 W,分别以四种 Nd:YAG 激光晶体为工作物质进行实验,测量固体激光器达到稳态时波长为 1064 nm 激光的输出功率,得到图 6 所示的激光器输出功率曲线。

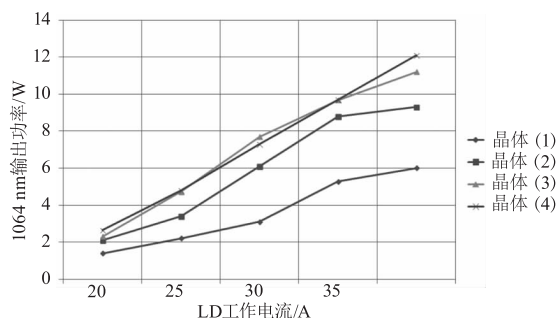


图 6 四种激光晶体在泵浦功率为 18 W 时的功率曲线

Fig. 6 Power curves of four laser crystals at pump power of 18 W

由图 6 可知在 LD 最大工作电流为 40 A (输出功率为 18 W) 时,分别使用四种晶体的 1064 nm 激光的最大输出功率分别为 6 W、9.3 W、11.2 W 和 12.1 W,若进一步提高泵浦功率,均匀掺杂的晶体 (1) 输出激光光斑已不是 TEM₀₀ 模,由此可知晶体内部热效应产生的温度场已经影响到激光器的输出光束质量。与此同时,三种复合晶体输出的激光仍为基模。从图 6 可以看出,键合结构可以有效改善激光晶体的散热,提高激光器的输出功率。在三种复合晶体中,端面 & 侧面键合的晶体 (4) 输出功率最高,在泵浦功率为 18 W 时,激光器的最大输出功率为 12.1 W,转化效率为 67.2 %。曲线要明显优于另外两种结构的复合晶体;在 LD 工作电流为 40 A 时,相较于侧面键合晶体 (3),端面 & 侧面键合晶体 (4) 的输出功率要提高 5 %。实验中,端面 & 侧面键合晶体的输出功率优于仅端面键合和侧面键合的情况,与理论模拟不完全符合,可能的原因是由于晶体通光长度比较长,在激光晶体与晶体座装调过程中,晶体侧面与晶体座直接接触,没有使用软金属箔,导致接触不紧密,影响到散热效果的原因。

4 模拟结果与实验分析

由于在激光器实际工作时冷却方式不同,或者激光晶体与冷却装置接触不紧密等原因,激光晶体的散热情况会有很大的不同。为了研究该因素对于上述四种激光晶体的温度场分布的影响,并验证对实验结果的判断,我们在泵浦功率为 30 W 时,将激光晶体侧面换热系数降低至 $h = 2000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,通过 Comsol 模拟计算出四种激光晶体在稳态时内部的最高温度和最低温度。模拟结果如表 4 所示。

表 4 换热系数调整后四种晶体内最高、低温度

Tab. 4 The highest and lowest temperatures in the four crystals after the heat transfer coefficient is adjusted

晶体种类	最高温度/℃	最低温度/℃
晶体 (1)	212.014	33.8713
晶体 (2)	149.158	23.6047
晶体 (3)	186.741	30.9249
晶体 (4)	134.410	23.7288

通过将表 1 与表 4 的数据对比可知,传统晶体的散热效果仍然最差,最高温升最大,侧面键合 YAG 晶体的晶体 (3) 次之;相较于换热系数 $h = 10000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,当换热系数降低至 $h = 2000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,端面 & 侧面键合 YAG 晶体的晶体 (4) 散热效果要明显优于只有端面键合 YAG 晶体的晶体 (2)。说明在换热系数比较小,或导热性能比较差的情况下,侧面键合可以有效提高晶体的导热性能。与我们的实验结果相吻合。

5 结 论

本论文通过使用 Comsol 有限元仿真软件中的热传导模块对四种激光晶体在激光器中达到稳态时的温度场分布进行模拟,得出键合晶体是有效改善激光晶体散热,提高光束质量的有效方法。键合晶体的结构与激光晶体的冷却方式或晶体侧面的换热系数有关,当换热系数较大为 $h = 10000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,泵浦功率为 $P_{\text{in}} = 30 \text{ W}$ 的情况下,比较四种晶体结构的最高温度。侧面键合的晶体最高温度最高为 157.507 °C,比均匀掺杂未键合的晶体最高温度 153.518 °C 高,端面键合的激光晶体的最高温度最低为 114.309 °C。说明侧面键合在一定情况下会阻碍激光晶体的散热,与侧面键合相比,端面键合是提高晶体散热性能的最有效的方法。同时,当换热系

数为 $h = 2000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 泵浦功率为 30 W 时, 比较四种晶体结构的最高温度。均匀掺杂的晶体最高温度最高为 212.014 °C, 端面 & 侧面键合晶体的最高温度最低为 134.410 °C。在实验方面, 采用 LDA 作为泵浦源, 在泵浦功率为 18 W 时, 得到侧面与端面双重键合的 Nd:YAG 的 1064 nm 输出功率最高, 为 12.1 W, 转换效率为 67.2 %, 实验结果与理论模拟结果相符合。可以得出对于冷却效果不是很好的激光器, 端面 & 侧面键合结构更有利于降低激光晶体内部的热效应。且随着泵浦功率的增加, 复合晶体输出的激光光斑仍旧保持基模状态, 而均匀掺杂的晶体输出激光光斑则不再是基模状态。此研究对于以后的复合结构激光晶体的设计加工具有一定的指导意义。

致谢:感谢福州聚光光电技术有限公司提供的晶体支持。

参考文献:

- [1] T H Maiman. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, 187: 493 – 494.
- [2] QI Lingfei. Study on thermal effect of LD pumped all solid state laser crystal[D]. Ji'nan: Shangdong Normal University, 2014. (in Chinese)
亓凌飞. LD 抽运全固态激光晶体热效应的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2014.
- [3] YANG Liying, LI Jiaqiang, ZHANG Jinyu, et al. Thermal effects of semiconductor laser-pumped composite crystal solid-state lasers[J]. Journal of Luminescence, 2017, 38(6): 742 – 746. (in Chinese)
杨丽颖, 李嘉强, 张金玉, 等. 半导体激光泵浦复合晶体固体激光器的热效应[J]. 发光学报, 2017, 38(6): 742 – 746.
- [4] GUO Longcheng. Study on the thermal effect of crystal in diode-pumped solid – state laser[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
郭龙成. 二极管泵浦固体激光器中晶体热效应的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [5] ZHANG Chao. Study on the thermal effect of LD side pumped rod-shaped Nd:YAG laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
张超. LD 侧面泵浦棒状 Nd:YAG 激光器的热效应研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [6] SHI Peng, LI Jinping. Influence of pumping light distribution on the thermal effect of Nd:YAG microchip laser[J]. Chinese Laser, 2008, (5): 643 – 646. (in Chinese)
史彭, 李金平. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响[J]. 中国激光, 2008, (5): 643 – 646.
- [7] LI Long, NIE Jianping, DONG Wuwei. Time-varying temperature field of pulsed laser diode end – pumped Nd:YAG rod[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, (9): 63 – 67. (in Chinese)
李隆, 聂建萍, 董武威. 脉冲激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 棒时变温度场[J]. 红外与激光工程, 2011, (9): 63 – 67.
- [8] WANG Hui. Effect of thermal effect on output performance of diode pumped laser[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
王慧. 热效应对二极管泵浦激光器输出性能的影响[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [9] W Koechner. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [10] HAO Wang, LI Wei, GAO Lanlan. Composite Nd:YAG crystal high power 1064 nm solid state laser research[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(1): 47 – 51. (in Chinese)
郝旺, 李伟, 高兰兰. 复合 Nd:YAG 晶体大功率 1064 nm 固体激光器研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(1): 47 – 51.
- [11] WANG Siqi, LI Yongliang, LI Shiming. Research progress of LD pumped Yb:YAG solid-state laser[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(1): 3 – 9. (in Chinese)
王斯琦, 李永亮, 李仕明. LD 泵浦 Yb:YAG 固体激光器研究进展[J]. 激光与红外, 2018, 48(1): 3 – 9.
- [12] Masaki Tsunekane, Noboru Taguchi, Humio Inaba. Improvement of thermal effects in a diode-end-pumped, composite Tm:YAG rod with undoped ends[J]. Appl. Opt., 1999, 38(9): 1788 – 1791.
- [13] SHI Peng, LI long, GAN Ansheng. LD end face pumping rectangular section YAG:Nd:YAG composite crystal thermal effect[J]. Photoelectron · Laser, 2006, 17(12): 1461 – 1465. (in Chinese)
史彭, 李隆, 甘安生. LD 端面抽运矩形截面 YAG:Nd:YAG 复合晶体热效应[J]. 光电子 · 激光, 2006, 17(12): 1461 – 1465.

- [14] Frauchiger J, Albers, Peter. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd : YAG lasers[J].//Oe/lase 93:optics, Elctro-optics, & Laser Applications in Science & Engineering, International Society for Optics and Photonics, 1993.
- [15] LV Jingshu, YAN Ping, GONG Mali, et al. Thermal bonding and its application in laser system[J]. Opical Technique, 2002, 28(4): 355 - 364.
- [16] LI Long, GE Yingge, YU Genghua . Pulsed laser diode end-pumped Nd : YAG round bar crystal thermal effect [J]. Application of Laser, 2015, 35(5): 597 - 602. (in Chinese)
李隆, 耿鹰鸽, 余庚华. 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.
- [17] ZHAO Yuan, CAI Xiping, LIU Jianbo. Diode-pumped solid-state laser radar technology and its application[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 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, 2015, 30(1): 47 - 50.
- [18] 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.
- [19] GAO Lanlan. Research on several key technologies of LD pumped all solid state lasers[D]. Changchun: Changchun Institue of Optics, Fine Medchanics and Physics, Chinese Academy of Science. 2003. (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: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2003: 66 - 72.
- [20] HU Zhiyong, SUN Weicheng, WANG Zhaoying. Research progress of thermally bonded double-clad slab waveguide lasers[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2004, (2): 23 - 25. (in Chinese)
胡智勇, 孙伟成, 王肇颖. 热键合双包层平板波导激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, (2): 23 - 25.