

激光与光电子学进展

脉冲 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合
晶体热效应分析李隆^{1,2}, 杨建华^{1*}, 张春玲^{1,2}, 牛娟¹, 薛彪¹, 耿鹰鸽¹¹西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055;²西安建筑科技大学应用物理研究所, 陕西 西安 710055

摘要 为了解决 LD 端面泵浦晶体引起的热效应问题, 根据脉冲 LD 端面泵浦复合晶体工作特点, 利用热传导理论建立了脉冲激光二极管泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体的有限元热模型。定量分析了泵浦功率、未掺杂晶体厚度、脉冲宽度对复合晶体温度场及热形变量的影响。结果表明, 当掺杂晶体厚度为 8 mm, 未掺杂晶体厚度为 3 mm, 脉冲宽度为 3 ms, 经光学耦合系统准直聚焦的泵浦光斑半径为 300 μm , 重复频率为 100 Hz 时, 使用泵浦功率为 80 W 的脉冲 LD 端面泵浦复合晶体 YAG/Nd:YAG, 泵浦端面中心的最高温度及最大热形变量分别 66.84 $^{\circ}\text{C}$ 和 0.12 μm 。可见, 复合晶体能有效缓解晶体的温升和晶体端面的热形变。该研究为实现 Nd:YAG 激光器高功率输出目标提供了理论指导。

关键词 激光光学; 复合晶体; 热效应; 温度场; 激光二极管

中图分类号 O434

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2114001

Thermal Effect Analysis of Pulsed LD End-Pumped YAG/Nd : YAG
Composite CrystalLi Long^{1,2}, Yang Jianhua^{1*}, Zhang Chunling^{1,2}, Niu Juan¹, Xue Biao¹, Geng Yingge¹¹Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;²Institute for Applied Physics, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

Abstract Based on the working characteristics of the pulsed laser diode (LD) end-pumped composite crystal, a finite element thermal model of the pulsed LD pumped YAG/Nd:YAG composite crystal was established using the heat conduction theory to solve the thermal effect caused by the LD end-pumped crystal. The effects of pump power, undoped crystal thickness, and pulse width on the temperature field and thermal deformation of the composite crystal were quantitatively analyzed. The results show that when the thickness of the doped crystal is 8 mm, the thickness of the undoped crystal, pulse width, and repetition rate is 3 mm, 3 ms, and 100 Hz, respectively. Furthermore, the radius of the pump spot collimated and focused by the optical coupling system is 300 μm when a pulse with a pump power of 80 W is applied. In the LD end-face pumped composite crystal YAG/Nd:YAG, the highest temperature and maximum thermal deformation available at the center of the end-face pumped are 66.84 $^{\circ}\text{C}$ and 0.12 μm , respectively. It is thought that the composite crystal can effectively reduce the high-temperature rise of the crystal and the thermal deformation of the end-face of the crystal. This conclusion provides theoretical guidance for realizing the high power output of a Nd:YAG laser.

Key words laser optics; composite crystal; thermal effect; temperature field; laser diode

1 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器(DPSSL)具有体积小、效率高、稳定性好等优势^[1-2], 被广泛应用于国防、光电子产业等领域。但是 LD 端面泵浦固体

激光器(DPSSL)时, 易引起激光晶体内部非均匀温升, 所产生的热效应一直是影响 LD 工作特性的重要因素^[3-5]。

为减小激光晶体热效应的影响, 固态热容激光器和侧泵板条激光器等应运而生, 然而这些激光器结构

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-10-21; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(11705136)

通信作者: *3171710196@qq.com

复杂、成本高^[6-7]。使用掺杂晶体和非掺杂晶体进行热键合形成的复合晶体,可以改善固体激光器的工作性能^[8-9]。在众多激光晶体中,掺钕离子激光晶体 Nd:YAG 具有结构紧凑、激光输出质量好等特点,在脉冲 LD 泵浦的 DPSSL 中有着广泛的应用^[10-11]。Bowman 等^[12-13]为了改善 YAG 激光器的热效应,提出复合晶体概念,结果表明,当半导体侧面泵浦未掺杂端的复合晶体 Tm/Ho:YAG 时,激光器的最大输出功率可提高 2 倍。Bruesselbach 等^[14-15]采用三个掺杂段和两个非掺杂段的复合 Nd:YAG 晶体板作为增益介质,获得最大激光输出功率为 3.54 kW,光转换效率为 41%,斜率效率最高为 59%。李隆等^[16]利用有限元法研究了连续激光功率、键合长度及截面长度对复合 YAG/Yb:YAG 晶体温度场的影响。

本文通过分析脉冲 LD 端面泵浦掺钕 YAG 陶瓷的工作特点,建立有限元热分析模型,利用有限元法仿

真单脉冲 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体,定量地分析了 LD 端面泵浦 Nd:YAG 复合陶瓷温度场分布情况以及达到热稳态平衡时陶瓷泵浦面的热形变量。该研究结果为减弱全固态陶瓷激光器热效应、获得大功率激光输出提供了理论依据。

2 有限元模型的建立

2.1 圆形 YAG/Nd:YAG 复合激光晶体热模型

为了提高泵浦效率,LD 通过耦合镜聚焦进入 YAG/Nd:YAG 复合晶体端面中心^[17]。图 1 为 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 晶体示意图,其中 l_0 为掺杂部分厚度, l 为未掺杂部分厚度。泵浦光沿 YAG/Nd:YAG 端面中心泵浦,晶体泵浦端面镀有 808 nm 高透膜(透过率大于 99.8%)和 808 nm 高反膜(反射率大于 95%),另一端面镀有 1064 nm 增透膜(透过率大于 95%)^[18]。

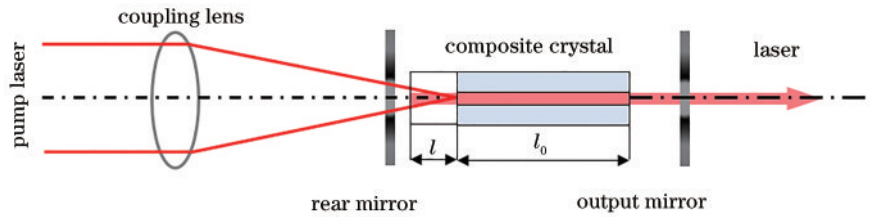


图 1 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体示意图

Fig. 1 Schematic of LD end-pumped YAG/Nd:YAG composite crystal

为使激光晶体吸收泵浦光产生的热量尽快散失,依据复合激光晶体几何尺寸以及激光器谐振腔光路,机械加工了热沉装置,将复合激光晶体置于两个铜质支架中,为保持晶体与热沉产生一致的热膨胀,使用紫铜来加工热沉。并使用循环水冷方式保持热沉铜块温度为 20 °C。

2.2 热源

YAG/Nd:YAG 激光器在柱坐标系的稳态热传导方程^[19]可写为

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rk \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + Q(r, z), \quad (1)$$

式中: ρ 为晶体的密度; c_p 为比热容; k 为晶体热导率; $T(r, z)$ 为晶体内部的温度; $Q(r, z)$ 为热源功率。

复合晶体两端面与空气直接接触, YAG/Nd:YAG 在吸收泵浦光进行受激辐射时会产生热效应,其中大部分热量以热传导的形式从冷却面散失^[20]。因此,可假定晶体两端面近似绝热。则边界条件表示为

$$\begin{cases} T(r, z) \Big|_{r=R} = 0 \\ \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=l_0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

热源功率 $Q(r, z)$ 表示为

$$Q(r, z) = \frac{dP(r, z)}{dV} = \beta I(r, z), \quad (3)$$

式中: β 为增益晶体对泵浦光的吸收系数与热转换系数的乘积; I 为泵浦光强。根据吸收定律,泵浦光在 z 位置沿 z 轴传播的光强^[21]表示为

$$I(r, z) = I_{op} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \cdot \exp[-\alpha(z-l)], \quad (4)$$

式中: I_{op} 为入射光强的最大值; ω 为腰束半径。 I_{op} 与入射光功率的关系为

$$I_{op} = \frac{2P}{\pi\omega^2}. \quad (5)$$

热源功率表达式为

$$Q(r, z) = \frac{2\alpha\eta P \exp(-2r^2/\omega^2) \exp[-\alpha(z-l)]}{\pi\omega^2}, \quad (6)$$

式中: α 是 Nd:YAG 晶体对泵浦光的吸收系数, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体对于 808 nm 波长泵浦光的吸收系数为 110 m⁻¹^[22]; η 是热转化系

数, 即 $\eta = 1 - \frac{808 \text{ nm}}{1064 \text{ nm}}$; P 为输入功率。具体数值如表 1^[23] 所示。

表 1 Nd:YAG 晶体的热性能

Table 1 Thermal performance of Nd:YAG crystal

Parameter	Value
Melting point / °C	1970
Density / (g·cm ⁻³)	4.56
Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	10
Specific heat / (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.59
Radius of disk / μm	300
Coefficient of thermal expansion / K ⁻¹	8.2 × 10 ⁻⁶

3 脉冲 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体热效应分析

3.1 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体温度场分析

利用有限元法模拟了 Nd:YAG 晶体的温度场分布。如图 2 所示, 当泵浦功率为 80 W, 掺杂晶体厚度为 8 mm, 未掺杂晶体厚度为 0 mm, 经光学耦合系统准直聚焦的泵浦光斑半径为 300 μm, 脉宽为 3 ms 时, 复合晶体端面中心的最大温度可达 130.69 °C。结果表明, 高温是限制激光高功率输出的最重要因素。

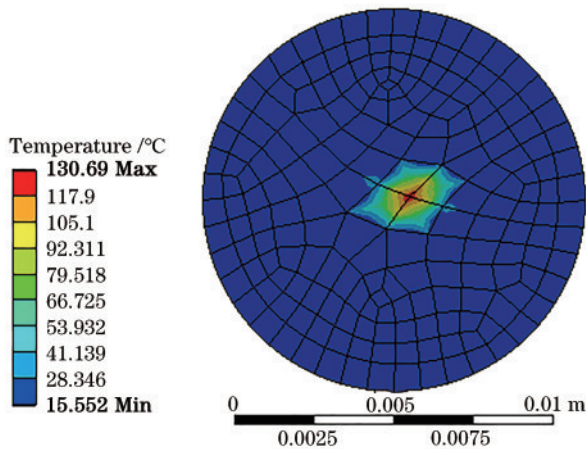


图 2 复合晶体泵浦面温度分布图

Fig. 2 Temperature distribution of composite crystal in pump surface

脉冲 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体 z 轴上的温度分布如图 3 所示。由图 3 可知, 采用复合晶体可以显著降低激光晶体的温度。当 YAG 未掺杂晶体厚度 l 为 0.8 mm 时, 激光晶体的最高温度降到 96.4 °C, 比非复合晶体的温度低 34.29 °C。但是随着未掺杂晶体厚度逐渐增大, 最高温度的下降趋势越来越缓慢, 当未掺杂晶体厚度增加到 3 mm 时, 温度降至 66.84 °C, 晶体内最高温升基本趋于稳定状态, 不再随 l 增大而降低。

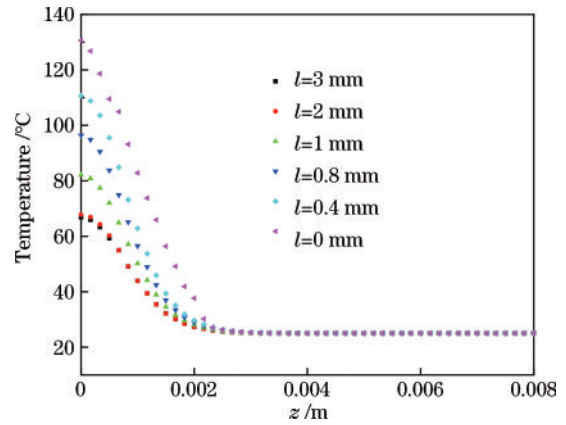


图 3 复合晶体最大温度和未掺杂晶体长度的关系

Fig. 3 Relationship between maximum temperature of composite crystal and length of undoped crystal

对于脉冲 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体来说, 影响其温度场因素除了未掺杂晶体厚度外, 泵浦功率与泵浦脉宽也会影响复合晶体的温度场。当掺杂晶体厚度为 8 mm, 未掺杂晶体厚度为 0.8 mm, 光斑半径为 300 μm, 脉宽为 3 ms 时, 泵浦功率对 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体温度分布如图 4 所示。当泵浦功率 P 分别为 50 W、60 W、70 W、80 W 时, 在泵浦端面获得的最高温升分别为 97.285 °C、100.52 °C、103.75 °C、110.21 °C。由图 4 可知, 当其他参数不变时, 脉冲 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体, 其最高温升和脉冲泵浦功率成正比, 复合晶体的温度随着泵浦功率的增加而增大。泵浦输入功率的变化引起了复合晶体内温度梯度场分布变化, 产生了热透镜效应, 影响了光的输出质量。当脉冲光斑半径为 300 μm, 脉冲泵浦功率为 80 W 时, 不同脉宽下 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体的温度场如图 5 所示。当脉宽 τ 分别为 1 ms、2 ms、3 ms、4 ms、5 ms 时, 最高温度分别为 41.93 °C、92.10 °C、110.21 °C、

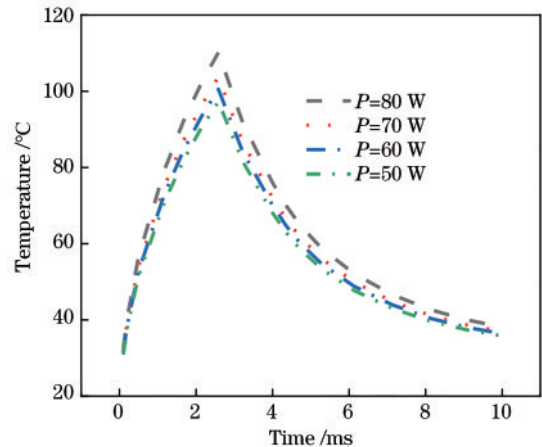


图 4 不同泵浦功率下的 YAG/Nd:YAG 复合晶体温度

Fig. 4 Temperature of YAG/Nd:YAG composite under different pump powers

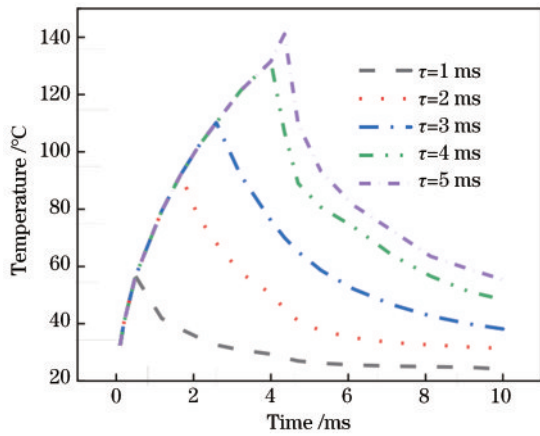


图5 不同脉宽下的YAG/Nd:YAG复合晶体温度

Fig. 5 Temperature of YAG/Nd:YAG composite crystal under different pulse widths

131.58 °C、141.14 °C。由图5可知,当复合晶体的几何结构固定时,脉冲宽度也会影响复合晶体的最高温升。

3.2 端面泵浦YAG/Nd:YAG复合晶体热形变分析

利用温度-热力学间接耦合方法得到了激光晶体的热形变分布,当泵浦功率为80 W,光斑半径为300 μm,截面半径为6 mm,掺杂晶体厚度为8 mm,未掺杂晶体厚度为0 mm时,YAG/Nd:YAG复合晶体端面热形变场三维分布如图6所示。脉冲LD端面泵浦YAG/Nd:YAG最高热形变出现在泵浦光中心(YAG晶体端面中心)处,其形状是以泵浦光为中心的圆形凸包,可以看出,高温导致的热形变同样会限制激光输出功率,影响光束质量。

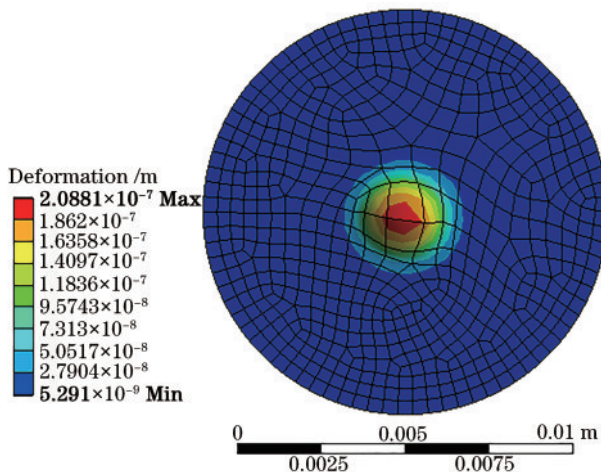


图6 晶体泵浦面热形变三维分布图

Fig. 6 Three-dimensional distribution map of thermal deformation of crystal pump surface

如图7所示,改变YAG/Nd:YAG未掺杂晶体厚度 l ,当 l 分别为0 mm、0.4 mm、0.8 mm、1 mm、2 mm时,晶体端面最高热形变量分别为0.208 μm、0.117 μm、0.116 μm、0.115 μm、0.114 μm。这说明改变 l 几乎不影响端面最高热形变,但是利用复合晶体

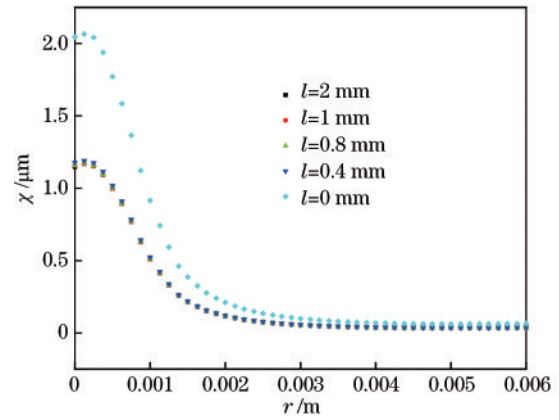


图7 YAG/Nd:YAG复合晶体端面中心处热形变分布图

Fig. 7 Thermal deformation distribution map on end face center of YAG/Nd:YAG composite crystal

YAG/Nd:YAG会减少晶体端面热形变,也为提高LD的输出功率和稳定性提供了理论指导。

4 结 论

本文根据热传导理论,使用有限元分析法,研究了脉冲LD端面泵浦YAG/Nd:YAG复合晶体热效应,得出了采用复合晶体可有效降低晶体中最高温升及晶体端面热形变的结论。在设计激光系统时,应防止晶体因温度过高而损坏,并适当增加未掺杂晶体厚度来降低激光器热效应,为输出高功率激光提供更优的条件,也为进一步设计热性能更好的Nd:YAG激光器提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 李密, 胡浩, 高清松, 等. 高功率双浓度掺杂的Nd:YAG复合陶瓷板条激光器[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514003.
Li M, Hu H, Gao Q S, et al. Dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab laser with high power [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514003.
- [2] 赵志斌, 陈浩, 徐东昕, 等. LD端面抽运全固态声光调Q 228.5 nm深紫外激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0315001.
Zhao Z B, Chen H, Xu D X, et al. LD end-pumped all-solid-state acousto-optical Q-switched 228.5 nm deep ultraviolet laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0315001.
- [3] 鲁远甫, 谢仕永, 刘艳, 等. 高功率窄线宽微秒脉冲1064 nm环形腔激光[J]. 光学精密工程, 2016, 24(S10): 35-40.
Lu Y F, Xie S Y, Liu Y, et al. High-power narrow linewidth microsecond pulse 1064 nm ring laser [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(S10): 35-40.
- [4] 岱钦, 李新忠, 王希军. LDA侧面泵浦固体激光器介质瞬态温升过程分析[J]. 激光与红外, 2007, 37(8): 731-734.
Dai Q, Li X Z, Wang X J. Analysis of temperature rise

- in LDA side pumped solid state laser rod[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(8): 731-734.
- [5] 乔焱. 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, 2012: 11-15.
Qiao Y. Thermal effect of LD end-pumped laser crystal with circular cross-section[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012: 11-15.
- [6] 郭明秀, 李劲东, 付文强, 等. 千瓦级半导体抽运的固体热容板条激光器[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 280-286.
Guo M X, Li J D, Fu W Q, et al. Kilowatt laser diode-pumped solid-state heat capacity slab laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 280-286.
- [7] 郑长波, 吕珍龙. LD 侧面泵浦板条激光器热分布研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(2): 145-149.
Zheng C B, Lü Z L. Study on the thermal distribution of LD side pumped slab laser[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(2): 145-149.
- [8] MacDonald M P, Graf T, Balmer J E, et al. Reducing thermal lensing in diode-pumped laser rods[J]. *Optics Communications*, 2000, 178(4/5/6): 383-393.
- [9] 任滢滢. 激光二极管泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体被动调 Q 激光器的性能研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015: 25-69.
Ren Y Y. Study on passively Q-switched Nd:YAG/Cr:YAG composite laser pumped by LD[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015: 25-69.
- [10] 宋恩茂, 朱广志, 王海林, 等. Nd:YAG 薄片多程激光放大器的设计及实验研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1214001.
Song E M, Zhu G Z, Wang H L, et al. Design and experimental investigation of Nd:YAG thin-disc multipass laser amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1214001.
- [11] Chen X M, Xu L, Hu H, et al. High-efficiency, high-average-power, CW Nd:YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature[J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24517-24523.
- [12] Bowman S R, Lynn J G, Searles S K, et al. Power scaling of diode-pumped 2 micron lasers[C]//Proceedings of LEOS'93, November 15-18, 1993, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 1993: 692.
- [13] 李志刚, 熊政军, 黄维玲, 等. 高功率激光二极管端面抽运复合晶体激光器的研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(3): 297-300.
Li Z G, Xiong Z J, Huang W L, et al. Study of high power laser diode end-pumped composite crystal lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(3): 297-300.
- [14] Bruesselbach H W, Sumida D S, Reeder R A, et al. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Nd:YAG lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(1): 105-116.
- [15] Hanson F. Improved laser performance at 946 and 473 nm from a composite Nd:Y₃Al₅O₁₂ rod[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(26): 3549-3551.
- [16] 李隆, 牛娟, 张春玲, 等. 连续 LD 端面泵浦 YAG/Nd:YAG 复合晶体温度场分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1314002.
Li L, N J, Zhang C L, et al. Temperature field analysis of YAG/Nd:YAG composite crystal pumped by continuous LD end face[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1314002.
- [17] 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.
Yang L Y, Li J Q, Zhang J Y, et al. Thermal effect of composite crystals solid state lasers pumped by diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(6): 742-746.
- [18] 张智群, 黄志云, 邱怡申, 等. LD 端面抽运 Nd³⁺:YAG 激光器输出功率的理论分析[J]. *中国激光*, 2008, 35(s2): 94.
Zhang Z Q, Huang Z Y, Qiu Y S, et al. Theoretical analysis of LD end-pumped Nd³⁺:YAG laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(s2): 94.
- [19] 李永智, 张萌, 闫东钰, 等. 基于 Nd:YAG/YAG/Cr:YAG/YAG 复合晶体的高效被动调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 41-51.
Li Y Z, Zhang M, Yan D Y, et al. High efficiency passive Q-switched laser based on Nd:YAG/YAG/Cr:YAG/YAG composite crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 201, 48(21):41-51.
- [20] 耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. LD 端面泵浦变热导率圆片 Nd:YAG 激光器的热效应[J]. *光学技术*, 2017, 43(2): 103-107.
Geng Y G, Li L, Pan X R, et al. Thermal effect of variable thermal-conductivity circular Nd:YAG crystal end pumped by pulse LD[J]. *Optical Technique*, 2017, 43(2): 103-107.
- [21] 李隆, 张秋娟, 张春玲, 等. 脉冲激光二极管巴条侧面泵浦 Nd:YAG 陶瓷瞬态热效应研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 20200495.
Li L, Zhang Q J, Zhang C L, et al. Transient thermal effect of Nd:YAG ceramics with pulsed laser diode bar side-pumped[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20200495.
- [22] 李锋, 刘蓉, 白晋涛, 等. LD 抽运复合 YAG 晶体温度场及热透镜效应研究[J]. *激光技术*, 2008(01): 101-104.
Li F, Liu R, Bai J T, et al. Temperature field and thermal lens effect of LD pumped Composite YAG crystal [J]. *Laser Technology*, 2008(01): 101-104.
- [23] Liu Q, Wu H S, Gong M L, et al. GaAs as a passive Q-switch and Brewster plate for pulsed Nd:YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2003, 222(1/2/3/4/5/6): 355-361.