

激光与光电子学进展

连续 LD 端面泵浦 YAG/Yb:YAG 复合晶体温度场分析

李隆^{1,2}, 牛娟^{1*}, 张春玲^{1,2}, 杨建华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 为了解决激光二极管端面泵浦圆盘晶体引起的热效应问题,根据连续 LD 端面泵浦圆盘形 YAG/Yb:YAG 的工作特点,基于热传导理论建立了复合晶体有限元分析模型。通过设定 LD 泵浦参数,定量分析了泵浦功率、复合晶体厚度与截面大小对温度场的影响。研究结果表明,当复合晶体几何结构一定时,随泵浦功率增大,晶体温度升高。当泵浦功率为 70 W,经光学耦合系统准直聚焦的泵浦光斑半径为 400 μm 时, Yb:YAG 晶体厚度为 3 mm,当键合的 YAG 晶体厚度从 0 mm 变为 0.7 mm 时,复合晶体内最高径向温升降低了 39.7 $^{\circ}\text{C}$,最高轴向温升降低了 238.3 $^{\circ}\text{C}$ 。在相同泵浦条件下,取 YAG 晶体厚度为 0.5 mm,当复合晶体截面半径由 8 mm 增加至 13 mm 时,晶体内沿径向的最高温升降低了 32.8 $^{\circ}\text{C}$,沿轴向最高温升降低了 171.7 $^{\circ}\text{C}$ 。利用复合晶体能够降低激光晶体内部热效应,对实现全固态 Yb:YAG 激光器高功率输出具有指导意义。

关键词 激光器; 激光二极管; YAG/Yb:YAG; 复合晶体; 温度场

中图分类号 O434

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1314002

Temperature Field of Continuous LD End-Pumped YAG/Yb:YAG Composite Crystal

Li Long^{1,2}, Niu Juan^{1*}, Zhang Chunling^{1,2}, Yang Jianhua¹, Xue Biao¹, Geng Yingge¹¹Faculty of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;²Institute for Applied Physics, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

Abstract In this paper, we proposed a finite element model of composite crystals to solve the thermal effect of disk crystal end-pumped by LD. The model was established based on the heat conduction theory, which is related to the working characteristics of continuous LD end-pumped YAG/Yb:YAG disk. The effects of different factors such as the pump power, composite crystal thickness, and cross section size on the temperature field were analyzed by setting LD pumping parameters. The results showed that when the geometry of the composite crystal is constant, the temperature of the crystal increased with increasing pump power. At 70 W pump power, the pump spot radius was 400 μm via the collimation focusing of the optical coupling system, the thickness of Yb:YAG crystal was 3 mm, and the thickness bonding of YAG crystal changed from 0 mm to 0.7 mm. Furthermore, the rise in maximum radial and axial temperatures decreased by 39.7 $^{\circ}\text{C}$ and 238.3 $^{\circ}\text{C}$, respectively. Under the same pumping conditions and with a 0.5 mm thick YAG crystal, the cross section radius of composite crystal increased from 8 mm to 13 mm, the maximum temperature rise along the radial and axial directions decreased by 32.8 $^{\circ}\text{C}$ and 171.7 $^{\circ}\text{C}$, respectively. Thus, the composite crystals can reduce the thermal effect inside laser crystals, which is significant for realizing high-power outputs of solid-state Yb:YAG lasers.

Key words lasers; laser diode; YAG/Yb:YAG; composite crystal; temperature field

1 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态 Yb:YAG 激光器具有结构紧凑、激光输出质量好、可靠性高等特点,在工业、通信、国防、医疗以及科研等领域有着广泛的应

用,成为当前激光科技发展的主要方向之一^[1]。LD 出射的泵浦光波长与激光晶体的吸收峰相匹配,使得激光的转换效率大大提高^[2]。掺 Yb³⁺ 的 YAG 晶体有以下优点:适合 LD 泵浦、激光晶体中激活粒子掺杂浓度高、没有激发态吸收与上转换及荧光寿命长等,从而得

收稿日期: 2021-07-06; 修回日期: 2021-08-02; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(11705136)

通信作者: *2628492591@qq.com

到了人们的广泛关注^[3-4]。

Yb:YAG 固体激光器虽然具有很多优势,但其较低的热载荷(Yb:YAG 产生的热载荷是 Nd:YAG 的 1/3)仍是限制其大功率、高能量输出的主要因素^[5]。同时,由于 Yb:YAG 晶体为准三能级系统,使得激光器的运转状态对于激光晶体的温度变化比较敏感,需要高效率制冷^[6]。Yb:YAG 晶体在高功率泵浦产生激光的同时,会产生大量废热^[7-8]。为了减小晶体热效应带来的影响,近年来有人利用键合晶体来降低激光器工作过程中的热效应,并取得了一定成果。Liu 等^[9-10]的研究表明,当 LD 侧面泵浦带有无掺杂端的复合晶体 Tm/Ho:YAG 时,其最大输出功率是 Yb:YAG 晶体的 2 倍。Chen 等^[11]采用三个掺杂段和两个非掺杂段的复合 Yb:YAG 晶体板作为增益介质,由两个输出波长为 940 nm 的激光二极管端面泵浦,获得了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%。

本文基于热传导理论建立了 YAG/Yb:YAG 复合晶体在稳定工作时的热稳态模型,利用有限元分析的方法研究了激光二极管端面泵浦的全固态 Yb:YAG 激光器设计中的泵浦功率、复合晶体厚度及截面大小对温度场的具体影响,为设计性能更好的掺镱固体激光器提供实验依据和参考。

2 理论分析

2.1 LD 端面泵浦 YAG/Yb:YAG 复合晶体 z 型折叠腔激光器的结构及几何建模

利用 LD 端面泵浦的优点,泵浦光的模式与激光谐振腔内的振荡模相匹配,不仅提高了泵浦光的利用率,而且能够产生高质量的激光输出。泵浦光通过耦合聚焦器聚焦到 YAG/Yb:YAG 晶体键合部分端面中心,图 1 给出了 LD 端面泵浦 YAG/Yb:YAG 复合晶体 z 型折叠腔激光器实验装置简图。

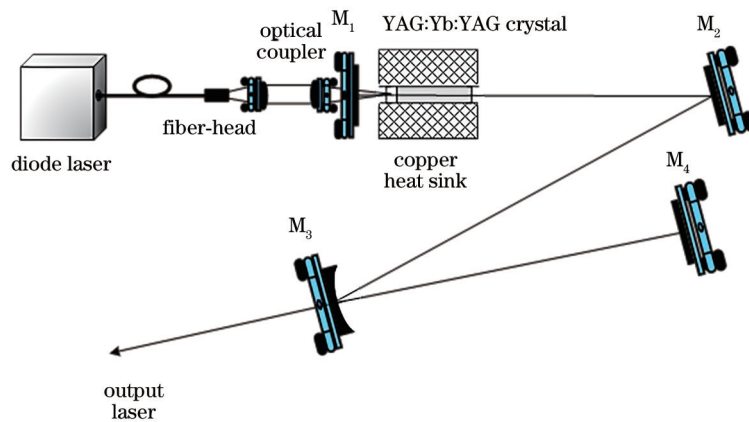


图 1 LD 端面泵浦 YAG/Yb:YAG 复合晶体 z 型折叠腔激光器实验装置简图

Fig. 1 Schematics of LD end-pumped YAG/Yb:YAG composite crystal z-shaped fold cavity laser

Yb:YAG 晶体入射端面键合一个截面面积、长度均可调的 YAG 未掺杂晶体,形成 YAG/Yb:YAG 复合晶体。泵浦光沿 YAG/Yb:YAG 端面中心泵浦,晶体泵浦端镀有 940 nm 高透膜(透过率大于 99.8%)和 1030 nm 高反膜(反射率大于 95%),另一端面镀有 1030 nm 增透膜(反射率大于 95%)。图 2 是 LD 端泵

YAG/Yb:YAG 晶体几何结构图,图中 R 为复合晶体半径, l_0 为掺杂部分厚度, l 为未掺杂部分厚度。

2.2 热传导方程及边界条件

建立柱坐标系,由于激光晶体和热源同时具有圆对称性,就均匀各向同性固体而言,材料的导热系数与方向无关^[12]。根据热传导基本理论,导热方程表达式为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{q}{K}, \quad (1)$$

式中: T 为晶体的温度分布; K 为晶体内导热系数; q 是热源功率。

复合晶体满足的边界条件:掺杂晶体与非掺杂晶体之间由于热键合精密连接,在模型中键合面两侧的不同晶体可以理想状态下近似为同一晶体内部该平面的两侧,传导系数由晶体材料本身决定^[13]。由于复合晶体侧面有紫铜热沉强制降温,温度相对恒定,作为热模型在数学上可设为 0(相对)。晶体两端面与空气直接接触,YAG/Yb:YAG 在吸收泵浦光进行受激辐射

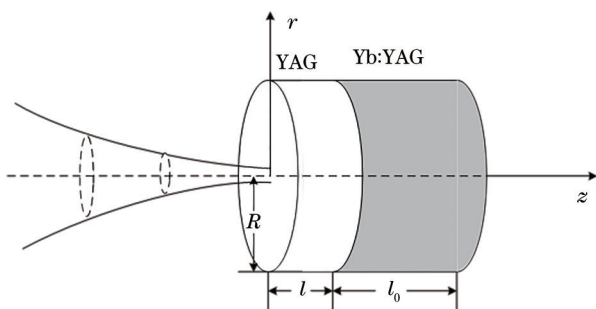


图 2 LD 端泵 YAG/Yb:YAG 复合晶体几何结构图

Fig. 2 Schematics of LD end-pumped YAG/Yb:YAG composite crystal

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^[14]。因此可以假定晶体两端面近似绝热。则边界条件表示为

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

2.3 热源

激光晶体在稳恒条件下的热传导方程式(2)可写为

$$-K_T \nabla^2 T(r, z) = Q(r, z), \quad (3)$$

式中: K_T 是激光材料的热导率; $T(r, z)$ 代表晶体内部的温度分布情况; $Q(r, z)$ 是激光器工作过程中Yb:YAG晶体吸收泵浦光时,在 (r, z) 点附近产生的单位体积内的热源功率。因此有,

$$Q(r, z) = \frac{dP(r, z)}{dV} = \beta I_p(r, z), \quad (4)$$

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_p 为激光器工作过程中晶体内部 (x, y, z) 点处的泵浦光强度。根据吸收定律,泵浦光在 z 位置沿 z 轴传播的光强为^[15]

$$I_p(r, z) = I_{op} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \cdot \exp[-\alpha(z-l)], \quad (5)$$

式中: I_{op} 为入射光强的最大值; ω_p 为光斑半径。 I_{op} 与入射光功率的关系为

$$I_{op} = \frac{2P_{in}}{\pi\omega_p^2} \quad (6)$$

由式(4)~(6)可以得到热源功率表达式为

$$Q(r, z) = \frac{2\alpha\eta P \exp(-2r^2/\omega^2) \exp[-\alpha(z-l)]}{\pi\omega^2}, \quad (7)$$

式中: α 是Yb:YAG晶体对泵浦光的吸收系数,Yb³⁺掺杂摩尔分数为8.0%的Yb:YAG晶体对于940 nm波长泵浦光的吸收系数为8.28 cm⁻¹[16]; η 是YAG/Yb:YAG晶体工作时所产生的荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数,即 $\eta = 1 - \lambda_{in}/\lambda_{out}$; P 为输入功率。

3 连续LD端面泵浦YAG/Yb:YAG复合晶体温度场计算结果

3.1 复合晶体泵浦面温度分布情况

设定泵浦功率为70 W,复合晶体截面半径为10 mm,掺杂晶体厚度为3 mm,未掺杂晶体厚度为0.5 mm,复合晶体泵浦面的最高温升为108.8 °C。从计算结果可以看出,端面中心的温升最高,因为光斑范围在中心部分,这与理论是相符合的。图3是复合晶体泵浦面最高温升分布图,表1中给出本文所用参数。

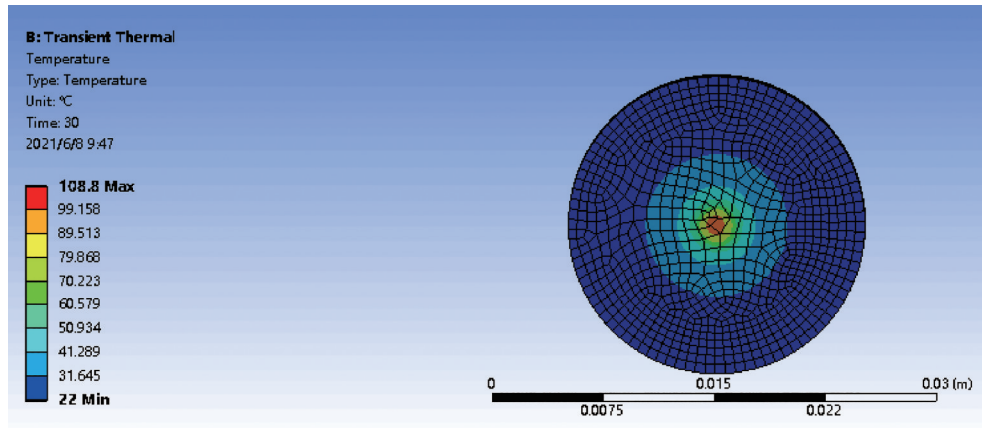


图3 复合晶体泵浦面温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution of composite crystal in pump surface

表1 计算中所用到的参数

Table 1 Parameters used in the calculation

Parameter	Value
Pump power /W	60, 70, 80
Melting point /°C	1970
Density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	4.56
Thermal conductivity /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ^[17]	14
Specific heat /($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.59
Radius of disk / μm	400

3.2 复合晶体内不同方向上的温升变化趋势

图4、图5是泵浦功率分别为60 W、70 W、80 W时

晶体内部温度沿径向与轴向的温度分布情况,由模拟结果可知,当泵浦功率由60 W增至70 W时,复合晶体内部径向最高温升由33.9 °C增为45.9 °C,轴向由79.2 °C增至136.3 °C。因此,复合晶体内部的温度随着泵浦功率的增大而升高。

泵浦光参数及复合晶体截面半径不变,选Yb:YAG为激光晶体时,晶体厚度由3 mm增加为3.5 mm,晶体内部径向最高温升下降了8.9 °C,轴向下降了53.1 °C。而选择厚度为3 mm的掺杂晶体与厚度为0.5 mm的未掺杂组成的复合晶体时,晶体内部径向最高温升下降了30.1 °C,轴向下降了142.2 °C。由此可知,利用复合晶体能够有效降低激光晶体工作时的

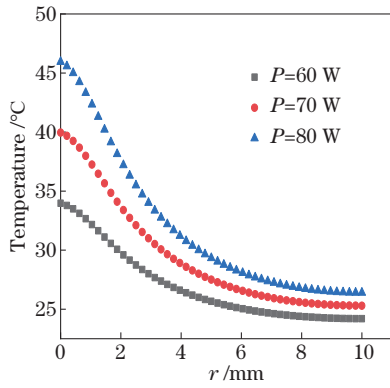


图 4 不同泵浦功率下复合晶体内径向的温度变化

Fig. 4 Temperature variation along radius direction in composite crystal under different pump powers

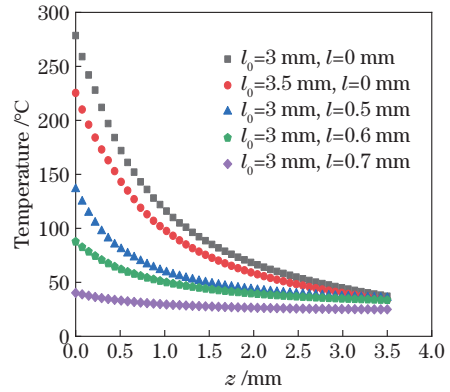


图 7 键合不同长度 YAG 的复合晶体沿 z 轴温度变化

Fig. 7 Temperature variation along z axis of composite crystals bonded to YAG of different lengths

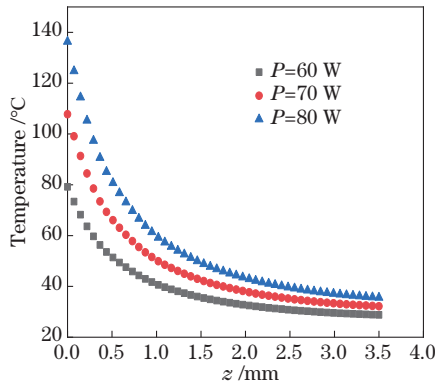


图 5 不同泵浦功率下复合晶体内沿 z 轴的温度变化

Fig. 5 Temperature variation along z axis in composite crystal under different pump powers

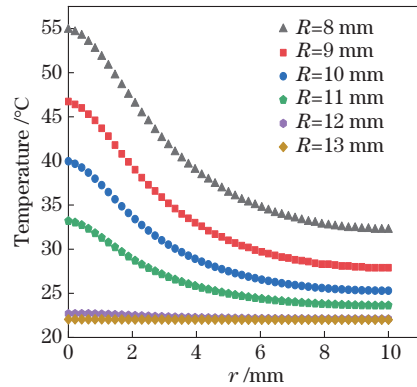


图 8 不同截面尺寸的复合晶体沿径向的温度变化

Fig. 8 Temperature variation along radius direction of composite crystals with different cross section sizes

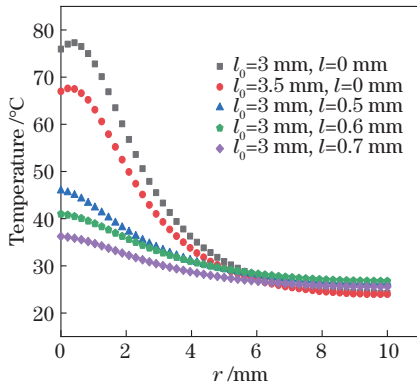


图 6 键合不同长度 YAG 的复合晶体沿径向的温度变化

Fig. 6 Temperature variation along radius direction of composite crystals bonded to YAG of different lengths

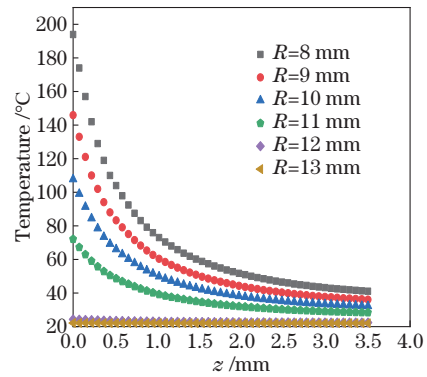


图 9 不同截面尺寸的复合晶体沿 z 轴的温度变化

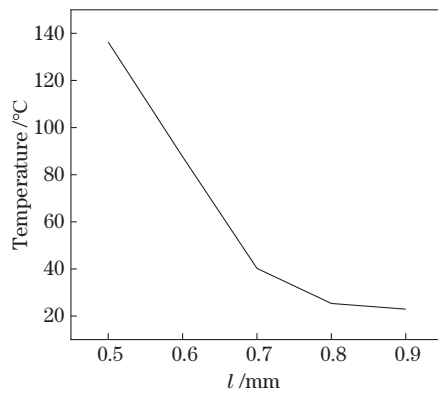
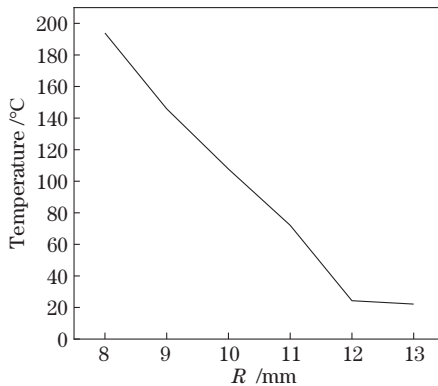
Fig. 9 Temperature variation along z axis of composite crystals of different cross section sizes

热效应,当键合晶体厚度增加时,晶体内最高温升也随之降低。

当泵浦功率为 70 W,几何模型中掺杂晶体厚度为 3 mm,未掺杂晶体厚度为 0.5 mm 时,改变复合晶体截面半径,对有限元计算结果进行分析,由图 8、图 9 可知,随着复合晶体截面半径的增大,复合晶体内最高温升逐渐降低。当复合晶体半径由 8 mm 增大为 13 mm 时,晶体沿轴向的最高温升由 193.9 °C 降低为

22.1 °C,沿径向的最高温升由 54.8 °C 降低为 22.1 °C。同时,当键合晶体半径增加为 12 mm 后,继续增加截面半径,晶体内最高温升基本趋于稳定状态,不再随半径增大而降低。

当需要高功率的输出激光时,可以通过增大泵浦功率来实现。但由图 3、图 4 可知,随着泵浦功率的增大,同时会造成激光晶体内温升的增高。由图 10、图 11 可以明确看出 l 、 R 与温升变化关系,随着 l 或 R

图 10 l 与温升变化关系图Fig. 10 Relationship between l and temperature rise图 11 R 与温升变化关系图Fig. 11 Relationship between R and temperature rise

增大, 晶体内部温升逐渐减小, 当 l 增至 0.8 mm 后, 晶体内部最大温升基本趋于稳定, 当 R 增加为 12 mm 后, 晶体内部最高温升也趋于稳定。由计算结果可知, 能够利用键合技术降低激光晶体热效应, 适当增大未掺杂晶体长度或半径, 均可起到降低复合晶体温升的作用。从而改善晶体内部温度场分布, 使得输出功率增大, 提高激光输出质量, 提升激光器的稳定性。

4 结 论

本文以热传导理论为基础, 使用有限元方法, 对连续 LD 泵浦的 YAG/Yb:YAG 复合晶体在激光器工作过程中达到稳态时的温度场分布进行计算。定量分析了光斑半径为 400 μm 时, 泵浦功率、复合晶体半径及厚度对晶体内部温度场分布的影响。由计算结果可得, 随着泵浦功率的减小, 晶体内部温升逐渐降低。当泵浦功率为 70 W 时, 增加 YAG 晶体的长度或者半径, 晶体内部最高温升可降低至 24.9 $^{\circ}\text{C}$, 当 YAG 晶体截面半径增加为 12 mm 后, 降低热效应的效果变得不再明显。因此, 适当增加键合晶体厚度及截面大小都能够有效降低晶体内部热效应, 给输出高功率激光提供更优的条件, 为进一步设计热性能更好的 Yb:YAG 激光器提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 刘东升, 王金川, 徐浏, 等. 长脉宽大能量 Yb:YAG 平面波导激光放大器[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1601004.
Liu D S, Wang J C, Xu L, et al. Long pulse laser amplification of Yb:YAG planar waveguide with high energy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1601004.
- [2] 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.
- [3] Bruesselbach H W, Sumida D S, Reeder R A, et al. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(1): 105-116.
- [4] 宋恩茂, 朱广志, 王海林, 等. Yb: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 Yb:YAG thin-disc multipass laser amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1214001.
- [5] 耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. 脉冲 LD 端面抽运变热导率方片 Yb:YAG 晶体温度场[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 081401.
Geng Y G, Li L, Pan X R, et al. Temperature field of pulsed LD end-pumped square Yb:YAG crystal with variable thermal-conductivity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 081401.
- [6] 任滢滢. 激光二极管泵浦 Yb: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 Yb:YAG/Cr:YAG composite laser pumped by LD[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015: 25-69.
- [7] 肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 美国 LIFE 计划激光驱动器概念设计研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040001.
Xiao K B, Yuan X D, Jiang X Y, et al. Research status of conceptual design of diode-pumped solid-state laser driver for LIFE[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040001.
- [8] 王君涛, 王小军, 周唐建, 等. 端面抽运双包层 Nd:YAG 平面波导激光放大器设计[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102009.
Wang J T, Wang X J, Zhou T J, et al. Design of end-pumped double cladding Nd:YAG planar waveguide laser amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102009.
- [9] Liu Q, Wu H S, Gong M L, et al. GaAs as a passive Q-switch and Brewster plate for pulsed Yb:YAG laser[J]. Optics Communications, 2003, 222(1/2/3/4/5/6): 355-361.
- [10] 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.
- [11] Chen X M, Xu L, Hu H, et al. High-efficiency, high-average-power, CW Yb:YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature[J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24517-24523.
- [12] 耿鹰鸽. 激光加热 Al_2O_3 陶瓷温度场特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017: 11-46.
Geng Y G. Temperature field of Al_2O_3 ceramics by laser heating[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017: 11-46.
- [13] 周宗仁. 单端键合激光晶体的热效应仿真研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019: 19-28.
Zhou Z R. Simulation study on thermal effect of single-ended bonded laser crystals[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019: 19-28.
- [14] 樊素, 侯涛. 基于 ANSYS 的圆截面激光晶体的热变形分析[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 285-288.
- Fan S, Hou T. Thermal distortion analysis of laser crystal with circular cross-section based on ANSYS[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 285-288.
- [15] Gong L Y, Qiao Y Q, Yao M X, et al. LD end-pumped single-ended bonding Tm:LuAG laser[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 103: 103059.
- [16] 耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. LD 端面泵浦变热导率圆片 Yb: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 Yb:YAG crystal end pumped by pulse LD[J]. Optical Technique, 2017, 43(2): 103-107.
- [17] 曹健东, 程小劲, 范米, 等. 端面泵浦薄片激光器热效应补偿方法的研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(2): 111-116.
Cao J D, Cheng X J, Fan M, et al. Research on thermal effect compensation method of end-pumped thin-disk Yb:YAG lasers[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30(2): 111-116.