

# 改善 Nd:YAG 掠入射板条激光器增益介质热效应的研究

季林涛, 邹岩, 李之通, 姜梦华, 雷甸, 李强\*

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 增益介质的热效应是制约掠入射板条激光器获得高功率和高光束质量的重要因素。采用 Nd:YAG 和蓝宝石晶体键合的方法, 研究掠入射板条激光器增益介质的热效应。理论模拟了 Nd:YAG 与蓝宝石键合晶体增益介质的温度场分布和热焦距。实验对比了 Nd:YAG 和蓝宝石键合晶体与单块 Nd:YAG 晶体增益介质的输出特性; 在相同腔长和抽运的自由振荡条件下, 键合晶体的最大稳定输出功率比单块 Nd:YAG 晶体提高了 26%; 当抽运功率为 44 W 时, 键合晶体相对于单块 Nd:YAG 晶体热焦距增长了 69%; 同时, 键合晶体宽度、厚度方向的光束质量因子  $M_x^2 = 1.84$ 、 $M_y^2 = 2.29$ , 单块 Nd:YAG 晶体宽度、厚度方向的光束质量因子  $M_x^2 = 2.92$ 、 $M_y^2 = 4.38$ 。理论分析和实验结果表明, Nd:YAG 和蓝宝石键合晶体能够降低掠入射板条激光器增益介质的热效应, 有利于输出功率和光束质量的提高。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 掠入射; 键合; 热效应

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.1101005

## Improvement of Gain Medium Thermal Effect in Nd:YAG Grazing Incidence Slab Laser

Ji LinTao, Zou Yan, Li Zhitong, Jiang Menghua, Lei Hong, Li Qiang

*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** The thermal effect of gain medium is an important factor to control the high power and high beam quality of the grazing incidence slab laser. The Nd:YAG and sapphire crystal bonding method is used to study the thermal effect of grazing incidence slab laser. The temperature field distribution and thermal focal length of gain media of Nd:YAG and sapphire bonding crystal are simulated theoretically. The output characteristics of gain media of Nd:YAG and sapphire bonding crystal and single Nd:YAG crystal are compared experimentally. The maximum stable output power of the bonding crystal is 26% higher than that of the single Nd:YAG crystal, under the same condition of cavity length and pump free oscillation. When the pump power is 44 W, the thermal focal length of bonding crystal increased by 69% with respect to the single Nd:YAG crystal. The beam quality factors along the width and thickness direction of bonding crystal are  $M_x^2 = 1.84$  and  $M_y^2 = 2.29$ , respectively. The beam quality factors along the width and thickness direction of single Nd:YAG crystal are  $M_x^2 = 2.92$  and  $M_y^2 = 4.38$ , respectively. The theoretical analysis and experimental results show that the Nd:YAG and sapphire bonding crystals can reduce the thermal effect of gain medium in grazing incidence slab laser, which is beneficial to improve the output power and beam quality.

**Key words** lasers; solid-state lasers; grazing incidence; bonding; thermal effect

**OCIS codes** 140.3580; 140.3390; 140.6810

**收稿日期:** 2017-06-15; **收到修改稿日期:** 2017-07-03

**基金项目:** 国家自然科学基金(61378023)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)、北京市自然科学基金(KZ201610005006,4174085)

**作者简介:** 季林涛(1992—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: jilintao@emails.bjut.edu.cn

**导师简介:** 雷甸(1970—),男,博士,副教授,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: leihong@bjut.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

# 1 引 言

随着 LD 技术的进步,半导体抽运固体激光器得到了迅速的发展,并以其效率高、寿命长、光束质量好、可靠性强等优势,被普遍应用于机械加工、医疗、遥感探测等领域<sup>[1-2]</sup>。固体激光器的主要形式有棒状<sup>[3]</sup>、板条<sup>[4]</sup>、薄片<sup>[5]</sup>等,其中掠入射板条结构<sup>[6]</sup>是由侧面抽运板条晶体,光束在晶体侧面发生一次内全反射,使抽运光模式与信号光模式在掠入射表面高度匹配,能同时获得高增益和高光束质量的激光输出,故而成为结构紧凑、增益高的中小功率激光器和放大器的常用结构。

自 20 世纪 90 年代以来,Rutherford 等<sup>[7-10]</sup>对掠入射板条固体激光器的热效应问题进行了系统的研究。掠入射板条激光器由于增益介质中热分布不均匀,会存在应力双折射、热致波前畸变、热退偏、热透镜等效应,这些热效应成为制约其获得更高平均功率和更好光束质量输出的重要因素。为了降低掠入射板条激光器中的热效应,人们采取了多种方法,包括增大板条宽厚比<sup>[11]</sup>、加厚作为热沉的铜块<sup>[12]</sup>、在板条和热沉之间放置热传导材料<sup>[13]</sup>或在增益介质上组合或者键合一块高热导率晶体或者非掺杂晶体<sup>[14-15]</sup>等。2015 年 Abe 等<sup>[14]</sup>采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 贴合蓝宝石的方法通过三通放大获得了 44.5 W 的输出功率,光-光转换效率为 56%。而关于异种材料直接键合作为增益介质来减弱热效应的激光器未有报道。

本文采用将 2% 掺杂原子数分数的 Nd:YAG 和蓝宝石直接键合的方法,研究掠入射板条激光器增益介质的热效应。理论模拟了 Nd:YAG 与蓝宝石键合晶体和单块 Nd:YAG 晶体作为增益介质的温度场分布和热焦距;实验对比了 Nd:YAG 和蓝宝石键合晶体与单块 Nd:YAG 晶体增益介质的输出特性。研究表明,Nd:YAG 和蓝宝石键合晶体,降低了掠入射板条激光器增益介质的热效应,能够提高输出功率和光束质量。

## 2 热效应实验模拟及分析

为比较键合晶体和单块 Nd:YAG 晶体的热效应,对掠入射板条激光器的温度场分布和热透镜焦距等参数进行了模拟计算。

### 2.1 温度场模拟分析

对相同抽运功率下单块 Nd:YAG 晶体和键合晶体作为增益介质时的温度场进行模拟。单块 Nd:YAG 晶体尺寸为 4 mm × 8 mm × 30 mm,键合晶体是在相同单块 Nd:YAG 晶体的抽运面键合一块尺寸为 4 mm × 2 mm × 30 mm 的蓝宝石,两者结构如图 1 所示。设定抽运区域为 24 mm × 0.6 mm,上下冷却,抽运平均功率为 60 W,初始温度设为 293.15 K。设置蓝宝石晶体的泊松率为 0.28,热导系数为 36 W · (m · K)<sup>-1</sup>,热容为 810 J · (kg · K)<sup>-1</sup>,热膨胀系数为 8.8 × 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>。利用 Comsol 和 Matlab 软件画出晶体宽度方向中心线(x 轴)、厚度方向中心线(y 轴)、长度方向中心线(z 轴)的温度场分布,如图 2 所示。

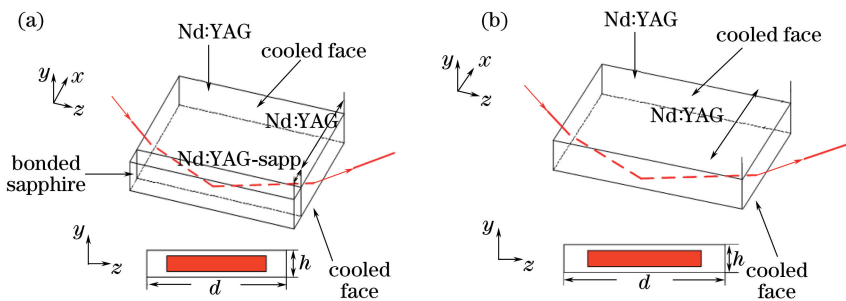


图 1 晶体结构图。(a)键合晶体;(b)单块 Nd:YAG 晶体

Fig. 1 Structure charts of crystals. (a) Bonding crystal; (b) single Nd:YAG crystal

从图 2 中可以看出,相同抽运功率下,键合晶体比单块 Nd:YAG 晶体降低了 16 °C,这说明侧面键合蓝宝石材料能有效地降低晶体温升,改善晶体内部的热分布。高热导率的蓝宝石晶体起到了热沉的作用,Nd:YAG 晶体中高增益区域产生的热,大部分通过蓝宝石晶体传导出去,增大了晶体整体的散热能力。

### 2.2 热透镜的理论分析及模拟

板条中的温度梯度及热应力引起折射率的变化,使得光通过晶体后光程发生变化,产生热透镜效应,一般以热透镜焦距来表征热透镜效应的强弱。对于掠入射板条结构,采用先计算由热引起的光程差(OPD)再

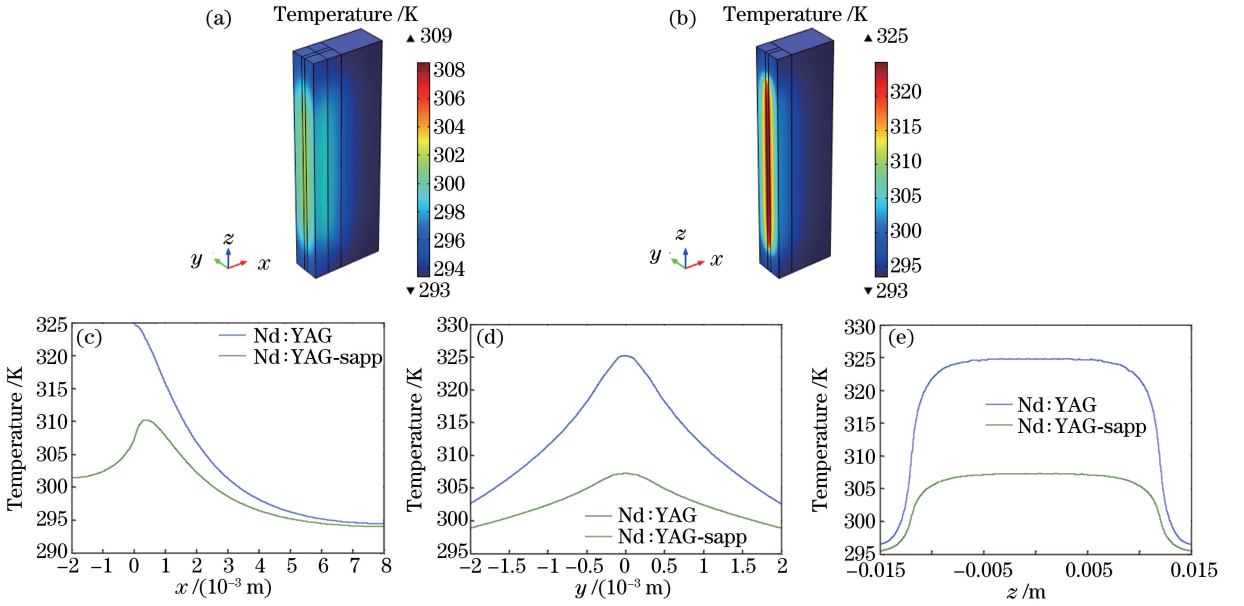


图2 晶体和不同中心线的温度场分布。(a)键合晶体;(b)单块 Nd:YAG 晶体;(c)  $x$  轴;(d)  $y$  轴;(e)  $z$  轴

Fig. 2 Temperature field distributions of crystals and different centerlines. (a) Bonding crystal; (b) single Nd:YAG crystal; (c)  $x$ -axis; (d)  $y$ -axis; (e)  $z$ -axis

拟合的方式来计算热焦距<sup>[16]</sup>。板条热效应引起的光程差由温度梯度引起的光程差  $d_{\text{OPDT}}$ 、热应力引起的光程差  $d_{\text{OPDe}}$  以及形变引起的光程差  $d_{\text{OPDE}}$  三部分组成。其中温度梯度引起的光程差  $d_{\text{OPDT}}$  为

$$d_{\text{OPDT}}(x, y) = \int_s \Delta n(x, y, z)_T ds, \quad (1)$$

$$\Delta n(x, y, z)_T = \left[ \left( \frac{dn}{dT} \right) + E\zeta B_{\perp} + (1 + \nu)\zeta n \sin^2(\theta) \right] T(x, y, z), \quad (2)$$

式中 Nd:YAG 折射率随温度的变化系数  $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 热膨胀系数  $\zeta = 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 杨氏模量  $E = 31 \times 10^{10}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ , 垂直方向的压光张量  $B_{\perp} = 3.4 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $\theta$  为内入射角。

热应力引起的光程差  $d_{\text{OPDe}}$  为

$$d_{\text{OPDe}}(x, y) = \int_s \Delta n(x, y, z)_{\epsilon} ds, \quad (3)$$

$$\Delta n(x, y, z)_{\epsilon} = (\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) \left[ B_{\perp} (1 + \nu) - \frac{1 - \nu^2}{E} n \sin^2(\theta) \right], \quad (4)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{zz} \approx \frac{p_h E \zeta}{2(1 - \nu) k d t h} (y^2 - h^2/12), \quad (5)$$

式中  $p_h$  为入射在板条表面的热功率分布, 即热传导系数,  $E$  为杨氏模量,  $\zeta$  为热膨胀系数。  $d$  为增益介质长度,  $t$  为增益介质宽度,  $h$  为增益介质厚度。

形变引起的光程差  $d_{\text{OPDE}}$  为<sup>[17]</sup>

$$d_{\text{OPDE}} = 2n_0 \sin \theta dx + \frac{n_0 - 1}{\cos[\arcsin(n_0 \sin \theta)]} dz, \quad (6)$$

式中  $n_0$  为介质初始折射率,  $dz$  为端面上一点沿  $z$  方向位移。

因此, 热引起的总的 OPD 为

$$d_{\text{OPD}}(x, y) = d_{\text{OPDT}}(x, y) + d_{\text{OPDe}}(x, y) + d_{\text{OPDE}}(x, y). \quad (7)$$

将总 OPD 表达为泰勒级数展开的形式<sup>[16]</sup>:

$$d_{\text{OPD}}(j) = p(0) + p_1 j + p_2 j + \cdots + p_n j + \cdots, \quad (8)$$

式中二次项系数与热透镜焦距有关, 关系表达式为

$$f_{\text{thermal}} = -\frac{1}{2p_2}. \quad (9)$$

由于热梯度主要在厚度方向,故模拟厚度方向上的热焦距随抽运功率的变化,并与实际测得的热焦距对比,如图3所示。从图3可以看出,模拟结果与实际结果基本吻合,并且不管是模拟还是实际测量的结果,键合晶体的热焦距总是大于单块Nd:YAG晶体的热焦距,从理论上说明键合晶体对于降低增益介质的热效应具有明显效果。

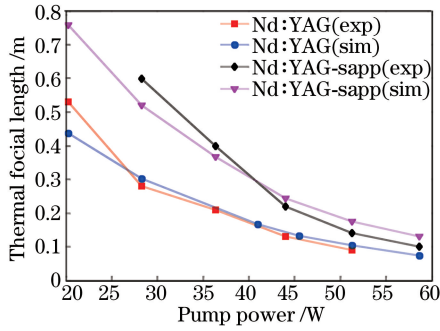


图3 键合晶体和单块Nd:YAG晶体的模拟和实测热焦距对比图

Fig. 3 Simulated and measured thermal focal length comparison of bonding crystal and single Nd:YAG crystal

### 3 键合晶体与单块Nd:YAG晶体掠入射结构输出实验

为比较键合晶体与单块Nd:YAG晶体的热效应对输出特性的影响,设计了相同腔长的掠入射板条结构,并比较了其在自由振荡时的光输出特性。

#### 3.1 实验结构

键合晶体和单块Nd:YAG晶体掠入射板条激光器实验结构如图4所示,振荡腔长为450 mm,由1064 nm全反镜M1与透过率 $T=30\%$ 的输出镜OC组成。光阑S(直径为1.5 mm)用以限制腔内起振模式提高输出光束质量。实验中,激光振荡输出的外部角为 $20^\circ$ ,内入射角为 $5.9^\circ$ 。振荡器的抽运源为传导冷却封装的半导体巴条堆栈,抽运方式为脉冲抽运,抽运重复频率为200 Hz,抽运脉宽为240  $\mu\text{s}$ ,抽运最大峰值功率2000 W,抽运波长为808 nm。采用焦距为70 mm的柱透镜(VCL)沿半导体巴条快轴方向对抽运光进行压缩整形,抽运光通光面区域大小为24 mm $\times$ 0.6 mm。

实验采用的单块Nd:YAG晶体的掺杂原子数分数为2.0% (吸收系数为 $14\text{ cm}^{-1}$ ),尺寸为4 mm $\times$ 8 mm $\times$ 30 mm,晶体切角为 $10^\circ$ 。晶体下侧面(4 mm $\times$ 30 mm)镀有808 nm增透膜,为抽运光通光面。晶体两侧的通光面镀有1064 nm增透膜,晶体的两个大面(8 mm $\times$ 30 mm)采用铜热沉冷却。键合晶体是参数相同的Nd:YAG晶体在通光面键合了宽度为2 mm的蓝宝石制作而成,两者的照片如图5所示。

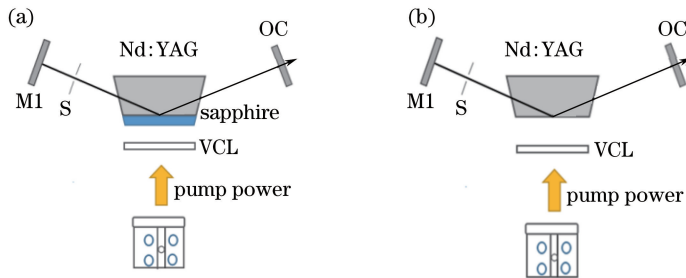


图4 对比实验示意图。(a)键合晶体;(b)单块Nd:YAG晶体

Fig. 4 Comparison of experimental diagrams. (a) Bonding crystal; (b) single Nd:YAG crystal

#### 3.2 单块Nd:YAG晶体和键合晶体自由振荡输出功率对比

单块Nd:YAG晶体和键合晶体自由振荡输出功率与抽运功率的关系如图6所示。键合晶体与单块Nd:YAG晶体掠入射板条振荡输出的抽运电流的阈值分别为64 A和78 A,对应的抽运功率分别为6.21 W和8.45 W。在低抽运功率(抽运功率小于45.51 W)时,键合晶体与单块Nd:YAG晶体的输出功率基本一致,在抽运功率为45.51 W处,单块Nd:YAG晶体输出功率开始下降而键合晶体输出功率持续上升。在高抽运

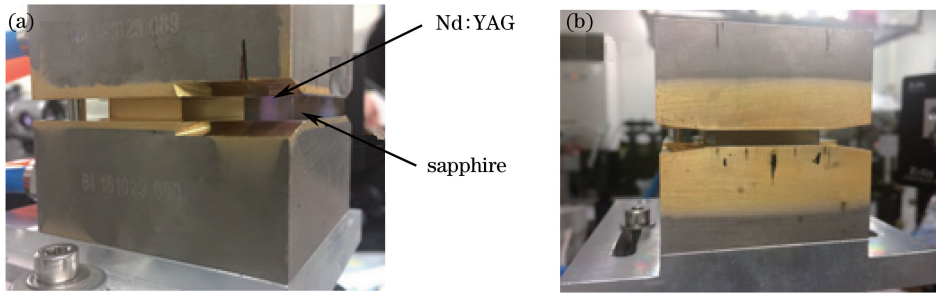


图5 实物照片图。(a)键合晶体;(b)单块 Nd:YAG 晶体

Fig. 5 Photographs. (a) Bonding crystal; (b) single Nd:YAG crystal

功率(抽运功率大于 45.51 W)时,单块 Nd:YAG 晶体输出功率持续下降甚至停止振荡,但键合晶体仍能稳定输出,直到抽运功率达到 55.9 W 时输出功率才开始下降。

在平-平对称腔中,当热焦距  $f < L/4$  ( $L$  为腔长)时,谐振腔变成非稳腔<sup>[18]</sup>,输出功率开始下降。从图 6 中可以看出,对于等效腔长为 49 cm,键合晶体和单块 Nd:YAG 晶体分别在抽运功率为 45.51 W 和 55.9 W 时输出功率出现下降,这说明其热焦距在 45.51 W 和 55.9 W 时分别缩小到了 12.25 cm。测得实际的热焦距如图 7 所示,可以看出,大约在 45.51 W 和 55.9 W 附近,单块 Nd:YAG 晶体和键合晶体的热焦距开始小于 12.25 cm,与实验结果基本一致。

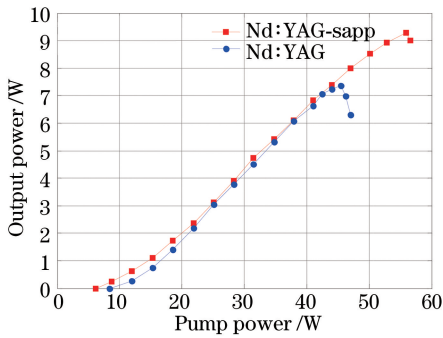


图 6 输出功率与抽运功率关系

Fig. 6 Output power versus pump power

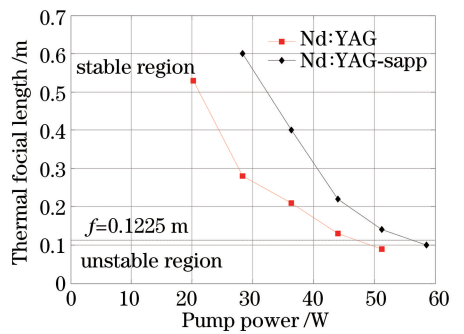


图 7 键合晶体与单块 Nd:YAG 晶体的稳定区和非稳区

Fig. 7 Stable and unstable regions of bonding crystal and single Nd:YAG crystal

### 3.3 远场光斑及光束质量

实验对比了键合晶体和单块 Nd:YAG 晶体在抽运电流为 300 A(对应抽运功率为 44.01 W)时,输出光的远场光斑形状和光束质量。测光束质量的具体方法是:在输出镜后加入两个偏振分光棱镜对光束进行衰减,再加入  $f=175$  mm 的透镜对光束进行压缩,然后通过 CCD 分别测出光束束腰前后对称位置光斑的直径,输入软件求得宽度和厚度光束质量因子  $M^2$ 。最终结果如图 8 所示,键合晶体输出的光斑光束质量在宽

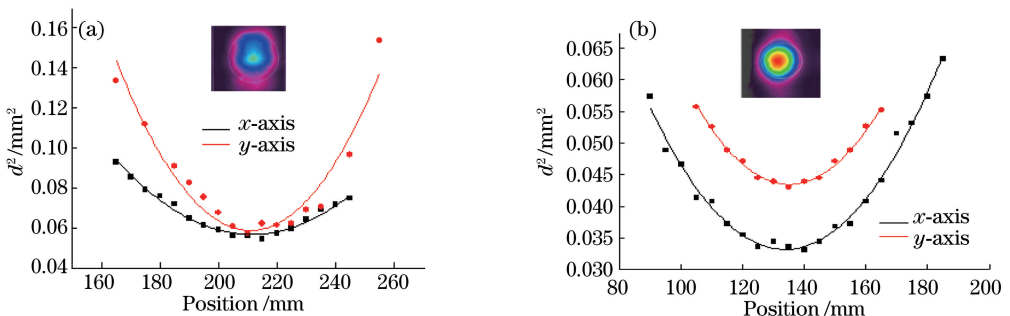


图8 远场光斑及光束质量。(a)单块 Nd:YAG 晶体;(b)键合晶体

Fig. 8 Far field spot and beam quality. (a) Single Nd:YAG crystal; (b) bonding crystal

度、厚度方向的光束质量因子  $M_x^2 = 1.84$ 、 $M_y^2 = 2.29$ 。单块 Nd:YAG 晶体输出的光斑光束质量在宽度、厚度方向的光束质量因子  $M_x^2 = 2.92$ 、 $M_y^2 = 4.38$ 。可以看出,键合晶体的光束质量优于单块 Nd:YAG 晶体,特别是在厚度方向上。

## 4 结 论

分析了键合晶体和单块 Nd:YAG 晶体的温度场分布,模拟计算了厚度方向的热透镜焦距,在相同抽运功率(电流)下,键合晶体的温度更低且热焦距更长。实验对比了二者输出激光的特性:在相同腔长和抽运的自由振荡条件下,Nd:YAG 和蓝宝石键合晶体的最大稳定输出功率比单块的 Nd:YAG 晶体提高了 26%;当抽运功率为 44.01 W 时,键合晶体相对于单块晶体的热焦距增长了 69%;同时,Nd:YAG 和蓝宝石键合晶体在宽度、厚度方向的光束质量因子  $M_x^2 = 1.84$ 、 $M_y^2 = 2.29$ ;单块 Nd:YAG 晶体在宽度、厚度方向的光束质量因子  $M_x^2 = 2.92$ 、 $M_y^2 = 4.38$ 。研究表明,Nd:YAG 和蓝宝石键合晶体降低了掠入射板条激光器增益介质的热效应,提高了输出功率和光束质量。

## 参 考 文 献

- [1] Omatsu T, Nawata K, Sauder D, *et al.* Over 40-watt diffraction-limited Q-switched output from neodymium-doped YAG ceramic bounce amplifiers[J]. Optics Express, 2006, 14(18): 8198-8204.
- [2] Hsu Y N, Arsenault H H, April G. Rotation-invariant digital pattern recognition using circular harmonic expansion [J]. Applied Optics, 1982, 21(22): 4012-4015.
- [3] Kundu P, Joseph C S, Chandrasekaran N. High efficiency diode laser side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36(1): 65-73.
- [4] Martin W S, Chernoch J P. Multiple internal reflection face-pumped laser: US3633126[P]. 1972-01-04.
- [5] Giesen A. Thin-disk solid state lasers[C]. SPIE, 2004, 5620:112-127
- [6] Bernard J E, Alcock A J. High-efficiency diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser[J]. Optics Letters, 1993, 18(12): 968-970.
- [7] Rutherford T S, Tulloch W M, Sinha S, *et al.* Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers[J]. Optics Letters, 2001, 26(13): 986-988.
- [8] Kane T, Eggleston J, Byer R. The slab geometry laser-Part II: thermal effects in a finite slab[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1985, 21(8): 1195-1210.
- [9] Rutherford T S, Tulloch W M, Gustafson E K, *et al.* Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 205-219.
- [10] Chen Y, Chen B, Patel M K R, *et al.* Calculation of thermal-gradient-induced stress birefringence in slab lasers-II[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(7): 917-928.
- [11] Xiao Ligang, Li Qiang, Guo Weirong, *et al.* Study on thermal effects of Nd: glass slab laser with large size and large aspect ratio[J]. Applied Laser, 2010, 30(3): 219-222.  
肖利刚, 李强, 郭渭荣, 等. 大尺寸大宽厚比铈玻璃板状激光介质热效应分析[J]. 应用激光, 2010, 30(3): 219-222.
- [12] Fang Aiping, Lou Qihong, Dong Jingxing, *et al.* Theoretical study on the temperature characteristics of LD side-pumped Nd:YAG laser slab[J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 248-250.  
方爱平, 楼祺洪, 董景星, 等. LD 侧泵浦 Nd:YAG 板条介质温度特性的理论研究[J]. 激光技术, 2003, 27(3): 248-250.
- [13] Shen Lifeng, Jiang Hongbo, Zhao Zhigang, *et al.* Experimental study of picosecond laser amplifier based on grazing incidence Nd:YVO<sub>4</sub> slab geometry[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(11): 1101004.  
沈利洋, 姜洪波, 赵志刚, 等. 掠入射 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条结构皮秒激光放大器的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101004.
- [14] Abe M, Seki H, Kowa M, *et al.* High average power, diffraction-limited picosecond output from a sapphire face-cooled Nd:YVO<sub>4</sub> slab amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2015, 32(4): 714-718.
- [15] Lee H C, Brownlie P L, Meissner H E, *et al.* Diffusion-bonded composites of YAG single crystals[C]. Proceedings of SPIE, 1992, 1624: 2-12.
- [16] Chen Z, Yan X, Jiang X, *et al.* The thermal effect in a grazing-incidence slab laser with the novel composite cooling

method[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2009, 41(1): 27-38.

- [17] Wang Wanyi, Lei Hong, Guo Meng, *et al.* Thermal effect study of grazing-incidence amplifier chain[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(5): 051009.

王万祎, 雷匐, 郭猛, 等. 掠入射板条放大器链的热效应模拟分析[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(5): 051009.

- [18] Koechner W. *Solid-state laser engineering*[M]. Berlin: Springer, 2013.