

## Nd:YAG 薄片激光增益介质封装技术

曹礼强,雷 军,于 益,吕文强,王 昭\*

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 高能激光科学与技术重点实验室,四川 绵阳 621900)

**摘要:** 为了保证 Nd:YAG 薄片激光器的高功率、高光束质量,需解决薄片增益介质封装后的均匀散热、低波前畸变等关键问题。分析了封装过程中薄片增益介质的热应力,模拟了连接界面无缺陷条件下薄片增益介质的热分布,对封装工艺技术进行改进。优化的封装技术将薄片激光增益介质与微通道冷却器连接在一起,采用超声扫描显微镜、激光干涉仪对薄片激光器的焊接界面与增益介质表面面形进行测试。结果表明:该封装技术实现了直径  $\Phi 80$  mm 的大口径 YAG 薄片与冷却器焊料层均匀、无空洞的界面连接,同时减小了焊接后薄片的波前畸变, $\Phi 60$  mm 口径内面形畸变 PV 值小于  $1 \mu\text{m}$ ,均方根 RMS 值小于  $0.15 \mu\text{m}$ 。该技术封装的单模块 Nd:YAG 薄片激光器输出功率达到 2.3 kW。

**关键词:** 薄片激光增益介质; 封装; 热均匀性; 波前畸变

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1205003

## Packaging technique of Nd:YAG thin disk laser gain medium

Cao Liqiang, Lei Jun, Yu Yi, Lv Wenqiang, Wang Zhao\*

(The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Institute of Applied Electronics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Thermal homogeneity and low wave-front distortion are the main problems affecting the beam quality of high power Nd:YAG thin disk laser which should be solved through packaging technique. The thermal stress of thin disk produced in the process of welding was analysed and the thermal distribution was stimulated.  $\Phi 80$  mm YAG thin disk laser gain medium and micro channel cooler (MCC) were connected by optimized packaging technology. The disk laser was tested by scanning acoustic microscope (SAM) and laser interferometer. The results show that solder layer is homogeneous and void-free, peak-to-valley (PV) departure of optical surface is less than  $1 \mu\text{m}$  and root-mean-square (RMS) is less than  $0.15 \mu\text{m}$  in the circle diameter of 60 mm. On the basis of this packaging technique, high beam quality 2.3 kW output power was extracted with one disk laser.

**Key words:** thin disk laser gain medium; packaging; thermal homogeneity; wave-front distortion

收稿日期:2017-04-05; 修订日期:2017-05-03

基金项目:中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金

作者简介:曹礼强(1986-),男,助理研究员,硕士,主要从事半导体、固体激光器封装技术方面的研究。Email:tianfeng888555@163.com

通讯作者:王昭(1987-),男,硕士,主要从事半导体激光器封装技术方面的研究。Email:wz870815@163.com

## 0 引言

二极管泵浦固体激光器 (Diode Pumped Solid State Laser, DPSSL) 具有效率高、结构紧凑、寿命长、运行可靠等优点<sup>[1]</sup>, 被广泛运用于工业、国防、科研、医疗等领域, 特别是高功率、高光束质量的 DPL 有着非常广阔的应用前景。

按增益介质的形状固体激光器主要分为圆棒状激光器、板条激光器、薄片激光器和光纤激光器<sup>[2-3]</sup>, 由于激光增益介质的热导率较低, 在增益介质内部和冷却表面将产生显著的温度梯度, 从而导致折射率梯度、热应力和热畸变等效应, 会严重影响固体激光器的光束质量<sup>[4-7]</sup>。薄片激光介质能有效地解决这一问题, 当薄片泵浦区尺寸远大于厚度时, 只要泵浦光均匀, 薄片散热冷却结构合理, 热流可近似为沿厚度方向的一维分布, 有效地减小热透镜效应, 使薄片激光器在获得高功率激光输出的同时保持高效率和高光束质量<sup>[8-11]</sup>。目前商用薄片激光器直径一般约为 10 mm, 可以通过增大薄片泵浦尺寸来实现功率的定标放大<sup>[12-13]</sup>。为解决大口径薄片激光增益介质的均匀散热问题和低波前畸变问题, 薄片与冷却器封装后焊料层无空洞、薄片低面形畸变成为封装的技术难点。

文中针对大口径薄片增益介质的封装技术进行研究, 分析了封装过程中薄片增益介质产生的热应力对薄片面形的影响, 在泵浦源均匀、连接界面无缺陷的条件下对增益介质的热分布进行了模拟, 同时对封装工艺进行不断改进。优化后的封装技术实现了大口径 YAG 薄片与冷却器焊料层均匀、无空洞的界面连接, 减小了焊接后薄片的波前畸变, 为薄片激光器实现高功率、高光束质量的激光输出提供了技术保障。

## 1 封装技术

薄片增益介质是薄片激光器最重要的组成部分, 封装是指选择合适的焊料、采用真空钎焊工艺把薄片与微通道 (Micro Channel Cooler, MCC) 冷却器连接在一起, 封装技术主要针对薄片均匀散热问题和低波前畸变问题进行研究。为了解决薄片激光器高功率条件下的均匀散热问题, 要求焊接后焊料层均匀、无空洞, 薄片作为一种光学器件, 应尽可能减小薄片在封装过程中因热应力等原因引入的波前畸变<sup>[14]</sup>。

### 1.1 热应力分析与应用

因冷却器与薄片的热膨胀系数不同, 焊料凝固温度不同于薄片工作时的温度 (测量一般在室温下), 由此产生热应变, 从而导致静态波前畸变, 另外封装过程中, 由于薄片增益介质温度的不均匀分布也会产生热应变<sup>[15]</sup>。

材料热膨胀系数失配产生的界面应力和应变是导致薄片激光增益介质波前畸变的主要原因。在不考虑焊料层, 只考虑一维形变的情况下, 假设  $\Delta T$  为焊接凝固温度  $T_1$  与室温  $T_0$  的差值,  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为冷却器与薄片的热膨胀系数, 那么在温度  $T=T_1$  时, 冷却器与薄片的应变分别为  $\Delta T \cdot \alpha_1, \Delta T \cdot \alpha_2$ , 当焊接后温度  $T=T_0$  时, 假设共同形变量为  $x$ , 由胡克定律可得冷却器与薄片的热应力分别为:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E_1(\Delta T \cdot \alpha_1 - x) \\ \sigma_2 &= E_2(\Delta T \cdot \alpha_2 - x) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $E_1, E_2$  分别为冷却器与薄片的杨氏模量, 由统一应变分量所引起的合力为零可得:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = 0 \quad (2)$$

由公式(1)、(2)得出:

$$x = (\alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2) \Delta T / (E_1 + E_2) \quad (3)$$

把公式(3)带入公式(1)中得出热应力大小可表示为:

$$\sigma = E_1 \cdot E_2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T / (E_1 + E_2) \quad (4)$$

对于形状为平面的系统来说, 杨氏模量  $E$  由双轴模量  $E/(1-\nu)$  来代替, 其中  $\nu$  为泊松比。

综上可得薄片的热应力与材料的热膨胀系数、杨氏模量等物理性质密切相关, 为减小封装产生的热应力, 实验将对冷却器的材料及焊料进行合理筛选。从工程实际出发, 因热膨胀系数匹配于薄片激光增益介质的 W80Cu20、BeO 等材料其热导率、可加工性都不如 Cu, 目前 MCC 冷却器选为 Cu 材料, Cu 与 Nd:YAG 的主要物理性质如表 1 所示 (1 ppm=0.000 1%)。

表 1 材料的物理性质

Tab.1 Physical properties of material

Material	Thermal conductivity /W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>	CTE /ppm · °C <sup>-1</sup>	Young modulus /GPa	Yield strength /MPa	Poisson's ratio
Nd:YAG	11.1	7.9	310	252	0.3
Cu	380	17	101	71	0.35

因冷却器与薄片材料的热膨胀系数差异大, 二者杨氏模量均较大, 依据公式(4), 薄片在封装过程中会产生较大的热应力, 为较好的释放热应力, 需选

择低熔点焊料降低  $\Delta T$ ，常见低熔点焊料如表 2 所示。对比表 2 参数可知，In 是一种杨氏模量小、屈服强度低、延展性非常好的金属，因此选择纯 In 为焊接材料，同时实验结果证明 In 焊料相比其他焊料能很好地释放封装过程中产生的热应力，减小封装过程中薄片面形的波前畸变。

表 2 焊料的参数

Tab.2 Parameters of solder

Solder	Melting point / $^{\circ}\text{C}$	Thermal conductivity / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	CTE / $\text{ppm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	Young modulus / $\text{GPa}$	Yield strength / $\text{MPa}$
In52Sn48	118	34	20	-	43
In100	156.7	86	29	12.7	1.88
Pb37Sn6	183	51	25	31.4	51.7

前面对薄片增益介质封装过程中产生热应力的主要原因进行了分析，外加薄片焊接前需镀光学膜、金属化膜，以及 In 焊料界面层的引入，使得封装过程中界面应力分布变得非常复杂，很难直接从理论分析上进行工艺改进。

### 1.2 薄片激光器热分布模拟

假设薄片激光器泵浦光均匀，焊接界面均匀、无空洞，满足薄片增益介质均匀散热条件，采用 COMSOL Multiphysics 程序对薄片激光器的温度分布进行了数值模拟<sup>[8]</sup>。热流边界条件为：Cu 冷却器直径为 95 mm，Cu 冷却板厚 3 mm，直接与冷却水（水温 20  $^{\circ}\text{C}$ ）接触，YAG 薄片直径  $\Phi 80$  mm，厚度 1.5 mm，均匀泵浦（掺铒）介质区域为  $\Phi 60$  mm，平均热功率密度 0.5  $\text{kW}/\text{cm}^3$ ，等效换热系数为 10  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

模拟结果如图 1 所示，薄片增益介质温度场分布均匀，泵浦区最高温度约为 95  $^{\circ}\text{C}$ ，热源区域径向

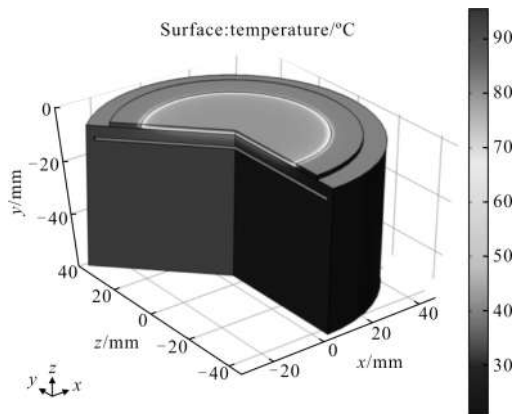


图 1 热分布模拟结果

Fig.1 Results of thermal distribution

最大温差约为 45  $^{\circ}\text{C}$ ，上下表面最大温差约为 60  $^{\circ}\text{C}$ ，表明 Nd:YAG 薄片激光器在 0.5  $\text{kW}/\text{cm}^3$  的热加载条件下，散热能力满足薄片激光器的工作需求。

## 2 实验结果与分析

实验选用 In 焊料，在真空回流焊接炉内对直径  $\Phi 80$  mm 的 Nd:YAG 薄片增益介质与直径  $\Phi 95$  mm 的圆形 Cu 材料 MCC 冷却器进行焊接。通过优化后的焊接工艺技术，实现了大尺寸薄片增益介质焊料层均匀、无空洞，薄片低波前畸变的焊接，图 2 为  $\Phi 80$  mm 的 Nd:YAG 薄片增益介质与 Cu 冷却器焊接后的薄片激光器。

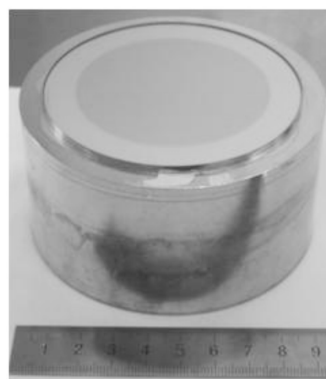


图 2  $\Phi 80$  mm Nd:YAG 薄片激光器

Fig.2  $\Phi 80$  mm Nd:YAG thin disk laser

### 2.1 超声扫描测试分析

纯 In 在空气中极易被氧化 In 的氧化膜层会影响钎焊的浸润与铺展，导致界面空洞的形成<sup>[16]</sup>。采用 D9500 型超声扫描显微镜 (SAM) 对  $\Phi 80$  mm Nd:YAG 薄片激光器的焊料层进行测试，钎焊工艺改进前焊接界面如图 3 所示，焊料层存在空洞，均匀性较差，不能满足高功率薄片激光器的散热需求。

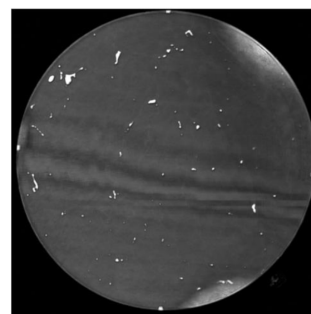


图 3 工艺改进前焊接界面 SAM 图像

Fig.3 SAM image of soldering layer with original technology

对大尺寸钎焊界面空洞的形成机理进行分析,通过合理的清洗工艺对焊料的浸润性进行改善,活化钎焊界面和优化焊接工艺参数等措施实现了大尺寸的无空洞钎焊界面。工艺改进后 SAM 扫描图像如图 4 所示,焊料层均匀、无空洞,满足大功率薄片激光器的均匀散热需求,多次焊接实验证明改进后的工艺稳定。

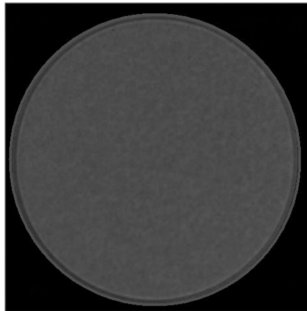


图 4 工艺改进后钎焊界面 SAM 图像

Fig.4 SAM image of soldering layer after improved technology

该工艺封装的 Nd:YAG 薄片激光器在工作条件下,薄片激光增益介质表面泵浦区域温度分布均匀,如图 5 所示。在 6.5 kW 加载条件下,薄片增益介质热功率密度约为 0.5 kW/cm<sup>2</sup>,上表面实际最高温度为 100 ℃,与热模拟数值差异不大。

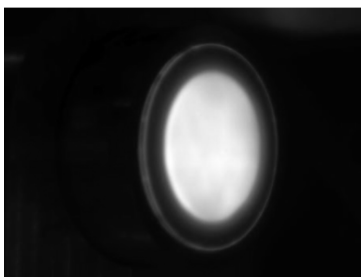


图 5 Nd:YAG 薄片激光器表面温度分布

Fig.5 Surface temperature distribution of Nd:YAG thin disk laser

## 2.2 薄片静态波前畸变分析

采用激光干涉仪(GPI-XP)对薄片表面面形进行分析测试,测量方法为 GJB8153-2013 大口径平面光学元件面形测量法,光波长  $\lambda$  为 0.633  $\mu\text{m}$ 。首先薄片激光增益介质的透射面和反射面需要分别镀上光学透射膜与反射膜,直径  $\Phi 80\text{mm}$  的 Nd:YAG 薄片镀光学膜后测试面形如图 6 所示,表面为凹面,在  $\Phi 60\text{mm}$  口径内面形畸变 PV 值为 1.334 $\lambda$ ,去离焦以后 PV 值为 0.147 $\lambda$ ,因薄片增益介质所镀光学膜均匀、膜层很

薄,主要面形畸变为离焦变形,镀光学膜的薄片面形畸变除去离焦量后约为 0.1  $\mu\text{m}$ 。

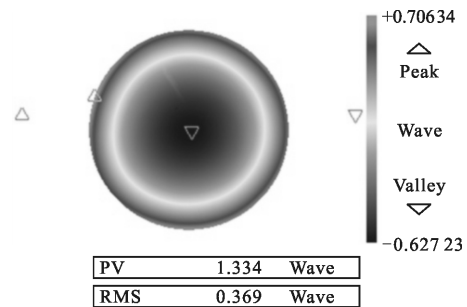


图 6 镀光学膜后薄片面形 PV 值

Fig.6 PV value of thin disk after coating optical film

为了薄片与冷却器能很好地连接在一起,需要对两种材料的焊接表面进行金属化,金属化最表层为一定厚度的 Au 层,金属化后的薄片面形如图 7 所示,表面为凸面,在  $\Phi 60\text{mm}$  口径内面形畸变 PV 值为 0.962 $\lambda$ ,去离焦以后面形畸变 PV 值为 0.381 $\lambda$ 。

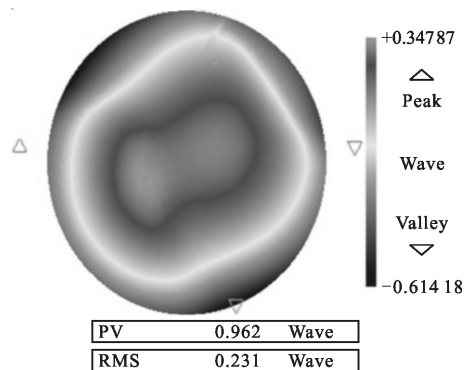


图 7 金属化后薄片面形 PV 值

Fig.7 PV value of thin disk after metallization

在薄片封装的焊接过程中,通过 In 的塑性形变来释放热膨胀系数差异等因素引入的界面应力,从而减小面形畸变。焊料厚度将会直接影响界面应力释放的程度,焊料层的均匀性以及薄片面形,同时薄片激光器在加载的情况下,焊料层厚度会对薄片面形的热畸变产生较大影响。在薄片封装过程中,进行大量的对比实验,不断优化焊接工艺参数,检测不同条件下大尺寸薄片激光增益介质的透射波前畸变,得到最佳 In 焊料层厚度 50  $\mu\text{m}$ 、炉内最高焊接温度 235 ℃、炉内真空度需优于 10<sup>-3</sup> mbar。封装后薄片面形如图 8 所示,在  $\Phi 60\text{mm}$  口径内面形畸变 PV 值为

1.141λ, RMS 值为 0.22λ, 去离焦后 PV 值仍为 1.141λ, RMS 值为 0.193λ, 测试结果表明优化后的封装技术解决了焊接过程中离焦量的面形畸变, 整体面形畸变 PV 值、RMS 值均较小, 满足薄片激光器对封装后薄片增益介质波前畸变的要求。

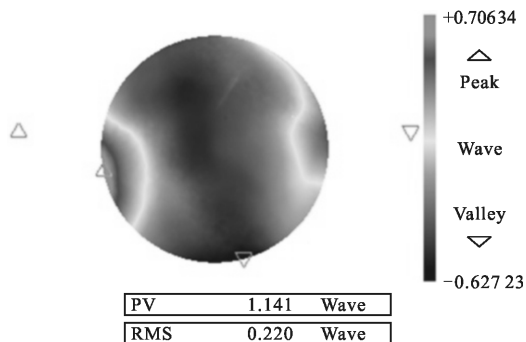


图 8 封装后薄片面形 PV 值

Fig.8 PV value of thin disk after packaging

封装后的薄片激光器面形畸变去离焦、去像散后如图 9 所示, PV 值为 0.415λ, RMS 值为 0.074λ, 薄片面形畸变主要为像散畸变和高阶面形畸变, 对薄片激光器的光束质量会产生较大影响。为了薄片激光器能够获得更高的光束质量, 在后续的封装技术研究中, 希望能够尽可能地减少像散和高阶面形畸变, 使薄片增益介质的面形畸变更小。

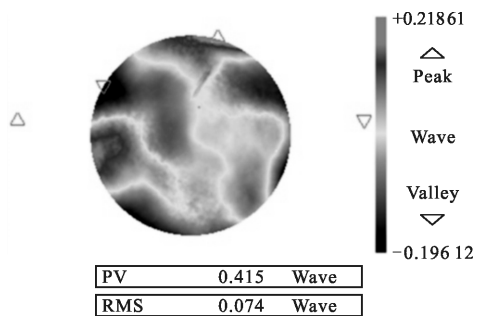


图 9 去离焦、去像散后薄片面形 PV 值

Fig.9 PV value of thin disk after removing defocus and astigmatism

### 2.3 薄片激光器测试实验

对该工艺封装后的大口径 Nd:YAG 薄片激光器进行测试, 实验装置如图 10 所示, 在 500 Hz、6.5 kW 的加载条件下, 薄片增益介质散热均匀, 单模块薄片激光器输出功率达到 2 300 W。将该技术封装的 7 个薄片串接应用于非稳腔, 静态下实现了自适应光学校正后光束质量因子  $\beta=4$  的激光输出。

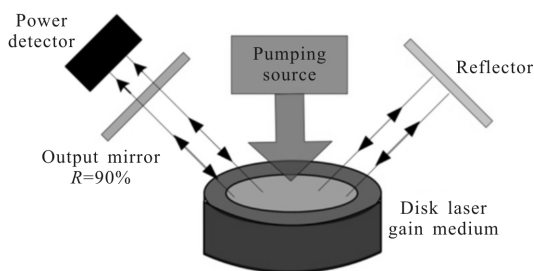


图 10 实验装置图

Fig.10 Schematic of the experimental setup

### 3 结论

文中针对大尺寸 Nd:YAG 薄片增益介质封装技术进行研究, 得到最佳 In 焊料层厚度 50 μm, 炉内焊接温度 235 °C, 采用改进的真空回流焊接技术对 Φ80 mm 的薄片增益介质与 Φ95 mm 的圆形 Cu 冷却器进行封装, 实现了钎焊面积大于 50 cm<sup>2</sup>、界面层均匀、无空洞的大尺寸焊接。优化的焊接工艺解决了 Nd:YAG 薄片增益介质封装过程中较大的离焦面形畸变, Φ60 mm 区域内面形畸变 PV 值小于 1 μm, RMS 值小于 0.15 μm, 满足现阶段薄片激光器加载条件下对波前畸变的要求。该技术封装的 Φ80 mm 单模块 Nd:YAG 薄片激光器输出功率达到 2 300 W, 静态下 7 个薄片串接应用于非稳腔可实现自适应光学校正后光束质量因子  $\beta=4$  的激光输出。

### 参考文献:

- [1] Lv Baida, Hu Yufang, Cai Bangwei, et al. High power solid-state lasers [J]. *Laser & Infrared*, 1991, 21(5): 33-42. (in Chinese)
- [2] Geusic J E, Maecos H M, Uitert L G V. Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets[J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 4(10): 182-184.
- [3] Koehchner W. Solid State Laser Engineering [M]. Berlin: Springer, 1999.
- [4] Yao Zhenyu, Lv Baida, Tu Bo, et al. 100 W diode pumped Nd: YAG disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(9): 1116-1118. (in Chinese)
- [5] Zhao Changmin, Wei Guanghui. An investigation on the improvement of the beam quality of high average power solid-state Lasers[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, 24(5): 50-58. (in Chinese)
- [6] Wan Min, Su Yi, Zhang Wei, et al. Influence of the surface

- error of optical elements on beam quality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4): 495–500. (in Chinese)
- [7] Zhang Shenjin, Zhou Shouhuan, Tang Xiaojun, et al. Pump distribution in gain medium of laser-diode side pumped disk laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (4): 505–508. (in Chinese)
- [8] Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo, et al. Study on diode-pumped Nd: YAG disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(s1): 15–18. (in Chinese)
- [9] Mende J, Schmid E, Speiser J, et al. Thin-disk laser-power scaling to the kW regime in fundamental mode operation [C]//SPIE, 2009, 7193: 71931V–1–12.
- [10] Giesen A. Thin disk lasers-power scalability and beam quality [J]. *Laser Technik Journal*, 2005, 2(2): 42–45.
- [11] Liu Dan, Xie Kedi, Ma Xiuhua, et al. Study of high-efficiency conduction cooling technique for high power space-based all-solid-state lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0702016. (in Chinese)
- [12] Su Yi, Wan Min. High Energy Lasing System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 91–101. (in Chinese)
- [13] Nixon M D, Cates M C. High energy high brightness thin disk laser[C]//SPIE, 2012, 8547: 85470D–1–5.
- [14] Lei Jun, Cao Liqiang, Lv Wenqiang, et al. Progress on packaging technique of Nd:YAG slab laser gain medium[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28 (9): 25–29. (in Chinese)
- [15] Timoshenko S, Goodier J N. Theory of Elasticity [M]. US: Mcgraw-Hill Book Company, 1951: 399–437.
- [16] Christian Scholz, Konstantin Boucke, Reinhart Poprawe, et al. Investigation of indium solder interfaces for high-power diode lasers[C]//SPIE, 2003, 4973(12): 478370.