

LD 端面泵浦分离式放大器结构的热效应研究

张德平, 吴超, 张蓉竹, 孙年春

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 对 LD 端面泵浦分离型激光放大介质的热效应进行了分析和研究; 建立了 Cr,Yb:YAG/Yb:YAG 复合结构的热传导模型。采用有限元分析方法得到了介质内部的温度分布, 给出了介质折射率随温度变化的计算方法并得到了出射端面波前相位分布随温度变化的情况。计算结果表明: 保持泵浦光功率密度不变, 在不同的泵浦时长下, 介质温度以及通光方向截面折射率变化也不同。随着泵浦时间的增长, 介质的温度和折射率也增大, 出射端面激光光束的相位畸变同样增大。当泵浦光功率密度增大时, 温度与折射率的变化趋势与泵浦时间变化时的情况较为相似。热效应随着泵浦时间的增长和泵浦光功率的增大都变得越来越严重。

关键词: 分离式放大器; Yb:YAG; 热效应; 温度分布

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2250-06

Study on thermal effect of LD end-pumped separated amplifier structure

Zhang Deping, Wu Chao, Zhang Rongzhu, Sun Nianchun

(School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The thermal effect of LD end-pumped rectangular separated laser amplifying medium was analyzed and studied. Thermal conduction model of Cr,Yb:YAG/Yb:YAG composite structure was established. The temperature distribution inside the medium was calculated by utilizing the finite element method. The computing method of the medium refractive index vary with temperature was given, and worked out the output end face wave front phase distribution change with temperature. The results reveal that, while the pump power density is unchanged, with different pumping time the temperature distribution and refractive index at the direction of the optical section are different. With the increasing of the pumping time, the temperature and refractive index also increases, the output end face wave front phase distortion enlarge as well. While the pump power density increases, the variation tendency of temperature and refractive index are similar to the situation while the pumping time changes. The thermal effect becomes more serious as the growths of pumping time and the increases of pump power density.

Key words: separated amplifier; Yb:YAG; thermal effect; temperature distribution

收稿日期: 2014-12-09; 修订日期: 2015-01-11

基金项目: 四川省科技支撑计划(2012F20046); 四川省教育厅创新团队资助项目(13TD0048)

作者简介: 张德平(1991-), 男, 硕士生, 主要从事激光技术方面的研究。Email: dpzhang@yeah.net

导师简介: 孙年春(1961-), 男, 教授, 主要从事光电子方面的研究。Email: 8178137@163.com

0 引言

在高功率固体激光器中,如何有效地散热和减弱热光效应已经成为激光器设计中的关键步骤^[1]。由于激光晶体吸收泵浦光并且转化成热量耗散在晶体内部,导致晶体的温度升高,而温度梯度的存在将使得晶体内部同时出现热透镜效应和热应力双折射,这些都严重限制了激光器性能的提升。因此,研究激光热效应的重要步骤在于准确计算晶体内部温度场的分布^[2-6]。

分离式激光放大器具有可以降低激光介质的口径、提高放大效率、可以同时多束激光束进行放大等特点,使输出激光光束的功率和光束质量得到一定程度的提高。目前关于激光介质热效应分析的研究已经获得了一些成果,但是这些研究主要集中在对传统激光器(即对单束激光进行放大的激光器)的热效应进行分析。与传统的激光器相比,分离式放大器具有更加复杂的结构(由包边和放大介质组成),因此用已有的研究成果来分析分离式放大器的热效应就受到了一定的限制。文中针对这种可以同时产生多束激光束的分离式放大结构的热效应进行了分析,采用有限元分析方法,对在不同脉宽单脉冲泵浦下和不同泵浦光功率密度下介质内部三维温度分布进行了模拟计算,在得到温度场分布的基础上,研究了由于温度梯度的存在,对介质折射率变化和出射光束波前相位分布的影响。最后分析了不同泵浦时长和不同泵浦光功率密度对热效应的影响。

1 分离式放大模型

分离式放大介质的结构图如图 1 所示,4 块完

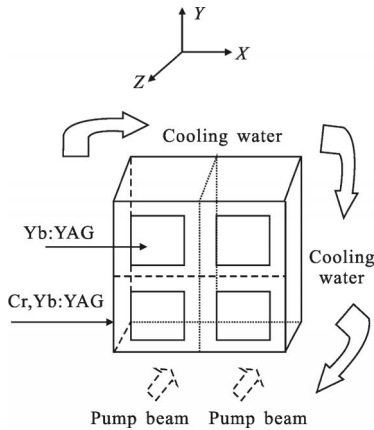


图 1 分离式放大结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of separated amplifying structure

全相同的放大介质在包边材料的组合下组成一个放大器整体。激光介质为尺寸为 80 mm×80 mm×50 mm 的 Yb:YAG 晶体,其外部边缘被 Cr, Yb:YAG 陶瓷材料包裹,最终介质尺寸为 100 mm×100 mm×50 mm。使用 4 块相同的复合结构组合得到总大小为 200 mm×200 mm×50 mm 的如原理图中所示的热模型。

泵浦光均匀照射到晶体的表面,并在晶体中传播,泵浦光强在晶体中的分布可以表示为:

$$I=I_0\exp(-\beta z) \tag{1}$$

式中: I_0 为入射光的中心光功率密度; β 为 Yb:YAG 晶体的吸收系数,入射光在晶体中传播的过程中,损失的那一部分光强即为晶体所吸收的光能。晶体吸收的总的泵浦光能量中转化成热能的比例为 η_h (这里假设 $\eta_h=20\%$)。因此,在达到稳定状态时,放大介质内部的热源可以表示为^[7]:

$$Q(x, y, z)=\eta_h \frac{dI}{dz}=\eta_h I_0 \beta \exp(-\beta z) \tag{2}$$

通过循环水冷却的方式保持激光介质的侧面恒温,晶体吸收的泵浦光能量所产生的热对称地从陶瓷材料的上下表面和两个侧面以热传导或者热对流的方式散去。

2 模拟计算

在文中的模拟计算中,忽略由于温度变化对晶体物理特性(如热导率、吸收系数等)的影响以达到简化计算的目的,在还未达到激光增益介质的断裂极限的情况下,对分离式放大器的热效应进行了模拟计算和分析。对于掺杂浓度为 10 atm% 的 Yb:YAG 晶体而言,在模拟计算中激光介质和泵浦光的对应参数如表 1 所示。

表 1 激光介质和泵浦光的对应参数

Tab.1 Corresponding parameters of laser medium and pumping light

Type	Value
Laser medium size/mm ³	80×80×50
Whole size/mm ³	200×200×50
Absorb coefficient of Yb:YAG/cm ⁻¹	10.8
Heat conductivity of Yb:YAG /W·(m·K) ⁻¹	6.5
Coefficient of thermal expansion of Yb:YAG/K	7×10 ⁻⁶
Specific heat of Yb:YAG/J·(kg·K)	590
Density of Yb:YAG/kg·m ⁻³	4 560
Coefficient of heat convection /W·(m ² ·K) ⁻¹	5 000
Pumping power density/W·cm ⁻²	1×10 ⁷

2.1 不同泵浦时长下的计算结果

2.1.1 温度分布

使用 ANSYS 中的 SOLID70 3-D 热单元模型, 该分析单元有 8 个节点且每个节点上只有一个温度自由度。在该有限单元上建立分析模型, 模拟计算介质的温度场分布。当入射光功率密度为 $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 分别计算在三种不同泵浦时长下的温度分布, 如图 2 所示。

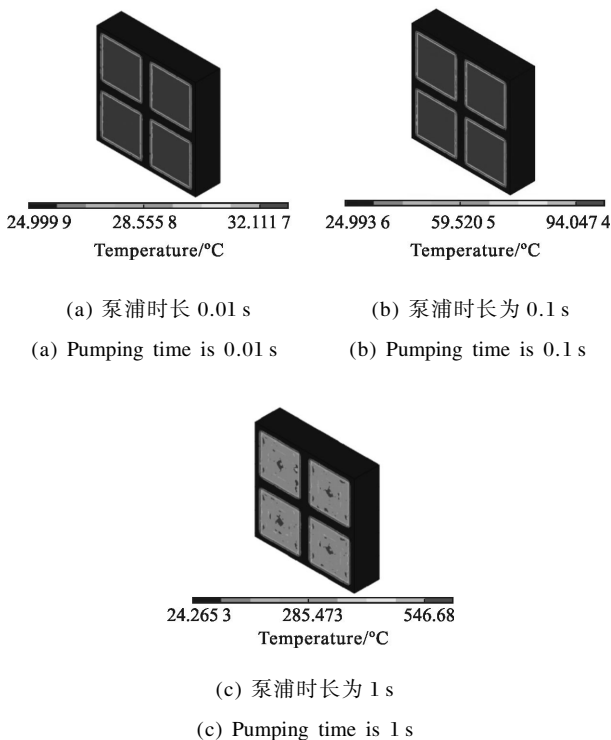


图 2 不同泵浦时长下介质温度分布

Fig.2 Medium temperature distribution under different pumping time

从图 2 中可以看出, 当泵浦光入射到晶体上时, 晶体对泵浦光的吸收导致晶体的端面温度会上升。晶体端面被照射区域的温度最高, 靠近边缘处温度逐渐降低。随着泵浦时间的增长, 晶体端面的最高温度也在上升。当泵浦时间分别为 0.01 s、0.1 s 和 1 s 时, 晶体端面的最高温度分别为 $33 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $102 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $611 \text{ }^\circ\text{C}$ 。泵浦时间为 0.01 s 和 0.1 s 时泵浦区域的温度分布比较均匀。但在 1 s 的情况下, 泵浦区域的温度分布与 0.01 s 和 0.1 s 时的温度分布明显不同, 泵浦区域出现多种不同温度分布。相比之下, 泵浦时长为 1 s 时温度分布更加不均匀, 最大温升更高。

2.1.2 折射率变化

Yb:YAG 晶体的热力学特性随着晶体温度的变

化而变化(晶体的折射率、热导率等特性参数随着晶体温度的变化而变化), 晶体折射率的变化会严重影响到激光器的输出, 使输出波形产生波前相位畸变。有必要研究激光热效应对晶体折射率变化的影响, 为降低激光热效应提供理论依据。

Yb:YAG 晶体的折射率变化量可以分解成与温度、应力有关的变量, 因此有^[8]

$$n(T, \varepsilon) = n_0 + \Delta n_T + \Delta n_\varepsilon \quad (3)$$

式中: n_0 为晶体初始时的折射率; Δn_T 和 Δn_ε 分别为与温度、应力有关的折射率变化量。对于 Yb:YAG 晶体而言, 与应力有关的折射率变化量 Δn_ε 可以忽略不计。因此, 与温度有关的变化量可以表达为:

$$\Delta n_T = [T - T(0)](dn/dT) \quad (4)$$

式中: T 表示达到稳定状态后晶体的温度; $T(0)$ 表示晶体的初始温度; dn/dT 表示 Yb:YAG 晶体的温度折射率系数, 值为 $10 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。综合公式(1)~(4), 利用已经求得温度分布就可以得到在不同泵浦时长下晶体折射率的变化。

2.1.3 出射端面相位分布

当在晶体内部形成稳定的温度场后, 由于激光晶体受热发生膨胀会使晶体的端面产生热形变。假设激光晶体内部某一点 (x, y, z) 处原来的温度为 $T_1(x, y, z)$, 达到稳定状态后这点的温度为 $T_2(x, y, z)$, 则晶体沿着 z 方向的微元 dz 的热膨胀量为:

$$dl = \alpha [T_2(x, y, z) - T_1(x, y, z)] dz \quad (5)$$

式中: α 为晶体的热膨胀系数。则可以得到在 z 方向上的总的热膨胀量为^[9]:

$$l = \int_0^d dl = \int_0^d \alpha [T_2(x, y, z) - T_1(x, y, z)] dz \quad (6)$$

式中: d 为放大介质的厚度, 利用已经求得温度值再结合公式(6)即可求出在 z 方向上的膨胀量。

晶体受热后端面发生膨胀和温度对折射率分布的影响, 这二者的共同作用导致输出光束的相位发生畸变。晶体出射端面光束的相位分布可以表示为^[10]:

$$\varphi = \int_0^{d+1} n(T, \varepsilon) dz \quad (7)$$

式中: $n(T, \varepsilon)$ 为晶体受温度和应力影响下的折射率。联合公式(1)~(7)计算出晶体在三种不同泵浦时长下出射端面的波前相位分布, 如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 出射端面波前相位分布由于受折射率和温度变化的影响也呈现出一定的不均

匀分布。泵浦时间由 0.01 s 增长至 1 s 时,出射端面光束的相位也由分布均衡逐渐变成分布不均匀到最后出现较大畸变。当泵浦时间为 1 s 时,出射端面光束波前相位分布畸变较为严重,导致激光器的输出光束质量急剧下降。从以上的计算结果中可以得出:随着泵浦时间的增长,介质的温度、折射率会随之增大,出射端面的光束波前相位分布也会随之变化,对于不同时长的泵浦时间呈现不同的分布。图 4 示出了介质出射端面通光口径内相位均方根值(RMS)随泵浦时间的变化关系。

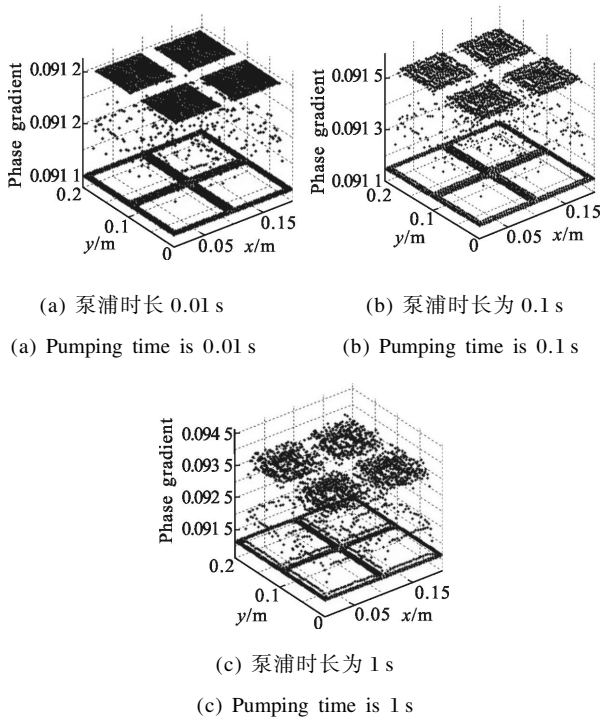


图 3 不同泵浦时长下介质出射端面波前相位分布

Fig.3 Medium output end face wave front phase distribution under different pumping time

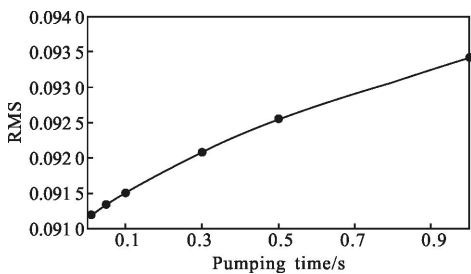


图 4 出射端面 RMS 值与泵浦时间的关系

Fig.4 Relationship between RMS of output end face and pumping time

从图 4 中可以看出,随着泵浦时间的增长,介质

出射端面的 RMS 值也呈现增长的趋势。在相同的泵浦功率下,泵浦时间越长,RMS 值越大,即介质出射端面光束的波前相位畸变越大。热效应对输出光束的影响随着泵浦时间的增长也越来越大。

2.2 不同泵浦光功率密度下的计算结果

为了研究泵浦光功率密度的变化对热效应的影响,与前文的计算类似,在保持其他计算条件与前文计算时所用的相同的前提下,研究了在泵浦光功率密度分别为 $3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 和 $3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 下,泵浦时长为 0.01 s 不变时介质的温度分布和出射端面波前相位分布,如图 5 和图 6 所示。

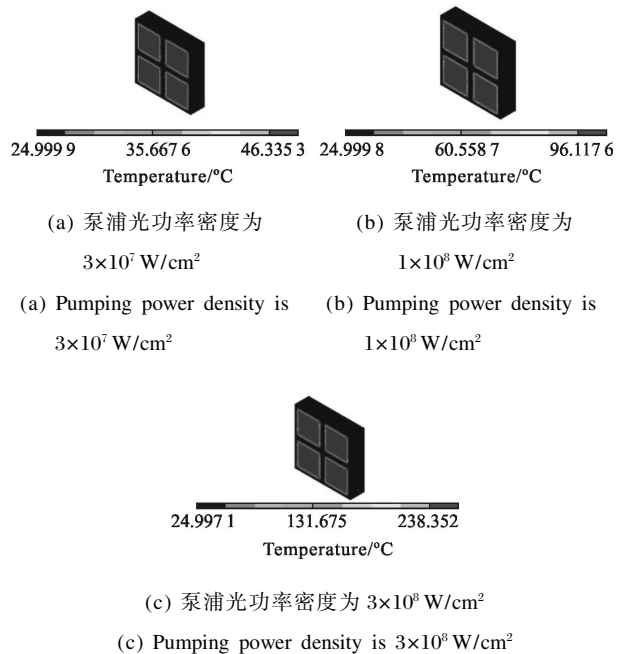


图 5 不同泵浦光功率密度下介质温度分布

Fig.5 Medium temperature distribution under different pumping power density

从图 5 和图 6 中可以看出,激光介质的温度随着泵浦光功率密度的增大而增大。当泵浦光功率密度分别为 $3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 和 $3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,激光介质端面的最高温度分别为 $49 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $265 \text{ }^\circ\text{C}$ 。泵浦光功率密度的增大导致介质整体温度较高。容易知道泵浦功率越大,折射率变化越大,由于温度的不均匀分布导致折射率出现不均匀变化,从而导致出射端面波前相位分布出现不均匀分布,随着泵浦功率的增大,出射端面波前相位分布也越来越不均匀,出现明显的畸变,即热效应变得越来越严重。图 7 示出了出射端面 RMS 值随泵浦功率的变化

关系,在相同的泵浦时长下,泵浦光功率越大,RMS 值越大,出射端面光束的相位畸变越大,热效应影响越大。相比较而言,由于泵浦时长增大引起的热效应变化更加明显。即泵浦时间的变化对热效应的影响比泵浦光功率变化对热效应的影响更大。

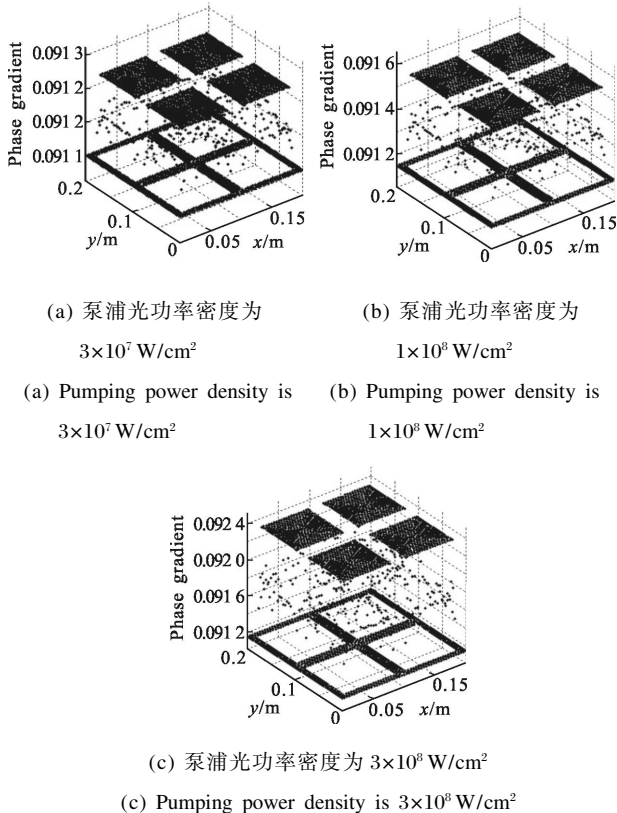


图 6 不同泵浦光功率密度下介质出射端面波前相位分布

Fig.6 Medium output end face wave front phase distribution under different pumping power density

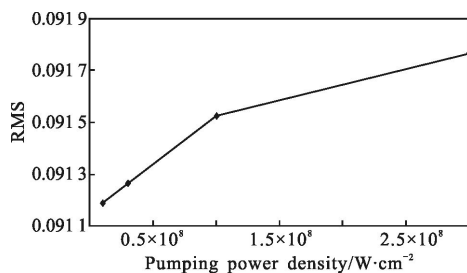


图 7 出射端面 RMS 值与泵浦光功率密度的关系

Fig.7 Relationship between RMS of the output end face and pumping power density

3 结论

文中建立了 LD 端面泵浦 Cr,Yb:YAG/Yb:YAG 分离式放大复合结构的热模型。利用有限元法计算

了激光介质温度分布,由此计算出了介质的折射率变化。又在温度和折射率的基础上计算了晶体出射端面光束的相位分布情况,并给出了晶体出射端面通光口径内相位均方根值(RMS)随时间变化的关系。随后同样分析了在保持泵浦时间不变的情况下,泵浦光功率密度变化对热效应的影响。研究表明:激光热效应对激光系统输出光束质量有一定的影响;在不同的泵浦时长下,介质的温度和折射率变化不同,出射端面光束的相位分布也不同;泵浦时间越长,激光热效应越严重。泵浦光功率的变化导致的温度、折射率和出射端面波前相位变化与泵浦时间变化时的情况较为类似,但是泵浦时长的变化对热效应的影响更加明显。为了有效降低激光热效应的影响,应当合理控制泵浦时长和泵浦光功率,使激光器达到最大的输出。

参考文献:

- [1] Lu Fuyuan, Gong Mali, Xue Haizhong, et al. Analysis on the temperature distribution and thermal effects in corner-pumped slab lasers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45: 43-48.
- [2] Huang Feng, Wang Yuefeng, Niu Yanxiong. Study on the thermal effect of LD End-Pumped high repetition frequency Nd:YAG laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33 (4): 355-358. (in Chinese)
黄峰,汪岳峰,牛燕雄. LD 端面泵浦的高重频 Nd:YAG 激光器的热效应研究 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 355-358.
- [3] Shi Peng, Chen Wen. Thermal effect of LD End-Pumped circular cross section YAG-Nd:YAG composite crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 213-217. (in Chinese)
史彭,陈文. LD 端面抽运圆形截面 YAG-Nd:YAG 复合晶体热效应[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 213-217.
- [4] Anaya J, Torres A, Martin-Martin A, et al. Study of the temperature distribution in Si nanowires under microscopic laser beam excitation [J]. *Materials Science & Processing*, 2013, 113: 167-176.
- [5] Fan Ting, Gao Feng, Li Jinping. Thermal effect of LD end-pumped flat Nd:GdVO₄ crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 429-433. (in Chinese)
范婷,高峰,李金平. 激光二极管端泵平板 Nd:GdVO₄ 晶体热效应[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 429-433.

- [6] Dong Jun, Deng Peizhen, Xu Zhen. Study of the effects of Cr ions on Yb in Cr,Yb:YAG crystal [J]. *Optics Communications*, 1999, 170: 255–258.
- [7] Chen Xinyu, Yu Yongji, Wang Chao, et al. Study on the uniformity of temperature field distribution in LD side-pumped laser[J]. *Optik*, 2013, 124: 2067–2071.
- [8] Koehner W. Solid-state Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] Yang Jimin, Liu Danhua, Liu Jie. Study on the thermal effect of Ytterbium doped yttrium silicate crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30 (3): 293–297. (in Chinese)
杨济民, 刘丹华, 刘杰. 掺镱硅酸钇晶体的激光热效应研究[J]. 量子电子学报, 2013, 30(3): 293–297.
- [10] Pei Zhengping, Tang Chun, Tu Bo, et al. Nd: YAG laser chip thermotropic wavefront aberrations [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1615–1618. (in Chinese)
裴正平, 唐淳, 涂波, 等. Nd:YAG 薄片激光器热致波前畸变[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1615–1618.