

有源反射镜式片状 Nd:LuAG 增益介质热分析

刘秋菊^{1,2**}, 王建磊¹, 刘晶¹, 李磊¹, 陈汝风¹, 施翔春^{1*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 对大口径有源反射镜式片状 Nd:LuAG 陶瓷激光增益介质在高功率激光二极管(LD)抽运条件下的热效应及其引入的波前畸变进行了分析。片状 Nd:LuAG 陶瓷尺寸为 64 mm×6 mm, 抽运峰值功率为 58.5 kW, 抽运光斑大小为 32 mm×35 mm, 在激光光束的入射角度为 15° 时对有源反射镜式片状 Nd:LuAG 增益介质的热效应和波前畸变进行仿真分析。仿真结果显示在抽运状态时片状 Nd:LuAG 陶瓷的最高温度为 55.6 °C; 水平方向和垂直方向引入的负焦距分别为 $F_H = -65.78$ m 和 $F_V = -77.28$ m。模拟放大后激光波前畸变峰谷值为 4.33λ (激光波长 λ 为 1064 nm), 波前畸变主要为离焦量导致的像散。在此基础上搭建了相应的实验装置, 测得抽运状态下 Nd:LuAG 陶瓷的温度分布及引入的激光光束波前畸变。模拟分析数据与实验数据相吻合。模拟计算和实验分析结果为片状 Nd:LuAG 陶瓷激光放大系统抽运均匀性的优化及激光光束质量的控制等提供了重要的参考依据。

关键词 激光器; 有源反射镜式片状放大器; 热分析; Nd:LuAG 陶瓷

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801002

Thermal Analysis of Active Mirror Nd:LuAG Gain Medium

Liu Qiuju^{1,2**}, Wang Jianlei¹, Liu Jing¹, Li Lei¹, Chen Rufeng¹, Shi Xiangchun^{1*}

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The thermal effect of large aperture active mirror disk Nd:LuAG ceramic laser gain medium under high power diode pump is analyzed and the wavefront distortions caused by the thermal effect is also studied. In simulation, the size of the disk Nd:LuAG ceramic is 64 mm×6 mm, the peak pump power is 58.5 kW, the spot size of the pump is 32 mm×35 mm and the incident angle of laser beams is 15°. Simulation results show that the maximum temperature of disk Nd:LuAG ceramic is 55.6 °C at pumping state, and the negative focal length is $F_H = -65.78$ m and $F_V = -77.28$ m in horizontal and vertical directions, respectively. The simulated wavefront distortions peak valley value is 4.33λ (the light wavelength λ is 1064 nm), which is caused by defocus mainly. On this basis, corresponding experimental facilities are set up to measure the temperature distribution of Nd:LuAG ceramic and the wavefront distortions introduced by laser beams. Simulation results are in good agreement with the experiment. Simulative and experimental analysis results provide important references for the optimization of the pumping uniformity and the improvement of the laser beam quality of Nd:LuAG ceramic laser amplifier system.

Key words lasers; active mirror disk amplifier; thermal analysis; Nd:LuAG ceramic

OCIS codes 140.4480; 140.6810

1 引言

片状放大器是高功率激光装置中的重要部分, 但片状放大器引入的波前畸变是影响高功率激光装置输出光束质量最重要的因素^[1]。高功率激光装置

对片状放大器的性能要求为高增益系数、高储能效率和低波前畸变。早在 20 世纪 60 年代, Swain 等^[2]采用闪光灯抽运直径为 14 cm 的片状玻璃增益介质, 但由于材料、结构等原因光束质量不是很理想, 故出现了形变致热焦距的问题。中国工程物理

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-09; 录用日期: 2018-03-20

* E-mail: shixc@siom.ac.cn; ** E-mail: 1219399120@qq.com

研究院曹丁象等^[3]采用有限元方法计算了热容模式下片状激光器的瞬态温度分布和热应力分布及波前畸变。中国科学院上海光学精密机械研究所唐仕旺等^[4]以神光 II 四程放大高功率激光驱动器为研究平台对片状放大器三维建模并进行波前模拟计算,通过实验获得了氙灯抽运引入的波前像差,实验结果验证了模拟计算的结果。

相较于传统的透射式片状放大器,有源反射镜式片状放大器可实现单程双通放大,能量提取效率高,而且表面热沉积可通过直接接触流体进行冷却,从而有效地克服激光增益介质的热效应^[5]。早在 20 世纪 80 年代,Abate 等^[5]采用 Nd:glass 有源反射镜式激光放大器得到了高功率、大能量的激光光束。日本 Furuse 等^[6-7]研究了有源反射式 Yb³⁺:YAG 陶瓷的波前畸变、小信号增益系数等。2016 年,法国 Marrazzo 等^[8]探究了低温下抽运有源反射镜式 Yb³⁺:YAG 片状激光放大器。

近些年来,Nd:LuAG 以其优良的光学性质备受关注,Nd:LuAG 受激发射截面小,荧光寿命较大,且其为立方晶系,可生产出大口径的激光陶瓷^[9]。本文对大口径有源反射镜式片状 Nd:LuAG 陶瓷激光增益介质在高功率激光二极管(LD)抽运条件下的热效应及其引入的波前畸变进行分析。以模拟仿真为基础,对高功率抽运下的陶瓷介质进行热分析,包括温度分布、热焦距变化和波前畸变^[10]。搭建实验平台,通过监测 Nd:LuAG 陶瓷介质的温度、热焦距和激光光束波前的变化,对仿真结果加以验证。通过模拟计算和实验分析,为片状 Nd:LuAG 陶瓷激光放大系统的抽运均匀性及激光光束质量的控制等提供了重要的参考依据。

2 基本原理

端面抽运片状放大器导致的温度梯度会引起片内的机械形变和热应力分布^[11-13]。由于折射率是温度和应力的函数,片内的机械形变和折射率的改变会在增益介质中引入光程差(OPD)^[14]。OPD 的计算公式为

$$L_{\text{OPD}} = \left[\int n(x, y, z) dr(x, y, z) \right]_A - \left[\int n(x, y, z) dr(x, y, z) \right]_B, \quad (1)$$

式中:第 1 项为物面 A 的光程分布;第 2 项为像面 B 的光程分布; n 和 r 分别为直角坐标系下的折射率变量和形变值变量。参考像面的选择会对 OPD 产生很大的影响,所以实验中要加以考虑。

$$n(x, y, z) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T} T'(x, y, z) + \frac{\partial n}{\partial \sigma} \sigma, \quad (2)$$

式中: n_0 为激光增益介质在常温下的折射率; $\partial n / \partial T$ 为温度折射率系数; $\partial n / \partial \sigma$ 为应力光学系数; σ 为热应力; $T'(x, y, z)$ 为温度梯度。

介质热应力服从胡克定律^[15]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1-\nu} \left[\epsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \times \delta_{ij} - \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha T'(x, y, z) \delta_{ij} \right], \quad (3)$$

式中: α 、 E 、 ν 分别为介质材料的热膨胀系数、杨氏模量和泊松比; ϵ_{ij} 为应变分量; $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ 。

3 仿真和实验结果

3.1 实验模型

实验光路图如图 1 所示,种子激光光束入射角为 15°,激光光束透反两次经过 Nd:LuAG 陶瓷,光束能量为 1.6 mJ,光斑尺寸为 3.14 mm×3.14 mm。Nd:LuAG 陶瓷介质中掺杂 Nd 离子数分数为 0.8%,吸收系数为 3.1 cm⁻¹,尺寸为 64 mm×6 mm,一面镀有 1064 nm 高透膜及 808 nm 高反膜,另一面镀有 1064 nm 高反膜及 808 nm 高透膜,同时采用同质掺杂钐(Sm)离子的材料对其进行包边处理。增益介质背面直接接触水流冷却,提高散热能力。采用端面抽运方式,抽运光尺寸为 35 mm×32 mm。

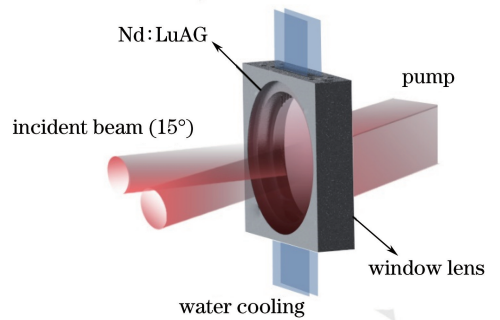


图 1 实验光路

Fig. 1 Experimental light path

3.2 模拟仿真

抽运光在陶瓷介质端面方向上呈高斯分布,在厚度方向上呈指数衰减。入射到介质内部的光强分布 I 表示为

$$I = \frac{\tau f_p P_m \eta_c}{A} \exp \left\{ - \left[\left(\frac{x^8}{v_x^8} \right) + \left(\frac{y^8}{v_y^8} \right) \right] \right\} \times [\exp(-az) + \exp(-2ab) \exp(az)], \quad (4)$$

式中： τ 、 f_p 、 P_m 、 A 分别为抽运脉宽、重复频率、峰值功率、抽运光斑面积； a 、 b 分别为陶瓷介质吸收系数和厚度； η_c 为抽运耦合系统耦合效率。

$$Q = \eta_a \eta_r I, \quad (5)$$

式中： Q 为激光陶瓷介质的热沉积； η_a 为陶瓷介质对抽运光的吸收效率； η_r 为产热比。计算中用到的相关参数如表 1 所示。

热源与光强分布成正比，可以表示为^[16]

表 1 模拟参数列表

Table 1 List of simulation parameters

Simulation parameter	Value	Simulation parameter	Value
Thermal conductivity κ / [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	8	Peak pump power P_m / kW	58.5
Special heat C / [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	411	Pump pulse width τ / μs	300
Mass density ρ / [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	6730	Pump repetition frequency f_p / Hz	10
Young modulus E / Pa	3×10^{11}	Pump area A / mm^2	35×32
Poisson ratio ν	0.24	Absorb efficiency a / cm^{-1}	3.1
Thermal expansion coefficient α	6.8×10^{-6}	Convection coefficient h / [$\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$]	4
Total power-heat ratio η	0.43	Cooling temperature T_c / $^\circ\text{C}$	23

利用有限元分析软件 ANSYS 进行模拟仿真^[17-18]，将(5)式热源函数作为温度边界条件加载到介质模型上，得到陶瓷介质在热稳态下的平均温度分布后，将温度分布再作用于陶瓷，通过施加压强、应力和温度载荷得到陶瓷介质的机械形变分布和热应力分布。仿真结果显示：引起激光光束质量恶化的主要原因是热致机械面形变化和热致折射率变化。本实验中入射到陶瓷介质上的光强分布 I 如(4)式所示，抽运光会透反经过陶瓷介质，2次通过致使陶瓷介质内部热应力相互补偿，所以热应力引起的光束质量的恶化相对于机械形变是小量，因此本文主要研究了热致机械面形变化和热致折射率变化对激光光束质量的影响。

在模拟中，将陶瓷介质作离散化处理，在光束传输方向上作光线追迹。通过有限元分析分别得到温度和机械形变的三维分布矩阵，使用光线追迹法对激光光束经过片状陶瓷介质的过程进行分析。仿真中激光光束以 15° 入射，只有相对光程差才对光束波面产生作用，所以追迹每条光线相对于中心光线的相对光程差，得到波前图如图 2 所示。

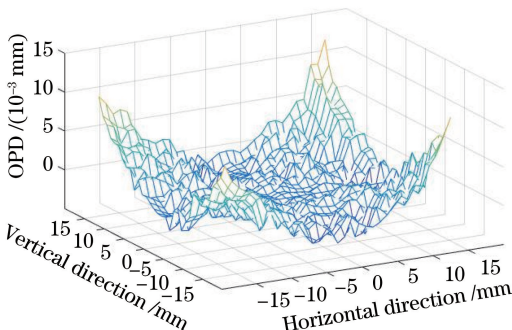


图 2 Matlab 绘制的波前曲面图

Fig. 2 Wavefront surface map drawn by Matlab

分别提取出水平切面和垂直切面的光程差数据绘制曲线，并采用抛物线线型对其进行拟合^[19]，如图 3 和图 4 所示。由光程差分布图可知，经过陶瓷介质后的光束呈发散特性，说明陶瓷介质引入了负透镜效应，对应水平和垂直的热焦距分别为 $F_H = -65.78 \text{ m}$ 、 $F_V = -77.28 \text{ m}$ 。由于是矩形光斑抽运，所以在水平方向和垂直介质方向热焦距有差异。

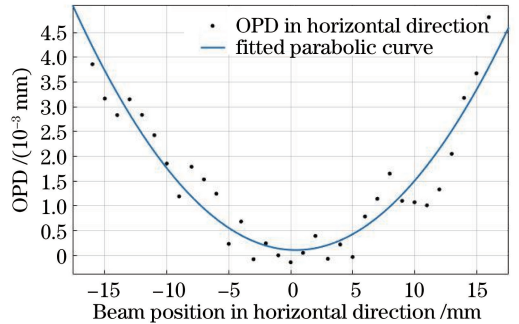


图 3 水平方向光程差数值和拟合曲线

Fig. 3 OPD in horizontal direction data and fitted curve

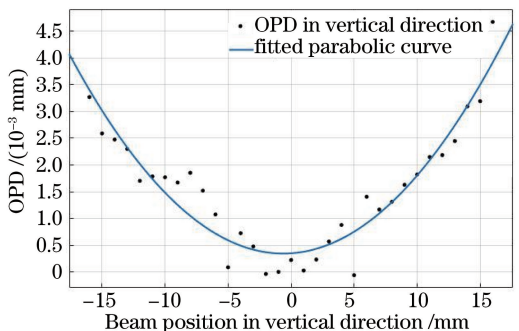


图 4 垂直方向光程差数值和拟合曲线

Fig. 4 OPD in vertical direction data and fitted curve

3.3 实验研究

种子光经过激光陶瓷增益介质后，通过一组耦

合透镜 (L_1 和 L_2 , 焦距 f 分别为 1000 mm 和 175 mm) 进入哈特曼波前测试系统, L_1 和 L_2 呈共焦放置, 取样镜位于透镜 L_1 后焦点前, 反射光束焦点处放置 CCD 用以测量激光光束远场, 如图 5 所示。

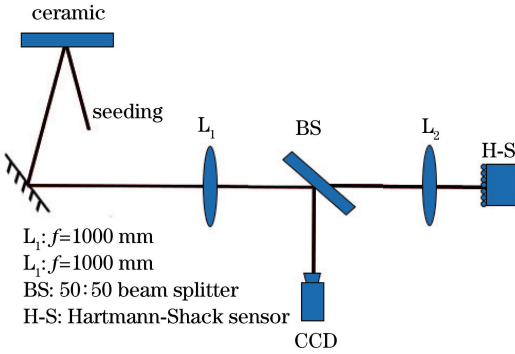


图 5 热焦距与波前测量光路图

Fig. 5 Light path of measuring thermal focus and wavefront

在抽运峰值功率为 58.5 kW 的条件下, 用 Zemax 软件仿真得到抽运光场分布如图 6 所示。

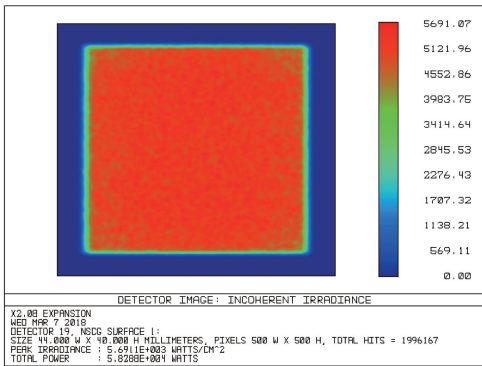


图 6 Zemax 仿真抽运光场分布图

Fig. 6 Simulation of pumping optical field distribution by Zemax

用热像仪测得陶瓷表面的温度分布, 温升最大值为 56.3 °C, 仿真稳态下平均温度最大值为 55.6 °C, 温度分布对比如图 7 所示。

CCD 观测的焦点后移量 $L_c = 22$ mm。根据几何光学和透镜成像公式, 等效引入的热焦距 $F_c = -66.2$ m。

利用哈特曼波前分析仪对片状 Nd:LuAG 陶瓷加入 LD 抽运(光波长 λ 为 1064 nm)后的波前进行了实验测量。将哈特曼波前分析仪放在经 L_2 透镜的焦平面处探测波前, 结果如图 8 所示。图中 RMS 为方均根值, PV 为峰谷值, GPV 为梯度 PV 值, GRMS 为梯度方均根值。哈特曼波前分析仪结果显示, 离焦量导致的像散是经过陶瓷介质后波前畸变的主要原因。波前的峰谷值为 4.33λ , 存在

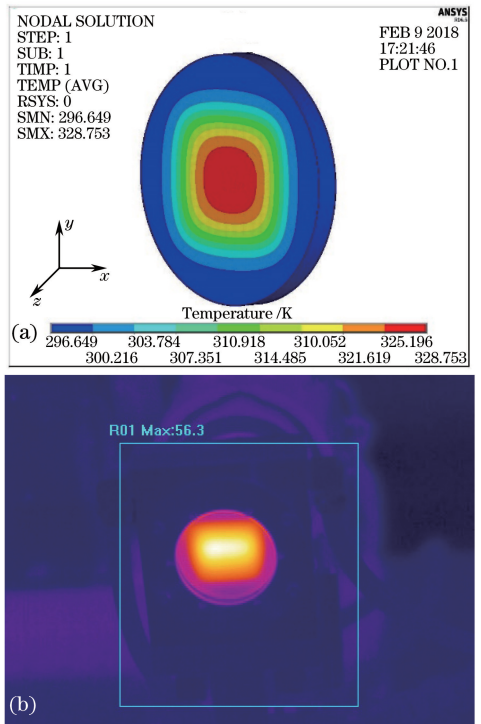


图 7 58.5 kW 峰值功率抽运下陶瓷热分布。

(a) 仿真值; (b) 热像仪测量值

Fig. 7 Heat distribution with peak power pump of 58.5 kW.

(a) Simulation; (b) measured by thermal imager

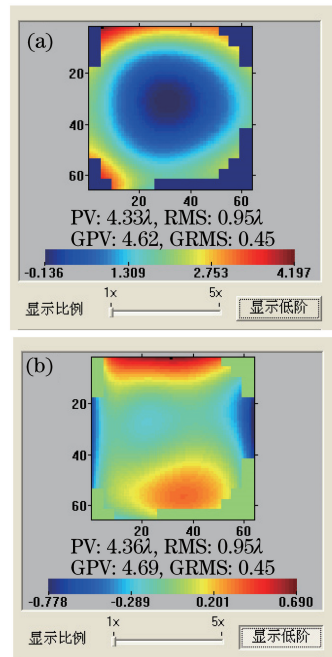


图 8 利用哈特曼-夏克传感器测得的波前畸变。

(a) 总波前畸变; (b) 去除低阶的波前畸变

Fig. 8 Wavefront distortion through Hartmann-Shack sensor.

(a) Wavefront distortion in total wavefront;

(b) wavefront distortion without low order

±0.05λ波动,去除低阶量之后的波前差值约为1.47λ,高阶量主要包括彗差、畸变等。

反射式放大器波前相对面型的变化比透射式更敏感,在系统波前畸变容忍度总量一定的情况下,将会对光学元件,特别是增益介质提出更高的面型要求。在陶瓷介质的装调过程中,要注意反射面型的离焦量控制。光学元件材料不均匀性、光学加工和夹持应力等因素也会引起波前变化。模拟分析中虽然加入了应力边界条件,但是在实际实验中对边角的夹持应力比较难以确定,故模拟仿真和实际值之间存在一定的误差。

4 结 论

对大口径有源反射镜式片状 Nd:LuAG 陶瓷激光增益介质在高功率 LD 抽运条件下的热效应及其引入的波前畸变进行了分析。在此基础上搭建了相应的实验装置,测得抽运状态下 Nd:LuAG 陶瓷的温度分布及引入的激光光束波前畸变,模拟值和实验值较好地匹配。出射光束热焦移为 $L_c = 22$ mm,验证了模拟仿真中陶瓷介质产生的负透镜效应,同时考虑到抽运光是矩形光束,所以在介质水平切面方向和垂直切面方向分别得到了热焦距 $F_H = -65.78$ m 和 $F_V = -77.28$ m。利用哈特曼波前分析仪对激光光束波前进行了实验研究,模拟放大后激光波前畸变峰谷值为 4.33λ (激光波长 λ 为 1064 nm),主要波前畸变为离焦量导致的像散。由于光学元件材料不均匀性、光学加工和夹持应力等因素的不确定性,模拟应力的边界条件比较难以确定,故模拟仿真和实际值之间存在一定的误差。模拟计算和实验分析为进一步提高光束波前质量、优化片状放大器抽运均匀性等提供了重要的参考依据。

参 考 文 献

- [1] Martin W, Trenholme J, Linford G, *et al.* Solid-state disk amplifiers for fusion-laser systems [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(9): 1744-1755.
 - [2] Swain J E, Kidder R E, Pettipiece K, *et al.* Large-aperture glass disk laser system [J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(10): 3973-3977.
 - [3] Cao D X, Zheng W G, Yuan X D, *et al.* Thermal distortions of heat capacity disk laser [J]. Laser Journal, 2006, 27(5): 45-46.
- 曹丁象, 郑万国, 袁晓东, 等. 热容模式下片状激光

介质的热畸变[J]. 激光杂志, 2006, 27(5): 45-46.

- [4] Tang S W, Zhu H D, Guo A L, *et al.* Study of simulation and experiment of the prompt pump-induced wavefront of the four-pass amplification high power laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 0702005.
- 唐仕旺, 朱海东, 郭爱林, 等. 四程放大高功率激光驱动器动态波前模拟与实验研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0702005.
- [5] Abate J A, Lund L, Brown D, *et al.* Active mirror: a large-aperture medium-repetition rate Nd: glass amplifier [J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 351-361.
- [6] Furuse H, Kawanaka J, Takeshita K, *et al.* Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb:YAG ceramics [J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3439-3441.
- [7] Furuse H, Sakurai T, Chosrowjan H, *et al.* Amplification characteristics of a cryogenic Yb³⁺: YAG total-reflection active-mirror laser [J]. Applied Optics, 2014, 53(9): 1964-1969.
- [8] Marrazzo S, Gonçalves-Novo T, Millet F, *et al.* Low temperature diode pumped active mirror Yb³⁺: YAG disk laser amplifier studies [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12651-12660.
- [9] Xu X D, Wang X D, Meng J Q, *et al.* Crystal growth, spectral and laser properties of Nd:LuAG single crystal [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(9): 678-681.
- [10] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 405-409.
- 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 405-409.
- [11] Sutton S B, Marshall C D, Petty C S, *et al.* Thermal recovery of NIF amplifier [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3047: 560-570.
- [12] Chen L, He S B, Yu H W, *et al.* Pump-induced wave-front distortion of the 4 × 2 assembled slab amplifier with 400 mm aperture [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 59-63.
- 陈林, 贺少勃, 於海武, 等. 400 mm 口径 4 × 2 组合式片状放大器的动态热畸变 [J]. 中国激光, 2010, 37(1): 59-63.
- [13] Yu H W, Zheng W G, He S B, *et al.* Modeling of residual thermo-optical distortions of the main amplifier of SG-III prototype [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(5): 385-390.
- 於海武, 郑万国, 贺少勃, 等. 神光 III 原型装置主放大器剩余热畸变模拟研究 [J]. 中国激光, 2001, 28(5): 385-390.

- [14] Smith W J. Modern optical engineering[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill Professional, 2007: 90-101.
- [15] Takeuchi Y. Thermal stress[M]. Guo Y W, Li A D, Transl. Beijing: Science Press, 1977.
竹内洋一郎. 热应力[M]. 郭延玮, 李安定, 译. 北京: 科学出版社, 1977.
- [16] Ma X H, Bi J Z, Hou X, *et al.* Numerical comparison of thermal effect among zigzag slab pump geometry[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12): 2209-2214.
马秀华, 毕进子, 候霞, 等. 锯齿形板条抽运结构的热效应数值比较[J]. 光学学报, 2007, 27(12): 2209-2214.
- [17] Kong X Q. Thermal stress analysis of finite element method[M]. 2nd ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999: 19-20, 71.
孔祥谦. 热应力有限元分析法分析[M]. 2版. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 19-20, 71.
- [18] Logan D L. A first course in the finite element method[M]. Wu Y S, Wu Y L, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 20-43.
达里尔洛根. 有限元分析方法基础教程[M]. 伍义生, 吴永礼, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 20-43.
- [19] Li H H, Li S G, Ma X H, *et al.* Modeling and experimental study at thermal effect of high power Bounce-pumped slab amplifiers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0302008.
李环环, 李世光, 马秀华, 等. 高功率 Bounce 板条放大器链路热补偿仿真及实验验证[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302008.