

文章编号: 0258-7025(2010)07-1708-05

空气传热系数对 Nd:YAG 微片激光器热形变的影响

常锐¹ 史彭¹ 张瑜² 辛宇¹ 白冰¹

(¹ 西安建筑科技大学理学院, 陕西, 西安 710055; ² 陕西师范大学物理与信息技术学院, 陕西, 西安 710062)

摘要 以半解析热分析理论为基础,研究了高斯分布激光二极管(LD)端面抽运背冷式微片 Nd:YAG 晶体热效应。通过分析高斯分布 LD 端面抽运背冷式微片 Nd:YAG 晶体工作特点建立热模型,并考虑空气传热系数对晶体温升的影响,利用狄尼级数对第三类热传导方程新的求解方法,得出了微片 Nd:YAG 晶体内部温度场。研究表明,当抽运总功率为 24.2 kW 时,在微片晶体端面抽运中心处获得 70.17 °C 最高温升和 0.836 μm 最大热形变。所得结果为 LD 端面抽运背冷式微片激光器的优化设计提供了依据。

关键词 微片激光器;热分析;空气热传导系数;狄尼级数;第三类边界条件

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1708

Influence of Air Heat Transfer Coefficient on Thermal Distortion Analysis of Nd:YAG Microchip Laser

Chang Rui Shi Peng Zhang Yu Xin Yu Bai Bing

(¹ School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China
² School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract Based on the theory of semi-analytical thermal analysis, the thermal effects within a laser diode (LD)-end-pumped Nd:YAG microchip crystal with back surface cooling are investigated. Through the working characteristics analysis of Nd:YAG microchip crystal that is pumped by a LD with a Gaussian distribution, a thermal model is established. The temperature field in the microchip Nd:YAG crystal is obtained by a novel solution to solve the third kind heat conduction equation with Dini series, and the influence of air heat transfer coefficient on the temperature rise in the crystal is researched. Research results show that a maximum temperature rise of 70.17 °C and a maximum thermal distortion of 0.836 μm occur in the center of the pump face when the total pump power is 24.2 kW. These results can provide basis for the optimized design of LD-end-pumped microchip laser with back surface cooling.

Key words microchip laser; thermal analysis; air heat transfer coefficient; Dini series; third type boundary condition

1 引 言

近年来,固体激光器的一个发展方向是小型化、集成化,由于微片激光器具有体积小,结构紧凑、稳定,寿命长,全固态化和转换效率较高,且易廉价批量生产等优点^[1~3],因此它的出现使固体激光器在

结构紧凑程度上有了突破性进展。微片激光器腔长较短,通常几毫米,容易实现单频激光输出且输出功率大。这些优点使得微片激光器在激光雷达、激光测距、激光传感、激光医疗及光存储和非线性光学等领域有着广阔的应用前景^[4~6]。由于抽运光在固体

收稿日期: 2009-10-23; 收到修改稿日期: 2009-12-07

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(09JK536)和陕西省教育厅工业公关项目(2008K05-15)资助课题。

作者简介: 常锐(1985—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光热分析方面的研究。

E-mail: changruiyl1985@126.com

导师简介: 史彭(1956—),男,教授,主要从事高功率激光热分析方面的研究。E-mail: pshi@sohu.com

激光介质中产生的废热会引起介质温度升高,因此微片激光器在连续运转时需要进行实时温控。这样使得晶体内部和冷却表面之间将产生非均匀的温度梯度,非均匀的温度梯度又导致了一系列的热效应,如晶体的热透镜、光弹和退偏等热效应,这些都将严重影响输出光束质量,减小输出功率,甚至造成介质的断裂^[7~10]。因此对微片激光器的热效应进行计算和分析是设计和制作微片激光器的基础。

目前激光晶体热效应在分析和计算时,一般都假设晶体表面绝热,如杨永明等^[1]的数值法,在分析晶体热效应时忽略了端面与空气的热交换;史彭等^[12,13]应用半解析法,虽考虑了第三类边界条件,但也是忽略了空气与晶体的热交换,这将使所得到的晶体温升普遍增大。本文以半解析法为基础,利用狄尼级数得出了微片晶体在考虑晶体与空气之间热交换时的内部温度场和形变场,这将使所得到的结论更符合实际晶体的工作条件。

2 热模型的建立及计算

2.1 背冷式圆形微片 Nd:YAG 晶体热模式

背冷式圆形微片 Nd:YAG 激光器结构如图 1 所示,Nd:YAG 晶体下表面镀有对 808 nm 和 1064 nm 波长光的全反膜,再与制冷器良好接触。晶体上端面镀有对 808 nm 和 1064 nm 波长光的增透膜。微片半径为 R ,厚度为 L 。建立柱坐标系,坐标原点 O 在晶体中心表面处。波长为 808 nm 抽运光从晶体上端面中心向下抽运,经下表面 808 nm 全反膜反射,反方向向上传播。

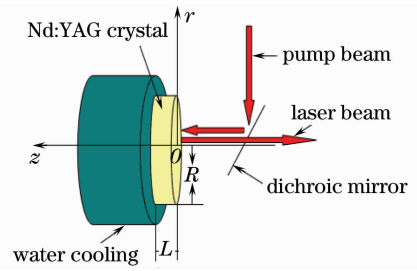


图 1 Nd:YAG 微片激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Nd:YAG microchip laser

2.2 圆形微片 Nd:YAG 晶体温度场半解析公式

由于晶体很薄,为 1.3 mm,晶体的侧面与空气的接触面远小于晶体的抽运面与空气的接触面,故忽略晶体侧面与空气热交换流出的热量,认为晶体侧面为绝热面,但是需要考虑晶体抽运端面($z=0$)与空气接触面的热交换。

设空气相对晶体的温度 T_0 ,则边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, T \Big|_{r=0} < +\infty, \quad (1)$$

$$T(r, z) \Big|_{z=L} = 0, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h[T(r, 0) - T_0], \quad (3)$$

式中 λ 是晶体的导热系数, h 为晶体与空气热交换系数。复合晶体内部是有热源的,则晶体热传导遵守泊松方程

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{q(r, z)}{\lambda}, \quad (4)$$

由半解析法,设温度场分布满足方程

$$T(r, z) = Z_0(z) + \sum_{n=1}^{\infty} Z_n(z) J_0\left(\frac{\alpha_n}{R} r\right), \quad (5)$$

式中 α_n 是 $J_0(x)$ 一阶导数的第 n 个零点。由边界条件以及将(5)式代入(4)式,可以求出温度场具体表达式为

$$T(r, z) = E \left[\frac{1}{\beta^2} \exp(\beta z) + \frac{1}{\beta^2} \zeta_R \exp(-\beta z) \right] + C_1 z + C_2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ D_1 \operatorname{ch}\left(\frac{\alpha_n}{R} z\right) + D_2 \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha_n}{R} z\right) + \frac{A}{[\beta^2 - (\alpha_n/R)^2]} [\exp(\beta z) + \zeta_R \exp(-\beta z)] \right\} \times J_0\left(\frac{\alpha_n}{R} r\right), \quad (6)$$

式中 E 和 A 为常数,表达式分别为

$$E = \left[\frac{2}{R^2 \lambda} \times (-\beta \eta I_0) \times \int_0^R r \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{w^{2k}}\right) dr \right] \times \exp(-\beta L), \quad (7)$$

$$A = \left[\frac{2}{R^2 J_0^2(\alpha_n) \lambda} \times (-\beta \eta I_0) \times \int_0^R r \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{w^{2k}}\right) J_0\left(\frac{\alpha_n}{R} r\right) dr \right] \times \exp(-\beta L), \quad (8)$$

$$C_1 = -E \left[\frac{1}{\beta^2 L} \exp(\beta L) + \frac{1}{\beta^2 L} \zeta_R \exp(-\beta L) \right] + \frac{E/(\beta^2 L) \times \{ (h + h\zeta_R) + [\exp(\beta L) + \zeta_R \exp(-\beta L)] \}}{(hL + 1)} - \frac{E/\beta \times (1 - \zeta_R) + hu}{(hL + 1)}, \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{E/\beta \times \{ (h + h\zeta_R) + [\exp(\beta L) + \zeta_R \exp(-\beta L)] \}}{-(hL + 1)} - \frac{L \times E/\beta \times (1 - \zeta_R) + hu_0 L}{-(hL + 1)}, \quad (10)$$

$$D_1 = \frac{A/[\beta^2 - (\alpha_n/R)^2] \times \{ \beta \times \text{sh}[(\alpha_n/R)L] \times (1 - \zeta_R) \}}{\{ \text{ch}[(\alpha_n/R)L] \times \alpha_n/R + h \times \text{sh}[(\alpha_n/R)L] \}} - \frac{A/[\beta^2 - (\alpha_n/R)^2] \times \{ \alpha_n/R \times [\exp(\beta L) - \zeta_R \exp(-\beta L)] \}}{\text{ch}[(\alpha_n/R)L] \times \alpha_n/R + h \times \text{sh}[(\alpha_n/R)L]}, \quad (11)$$

$$D_2 = \frac{A/[\beta^2 - (\alpha_n/R)^2] \times \{ \beta \times \text{sh}[(\alpha_n/R)L] \times (1 - \zeta_R) - \alpha_n/R \times [\exp(\beta L) + \zeta_R \exp(-\beta L)] \} \times \text{ch}[(\alpha_n/R)L]}{\{ \text{ch}[(\alpha_n/R)L] \times \alpha_n/R + h \times \text{sh}[(\alpha_n/R)L] \} \times \{ -\text{sh}[(\alpha_n/R)L] \}} - \frac{A/[\beta^2 - (\alpha_n/R)^2] \times [h + h \times \zeta_R] \times \text{sh}[(\alpha_n/R)L] \times \text{ch}[(\alpha_n/R)L]}{\{ \text{ch}[(\alpha_n/R)L] \times \alpha_n/R + h \times \text{sh}[(\alpha_n/R)L] \} \times \{ -\text{sh}[(\alpha_n/R)L] \}} + \frac{A/[\beta^2 - (\alpha_n/R)^2] \times [\exp(\beta L) + \zeta_R \exp(-\beta L)]}{-\text{sh}[(\alpha_n/R)L]}, \quad (12)$$

式中 I_0 为抽运光中心的强度, w 为抽运光束的高斯半径, λ 为 YAG 晶体的导热系数, k 为超高斯分布阶次, β 为 YAG 晶体对抽运光的吸收系数, η 为由荧光量子效应和内损耗所决定的热转换系数, $\eta = 1 - \lambda_p/\lambda_l$ 。 ζ_R 为 808 nm 高反膜的反射率。

2.3 圆形微片 Nd:YAG 晶体温度场的计算

半径为 12 mm 的超高斯抽运光抽运微片 Nd:YAG 晶体其总功率为 24.2 kW, 占空比为 10%。微片尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$, 掺 Nd^{3+} 离子的原子数分数为 3.0% 的 Nd:YAG 晶体对于 808 nm 抽运光的吸收系数为 20.9 cm^{-1} [12], 导热系数为 $0.13 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 。下表面 808 nm 高反膜的反射率为 99%。计算出微片晶体温度分布如图 2 所示, 等温线分布如图 3 所示。计算得出:

1) 在抽运光束一半范围内 ($r < w/2$) 等温线大

致平行晶面, 抽运面中心最高温升为 $70.17 \text{ }^\circ\text{C}$;

2) 在抽运光束范围外 ($r > w$) 基本上没有温升;

3) 过渡区 ($w/2 < r < w$) 等温线大致垂直晶面, 并从垂直面向平行晶面过渡, 会产生较强的热应力。

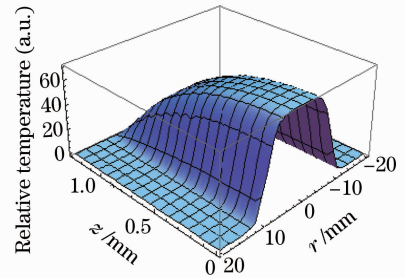


图 2 微片 Nd:YAG 晶体内部温度场
Fig. 2 Temperature distribution of the Nd:YAG microchip crystal

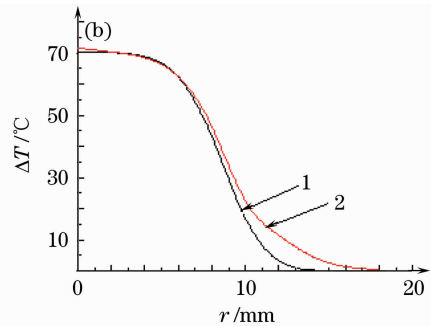
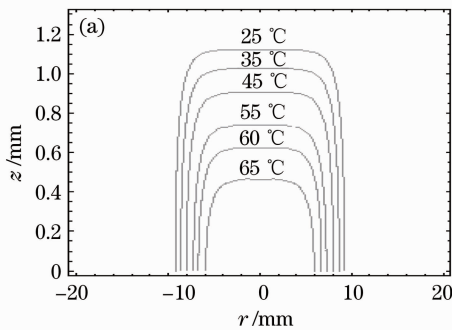


图 3 (a) 微片 Nd:YAG 晶体内部等温线; (b) 晶体抽运端面温度分布图

Fig. 3 (a) Isotherms diagram of the Nd:YAG microchip crystal; (b) temperature distribution on pump face

文献[14]对背冷微片 Nd:YAG 晶体温度场进行了研究,其导热边界条件和晶体参数与本文一致。文献[14]给出了抽运端面最高温升为 71.55 °C,其抽运端面温升曲线分布如图 3(b)中的曲线 2 所示。计算得出的最高温升为 70.17 °C,其抽运端面的温升曲线分布如图 3(b)中的曲线 1 所示。对计算得出的最高温升与文献[14]给出的最高温升,以及对曲线 1 与曲线 2 比较,验证了考虑空气传热系数对温度场影响的计算公式的可靠性。

3 h 的变化对温度的影响与晶体形变

3.1 h 的变化对温度的影响

改变温度场分布函数(6)式中的传热系数 h ,可以定量分析一般制冷(晶体抽运表面与空气自然热交换)和强制制冷(即晶体端面有循环风温控)两种情况下高斯抽运光产生的温度场,其对比如图 4 所示。由图 4 可知 $h=6.5$ 时,晶体的最高温升为 70.17 °C;在强制制冷条件下,加快了空气对流从而使 h 变大,如 $h=65$,则得出此时的最高温升是 65.53 °C。这两种情况的温度差为 4.64 °C,温度的变化是 $h=6.5$ 时的

6.6%,从而说明了空气热交换系数在计算晶体温度分布时的重要性和不可忽略性。

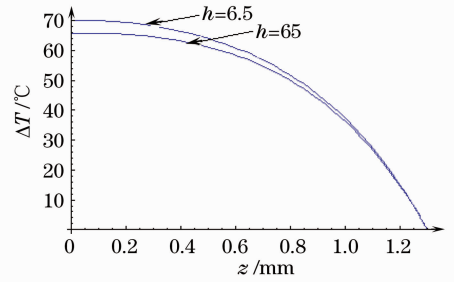


图 4 晶体在不同 h 时的温度对比图

Fig. 4 Temperature distribution of the Nd:YAG microchip crystal with different h

3.2 微片 Nd:YAG 晶体端面形变

微片内部任意点 (r, z) 原温度为 0,达到热平衡后的温度为 $T(r, z)$,则该点的温度增加量为 $T(r, z)$ 。温升引起该点热应变,该点 z 方向 dz 元热膨胀量为 $dl_z = \alpha T(r, z)dz$,其中 α 为 Nd:YAG 晶体沿 z 方向的热膨胀系数。则晶体沿 z 轴方向总膨胀量为^[12]

$$l_z = \int \alpha T(r, z) dz, \quad (13)$$

$$l_z = \alpha \times E \left[\frac{1}{\beta^3} \exp(\beta L) - \frac{1}{\beta^3} \zeta_R \exp(-\beta L) \right] + C_1 \times \frac{1}{2} \times L^2 + C_2 \times L - E \left(\frac{1}{\beta^3} - \frac{1}{\beta^3} \zeta_R \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ D_1 \times \frac{R}{\alpha_n} \times \operatorname{sh} \left(\frac{\alpha_n L}{R} \right) + D_2 \times \frac{R}{\alpha_n} \times \operatorname{ch} \left(\frac{\alpha_n L}{R} \right) + \frac{A}{[\beta^2 - (\alpha_n/R)^2]} \times \frac{1}{\beta} \times [\exp(\beta L) - \zeta_R \exp(-\beta L)] - D_2 \times \frac{R}{\alpha_n} + \frac{A}{[\beta^2 - (\alpha_n/R)^2]} \times \frac{1}{\beta} \times (1 - \zeta_R) \right\} \times J_0 \left(\frac{\alpha_n r}{R} \right). \quad (14)$$

由于 Nd:YAG 晶体下面与冷却器接触,晶体上部温度高,所以热膨胀主要在晶体上边抽运面上。利用(14)式可以计算抽运面上的热形变,计算得出抽运面上的热形变分布如图 5 所示,且得出了模型抽运端面中心的最大热形变量为 0.836 μm 。由图

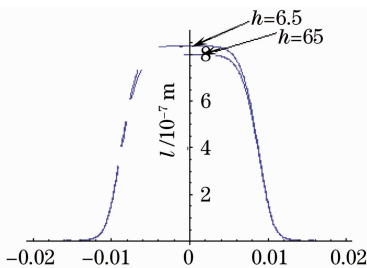


图 5 不同 h 时微片 Nd:YAG 晶体端面热形变分布图

Fig. 5 Thermal distortion distribution of the Nd:YAG microchip crystal with different h

5 可以得出,抽运面上的热形变仅分布在抽运光中心附近,且对不同的空气热交换系数对抽运中心的形变的影响不同, h 值越大,晶体的抽运端面形变越小,所以在考虑晶体形变的时候应该考虑到空气与晶体的热交换系数才能得到更为精确的晶体形变数据。

计算不同阶次情况,如图 6 所示,阶次越小,抽运面中心最高温升越高(阶次分别为 1,2,3,4 时,抽运面中心最高温升分别为 101.41,84.99,75.47 和 70.17 °C);高温区越窄,低温区越宽。

4 结 论

建立了具有超高斯分布的 LD 端面抽运背冷式微片 Nd:YAG 晶体工作的热模型。以半解析法为基础,利用狄尼级数得到了微片 Nd:YAG 晶体

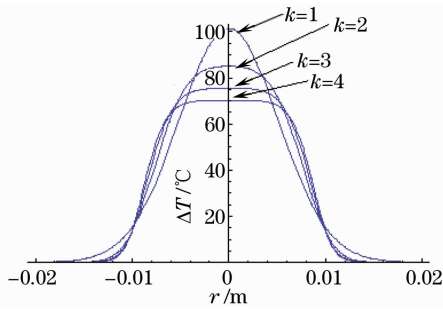


图 6 抽运面($z=0$)上不同阶次温度对比图

Fig. 6 Temperature comparison diagram on pump face ($z=0$) with different rank super-Gaussian distributions

在考虑晶体抽运表面与空气热交换时的温度场及其抽运端面的热形变,进而分析了不同 h 值时的微片 Nd:YAG 晶体内部温度场以及晶体抽运端面的热形变。所得微片晶体抽运端面的最高温升和晶体端面温度分布曲线与文献[14]所得结果进行比较,验证了本文得出理论结果的正确性。这对优化微片激光器设计提供了可靠的依据。

参 考 文 献

- Lin Zhifeng, Zhang Yunshan, Gao Chunqing *et al.*. Experimental investigation of LD-pumped Cr, Tm, Ho:YAG single longitudinal mode microchip laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1689~1690
林志锋,张云山,高春清等. LD 抽运 Cr, Tm, Ho:YAG 微片激光器单纵模运转特性的研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1689~1690
- Yufeng Li, Youlun Ju, Y. Urata *et al.*. Experimental spectra study of Tm:GdVO₄ microchip laser at room temperature[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 351~352
- Feng Zhongyao, Li Chengrong, Li Xiu *et al.*. Laser-diode side-pumped two rods quasi-continuous-wave Nd:YAG green laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1543~1546
冯忠耀,李成荣,李修等. 激光二极管侧抽运双棒串接连续 Nd:YAG 高功率绿光激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1543~1546
- Wang Shuxiang, Chen Yunlin, Yan Caifan *et al.*. Survey of microchip lasers[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2007, **24**(4): 401~406
王淑香,陈云琳,颜彩繁等. 微片激光器的最新研究进展[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(4): 401~406
- Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 1.5 kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 37~40
姚震宇,蒋建锋,涂波等. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd:YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 37~40
- Tang Hao, Zhu Xiaolei, Jiang Benxue *et al.*. Laser-diode-array side pumped Nd:YAG ceramic laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2001~2004
唐昊,朱小磊,姜本学等. 侧面抽运国产 Nd:YAG 陶瓷棒的激光特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 2001~2004
- G. Lescroart, R. Muller, G. Bourdet. Experimental investigations and theoretical modeling of a Tm:YVO₄ microchip laser[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **143**(1-3): 147~155
- Wang Ning, Lu Yutian, Kong Yong *et al.*. Analysing the light intensity distribution of super-Gaussian mirror resonator by fast Fourier-transform[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1317~1322
王宁,陆雨田,孔勇等. 用快速傅里叶变化法分析超高斯发射镜腔的广场分布[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1317~1322
- Zhang Shuaiyi, Huang Chunxia, Yu Guolei *et al.*. Thermal effect of laser crystal by laser diode end-pumped[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 333~337
张帅一,黄春霞,于果蕾等. 激光二极管端面抽运激光晶体的热效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 333~337
- Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Wang Peifeng *et al.*. High efficiency continuous-wave laser-diode-end-pumped vanadate laser operating on 914 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 328~332
石朝辉,樊仲维,王培峰等. 高效率连续波运转的激光二极管端面抽运 914 nm Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 328~332
- Yang Yongming, Xu Qiming, Guo Zhen *et al.*. Crystal end temperature distribution under different pumping light in solid state laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 224~225
杨永明,许启明,过振等. 不同抽运光分布下端面抽运固体激光器中晶体的端面温度分布研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(1): 224~225
- Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd:YAG microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646
史彭,李金平,李隆等. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 643~646
- Zhou Cheng. Theoretical analysis and experimental research on thermal focal length of a YVO₄/Nd:YVO₄ composite crystal[J]. *Chinese Physics B*, 2009, **18**(4): 1549~1550
- Pei Zhengping, Tang Chun, Tu Bo *et al.*. Simulation of thermal effect on beam distortion in Nd:YAG thin disk laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1616~1617
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): 1616~1617