

文章编号: 1001-3806(2011)03-0305-03

## 矩形截面 Nd: GGG 热容激光器热分析

史彭, 辛宇, 李隆, 陈文, 白冰  
(西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

**摘要:** 为了研究长方体型 Nd:GGG 热容激光晶体的热效应,通过对激光晶体工作特点的分析,采用半解析各向异性热分析方法,建立了符合实际工作状态热模型,对长方体型 Nd:GGG 热容激光晶体进行了热分析,得到了激光晶体抽运阶段和冷却阶段晶体内部温度场计算公式,定量分析了晶体宽度和厚度对温度场的影响。结果表明,当使用输出功率为 8100W、脉冲频率 500Hz、脉冲宽度 0.2ms 的 LD 抽运晶体 4s 时,抽运面中心最高温升为 169.1℃;停止抽运 120s 时,晶体最高温升下降到 0.97%。所得结果为热容激光器的优化设计提供了理论依据。

**关键词:** 激光物理; 热容激光器; 端面抽运; 长方体 Nd: GGG 晶体; 最高温升; 冷却时间

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.005

## Thermal analysis of rectangular Nd: GGG heat capacity lasers

SHI Peng, XIN Yu, LI Long, CHEN Wen, BAI Bing

(College of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the thermal effect of rectangular Nd: GGG heat capacity laser crystal, the semianalytical analysis of thermal conductive anisotropic material was introduced. Through the analysis of working characteristic of laser crystal, thermal model according to actual working state was established, thermal effect of a rectangular Nd: GGG crystal was investigated and the expressions of temperature field inside laser crystal in the pump stage and cooling stage were obtained. The effect of width and thickness of the crystal on temperature field was analyzed quantitatively. Results show that a maximum temperature rise of 169.1℃ is obtained in the center of the pump surface after LD-pumped for 4s with an output power of 8100W and a pulse frequency of 500Hz and a pulse width of 0.2ms. The maximum temperature rise decreases to 0.97% 120s later after the pumping stops. The results can offer theoretical basis for the optimization design of heat capacity lasers.

**Key words:** laser physics; heat capacity laser; end pump; rectangular Nd: GGG crystal; maximum temperature rise; cooling time

### 引言

固态热容激光器(solid-state heat capacity laser, SSHCL)的工作方式是将晶体抽运阶段和冷却阶段分离。这种运行方式可以大大降低激光输出阶段中晶体内部的温度梯度、热应力、光程畸变,具有在高功率抽运下输出光束质量好等优点。在激光武器、工业科技等领域有广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。

激光晶体吸收 LD 抽运光能量产生荧光辐射的同时,部分抽运光能量转变为废能,在晶体内部产生非均匀温度场、热应变、热应力、光程畸变、热透镜等热效

应。这种热效应严重地影响着激光器的性能<sup>[5]</sup>。目前,SSHCL 输出功率已经达到数千瓦<sup>[6]</sup>,其热效应也是不可忽略的因素。在设计新型激光器时,必须进行热效应分析。

分析激光晶体热效应是在准确得到激光晶体内部温度场基础上进行的。计算晶体内部温度场有数值法、商用计算机软件、半解析热分析方法等。相比其它方法,半解析热分析方法可以准确得出激光晶体内部非均匀温度场,并可以分析各个热参量对温度场的影响。作者应用半解析热分析方法已经在二极管抽运固体激光器(diode pump solid-state laser, DPSSL)热效应分析方面取得了研究成果<sup>[7-8]</sup>。和 DPSSL 相比,SSHCL 温度场增加了时间变量。

本文中利用各向异性半解析热分析方法,研究矩形抽运光斑抽运矩形 Nd: GGG 晶体<sup>[2]</sup>时,在晶体内部形成的温度场的半解析计算方法。所用方法可以应用到各向异性激光晶体,也可以应用到各向同性激光晶体中。

基金项目:陕西省教育厅专项科研资助项目(09JK536);  
陕西省科技厅工业攻关资助项目(2008K05-15)

作者简介:史彭(1956-),男,教授,主要从事高功率激光器热分析的研究。

E-mail: pshi56@163.com

收稿日期:2010-07-27;收到修改稿日期:2010-09-01

# 1 晶体抽运阶段热过程分析

## 1.1 晶体内部温度场

SSHCL 抽运阶段的抽运时段为  $(0 < t < t_1)$ 。

SSHCL 中长方体型 Nd: GGG 晶体热模型如图 1 所示。晶体下方与制冷器良好接触。LD 阵列光束经

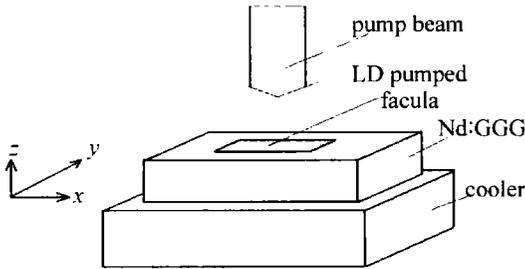


Fig. 1 Thermal model of Nd: GGG crystal

过准直透镜组准直后照射到 Nd: GGG 晶体上表面, 形成近似均匀的矩形光斑<sup>[2]</sup>。建立坐标系, 坐标原点  $O$  在晶体一角, 向上为  $z$  轴。方形晶体尺寸为  $a' \times b' \times c'$ , 在坐标系中范围为  $0 < x < a', 0 < y < b', 0 < z < c'$ 。

LD 阵列光束抽运光平行  $z$  轴入射到  $z = c'$  面, 并辐射在晶体中心时, 在  $z = 0$  面上抽运光表达式为<sup>[2]</sup>:

$$I(x, y, c') = \begin{cases} I_0, & (x_1 < x < x_2, y_1 < y < y_2) \\ 0, & (\text{其它区域}) \end{cases} \quad (1)$$

激光晶体对抽运光的吸收系数为  $\beta$ , 抽运光光强由于吸收而减弱, 由吸收定律可得在入射光在长方体内  $z = z$  面的光强为  $I(x, y, z) = I(x, y, c') e^{-\beta(c'-z)}$ 。

在  $z = z$  面晶体吸收抽运能量产生的热功率密度为:  $q_v(x, y, z) = I(x, y, z) \eta \beta$  (2)

式中,  $\eta$  为晶体的产热比<sup>[2]</sup>。

SSHCL 抽运阶段内, 由于激光介质内部有热源, 则内部温度场  $u(x, y, z, t)$  分布遵守传热方程<sup>[9]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial u}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + q_v(x, y, z) \quad (3)$$

式中,  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  为晶体沿着  $x, y, z$  方向的热导率,  $\rho$  为激光晶体的质量密度,  $c$  为激光晶体的比热容。

在热容开始抽运时, 晶体内部初始温度为 0 (相对), 则初始条件为  $u(x, y, z, 0) = 0$ 。晶体内部温度场为:

$$u(x, y, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{nml}(t) \cos \frac{n\pi}{a'} x \cos \frac{m\pi}{b'} y \sin \frac{(2l+1)\pi}{2c'} z \quad (4)$$

式中,  $n, m, l$  为正交函数得出的正整数。其中系数为:

$$A_{nml}(t) = \frac{16I_0\eta\beta \left[ \sin \frac{n\pi}{a'} x_2 - \sin \frac{n\pi}{a'} x_1 \right] \left[ \sin \frac{m\pi}{b'} y_2 - \sin \frac{m\pi}{b'} y_1 \right]}{nm\pi^4 D_{nml}} \times$$

$$\frac{\pi(2l+1)e^{-c'\beta} + 2c'\beta(-1)^l}{(2l+1)^2\pi^2 + 4c'^2\beta^2} \times (1 - e^{-\frac{1}{\rho c} D_{nml} t}) \quad (5)$$

$$D_{nml} = \lambda_x \left( \frac{n\pi}{a'} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{m\pi}{b'} \right)^2 + \lambda_z \left[ \frac{(2l+1)\pi}{2c'} \right]^2 \quad (6)$$

## 1.2 抽运阶段 Nd: GGG 晶体温度场计算

Nd: GGG 晶体尺寸为  $35\text{mm} \times 35\text{mm} \times 15\text{mm}$ , 吸收系数为  $3.04\text{cm}^{-1}$ , 热导率为  $8.02\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 质量密度为  $7090\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 比热容  $c = 380\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 产热率为  $0.4$ <sup>[2]</sup>。抽运光功率为  $8100\text{W}$ , 脉冲频率为  $500\text{Hz}$ , 脉冲宽度为  $0.2\text{ms}$ , 在晶体上表面形成  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$  矩形光斑。抽运后  $4\text{s}$  时, 抽运面(晶体上表面,  $z = c'$  面)温度分布如图 2 所示, 抽运面中心最高温升

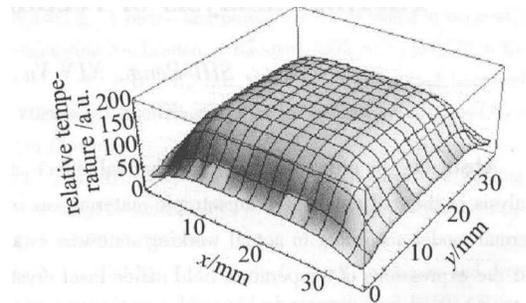


Fig. 2 Temperature field on the upper surface of the crystal after 4s of pump of  $169.1^\circ\text{C}$ 。不同抽运时间在抽运面中线 ( $z = c', y = b'/2$ ) 上的温度对比如图 3 所示。

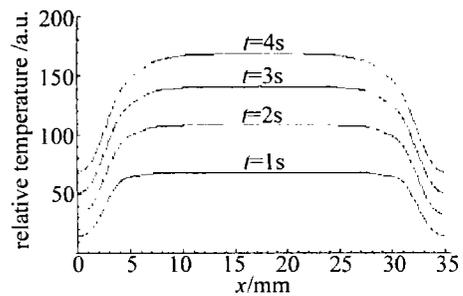


Fig. 3 Comparison of temperature fields at different pump time

计算得出晶体最高温升随着抽运时间迅速增加。在设计 SSHCL 时, 根据晶体最大允许温升, 利用(4)式计算出 SSHCL 最长抽运时间。

改变公式中晶体宽度, 可以计算分析不同晶体宽度的内部温度场。在图 2 条件下,  $35\text{mm} \times 35\text{mm}$ ,  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ ,  $45\text{mm} \times 45\text{mm}$  和  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$  4 种宽度的晶体在抽运  $4\text{s}$  时, 抽运中心线 ( $x = a'/2, y = b'/2$ ) 上温度对比如图 4 所示。从图 4 可以看出, 虽然都是中心抽运, 抽运光斑相同, 但是晶体宽度越大, 在抽运面抽运中心温度越高。这 4 种宽度晶体在抽运面抽运中心温度 (最高温度) 分别为  $169.1^\circ\text{C}$ ,  $200.9^\circ\text{C}$ ,  $230.5^\circ\text{C}$  和  $251.9^\circ\text{C}$ 。设计这种 SSHCL 时, 尽量选用宽度略大于抽运光斑的晶体。

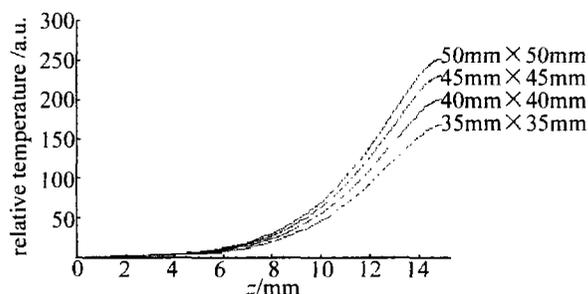


Fig. 4 Comparison of temperature fields along the central line of crystals in different width

利用计算公式,改变公式中其它参量可以研究该参量对温度场的影响,如不同晶体(如 Nd: GGG 晶体和 Nd: YAG 晶体)的温度场对比分析,不同晶体厚度温度场对比分析等。

计算结果与参考文献[2]中的结果基本一致。

## 2 晶体冷却阶段热过程分析

### 2.1 晶体冷却阶段温度场计算公式

在 SSHCL 抽运时段后,抽运停止进入晶体冷却阶段( $t_1 < t < t_2$ )。冷却阶段晶体内部无热源,晶体内部温度  $T(r, z, t)$  满足传热方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

抽运停止时刻就是冷却阶段开始时刻,则冷却阶段的初始条件为:

$$T(x, y, z, t_1) = u(x, y, z, t_1) \quad (8)$$

冷却阶段晶体内部温度场为:

$$T(x, y, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} B_{nml} \times e^{-D_{nm} \frac{1}{\rho c} (t-t_1)} \sin \frac{n\pi}{a'} x \sin \frac{m\pi}{b'} y \sin \frac{(2l+1)\pi}{2c'} z \quad (9)$$

其中系数为:

$$B_{nml} = \left\{ 16I_0 \eta \beta \times \left[ \sin \frac{n\pi}{a'} x_2 - \sin \frac{n\pi}{a'} x_1 \right] \left[ \sin \frac{m\pi}{b'} y_2 - \sin \frac{m\pi}{b'} y_1 \right] \right\} / (nm\pi^4 D_{nm}) \times \frac{\pi(2l+1)e^{-c'\beta} + 2c'\beta(-1)^l}{(2l+1)^2 \pi^2 + 4c'^2 \beta^2} (1 - e^{-\frac{1}{\rho c} D_{nm} t}) \quad (10)$$

### 2.2 冷却阶段 Nd: GGG 晶体温度场计算

按照图 2 条件和参量,计算出 Nd: GGG 晶体经过 4s 抽运后,停止抽运进入冷却阶段。晶体最高温升(在  $x = a'/2, y = b'/2, z = 0$  处)随时间衰减变化如图 5 所示。计算表明:停止抽运后,晶体内部温度迅速下降。经过 120s 的冷却,晶体最高温升下降到 0.97%, 1.64℃,不同冷却时间在抽运面中线( $z = c', y = b'/2$ )上温度对比如图 6 所示。

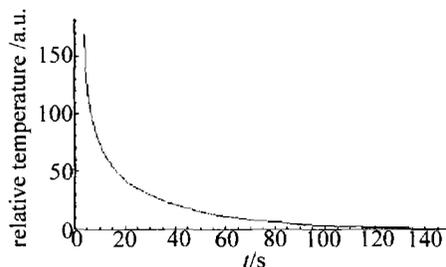


Fig. 5 Attenuation of the maximum temperature rise in Nd: GGG crystal during the process of cooling

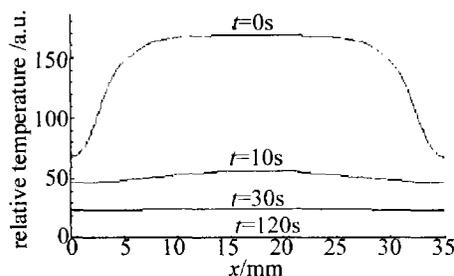


Fig. 6 Comparison of temperature fields at different cooling time

从图 6 可以看出,开始冷却后,晶体内部温度迅速下降,晶体内部温度梯度迅速减小,经过 30s 冷却后,晶体内部基本上没有温度梯度了。经过 120s 冷却后,晶体内部温度很低,并且没有温度梯度,可以开始下次抽运。

利用(9)式可以研究各参量对冷却时间的影响,如晶体厚度不同时,对冷却时间的影响。晶体厚度分别为 12mm, 15mm 和 18mm 时,其它条件不变,晶体最高温升随时间衰减变化对比如图 7 所示。从图中可

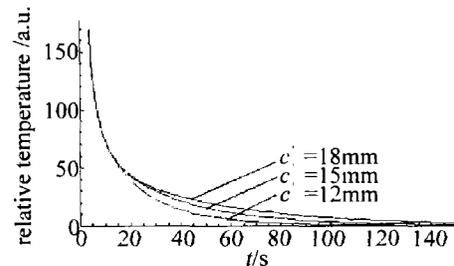


Fig. 7 Influence of different crystal thickness on cooling time

以看出,厚度大的晶体需要比较长的冷却时间,上述 3 种厚度晶体分别需要 80s, 120s, 170s 冷却时间。在设计这种 SSHCL 时,考虑晶体对抽运光充分吸收前提下,可适当减少晶体厚度。作者已经研究了晶体对抽运光的吸收规律<sup>[10]</sup>。

## 3 结论

利用各向异性半解析热分析方法,得出了具有矩形抽运光斑端面抽运长方体 Nd: GGG 激光晶体时段,晶体温度场计算公式。定量对比分析了不同抽运时间下的温度场,以及晶体宽度对温度场的影响。研究得出了冷却阶段激光晶体温度场计算公式,定量对比分

(下转第 333 页)

DPIM 或 DPPM 大于 5 倍的  $R_b$ , 即 MDPIIM 的功率利用率和带宽利用率都是最高的, 它提高了功率利用率, 改进了信息传输速率, 信道容量和传输带宽要求, 这对于水下光通信系统这种功率受限和带宽受限的系统更具优势。

## 6 结 论

分析了水下信道模型, 采用 MDPIIM 调制方式, 推断了水下无线光通信系统的带宽利用率和功率利用率。在和其它几种调制方式进行比较后发现, MDPIIM 同时具有较高的带宽利用率和功率利用率, 是更适于用于水下光通信中的调制方式。

### 参 考 文 献

- [1] SCHILL F, ZIMMER U, TRUMPF J. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications [C]// Proceeding of ACRA' 2004. Canberra, Australia: The Australia Robotics and Automation Association Inc., 2004:1-8.
- [2] SHIU D Sh, KAHN J. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(8):1201-1210.
- [3] VASILESCU I, KOTAY K, RUS D. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network [C]// Conference on Embedded Networked Sensor Systems Archive Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. San Diego, USA: Association for Computing Machinery, 2005:154-165.
- [4] WEID J P, SILVA J A P. Underwater cableless data transmission [C]// OCEANS '93 Engineering in Harmony with Ocean. Victoria, Canada: IEEE, 1993:191-193.
- [5] WANG H X, ZHU Y B, ZHANG T Y. Performance study of optical wireless DH-PIM and DPIM [J]. Laser Technology, 2007, 31(1):92-94 (in Chinese).
- [6] ZHANG K, GONG M L, ZHANG H T. Performance of dual header-pulse interval modulation for wireless infrared multipath channels [J]. Laser Technology, 2003, 27(1):4-7 (in Chinese).
- [7] GHASSEMLOOY Z, ALDIBBIAT N M. Multilevel digital pulse interval modulation scheme for optical wireless communications [C]// Transparent Optical Networks, 2006 International Conference. Nottingham, U K; International Conference on Transparent Optical Networks, 2006:149-153.
- [8] McLEAN J. Beam spread function with time dispersion [J]. Applied Optics, 1998, 37(21):4708-4712.
- [9] MOORADIAN G C, GELLER M, STOTTS L B. Blue-green pulsed propagation through fog [J]. Physical Ocean, 1980, 10(4):2093-2101.
- [10] GILES J. Underwater optical communications systems part 2 basic design considerations [C]// Military Communications Conference, 2005. Atlantic City, USA: IEEE, 2005:1700-1705.
- [11] ALDIBBIAT N M, GHASSEMLOOY Z, McLAUGHLIN R. Error performance of dual header pulse interval modulation (DH-PIM) in optical wireless communications [C]// Optoelectronics 2001 IEE Proceedings. London: IEEE, 2001:91-96.
- [1] SCHILL F, ZIMMER U, TRUMPF J. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications [C]// Proceeding of ACRA' 2004. Canberra, Australia: The Australia Robotics and Automation Association Inc., 2004:1-8.
- [2] SHIU D Sh, KAHN J. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(8):1201-1210.
- [3] VASILESCU I, KOTAY K, RUS D. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network [C]// Conference on Embedded Networked Sensor Systems Archive Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. San Diego, USA: Association for Computing Machinery, 2005:154-165.
- [4] WEID J P, SILVA J A P. Underwater cableless data transmission [C]// OCEANS '93 Engineering in Harmony with Ocean. Victoria, Canada: IEEE, 1993:191-193.
- [5] WANG H X, ZHU Y B, ZHANG T Y. Performance study of optical wireless DH-PIM and DPIM [J]. Laser Technology, 2007, 31(1):92-94 (in Chinese).
- [6] ZHANG K, GONG M L, ZHANG H T. Performance of dual header-pulse interval modulation for wireless infrared multipath channels [J]. Laser Technology, 2003, 27(1):4-7 (in Chinese).
- [7] GHASSEMLOOY Z, ALDIBBIAT N M. Multilevel digital pulse interval modulation scheme for optical wireless communications [C]// Transparent Optical Networks, 2006 International Conference. Nottingham, U K; International Conference on Transparent Optical Networks, 2006:149-153.
- [8] McLEAN J. Beam spread function with time dispersion [J]. Applied Optics, 1998, 37(21):4708-4712.
- [9] MOORADIAN G C, GELLER M, STOTTS L B. Blue-green pulsed propagation through fog [J]. Physical Ocean, 1980, 10(4):2093-2101.
- [10] GILES J. Underwater optical communications systems part 2 basic design considerations [C]// Military Communications Conference, 2005. Atlantic City, USA: IEEE, 2005:1700-1705.
- [11] ALDIBBIAT N M, GHASSEMLOOY Z, McLAUGHLIN R. Error performance of dual header pulse interval modulation (DH-PIM) in optical wireless communications [C]// Optoelectronics 2001 IEE Proceedings. London: IEEE, 2001:91-96.

(上接第 307 页)

析了不同冷却时间下的温度场, 以及晶体厚度对对温度场冷却的影响。所采用的研究方法可以应用到其它类型各向异性激光晶体温度场计算中, 如 Nd: YVO<sub>4</sub> 等激光器的热分析。研究结果可以为 SSHCL 热分析进一步研究提供研究基础, 为优化 SSHCL 设计提供理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] LI X Q, DOU Zh G, LI Q, *et al.* The study status of new lasers and its applications [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(6):95-99 (in Chinese).
- [2] WANG B S, JIANG H H, ZHANG Q L, *et al.* Analysis on the temperature field of LD array pumped Nd: GGG disc laser in heat-capacity mode [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2007, 24(6):688-693 (in Chinese).
- [3] DONG W W, LI L, SHI P, *et al.* Thermal effect of Nd: GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by fiber coupled diode laser [J]. Laser Technology, 2009, 33(6):633-637 (in Chinese).
- [4] LI L, DONG W W, SHI P, *et al.* Thermal effect of high power Yb: YAG microchip solid-state laser [J]. Laser Technology, 2010, 34(1):8-12 (in Chinese).
- [5] ZHENG X F, SHI P, LIU W, *et al.* Thermal effect of Nd: GdVO<sub>4</sub> crystal pumped by variable radius by LD [J]. Laser Technology, 2008, 32(6):642-644 (in Chinese).
- [6] HU H, CAI Zh, JIANG J F. Numerical simulation of thermodynamics in cooling for heat capacity laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(11):1507-1511 (in Chinese).
- [7] SHI P, CHEN W, LI L, *et al.* Semianalytical thermal analysis on a Nd: YVO<sub>4</sub> crystal [J]. Applied Optics, 2007, 46(19):4046-4061.
- [8] SHI P, CHEN W, LI L, *et al.* Semianalytical thermal analysis of thermal focal length on Nd: YAG rods [J]. Applied Optics, 2007, 46(26):6655-6661.
- [9] SABAEIAN M, NADGARAN H, MOUSAVE C. Analytical solution of the heat equation in a longitudinal pumped cubic solid-state laser [J]. Applied Optics, 2008, 47(13):2317-2325.
- [10] SHI P, LI J P, CHEN W, *et al.* Thermal effect of Nd: GdYO<sub>4</sub> cube microchip laser with back surface cooling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7):1772-1776 (in Chinese).