

文章编号:1004-4213(2011)01-0078-5

# 基于侧面热对流的 LD 泵浦 Yb : KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 热透镜效应研究

牛荣莲<sup>1</sup>, 刘成成<sup>1</sup>, 刘莹<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 秦连杰<sup>2</sup>

(1 山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

(2 烟台大学 环境与材料工程学院, 山东 烟台 264005)

**摘要:**基于对 LD 端面泵浦 Yb : KGW 激光晶体工作特点的分析, 建立了符合条件的激光晶体热模型. 考虑晶体侧面的热对流, 运用 MATLAB 和 FORTRAN 软件, 通过有限差分法求解各向异性介质热传导方程, 得到了该晶体的温度场分布、端面热形变分布和不同泵浦功率下的热焦距. 结果表明: 在泵浦功率为 14 W 时, 泵浦面最高温度达 272.8 °C、最大形变为 0.48 μm, 光斑附近的热焦距为 4.8 cm.

**关键词:** 固体激光器; Yb : KGW 晶体; 有限差分法; 热透镜效应

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114001.0078

## 0 引言

随着高功率激光二极管 (Laser Diode, LD) 的出现, 磷灰石结构钨酸钪钇 (Yb<sup>3+</sup> : KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, Yb : KGW) 晶体由于具有许多优异特性<sup>[1]</sup> 而备受关注<sup>[2-3]</sup>, 并被广泛应用于超短激光脉冲领域<sup>[4-5]</sup>. 但其本身存在的热透镜效应严重地影响了 Yb : KGW 激光器的性能<sup>[6]</sup>, 并且目前有关 b-cut 方形通光面 Yb : KGW 晶体热透镜效应的报道又很少<sup>[7-8]</sup>.

分析解决晶体热透镜效应的关键是晶体内部温度场和热形变场的准确计算<sup>[9-11]</sup>. 而在以往该类晶体温度场分布的理论研究中, 为了得到晶体内部温度场, 忽略了晶体与冷却装置之间的热对流, 把各向异性晶体按各向同性介质近似处理<sup>[12-13]</sup>. 由于该类激光晶体各方向热参量数值差别较大, 这样处理便引入了较大的计算误差. 本文通过对 LD 端泵 b-cut Yb : KGW 晶体的工作特点进行分析, 建立了高斯光束泵浦方形通光面 Yb : KGW 激光晶体的热模型. 考虑晶体侧面热对流, 采用最新报道的晶体参量, 运用 MATLAB 和 FORTRAN 软件编程求解各向异性晶体热传导方程, 得到了 Yb : KGW 晶体内部温度场分布, 端面形变分布以及不同泵浦功率下的热焦距. 在泵浦功率为 14 W 时, 端面中心最高温度达

272.8 °C、最大形变为 0.48 μm, 光斑附近的热焦距为 4.8 cm. 研究结果为解决各向异性晶体的热透镜效应、改善该类激光器的性能提供了理论依据.

## 1 理论分析

### 1.1 Yb : KGW 晶体内的温度场

b-cut Yb : KGW 掺杂浓度为 5at. %, 尺寸为 4×4×3 mm<sup>3</sup>. 用铝箔包裹其侧面, 放于热沉中, 用恒温循环器控制循环水温, 使其维持在 14 °C 左右. 泵浦光经耦合装置在晶体前端面几何中心处聚焦为一个很小的光斑. 热模型如图 1. Z-o-x 面为通光面, 通光方向 (y 向) 沿 b 轴. 由于 Yb : KGW 晶体的 b

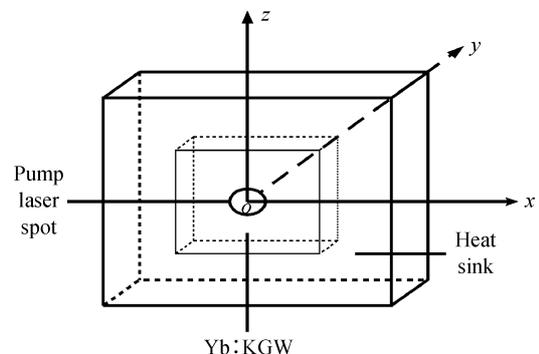


图 1 Yb : KGW 热模型

Fig. 1 Thermal model of Yb : KGW

基金项目: 山东省科技攻关计划 (No. 2010GGX10113)、济南市高校自主创新计划 (No. 201004007) 和山东省自然科学基金 (No. Y2008F10) 资助

第一作者: 牛荣莲 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 LD 泵浦固态激光器中的热效应. Email: 904736834@qq.com

导师 (通讯作者): 刘杰 (1963-), 女, 教授, 主要研究方向为全固态激光器技术及非线性光学. Email: jieliu@sdu.edu.cn

收稿日期: 2010-07-20; 修回日期: 2010-10-19

晶轴垂直于  $a$ - $o$ - $c$  晶面,且  $a$ 、 $c$  轴夹角为  $94^\circ$ ,可将其视为正交各向异性介质处理.稳态时晶体内部热传导遵循各向异性介质热传导方程,在笛卡尔直角坐标系中可表示为

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

式中  $T$  是晶体内部温度,  $k_x = 2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $k_y = 3.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $k_z = 3.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [7-8] 为晶体在各个方向上的热传导系数.  $q(x, y, z)$  是单位时间内在晶体单位体积中产生的热量,服从高斯分布[12]

$$q(x, y, z) = (2Q\alpha/\pi\omega_p^2)(1 - e^{-\alpha l}) \cdot e^{-2[(x-a/2)^2 + (z-c/2)^2]/\omega_p^2} e^{-\alpha y} \quad (2)$$

式中  $Q$  是晶体的总热耗,  $Q = (1 - \lambda_{\text{in}}/\lambda_{\text{out}})P_{\text{in}}$ ,  $\lambda_{\text{in}} = 977 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{out}} = 1060 \text{ nm}$ ,  $\omega_p = 100 \mu\text{m}$  为泵浦面光斑半径,  $\alpha = 26 \text{ cm}^{-1}$ [8,14] 为晶体吸收系数,  $l = 3 \text{ mm}$  是晶体长度,  $a = 4 \text{ mm}$  和  $c = 4 \text{ mm}$  分别是晶体在  $x$  和  $z$  方向上的长度.

由于晶体侧面传导冷却,所以考虑其侧面的热对流;基于晶体两通光面与空气接触,端面散发的热量远小于侧面热对流散发的热量,因此可认为晶体的两端面绝热,式(1)的边界条件为

$$T\left[-\frac{a}{2}, y, z\right] = 14 + \frac{Q\left[-\frac{a}{2}, y, z\right]}{hA} \quad (3)$$

$$T\left[\frac{a}{2}, y, z\right] = 14 + \frac{Q\left[\frac{a}{2}, y, z\right]}{hA}$$

$$T\left[x, y, -\frac{c}{2}\right] = 14 + \frac{Q\left[x, y, -\frac{c}{2}\right]}{hA} \quad (4)$$

$$T\left[x, y, \frac{c}{2}\right] = 14 + \frac{Q\left[x, y, \frac{c}{2}\right]}{hA}$$

$$\left.\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial y}\right|_{y=0} = 0; \left.\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial y}\right|_{y=b} = 0 \quad (5)$$

式中,  $Q\left[-\frac{a}{2}, y, z\right]$ ,  $Q\left[\frac{a}{2}, y, z\right]$ ,  $Q\left[x, y, -\frac{c}{2}\right]$ ,  $Q\left[x, y, \frac{c}{2}\right]$  为稳态时晶体各个侧面吸收的总热量(等于循环水从晶体各个侧表面带走的总热量),  $A$  为相应侧面的面积,  $h$  为热对流系数.

### 1.2 Yb:KGW 晶体端面形变

考虑沿  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  微元的热膨胀,设晶体内部一点的初始温度为  $T_0$ ,达到热平衡后的温度  $T(x, y, z)$ ,则在晶体各方向总的膨胀量为

$$\Delta l(x, z) = \sigma_y \int_0^b [T(x, y, z) - T_0] dy \quad (6)$$

$$\Delta l(x, y) = \sigma_z \int_0^c [T(x, y, z) - T_0] dz \quad (7)$$

$$\Delta l(y, z) = \sigma_x \int_0^a [T(x, y, z) - T_0] dx \quad (8)$$

$\sigma_x = 4.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\sigma_y = 2.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\sigma_z = 9.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [8] 是晶体在各个方向的热膨胀系数,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  是晶体在各个方向上的长度.

### 1.3 Yb:KGW 晶体热透镜焦距的计算

文献[15]指出在端面泵浦条件下,柱形晶体内部热透镜作用在一级近似下可等效为一个薄透镜,并给出了光程差(Optical Path Difference, OPD)与热透镜焦距的关系式

$$f(r) = 2r^2 / \text{OPD} \quad (9)$$

由于 Yb:KGW 是各向异性晶体,其光热特性不具有轴对称性,式(9)可修正为

$$f(x, z) = \frac{(x^2 + z^2)}{2[\text{OPD}_0 - \text{OPD}(x, z)]} \quad (10)$$

式中,  $\text{OPD}_0$  为泵浦中心的光程差,  $x$ 、 $z$  为相对于泵浦面中心的坐标.由文献[16],泵浦光通过具有热透镜效应的各向异性激光晶体时产生的光程差可修正为

$$\text{OPD}(x, z) = \int_0^b \frac{\partial n}{\partial T} T(x, z) dy + (n_0 - 1) \Delta l(x, z) + \sum_{i,j=1}^3 \int_0^b \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{ij}} \epsilon_{ij}(x, z) dy \quad (11)$$

式中,  $n$  和  $n_0$  分别是激光晶体在温度  $T$  和初始温度  $T_0$  ( $14^\circ\text{C}$ ) 时的折射率,  $\epsilon_{i,k}$  是晶体的热应力张量.对于端面镀有全反膜层的增益介质,由于激光在晶体内部反射,所以式(11)中的  $(n_0 - 1)$  应该用  $n_0$  代替[16].式(11)中的第一项为折射率随温度变化对光程差的影响,第二项为晶体端面形变对光程差的影响,第三项来自应力双折射.由于 Yb:KGW 晶体具有自然双折射特性,最后一项对光程差的影响很小,所以可忽略不计[7]

$$\text{OPD}(x, z) = \int_0^b \frac{\partial n}{\partial T} T(x, z) dy + n_0 \Delta l(x, z) \quad (12)$$

式中  $n_0 = 1.986$ , 热光系数  $\frac{\partial n}{\partial T}$  为  $4.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} - 1.0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [2], 在这里取  $0.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [8].

## 2 数值计算与模拟

泵浦功率为  $14 \text{ W}$  时,  $h$  取  $9000 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ [8], 通过 MATLAB 和 FORTRAN 软件,用有限差分法求解式(1)~(5),得到考虑晶体侧面热对流时的 Yb:KGW 晶体泵浦端面温度分布(图 2(a)).为了便于比较,同时给出了不考虑晶体侧面热对流时的 Yb:KGW 晶体泵浦端面温度分布(图 2(b)).

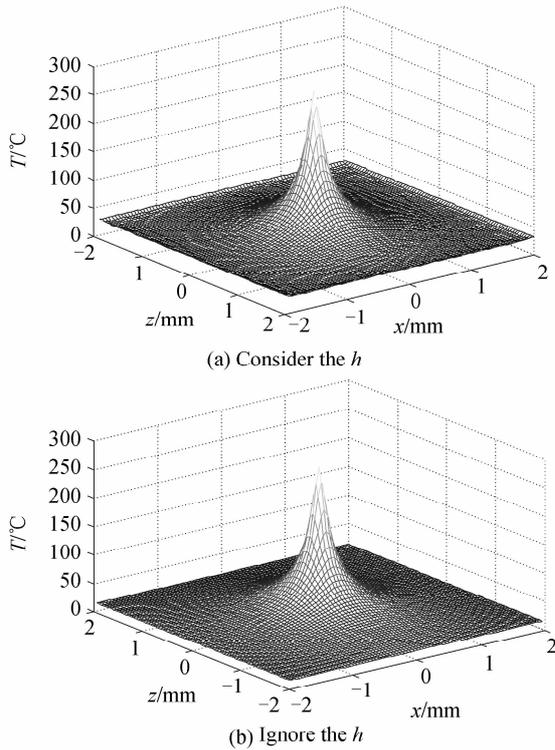


图2 泵浦面温度  
Fig.2 Pumped-face temperature

图2显示:泵浦功率为14 W时,考虑侧面热对流后,晶体侧表面温度由初始的14 °C变为23.33 °C,相对升高了9.3 °C;泵浦端面中心温度由初始的269.4 °C升高到272.8 °C.在连续泵浦情况下,入射激光经耦合头聚焦直接打在晶体泵浦端面中心,使得晶体中心能量密度最大,另外Yb:KGW热传导系数和热扩散系数较小(约为Nd:YAG的1/3),能量不易瞬间疏散,以致晶体泵浦端面中心温度最高.因为晶体侧表面通过铝箔与水冷铜块接触,热量及时疏散,所以侧表面温度相对较低.更进一步地进行分析,未考虑 $h$ 时的晶体泵浦端面中心与侧表面的温差为255.4 °C,而考虑 $h$ 时的晶体泵浦端面中心与侧表面的温差为249.6 °C,后者比前者低5.8 °C.这说明考虑 $h$ 后的温度梯度较未考虑 $h$ 时的小,即考虑 $h$ 后泵浦面上晶体的热透镜效应有所减弱.

基于该晶体 $x, z$ 轴热传导系数不同,进一步探究泵浦端面 $x, z$ 轴的温度分布(图3).图3显示:在其它条件完全相同的情况下,基于 $k_x = 2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} < k_z = 3.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,在距泵浦面中心相等距离处, $x$ 轴的温度较 $z$ 轴的高,即晶体温度分布存在各向异性.为了保护晶体,实验在低功率下操作.晶体与输入镜距离较小,可以认为打在晶体泵浦端面中心的激光束半径就是泵浦光斑半径.由于该晶体各方向热参量数值(体导热系数和热膨胀系数)差异很大,依据式(6)~(8),在激光束范围内,

只要晶体不同方向的温度变化存在差异,就会引起相应的热变形的非对称分布.进而由式(11)~(12)得出晶体的光程差和热透镜焦距也将非对称分布,从而会影响激光器谐振腔的稳定性和激光束的质量.

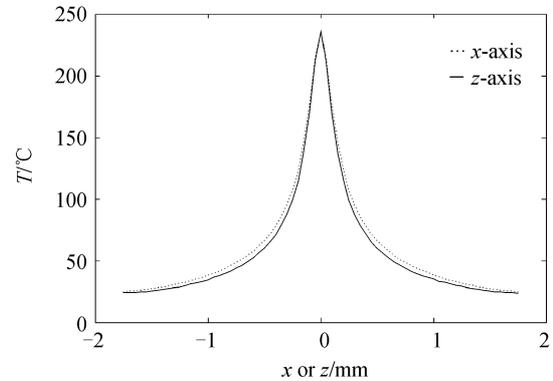


图3 泵浦面沿 $x, z$ 轴的温度  
Fig.3 Temperature along  $x$  and  $z$ -axis on pumped face

在相同条件下,考虑和不考虑侧面热对流时的激光晶体通光方向温度分布如图4.

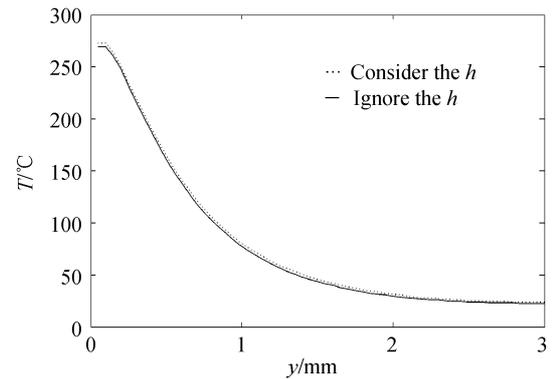


图4 沿 $y$ 轴温度  
Fig.4 Temperature along  $y$ -axis

图4显示:未考虑热对流时,晶体泵浦端面中心的最高温度为269.4 °C,末端面的温度为14 °C,温差为255.4 °C;考虑晶体侧面热对流后,泵浦端面中心的最高温度为272.8 °C,末端面的温度为23.3 °C,温差为249.1 °C.可见考虑热对流后温差有所下降,折射率和热变形随温度的变化也将有所降低,晶体的热透镜效应也将随之减弱.

模拟晶体泵浦面的形变如图5,可见,泵浦功率14 W时,泵浦面中心的最大形变量可达0.48  $\mu\text{m}$ .

模拟了端面形变,可以进一步计算出不同泵浦功率下Yb:KGW晶体的热透镜焦距(图6).图中数据显示,随着泵浦功率的增大,热透镜焦距变小,热效应加剧.在相同的泵浦功率下,考虑侧面热对流时的热透镜焦距比不考虑侧面热对流时的热透镜焦距大,那么考虑侧面热对流时的热效应就相应地比不考虑侧面热对流时的热效应弱.

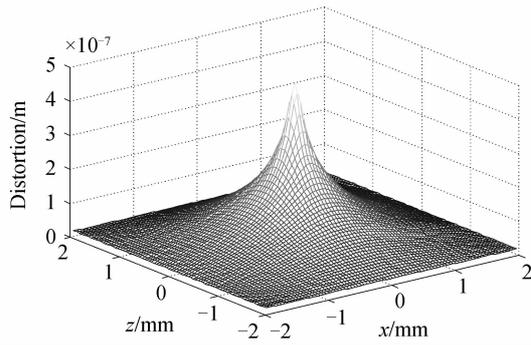


图 5 泵浦面形变

Fig. 5 Pumped-face distortion

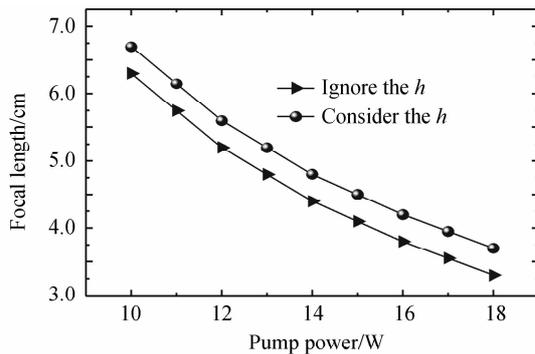


图 6 热焦距随泵浦功率的变化

Fig. 6 Thermal lens focal length vs. pump power

### 3 结论

分析了 LD 端面泵浦形式下,方形通光面 Yb : KGW 激光晶体热透镜效应. 采用有限差分法,运用 MATLAB 和 FORTRON 软件编制程序数值求解正交各向异性介质热传导方程,精确给出了晶体温度场分布、热应变场分布和热焦距,以及晶体在不同泵浦功率下的热焦距. 考虑侧面热对流,在泵浦功率为 14 W 时,泵浦面中心最高温度达 272.8 °C、最大形变达 0.48 μm,光斑附近的热焦距为 4.8 cm. 研究结果表明 Yb : KGW 晶体温度分布,热形变分布均有各向异性,具有严重的热透镜效应. 考虑晶体侧面的热对流可减弱晶体热透镜效应,提高激光器谐振腔的稳定性. 本文所采用的方法可以应用到其它各向异性激光晶体热透镜效应研究中,为提高改善激光器的激光特性提供理论基础.

#### 参考文献

[1] WANG Ying-wei, CHENG Hao-bo, ZHU Zhong-li, *et al.* Structure and vibration spectrum of laser crystal Yb : KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2005, **20**(6): 1295-1300.  
王英伟,程灏波,朱钟丽,等. Yb : KG(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 激光晶体结构与振动光谱[J]. *无机材料学报*, 2005, **20**(6): 1295-1300.

[2] BISWAL S, O'CONNOR S P, BOWMAN S R. Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(15): 3093-3097.

[3] FILIPPOV V V, KULESHOV N V, BODNAR I T. Negative thermo-optical coefficients and athermal directions in monoclinic KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser host crystals in the visible region[J]. *Applied Physics B*, 2007, **87**(4): 611-614.

[4] HOOS F, MEYRATH T P, LI S, *et al.* Femtosecond 5 W Yb:KGW slab laser oscillator pumped by a single broad-area diode and its application as supercontinuum source [J]. *Applied Physics B*, 2009, **96**(1): 5-10.

[5] HOLTOM G R. Mode-locked Yb:KGW laser longitudinally pumped by polarization-coupled diode bars[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(18): 2719-2722.

[6] BERGER J A, GRECO M J, SCHROEDER W A. High-power, femtosecond thermal-lens-shaped Yb : KGW [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(12): 8629-8640.

[7] HELLSTRÖM J E, BIUSHAGEN S, PASISKEVICIUS V. Laser performance and thermal lensing in high-power diode-pumped Yb : KGW with athermal orientation[J]. *Applied Physics B*, 2006, **83**(1): 55-59.

[8] HOOS F, LI S, MEYRATH T P, *et al.* Thermal lensing in an end-pumped Yb : KGW slab laser with high power single emitter diodes[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(9): 6041-6049.

[9] LI Feng, FAN Ting, BAI Jin-tao, *et al.* Investigation on temperature and thermal lens effects of laser diode end pumped quadrate composite YAG crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 425-429.  
李锋,范婷,白晋涛,等. 端面抽运方形复合 YAG 温度场及热透镜研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 425-429.

[10] SHI Peng, CHANG Rui, CHEN Wen, *et al.* Influence of the third thermal boundary condition on the thermal effect of laser crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2539-2542.  
史彭,常锐,陈文,等. 第三类热边界条件对激光晶体热效应的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2539-2542.

[11] LIU Quan-xi, ZHONG Ming. Finite element method analysis on thermal lens effect of the rod laser end-pumped by LDA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 776-780.  
刘全喜,钟鸣. LDA 侧面抽运棒状激光器热透镜效应的有限单元法分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 776-780.

[12] LIU Shu-shan, LIU Jie, LIU Min, *et al.* Theoretical and experimental study on thermal effect of LD end-pumped Nd : KGW laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 1-4.  
刘树山,刘杰,刘敏,等. LD 端面抽运 Nd : KGW 激光器热效应的理论与实验研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 1-4.

[13] CHENÍAS S, DRUON F, BALEMBOIS F, *et al.* Thermal lensing measurements in diode-pumped Yb-doped GdCOB, YCOB, YSO, YAG and KGW[J]. *Optical Materials*, 2003, **22**(2): 129-137.

[14] ZHOU Mu, WANG Xiao-feng, TAN Ji-chun. Calculation and analysis of athermal directions of Yb : KGW laser crystal [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(1): 81-85.  
周沐,王晓峰,谭吉春. Yb : KGW 激光晶体无热方向的计算与分析[J]. *应用光学*, 2008, **29**(1): 81-85.

[15] INNOCENZI M E, YURA H T, FIELDS F. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Applied Physics Letter*, 1990, **56**(19): 1831-1833.

[16] PFISTNER C, WEBER R, WEBER H P, *et al.* Thermal Beam Distortions in End-Pumped Nd : YAG, Nd : GSGG, and Nd : YLF Rods [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, **30**(7): 1605-1615.

## Thermal Lensing Effect of Diode-pumped Yb:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Based on Convective Heat-transfer on the Side Surface

NIU Rong-lian<sup>1</sup>, LIU Cheng-cheng<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, QIN Lian-jie<sup>2</sup>

(1 College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

(2 College of Environment and Materials Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

**Abstract:** Based on the features of LD end-pumped Yb : KGW laser crystal, the thermal model was established. Considering the convective heat transfer on the side faces, the temperature distribution, pumped-face distortion and thermal focal length under different pump power were obtained by solving anisotropy heat conductive equation through finite difference method. Under the pump power of 14 W, the highest temperature located at the center of the pumped face is 272.8 °C, the highest distortion is 0.48 μm, and the thermal lens focal length at the pump spot is 4.8 cm.

**Key words:** Solid-state lasers; Yb : KGW crystal; Finite difference method; Thermal lensing effect