

# 脉冲激光二极管巴条侧面抽运热传导各向异性 激光板条瞬态热分析

李 隆<sup>1,2</sup> 史 霞<sup>1</sup> 杜长龙<sup>1</sup> 董武威<sup>1</sup> 齐 兵<sup>1</sup> 史 彭<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055; <sup>2</sup> 西安建筑科技大学应用物理研究所, 陕西 西安 710055)

**摘要** 为合理进行激光谐振腔设计, 研制脉冲板条全固态激光器, 利用热传导理论解析研究了脉冲激光二极管(LD)巴条侧面抽运激光板条热平衡时的温度场以及热形变场分布情况。通过侧面抽运激光板条工作特点分析, 建立热分析模型, 考虑到激光二极管阵列(LDA)抽运光具有超高斯分布而 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条具有热传导各向异性的特点, 利用 Poisson 方程得出了准连续 LDA 侧面抽运热传导各向异性板条温度场分布的一般解析表达式。对比分析了 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条在单脉冲侧面抽运与重复脉冲侧面抽运过程中的温度场分布情况, 定量计算了达到热动态平衡时 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条抽运面中心的热形变量。计算结果表明, 达到热动态平衡时, Nd:YVO<sub>4</sub> 板条的最大与最低温升值分别为 34.8 °C 和 32.4 °C, 而 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条的最大与最低温升值分别为 30.2 °C 和 27.0 °C; Nd:YVO<sub>4</sub> 板条热动态平衡时最大与最小热形变量分别为 0.98 μm 和 0.89 μm, 而 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条的分别为 0.29 μm 和 0.24 μm。

**关键词** 激光技术; 全固态脉冲激光器; 激光板条; 热传导各向异性; 热效应

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.101406

## Transient Thermal Analysis of Anisotropic Thermal Conduction Laser Slab with Pulsed-Diode-Bar Side-Pumping

Li Long<sup>1,2</sup> Shi Xia<sup>1</sup> Du Changlong<sup>1</sup> Dong Wuwei<sup>1</sup> Qi Bing<sup>1</sup> Shi Peng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shannxi 710055, China  
<sup>2</sup> Institute for Applied Physics, Xi'an University of Architecture and Technology,  
Xi'an, Shannxi 710055, China

**Abstract** In order to rationally design laser resonator and develop a pulsed all-solid-state slab laser, based on the heat conduction theory, temperature and deformation field in thermal equilibrium state of laser slab side-pumped by pulsed-diode-bar were analytically investigated. Through working on characteristics analysis of laser slab side-pumped by pulsed-diode-bar, a thermal analysis model of laser slab was established. Considering that the pump light intensity of pulsed-diode-bar has super-Gaussian distribution and the laser slab with the characteristics of anisotropic thermal conduction, a general transient temperature field analytical expression of anisotropic thermal conduction laser slab by pulsed-diode-bar side-pumping was obtained by the Poisson equation. The temperature variations of Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:GdVO<sub>4</sub> slab side-pumped by single pulse and repetitive pulse were comparatively analyzed. And the deformations of pump surface of the Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:GdVO<sub>4</sub> slabs in thermal dynamic equilibrium state were quantitatively calculated. The results show that, when the transient temperature field of laser slab reaches thermal dynamic equilibrium state, the maximum and the minimum temperature rise in Nd:YVO<sub>4</sub> slab are 34.8 °C and 32.4 °C, but in Nd:GdVO<sub>4</sub> slab the maximum and the minimum temperature rise are 30.2 °C and 27.0 °C. The maximum and minimum deformations of Nd:YVO<sub>4</sub> slab are 0.98 μm and 0.89 μm, but in Nd:YVO<sub>4</sub> slab the maximum and minimum deformations are 0.29 μm and 0.24 μm.

**Key words** laser technique; all-solid-state pulsed laser; laser slab; anisotropic thermal conduction; thermal effect

**OCIS codes** 140.3460; 140.5680; 140.6810; 140.3580; 140.3480

收稿日期: 2011-05-11; 收到修改稿日期: 2011-06-05; 网络出版日期: 2011-08-27

基金项目: 西安市科技局创新支撑计划(CXY1015-6)和陕西省工业攻关项目(2008K05-15)资助课题。

作者简介: 李 隆(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事全固态激光器及其应用、超快激光光谱特性等方面的研究。

E-mail: lilong7211@126.com

# 1 引言

采用激光二极管阵列(LDA)侧面抽运全固态激光器(DPSSL)技术,即通过激光材料长方体或圆柱体表面相对于光轴横向抽运,这样不仅可以增加激光材料长度以及激光二极管(LD)抽运单元来提高DPSSL的输出功率,而且为激光材料的散热提供了较大的表面区域,目前LDA侧面抽运的DPSSL输出功率达到千瓦量级<sup>[1,2]</sup>。

由于LDA侧面抽运激光材料的激活区在材料的边缘,位于激光谐振腔光轴中心处振荡的 $TEM_{00}$ 模对抽运光的吸收相对较少,因此侧面抽运的DPSSL大都为多模输出<sup>[3]</sup>,近几年,出现的LDA侧面抽运掠射反弹几何结构的板条激光器,利用激光板条通光面的楔角将谐振的 $TEM_{00}$ 模折射到抽运面附近,实现了抽运激发区与振荡模具有较大的重叠空间,因此板条激光器具有较高的斜率效率以及 $TEM_{00}$ 模输出,受到了人们的广泛关注<sup>[4,5]</sup>。

准连续输出的LDA具有较高的峰值功率,抽运激光材料时便具有较高的抽运效率,成为近几年激光技术发展的新方向<sup>[6,7]</sup>。采用脉冲LDA抽运时存在着脉冲抽运阶段与脉冲间隔阶段,而激光板条处于热沉的冷却中,这样板条内部的温度场便具有了时变的特性<sup>[8,9]</sup>。虽然脉冲LDA抽运DPSSL具有更高的效率,但激光板条产生出的瞬态热效应问题仍然是影响DPSSL输出功率以及光束质量的重要因素<sup>[10,11]</sup>。

为研制脉冲LDA侧面抽运的板条激光器,合理设计激光谐振腔结构,本文解析地研究了激光板条达到热平衡时温度场以及抽运面热形变场的分布情况,通过侧面抽运激光板条工作特点分析,建立热分析模型,利用Poisson方程得出了准连续输出LDA抽运激光板条温度场的一般解析表达式。对比分析了侧面抽运Nd:YVO<sub>4</sub>与Nd:GdVO<sub>4</sub>板条在单脉冲抽运过程与重复脉冲抽运过程中的温度场分布情况,定量计算了达到热动态平衡时Nd:YVO<sub>4</sub>与Nd:GdVO<sub>4</sub>板条抽运面中心的热形变量。

## 2 准连续输出LDA侧面抽运板条激光器热模型

脉冲LDA侧面抽运的板条激光器实验装置如图1所示。其中脉冲LDA出射的抽运光经正交柱面透镜叠片整形成平行光,经抛面透镜会聚于板条抽运面。在正交柱面透镜组与抛面透镜之间插入808 nm半波片,其作用在于调整抽运光具有 $\pi$ 偏振状态,与Nd:YVO<sub>4</sub>板条的 $c$ -轴相一致,以提高激光板条对于抽运光的吸收率。激光板条尺寸为2 mm×10 mm×2 mm,两端双切6.5°楔角,并镀1064 nm波长增透膜(AR@1064 nm,  $T \geq 99\%$ )。经整形、聚焦后的808 nm抽运光经2 mm×10 mm面入射到板条上,抽运面镀有808 nm波长的高透膜(HT@808 nm,  $T \geq 99.8\%$ ),后表面蒸镀808 nm波长的高反膜(HR@808 nm,  $R \geq 95\%$ ),目的在于增加激光介质对于抽运光能量的利用率。由于LDA抽运激发反转粒子区与谐振的 $TEM_{00}$ 模存在较大的重叠区域,因此侧面抽运掠射反弹几何结构的板条激光器可获得高功率输出的同时,还具有接近激光衍射极限的光束质量。

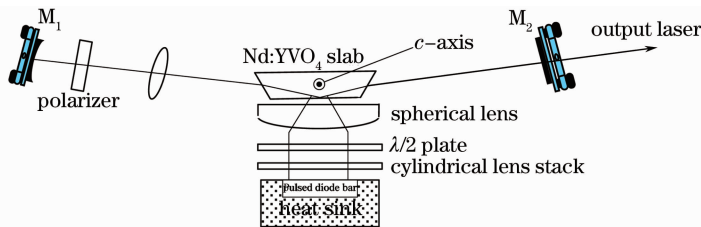


图1 脉冲LDA侧面抽运的板条激光器实验装置简图

Fig. 1 LDA side-pumped pulsed slab laser experimental setup

### 2.1 准连续LDA侧面抽运激光板条产生的热功率密度

LDA由一组单个发光LD平行排列组成。单个发光LD所发出的光束呈现出高斯分布特征,快轴发散角为 $40^\circ$ ,其慢轴发散角为 $10^\circ$ 。由于LD相邻间距很小,排列密集,在传播方向上相互重叠。经柱面镜、抛面镜后会聚于板条抽运面,由于柱面镜、抛面镜本身也存在热效应,对抽运光带来热畸变,可假设入射到激光板条抽运面( $z=0$ 面)的光束沿 $x$ 方向呈超高斯分布,沿 $y$ 方向呈均匀分布,其超高斯光强分布表达式为

$$I(x, y, 0, t) = \begin{cases} I_0 \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right]^k\right\} G(t), & (y_1 \leq y \leq y_2) \\ 0, & (y < y_1, y > y_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射到激光板条抽运面的光强;  $x_0$  为抽运光在  $x$  方向中心点的位置;  $w$  为抽运光的超高斯半径,  $k$  为超高斯阶次,  $G(t)$  为脉冲 LDA 时间因子。

使用激光功率计测量照射到激光板条抽运面 ( $oxy$  面) 的光功率为

$$P = \int_{y_1}^{y_2} \int_0^{\infty} I_0 \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right]^k\right\} dx dy, \quad (2)$$

脉冲 LDA 出射的超高斯光束中心处光强  $I_0$  表示为

$$I_0 = \frac{P}{(y_2 - y_1) \int_0^{\infty} \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right]^k\right\} dx}, \quad (3)$$

激光板条对 LDA 抽运光的吸收系数为  $\beta$ , 依据吸收定律, 沿  $z$  方向传播的抽运光在激光板条内  $z$  面处的光强为

$$I(x, y, z, t) = I(x, y, 0, t) \exp(-\beta z), \quad (4)$$

抽运光达到激光板条后侧面 ( $z=c$ ) 的光强为

$$I_i(x, y, c, t) = I(x, y, 0, t) \exp(-\beta c) = I_0 \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right]^k - \beta c\right\} G(t). \quad (5)$$

由于激光板条后侧面蒸镀抽运光波长的高反膜, 抽运光在板条后侧面被反射, 反射回的抽运光在激光板条内的光强为

$$I_r(x, y, z, t) = \zeta I_i(x, y, c, t) = \zeta I_0 \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right]^k - \beta c - \beta(c-z)\right\} G(t), \quad (6)$$

式中  $\zeta$  为激光板条蒸镀高反膜的反射率。

因此, 激光板条内任意位置处抽运光的光强为入射抽运光与反射抽运光在该位置光强之和

$$I(x, y, z, t) = I_i(x, y, z, t) + I_r(x, y, z, t) = I_0 \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right]^k\right\} \left\{ \exp(-\beta z) + \zeta \exp(-\beta c) \exp[-\beta(c-z)] \right\}. \quad (7)$$

由于激光晶体荧光量子效应和内损耗吸收抽运光的能量远大于其他原因晶体吸收的能量, 仅考虑晶体由于荧光量子效应和内损耗吸收抽运光能量所产生的热量, 则在激光板条内因吸收而产生的热功率密度为

$$q(x, y, z, t) = \eta \beta I(x, y, z, t) = \begin{cases} \eta \beta I_0 \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right]^k\right\} \left\{ \exp(-\beta z) + \zeta \exp(-\beta c) \exp[-\beta(c-z)] \right\} G(t), & (y_1 \leq y \leq y_2) \\ 0, & (y < y_1, y > y_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\eta$  为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数,  $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_l$ , 其中  $\lambda_p$  为半导体激光器抽运光波长 808 nm,  $\lambda_l$  为谐振腔的振荡激光波长 1064 nm;  $y_1$  与  $y_2$  间的距离为聚焦到激光板条横向光斑尺寸。

## 2.2 LDA 侧面抽运激光板条工作边界条件

激光板条安装在热沉冷却夹块中, 上、下两侧面与热沉保持良好的接触, 激光板条内部热量主要以热传导方式经上、下两侧面散失。激光板条及其热沉实验装置简图, 如图 2 所示。由于激光晶体上、下两侧面 ( $x=0$ ,  $x=a$ ) 温度相对恒定为 20 °C, 作为热模型数学处理可设其为 0 (相对), 得出温度场后, 再叠加冷却的环境温度。激光板条前、后两侧面 ( $y=0$ ,  $y=b$ ) 与左、右两通光端面 ( $z=0$ ,  $z=c$ ) 均与空气相接触, 与空气热交换流出的热量远远小于从上、下两侧面通过热传导流出的热量, 因此可假设晶体的前、后两侧面和左、右两端面绝热。另外, 激光板条两个通光端面虽然做了楔角切割, 考虑到聚焦到板条抽运面光斑半径较小、长度分布较窄 (约 3 mm), 忽略激光板条楔角切割的部分, 将板条视为一个长方体。这样, 侧面抽运激光板条的边界条件为

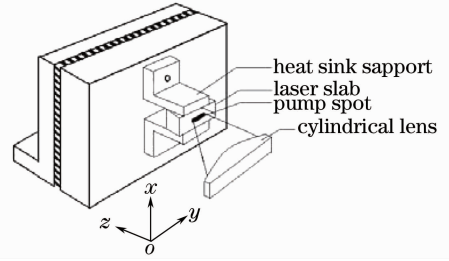


图 2 激光板条及其热沉实验装置简图  
Fig. 2 Thermal model of laser slab side-pumped by diode bar and its heat sink

$$\begin{cases} u(0, y, z, t) = 0; & u(a, y, z, t) = 0 \\ \left. \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; & \left. \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=b} = 0 \\ \left. \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; & \left. \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=c} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

### 3 准连续 LD 侧面抽运激光板条瞬态热效应解析分析

Nd:YVO<sub>4</sub>与 Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体均具有大的受激发射截面,对抽运波长有着高的吸收系数和宽的吸收带,以及高的激光破坏阈值、优异的物理、光学、机械加工等特性,成为目前普遍使用的一类激光晶体。在脉冲抽运阶段,给板条带来了升温,其热传导方程与初始条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_p} \left[ \lambda_x \frac{\partial^2 u_1(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 u_1(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 u_1(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \\ \frac{\beta \eta I_0}{\rho C_p} \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right]^k\right\} \exp(-\beta z) + \sigma \exp(-\beta c) \exp[-\beta(c-z)] & (0 < t < \tau) \\ u_1(x, y, z, t) |_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

在脉冲间隔期间,由于热沉的持续冷却,板条内温度场处于弛豫下降过程,其热传导方程与初始条件为

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial u_{II}(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 u_{II}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 u_{II}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 u_{II}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \\ u_{II}(x, y, z, t) |_{t=\tau} = u_1(x, y, z, \tau) \end{cases} \quad (\tau \leq t \leq T) \quad (11)$$

式中  $\rho, C_p$  分别为激光晶体的密度、比热容,而  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  分别为激光晶体不同方向上的热导率; $\tau$ 为脉冲 LDA 抽运脉宽, $T$ 为脉冲周期。 $u_1(x, y, z, t)$ 与  $u_{II}(x, y, z, t)$ 分别为单脉冲抽运阶段与抽运间隔期间的温度场。

根据侧面抽运板条热模型,结合热传导方程(10)、(11)式,得出板条在单脉冲抽运阶段与抽运间隔期间的温度场的解析表达式为

$$u_1(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{f}{g} [1 - \exp(-gt)] \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{l\pi z}{c} \quad (0 < t < \tau), \quad (12)$$

$$u_{II}(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{f}{g} [\exp(g\tau) - 1] \exp(-gt) \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{l\pi z}{c} \quad (\tau \leq t \leq T). \quad (13)$$

在得出第一个脉冲(单脉冲)在激光板条形成的温度分布后,依据连续性原理,即相邻两个脉冲抽运过程中其温度场具有承接性,可得到重复脉冲在激光板条内形成的温度场表达式为

$$u_s(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{f}{g} \left\{ \left[ \sum_{i=0}^{i-2} \exp[g(iT + \tau)] - \sum_{i=1}^{i-1} \exp(igT) - 1 \right] \exp(-gt) + 1 \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{l\pi z}{c} \\ (iT \leq t \leq iT + \tau \text{ and } i \geq 2), \quad (14)$$

$$u_j(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{f}{g} \left\{ \sum_{i=0}^{i-1} \exp[g(iT + \tau)] - \sum_{i=1}^{i-1} \exp(igT) - 1 \right\} \exp(-gt) \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{l\pi z}{c} \\ [iT + \tau \leq t \leq (i+1)T \text{ and } i \geq 2], \quad (15)$$

式中  $u_s(x, y, z, t)$ 、 $u_j(x, y, z, t)$ 分别为  $i(i \geq 2)$ 个脉冲重复周期后在抽运阶段与抽运间隔期间的温度场, $i$ 为脉冲抽运次数。

在脉冲 LDA 抽运持续一段时间后,板条激光器进入稳定工作状态,板条的温度场也进入其热平衡态,其温度场表达式为

$$u_{IW}(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{f}{g} \left\{ 1 + \frac{\exp[(1+N)gT] - \exp(\tau + Ng) \exp(-gt + gNt)}{\exp(NgT) - \exp[(N+1)gT]} \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{l\pi z}{c} \\ (NT \leq t \leq NT + \tau), \quad (16)$$

$$u_{IIW}(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{f}{g} \left\{ \frac{[\exp(g\tau) - 1] \exp[g(T - t + NT)]}{\exp(gT) - 1} \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{l\pi z}{c} \\ [NT + \tau \leq t \leq (N+1)T], \quad (17)$$

式中  $u_{1W}(x, y, z, t)$ 、 $u_{1W}(x, y, z, t)$  分别为激光板条热平衡态时抽运阶段与抽运间隔期间的温度场,  $N$  为准连续 LDA 抽运次数。(12) ~ (17) 式  $m, n, l$  为正交归一本征函数系确定的正整数,  $f, g$  为待定系数, 可表示为

$$f = \frac{8c\beta^2 \eta I_0}{a\rho C_p} \frac{\sin(n\pi y_2/b) - \sin(n\pi y_1/b)}{n\pi} \frac{1 - \sigma \exp(-2\beta c) + (\sigma - 1) \exp(-\beta c) \cos(l\pi)}{l^2 \pi^2 + c^2 \beta^2} \int_0^a \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2}{\bar{\omega}^2}\right]^k\right\} \sin\frac{m\pi x}{a} dx, \quad (18)$$

$$g = \frac{1}{\rho c} \left[ \lambda_x \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \lambda_y \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \lambda_z \left(\frac{l\pi}{c}\right)^2 \right], \quad (19)$$

#### 4 准连续 LDA 侧面抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 与 Nd : GdVO<sub>4</sub> 板条热效应

Nd : YVO<sub>4</sub> 与 Nd : GdVO<sub>4</sub> 都是各向异性激光晶体, 表 1 列出掺钕离子数分数 1% 的 Nd : YVO<sub>4</sub> 和 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体主要性能参数。

表 1 Nd : YVO<sub>4</sub> 和 Nd : GdVO<sub>4</sub> 主要参数

Table 1 Main parameters of Nd : YVO<sub>4</sub> crystal and Nd : GdVO<sub>4</sub> crystal

Parameters	Nd : YVO <sub>4</sub>	Nd : GdVO <sub>4</sub>
Specific heat / (J · kg <sup>-1</sup> · °C <sup>-1</sup> )	590	520
Density / (kg · m <sup>-3</sup> )	4220	5470
Thermal conductivity / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	//c 5.23 ⊥c 5.10	//c 5.23 ⊥c 11.7
Thermal expansion coefficient / (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	//c 11.37 ⊥c 4.43	//c 7.3 ⊥c 5
Absorption coefficient / cm <sup>-1</sup>	31.4	57

#### 4.1 准连续 LDA 侧面抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 与 Nd : GdVO<sub>4</sub> 板条时变温度场

##### 1) 单脉冲抽运激光板条温度场

LDA 第一个脉冲过后, 会在激光板条内形成瞬态温度场分布。在表 2 中所列脉冲 LDA 抽运参数下, 图 3 给出了 Nd : YVO<sub>4</sub> 和 Nd : GdVO<sub>4</sub> 两种晶体材料抽运面中心 ( $x = a/2, y = b/2, z = 0$ ) 在一个抽运脉冲周期 (0~10 ms) 内的温度场变化情况。

表 2 脉冲 LDA 抽运参数

Table 2 Parameters of LDA pump pulse

Parameters	Value
Power / W	50
Pot radius / μm	400
Frequency / Hz	100
Pulse width / ms	1
Cycle / ms	10
Super-Gauss order / k	2

由图 3 可看出, 在 0~1 ms 抽运过程中, 激光板条的温度从初始温度 20 °C 迅速升高, 对于掺钕离子数分数均为 1% 的 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体和 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体, 由于 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体比 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体有较大的抽运光吸收

系数, 因此 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体内的瞬态最高温升量要大于 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体。又因 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体有着比 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体大的热传导系数, 在 1~10 ms 时段内 Nd : GdVO<sub>4</sub> 晶体降温变化速率要明显快于 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体。图 4 为单脉冲抽运激光板条抽运面的三维瞬态温度场图, 其中 Nd : GdVO<sub>4</sub> 板条抽运面瞬态最高温升为 36.0 °C, Nd : YVO<sub>4</sub> 板条抽运面瞬态最高温升为 31.5 °C。图 5 为激光板条沿着  $z$  向中心线上的温度分布图。由图可以看出, 沿着  $z$  方向 Nd : GdVO<sub>4</sub> 板条内温度下降速度比 Nd : YVO<sub>4</sub> 板条快。

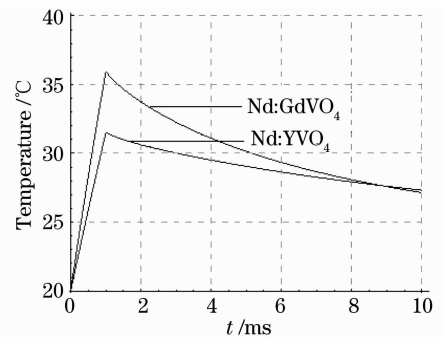


图 3 LDA 一个抽运脉冲周期内激光板条温度场  
Fig. 3 Temperature field of LDA pumped laser pulse in a cycle slab

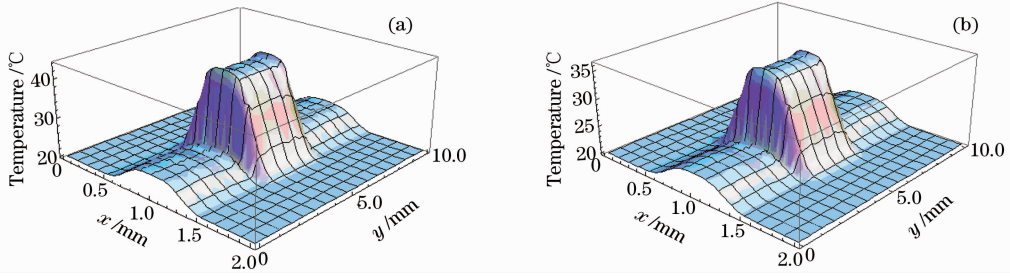


图4 LDA单脉冲抽运(a)Nd:YVO<sub>4</sub>板条和(b)Nd:GdVO<sub>4</sub>板条端面三维瞬态温度分布图

Fig. 4 Three-dimensional temperature field distribution of LDA side-pumped (a) Nd:YVO<sub>4</sub> slab and (b) Nd:GdVO<sub>4</sub> slab

图5为相同频率、不同脉宽的LDA侧面抽运Nd:GdVO<sub>4</sub>板条、Nd:YVO<sub>4</sub>板条时抽运面中心处的温度变化对比图。从图可看出,LDA具有不同脉宽抽运激光板条时引起温升的变化趋势相同,Nd:GdVO<sub>4</sub>的温升略大于Nd:YVO<sub>4</sub>的。抽运脉宽越大,板条的温升越高。

## 2) 重复脉冲抽运激光板条温度场

调节LDA工作电源固定脉冲抽运频率为100 Hz,当脉冲LDA抽运脉宽分别为0.2、0.5、1.0、2.0 ms时,表3列出两种板条在50个重复脉冲抽运过程中的温度最高值与最低值的差异。图6~9给出激光板条抽运面温度随时间变化情况。

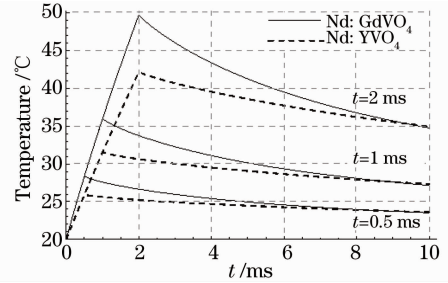


图5 LDA不同脉宽抽运激光板条抽运面中心处的温度变化对比图

Fig. 5 Temperature field distribution of LDA side-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab by different pulse widths

表3 脉冲LDA同频率不同脉宽侧面抽运激光板条热稳态温度值

Table 3 Thermal steady-state temperature in LDA side-pumped laser slab by different pulse widths

Pulse width /ms	Crystal	Maximum value /°C	Minimum value /°C	Difference /°C
0.2	Nd:GdVO <sub>4</sub>	30.2	27.0	3.2
	Nd:YVO <sub>4</sub>	34.8	32.4	2.4
0.5	Nd:GdVO <sub>4</sub>	45.3	37.5	7.8
	Nd:YVO <sub>4</sub>	56.8	51.0	5.8
1.0	Nd:GdVO <sub>4</sub>	70.0	55.3	14.7
	Nd:YVO <sub>4</sub>	93.3	82.3	11
2.0	Nd:GdVO <sub>4</sub>	117.6	91.7	25.9
	Nd:YVO <sub>4</sub>	165.0	145.6	19.4

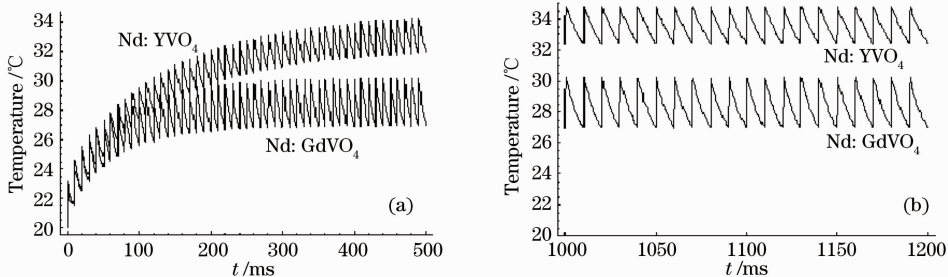


图6  $t=0.2$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms 占空比为1/50两种激光板条抽运面中心处(a)温度随时间变化规律和(b)达到热动态平衡时的温度变化

Fig. 6 (a) Temperature variation with time and (b) temperature changes when it reaches thermal dynamic equilibrium on the center of two laser-slab pumped face by duty cycle of 1/50,  $t=0.2$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms



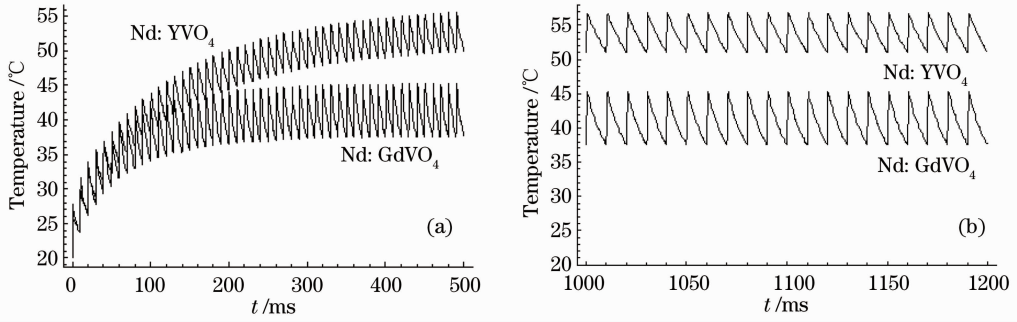


图 7  $t=0.5$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms 占空比为 1/20 两种激光板条抽运面中心处(a)温度随时间变化规律和 (b)达到热动态平衡时的温度变化

Fig. 7 (a) Temperature variation with time and (b) temperature changes when it reaches thermal dynamic equilibrium on the center of two laser-slab pumped face by duty cycle of 1/20,  $t=0.5$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms

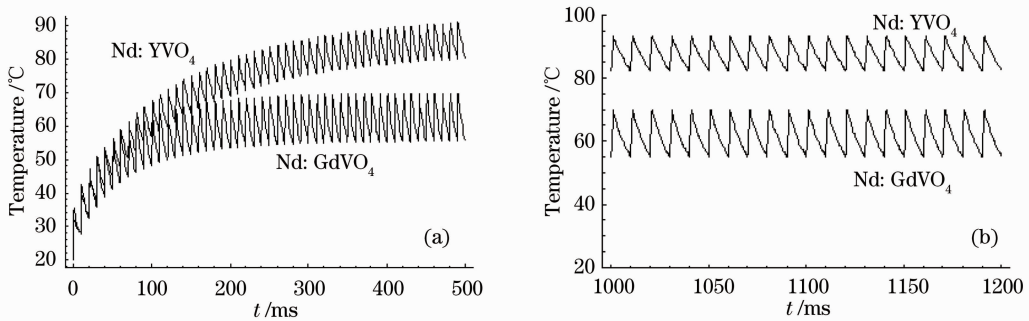


图 8  $t=1$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms 占空比为 1/10 两种激光板条抽运面中心处(a) 温度随时间变化规律和 (b)达到热动态平衡时的温度变化

Fig. 8 (a) Temperature variation with time and (b) temperature changes when it reaches thermal dynamic equilibrium on the center of two laser-slab pumped face by duty cycle of 1/10,  $t=1$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms

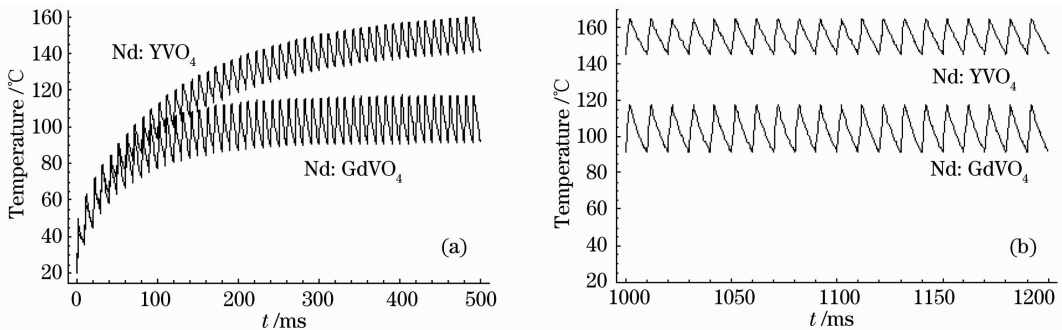


图 9  $t=2$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms 占空比为 1/5 两种激光板条抽运面中心处(a)温度随时间变化规律和 (b)达到热动态平衡时的温度变化

Fig. 9 (a) Temperature variation with time and (b) temperature changes when it reaches thermal dynamic equilibrium on the center of two laser-slab pumped face by duty cycle of 1/5,  $t=2$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms

图 10 为脉冲 LDA 频率固定,不同脉宽抽运时 Nd : YVO<sub>4</sub> 与 Nd : GdVO<sub>4</sub> 两种板条在 500 ms 内的温度变化趋势图。

对比两种板条在 50 个重复脉冲抽运过程中的温度变化,可以看出在相同的频率抽运下,随着抽运次数的增加 Nd : YVO<sub>4</sub> 板条温度上升的趋势逐渐超过 Nd : GdVO<sub>4</sub> 板条,Nd : YVO<sub>4</sub> 板条热稳态温升量比 Nd : GdVO<sub>4</sub> 板条要高;而 Nd : YVO<sub>4</sub> 板条进入热稳态的时间比 Nd : GdVO<sub>4</sub> 板条要稍长些。两种板条在

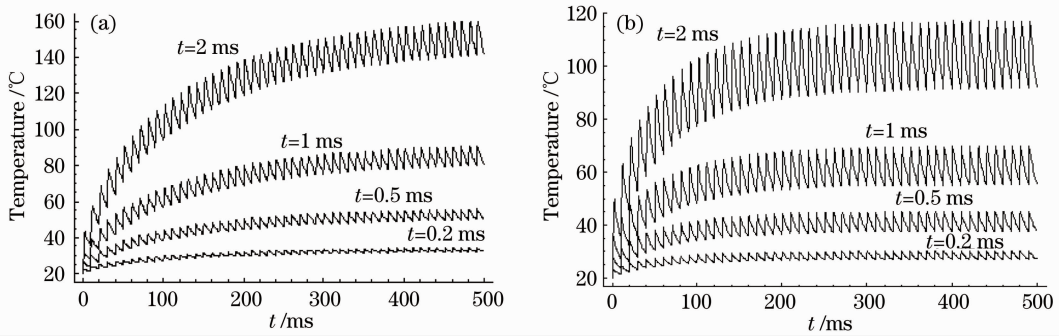


图 10 脉冲 LDA 测面抽运 (a) Nd : YVO<sub>4</sub> 激光板条和 (b) Nd : GdVO<sub>4</sub> 激光板条端面中心处不同脉宽时温度场随时间的变化

Fig. 10 Temperature variation with time on the center of (a) Nd : YVO<sub>4</sub> slab and (b) Nd : GdVO<sub>4</sub> slab pumped-face by different pulse widths

热稳态温升的最高值与最低值的差值都随抽运脉宽增加而增大。

现调节脉冲 LDA 抽运功率为 50 W, 脉宽固定为 1 ms, 调节输出频率分别为 20, 100 和 200 Hz, 对比两种板条在抽运中的温度变化, 如图 11~13 所示。图 11(a) 表示相同占空比下两种激光板条温度变化; (b) 表示两种激光板条热平衡态下温度变化。由图可得, 当 LDA 在脉宽一定时, 抽运频率越低, 两种板条进入热稳态的时间越快, 而 Nd : YVO<sub>4</sub> 较 Nd : GdVO<sub>4</sub> 更快进入热稳态。由表 4 数据分析, 随着 LDA 输出频率的增加, 两种板条的总升温量都会有所增加, Nd : YVO<sub>4</sub> 板条的升温趋势明显高于 Nd : GdVO<sub>4</sub> 板条。在到达热稳态后, 两种板条最高温升与最低温升的差值随着 LDA 脉冲频率的增大有所减小。图 11, 12, 13 中的 (a) 图分别对比了相同脉宽, 输出频率分为 20, 100 和 200 Hz, 占空比分别为 1/50, 1/10 和 1/5 时, 两种激光板条抽运面中心处温度变化情况。而图 11, 12, 13 中的 (b) 图则分别对比了在上述抽运条件下, 两种激光晶体板条抽运面中心在热动态平衡时的温度场变化规律。

表 4 同脉宽时热稳态温度值

Table 4 Steady-state temperature with the same pulse width

Pulse width /ms	Crystal	Maximum value /°C	Minimum value /°C	Difference /°C
20	Nd : GdVO <sub>4</sub>	40.0	24.4	15.6
	Nd : YVO <sub>4</sub>	43.4	30.0	13.4
100	Nd : GdVO <sub>4</sub>	70.0	55.3	14.7
	Nd : YVO <sub>4</sub>	95.4	82.5	12.9
200	Nd : GdVO <sub>4</sub>	111.2	97.0	14.2
	Nd : YVO <sub>4</sub>	160.0	150.0	10.0

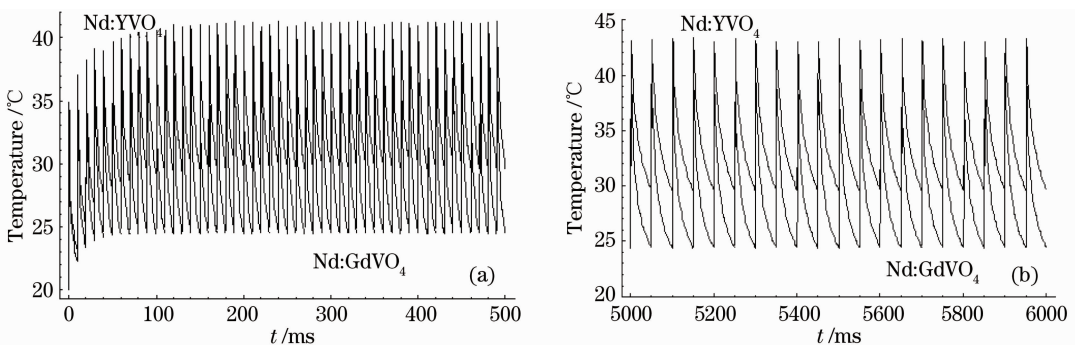


图 11  $t=1$  ms,  $f=20$  Hz,  $T=50$  ms 占空比为 1/50 两种激光板条抽运面中心处 (a) 温度变化和 (b) 达到热动态平衡时的温度变化

Fig. 11 (a) Temperature variation and (b) temperature changes when it reaches thermal dynamic equilibrium on the center of two laser-slab pumped face by duty cycle of 1/50,  $t=1$  ms,  $f=20$  Hz,  $T=50$  ms



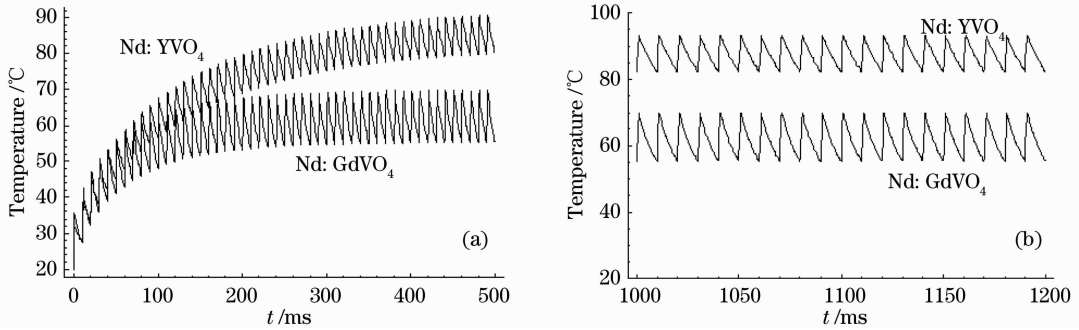


图 12  $t=1$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms 占空比为 1/10 两种激光板条抽运面中心处(a)温度变化和 (b)达到热动态平衡时温度变化

Fig. 12 (a) Temperature variation and (b) temperature changes when it reaches thermal dynamic equilibrium on the center of two laser-slab pumped face by duty cycle of 1/10,  $t=1$  ms,  $f=100$  Hz,  $T=10$  ms

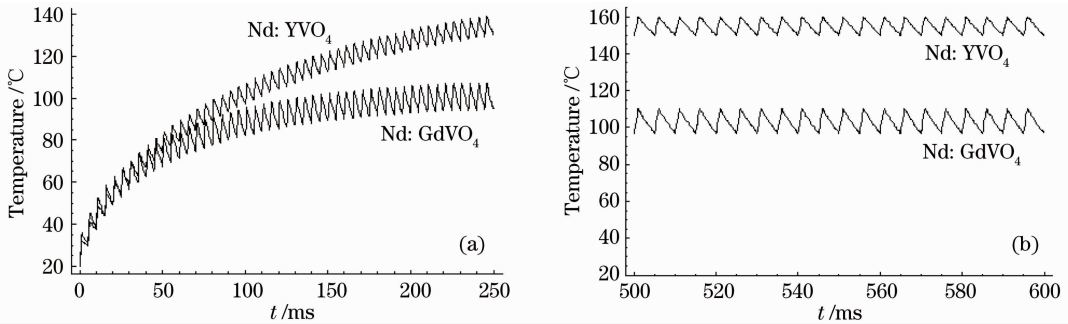


图 13  $t=1$  ms,  $f=200$  Hz,  $T=5$  ms 占空比为 1/5 两种激光板条抽运面中心处(a)温度变化和 (b)达到热动态平衡时温度变化

Fig. 13 (a) Temperature variation and (b) temperature changes when it reaches thermal dynamic equilibrium on the center of two laser-slab pumped face by duty cycle of 1/5,  $t=1$  ms,  $f=200$  Hz,  $T=5$  ms

#### 4.2 准连续 LDA 侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条热形变分析

在表 2 所列 LDA 抽运参数下,图 14 给出了侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条抽运中心的热形变量。由图可知,板条抽运中心处的热形变随其温度的变化呈现出周期性的变化。其中 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条的最大热形变量为  $0.98 \mu\text{m}$ ,最小热形变量为  $0.89 \mu\text{m}$ 。而 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条的最大热形变量为  $0.29 \mu\text{m}$ ,最小热形变量为  $0.24 \mu\text{m}$ 。Nd:YVO<sub>4</sub> 板条的热形变量远远大于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条,约为 Nd:GdVO<sub>4</sub> 形变量的 3 倍。

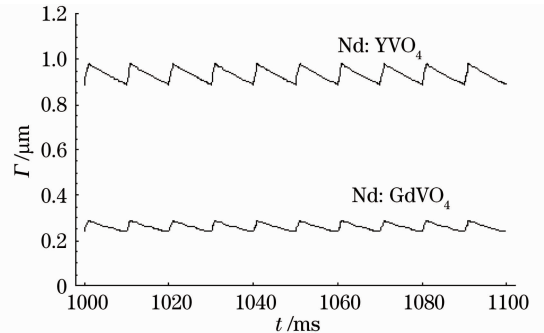


图 14 准连续 LDA 侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条热动态平衡时的热形变

Fig. 14 Thermal distortion when it reaches thermal dynamic equilibrium of LDA side-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab and Nd:GdVO<sub>4</sub> slab

## 5 结 论

利用热传导理论,通过对准连续 LD 侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条的实际工作特点进行分析,得到了准连续 LD 侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条的瞬态温度场的一般解析表达式。比较分析了不同脉宽、不同占空比的单脉冲与重复脉冲侧面抽运过程中 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条温度场的分布情况。同时定量计算了热平衡时 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条抽运面中心的热形变量。Nd:YVO<sub>4</sub> 板条的最大热形变量为  $0.98 \mu\text{m}$ ,最小热形变量为  $0.89 \mu\text{m}$ 。而 Nd:GdVO<sub>4</sub> 板条的最大热形变量为  $0.29 \mu\text{m}$ ,最小热形变量为  $0.24 \mu\text{m}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Li Long, Nie Jianping Feng Xiaojuan *et al.*. Thermal effect of quadrate laser crystal with diode laser end-pumped[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 091404  
李 隆, 聂建平, 冯小娟 等. 准连续激光二极管端面泵浦 Nd : YAG 棒的瞬态温度分布[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(9): 091404
- 2 Xu Degang, Yao Jianquan, Wang Yuye *et al.*. The QCW-LD side-pumped Nd : YAG double mode pulse laser[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(10): 1297~1300  
徐德刚, 姚建铨, 王与焯 等. 准连续 LD 侧面抽运的 Nd : YAG 双制式脉冲激光器[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(10): 1297~1300
- 3 Li Jian, Sun Yao, Li Xiaomin *et al.*. Comparison and research of Nd : GdVO<sub>4</sub> and Nd : YVO<sub>4</sub> laser's characteristics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(2): 44~47  
李 健, 孙 尧, 李晓敏 等. Nd : GdVO<sub>4</sub> 与 Nd : YVO<sub>4</sub> 的激光特性比较[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(2): 44~47
- 4 Zhang Shenjin, Ou Qunfei, Feng Guoying *et al.*. Analysis of transient temperature distribution in laser rod-pumped by repetitively pulsed high-power ring-LDA[J]. *High Power Laser and Particl Beams*, 2004, **16**(2): 145~148  
张申金, 欧群飞, 冯国英 等. 高功率环形激光二极管阵列重复脉冲抽运激光器中棒的瞬态温度分布[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(2): 145~148
- 5 Li Long, Dong Wuwei, Shi Peng *et al.*. Thermal effect of diode bar side-pumped Nd : YAG slab[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2120~2126  
李 隆, 董武威, 史 彭 等. 激光二极管阵列侧泵浦 Nd : YAG 板条的热效应[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(11): 2120~2126
- 6 M. Sovizi, R. Massudi. Thermal distribution calculation in diode pumped Nd : YAG laser rod by boundary element method [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(1): 46~52
- 7 Michelle S. Roth, Eduard W. Wyss, Thomas Graf *et al.*. End-pumped Nd : YAG laser with self-adaptive compensation of the thermal lens[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(12): 1700~1703
- 8 Li Jian, He Jingliang, Hou Wei *et al.*. Influence of the Nd<sup>3+</sup>-doped concent ration on the output performance of a high-power all-solid-state Nd : YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(4): 298~302  
李 健, 何京良, 侯 玮 等. Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对大功率全固态 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器输出特性影响的研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(4): 298~302
- 9 Shi Peng, Li Long, Gan Aasheng *et al.*. Thermal analysis of rectangular Nd : YVO<sub>4</sub> crystal by laser diode side-pumped[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 176~180  
史 彭, 李 隆, 甘安生 等. 激光二极管侧抽运长方形 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光晶体热分析[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 176~180
- 10 Chen Xinyu, Jin Guangyong, Wang Chao *et al.*. Pumping light distribution of laser diode arched side-pumped YAG laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 091401  
陈薪羽, 金光勇, 王 超 等. 激光二极管环形侧面抽运 YAG 激光器抽运光场分布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(9): 091401
- 11 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