

# 准连续激光二极管端面抽运 Nd:YAG 棒的瞬态温度分布

李 隆<sup>1,2</sup> 聂建萍<sup>1\*</sup> 冯小娟<sup>1</sup> 董武威<sup>1</sup> 许启明<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055; <sup>2</sup> 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要** 在准连续激光二极管(LD)抽运的激光晶体中存在升降温的瞬态过程。为解决准连续 LD 端面抽运激光晶体产生的热效应问题,基于热传导方程,采用特征函数法和常数变易法得到了准连续超高斯光束端面抽运 Nd:YAG 棒的瞬态温度场的一般解析表达式。同时定量分析了准连续抽运光束腰半径、脉宽以及频率对 Nd:YAG 棒瞬态温度场的影响。研究表明,准连续 LD 端面抽运 Nd:YAG 棒时,棒内温度随时间呈锯齿状变化,经过一段时间后最终呈稳定周期性分布,而且棒内温度也随脉宽和频率的增大而增大。研究方法和所得结果还可以应用到激光系统的其他瞬态热问题研究中。

**关键词** 激光技术;瞬态温度分布;解析分析;准连续抽运;Nd:YAG 棒

中图分类号 TN248.1

OCIS 140.3580 140.6810

文献标识码 A

## Transient Temperature Distribution of Nd:YAG Rod End-Pumped by Quasi-Continuous-Wave Laser Diode

Li Long<sup>1,2</sup> Nie Jianping<sup>1\*</sup> Feng Xiaojuan<sup>1</sup> Dong Wuwei<sup>1</sup> Xu Qiming<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China  
<sup>2</sup> School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, shaanxi 710055, China

**Abstract** The transient processes of temperature rise and fall exist in laser crystal pumped by quasi-continuous-wave (CW) laser diode (LD). In order to solve thermal effect of laser crystal end-pumped by quasi-CW LD, a general analytical transient temperature field expression of Nd:YAG rod end-pumped by the quasi-CW super-Gaussian beam is obtained by the methods of eigen-function and constant variation, based on the heat conduct equation. Meanwhile, the influence of the quasi-CW pump beam with different waist radii, pulse widths and frequencies on the transient temperature field of Nd:YAG rod, are quantitatively analyzed. The results show that for quasi-CW LD end-pumped Nd:YAG rod, the temperature of the rod has sawtooth distribution with time, which shows periodically stable distribution after some time, and it increases with the increase of the pump width or pump frequency. The research methods and results can also be used to analyze other transient thermal problems in laser systems.

**Key words** laser technique; transient temperature distribution; analytical analysis; quasi-continuous-wave pumping; Nd:YAG rod

## 1 引言

姚建铨<sup>[1]</sup>根据倍频理论提出了准连续抽运可以提高倍频效率的观点,并在理论和实验方面进行了研究和验证。准连续激光二极管(LD)抽运的调 Q 激光器可以产生高光束质量、高能量的脉冲激光输出<sup>[2,3]</sup>。但是激光器抽运光能量只有部分转化为激光输出,其余大部分则以“废热”形式沉积在激光晶体中,随着抽运光

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-05-07

基金项目: 陕西省工业攻关资助项目(2008K05-15)及博士后流动站资助项目。

作者简介: 李 隆(1972—),男,博士,副教授,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

\* 通信联系人。E-mail: njp803066@126.com

功率的增加,激光器的热效应更加明显,这对于激光器谐振腔的稳定性、输出激光功率、输出光束质量等都有着直接的影响。特别是对于高功率端面抽运的激光系统,抽运光被聚集在激光晶体很小的区域内,其腰斑半径通常只有几百微米,因而在激光晶体产生的热效应更加严重。

有关连续抽运的固体激光器的热效应研究已经有很多<sup>[4,5]</sup>,但是自由运转的准连续激光器与连续(CW)激光器的热积累效果不同。在准连续 LD 端面抽运 Yb:YAG 激光器中,由于准连续抽运源和冷却系统的共同作用,晶体中存在升降温的瞬态过程。从目前的报道来看,涉及准连续抽运的热效应瞬态过程的研究较少,而且大多采用有限元方法对晶体内的瞬态温度分布及其影响因素进行数值计算<sup>[6,7]</sup>。本文对准连续 LD 端面抽运的 Nd:YAG 棒的实际工作特点进行了分析,建立了符合实际的热分析模型,并使用特征函数法、常数变易法等解析方法求解定界条件下的热传导方程,得到了准连续超高斯光束端面抽运 Nd:YAG 棒的瞬态温度场的一般解析表达式,并比较分析了准连续抽运光束腰半径、脉宽以及频率对 Nd:YAG 棒瞬态温度规律的影响。

## 2 准连续 LD 端面抽运 Nd:YAG 棒的瞬态温度场解析计算

### 2.1 激光棒结构模型及其棒内热源分布状态

激光器采用端面抽运方式时,抽运光在入射方向的穿透深度很大,增益介质对抽运光吸收充分,所以抽运阈值功率低,斜率效率高<sup>[8]</sup>。图 1 为高功率准连续激光二极管端面抽运的声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 激光器的实验装置图<sup>[3]</sup>。

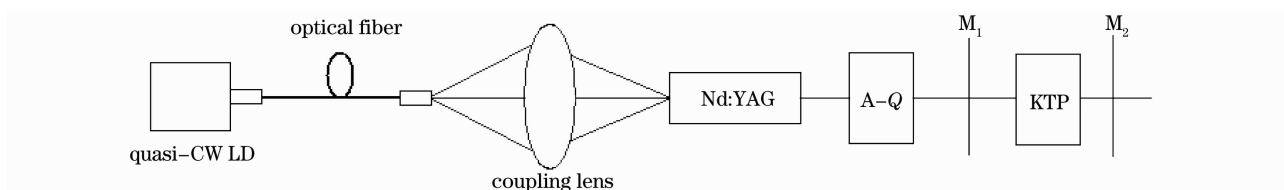


图 1 准连续激光二极管端面抽运的声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 激光器实验简图

Fig. 1 Experimental setup for the quasi-CW end-pumped Q-switched intracavity-frequency-doubled Nd:YAG laser

抽运激光从 LD 经光纤输出,其光强分布用超高斯函数来近似描述。基模高斯抽运光填充因子小,提取效率不高,而超高斯抽运光兼顾光束质量和提取效率<sup>[9]</sup>。耦合器由两个平凸透镜组合而成,不改变光束能量的分布状态。考虑到激光晶体对抽运光功率密度的充分利用,以及抽运光与激光的模式匹配,抽运光光腰一般在激光晶体表面内侧,此时端面处抽运光半径与光腰半径差别很小,可以认为与光腰半径相等<sup>[10]</sup>。端面抽运 Nd:YAG 棒结构与抽运光光强分布如图 2 所示,其中  $r$  和  $z$  分别为 Nd:YAG 棒的径向和轴向坐标, $R$  为棒端面的半径, $L$  为棒长。抽运光沿  $z$  轴入射到 Nd:YAG 棒端面 ( $z=0$  面)。

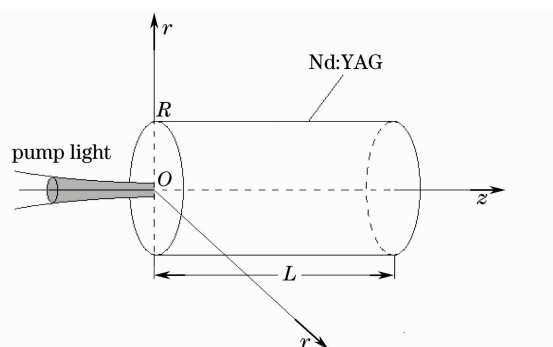


图 2 准连续 LD 端面抽运 Nd:YAG 棒的模型简图

Fig. 2 Schematic model diagram of Nd:YAG rod end-pumped by quasi-CW LD

设 Nd:YAG 晶体对抽运光的吸收系数为  $\beta$ 。准连续超高斯抽运光在 Nd:YAG 棒内因吸收而减弱,传播至棒内任意位置处的光强为

$$I(t, r, z) = \frac{P}{2\pi \int_0^{\infty} \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{\omega^{2k}}\right) r dr} G(t) \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{\omega^{2k}}\right) \exp(-\beta z), \quad (1)$$

式中  $P$  为入射到激光棒端面的光功率, $\omega$  为超高斯抽运光的束腰半径, $G(t)$  为描述准连续抽运光的时间包络, $k$  为超高斯抽运光的阶次。当阶次  $k$  为 1 时,超高斯抽运光的光强分布便为理想的高斯分布;当阶次  $k$  为 4, 5, 6 时,其光强分布呈“Top-hat”形状;而当阶次  $k$  趋于  $\infty$  时,其光强分布在腰斑半径范围内可视为均匀分布。

准连续超高斯抽运光在 Nd:YAG 棒内产生的热源分布为

$$q_v(t, r, z) = \beta\eta I(t, r, z) = \frac{\beta\eta P}{2\pi \int_0^{\infty} \exp\left(-2\frac{r^{2k}}{\omega^{2k}}\right) r dr} G(t) \exp\left(-2\frac{r^{2k}}{\omega^{2k}}\right) \exp(-\beta z), \quad (2)$$

式中  $\eta$  为热转换系数。

## 2.2 激光棒内瞬态温度解析计算

Nd:YAG 棒结构、内部热源分布以及外部条件都具有轴对称性,则温度分布与角度无关。设 Nd:YAG 棒升温阶段的瞬态温度为  $u_{\perp}(t, r, z)$ , 降温阶段的瞬态温度为  $u_{\parallel}(t, r, z)$ , 它们遵守的瞬态热传导方程分别为

$$\rho c \frac{\partial u_{\perp}}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 u_{\perp}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{\perp}}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_{\perp}}{\partial z^2} \right) + q_v(t, r, z), \quad (3)$$

$$\rho c \frac{\partial u_{\parallel}}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 u_{\parallel}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{\parallel}}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_{\parallel}}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

式中  $\rho, c, \lambda$  分别为 Nd:YAG 晶体的密度、比热容和热导率。忽略温度对晶体物理特性的影响, Nd:YAG 晶体的热导率为  $13 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ , 密度为  $4560 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 比热容为  $590 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

由于激光棒的两个通光端面与空气之间的换热系数极小,因此假设二者之间是绝热的。Nd:YAG 棒采用循环水冷进行冷却,其侧面温度保持相对恒定,在热模型的数学处理中将其设为零(相对),待得出温度场后,再叠加冷却环境温度  $u_0$ (这里设环境温度为  $20^{\circ}\text{C}$ )。设抽运光是脉宽为  $\tau$ , 周期为  $T$  的矩形准连续波,如图 3 所示。

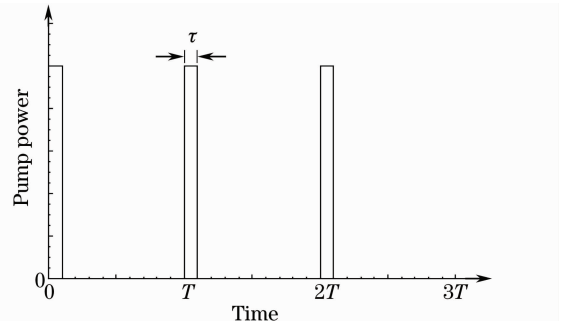


图 3 准连续抽运脉冲示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the quasi-CW pump pulse

通过求解定界条件下的热传导方程,得到准连续抽运光第  $i$  个脉冲端面抽运到 Nd:YAG 棒时,棒内升温阶段的瞬态温度解析解为

$$u_{\perp}^i(t, r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{M_{m0}}{2} \left\{ \left\{ \sum_{h=0}^{i-1} \left\{ \exp[F_{m0}(hT + \tau)] - \exp(hF_{m0}T) \right\} - \exp\{F_{m0}[(i-1)T + \tau]\} \right\} \times \right. \\ \left. \exp(-F_{m0}t) + 1 \right\} + J_0\left(\frac{\alpha_m r}{R}\right) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} M_{mn} \left\{ \left\{ \sum_{h=0}^{i-1} \left\{ \exp[F_{mn}(hT + \tau)] - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \exp(hF_{mn}T) \right\} - \exp\{F_{mn}[(i-1)T + \tau]\} \right\} \exp(-F_{mn}t) + 1 \right\} \cos\frac{n\pi z}{L} J_0\left(\frac{\alpha_m r}{R}\right), \quad (5)$$

第  $i$  个脉冲过后棒内降温阶段的瞬态温度解析解为

$$u_{\parallel}^i(t, r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{M_{m0}}{2} \sum_{h=0}^{i-1} \left\{ \exp[F_{m0}(hT + \tau)] - \exp(hF_{m0}T) \right\} \exp(-F_{m0}t) J_0\left(\frac{\alpha_m r}{R}\right) + \\ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} M_{mn} \sum_{h=0}^{i-1} \left\{ \exp[F_{mn}(hT + \tau)] - \exp(hF_{mn}T) \right\} \exp(-F_{mn}t) \cos\frac{n\pi z}{L} J_0\left(\frac{\alpha_m r}{R}\right). \quad (6)$$

(5),(6)式中  $J_0$  为零阶第一类贝塞尔函数,  $\alpha_m$  为  $J_0$  的第  $m$  个零点,而

$$\begin{cases} F_{m0} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\alpha_m}{R}\right)^2, & F_{mn} = \frac{\lambda}{\rho c} \left[ \left(\frac{\alpha_m}{R}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \right] \\ M_{m0} = \frac{2}{F_{m0} \rho c L} \int_0^L f_m(t, z) dz, & M_{mn} = \frac{2}{F_{mn} \rho c L} \int_0^L f_m(t, z) \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right) dz. \\ f_m(t, z) = \frac{2}{R^2 [J_0'(\alpha_m)]^2} \int_0^R r \frac{q_v}{\lambda} J_0\left(\frac{\alpha_m r}{R}\right) dr \end{cases} \quad (7)$$

### 3 准连续 LD 端面抽运 Nd:YAG 棒的瞬态温度分布规律

#### 3.1 Nd:YAG 棒内瞬态温度分布规律

掺  $\text{Nd}^{3+}$  质量分数为 1.0% 的 Nd:YAG 棒对 808 nm 抽运光的吸收系数  $\beta$  为  $9.1 \text{ cm}^{-1}$ , 热转换系数  $\eta$  取 40%<sup>[6]</sup>。若光聚焦耦合器传输效率为 85%, 图 4 给出了抽运频率为 200 Hz, 脉宽为 0.5 ms<sup>[11]</sup> (占空比为 10%), 峰值功率为 100 W, 束腰半径为 300  $\mu\text{m}$  的准连续四阶超高斯光束端面抽运到  $\Phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}^2$  Nd:YAG 棒时, 棒中心轴上不同位置处的瞬态温度分布。从图 4(a) 中可以看出, 尽管准连续抽运脉冲的占空比较小, 但它引起的热效应仍然很严重; 在抽运过程中, 由于晶体散热不充分, 下一个脉冲来临之前, 前一个脉冲产生的温度仍有存留, 随着抽运光的不断注入, 热能逐渐积累, 棒内温度随时间呈锯齿状逐渐升高; 由于端面抽运光的作用, 棒端面中心点处温度升高较快, 棒其他位置温度升高较慢; 抽运开始时, 棒内温度上升较快, 但随着时间的推移, 棒内温升逐渐变慢, 最后趋于稳定的周期性分布。晶体内稳定的周期性温度分布如图 4(b) 所示。

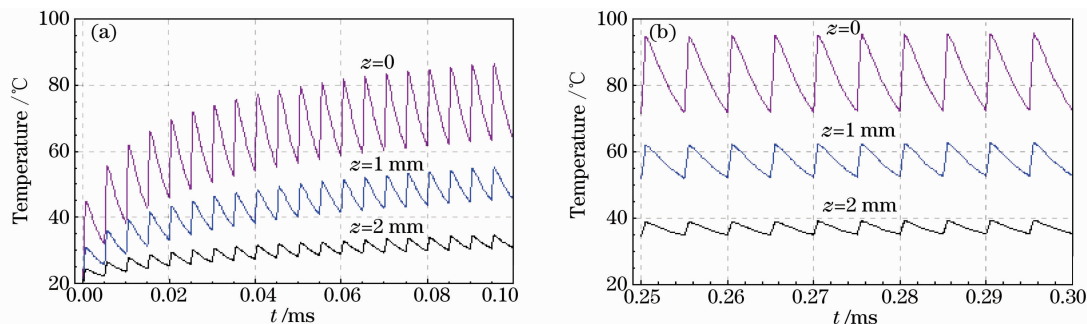


图 4 Nd:YAG 棒中心轴上不同位置处的瞬态温度变化规律。(a) 初始阶段, (b) 稳定阶段

Fig. 4 Transient temperature variation on Nd:YAG rod central axis with different positions. (a) initial stage, (b) stable stage

准连续抽运源以一定的占空比工作, 那么在每个脉冲周期中, 晶体温度升高到一定值时便进入无抽运源的散热阶段。图 4 中的准连续抽运光的平均功率为  $100 \text{ W} \times 10\% = 10 \text{ W}$ , 假设抽运光空间分布和散热条件均相同, 图 5 给出了 Nd:YAG 棒在准连续抽运工作状态和连续抽运工作状态时, 抽运端面中心点处的瞬态温度分布规律, 其中连续抽运光功率与准连续抽运光的平均功率相等 (即为 10 W)。可以看出, 在准连续工作状态下, 晶体温度随连续抽运工作状态时的瞬态温度曲线成锯齿状波动。

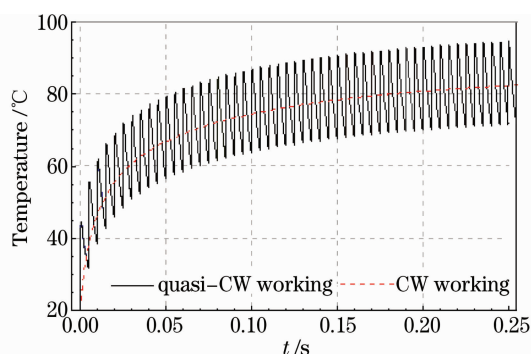


图 5 连续和准连续 LD 端面抽运 Nd:YAG 棒瞬态温度对比图

Fig. 5 Comparison of transient temperature on Nd:YAG rod end-pumped by CW and quasi-CW LD

#### 3.2 与 Nd:YAG 棒内瞬态温度分布有关的因素

##### 3.2.1 光斑半径对晶体内部瞬态温度的影响

要使 LD 抽运的全固态激光器有较高的光-光转换效率和良好的输出光束质量, 抽运光束与激光介质内基模之间的模式匹配至关重要<sup>[12]</sup>。而且抽运光斑的平均尺寸也与固体激光器的阈值抽运功率、斜率效率等有着直接关系<sup>[13]</sup>。图 6 给出了不同束腰半径的准连续抽运光端面抽运到 Nd:YAG 棒时, 棒抽运端面中心处温度达到稳定性周期分布时的对比图。可以看出, 抽运光的束腰半径越小, 晶体内部的局部温升越高, 温度波动幅度也越大。

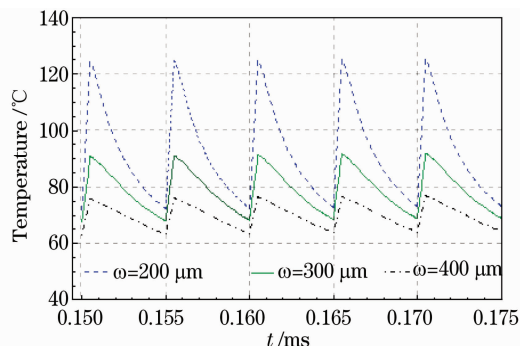


图 6 不同束腰半径下 Nd:YAG 棒端面中心的瞬态温度变化规律

Fig. 6 Transient temperature variation at the end-face center of Nd:YAG rod under different beam waist radii

### 3.2.2 频率对晶体内瞬态温度的影响

在脉冲抽运光峰值功率为 100 W,脉宽固定为 0.5 ms,抽运频率分别为 100,200 和 400 Hz,即占空比分别为 5%,10%,20%时,Nd:YAG 棒抽运端面中心点处的瞬态温度分布如图7所示。可以看出当抽运光脉宽一定时,抽运频率越高,由于此时散热时间变短,前一个脉冲抽运留下的余温就越高,导致棒内温升也越高,棒内温度达到稳定的周期性分布所需的时间也越长。

### 3.2.3 脉宽对晶体内瞬态温度的影响

在脉冲抽运光峰值功率为 100 W,抽运频率固定为 200 Hz,脉宽分别为 0.25,0.5 和 1 ms,即占空比分别为 5%,10%,20%时,Nd:YAG 棒抽运端面中心点处的瞬态温度分布如图8所示。可以看出,晶体内部温度的波动幅度主要由脉宽决定,脉宽越宽时由于热注入越大,温度波动的幅度也越大;当抽运光频率一定时,脉宽越宽,抽运空闲时的散热时间就越短,达到稳定的周期性分布所需的时间越长,最终温度也升得越高。

综合图 7 和图 8,可以看出,当抽运功率一定时,晶体内部的最终温升主要由占空比决定,占空比越大时,晶体内部温度升得就越高。

## 4 结 论

通过对准连续 LD 端面抽运 Nd:YAG 棒的实际工作特点进行分析,基于热传导方程,利用特征函数法和常数变异法得到了准连续超高斯光束端面抽运 Nd:YAG 棒的瞬态温度场的一般解析表达式。比较分析了不同束腰半径、不同脉宽、不同占空比的准连续抽运光抽运时,晶体棒内瞬态温度分布。计算结果表明,准连续 LD 抽运时,棒内各点的温度随时间呈锯齿状升高,经过一段时间后最终随时间呈稳定的周期性分布;棒内温度也随抽运光束腰半径的减小、脉宽的增大以及频率的增大而增大;棒内的温升主要由占空比决定,占空比越大时,棒内温度升得越高;温度的波动幅度主要由脉宽决定,脉宽越宽时,波动的幅度越大。本文所得结果同样适用于其他准连续 LD 抽运的激光晶体。

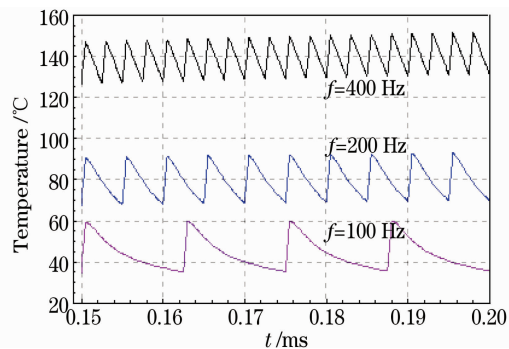


图 7 不同抽运频率下 Nd:YAG 棒端面中心的瞬态温度变化规律

Fig. 7 Transient temperature variation at the end-face center of Nd:YAG rod under different pump frequencies

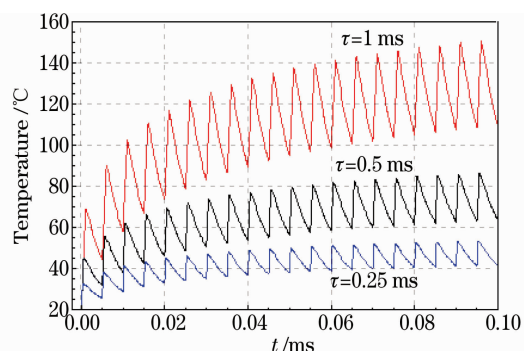


图 8 不同抽运脉宽下 Nd:YAG 棒端面中心的瞬态温度变化规律

Fig. 8 Transient temperature variation at the end-face center of Nd:YAG rod under different pump pulse widths

## 参 考 文 献

- 1 Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology[M]. Beijing: Science Press, 1995. 130~135  
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 130~135
- 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 侧面泵浦的 Nd:YAG 双制式脉冲激光器[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(10): 1297~1300
- 3 Ning Jiping, Zhan Yangqin, Lu Xiaochun, *et al.*. High-power diode-pumped Q-switched intracavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1516~1518  
宁继平, 詹仰钦, 鲁笑春 等. 高功率准连续激光二极管抽运的 Q 开关内腔倍频固体激光器的研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(12): 1516~1518
- 4 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*, **40**(12): 1700~1703
- 5 M. Sovizi, R. Massudi. Thermal distribution calculation in diode pumped Nd:YAG laser rod by boundary element method [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, **39**(1): 46~52
- 6 Song Xiaolu, Li Bingbin, Wang Shiyu *et al.*. Transient thermal effect in pulsed laser diode end-pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1476~1482  
宋小鹿, 李兵斌, 王石语 等. 脉冲激光二极管端面抽运全固态激光器热效应瞬态过程[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1476~1482
- 7 Liang Feng, Feng Guoying, Ou Qunfei *et al.*. Transient temperature rise in a repeat pulse pumped solid-state laser tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5): 685~688  
梁峰, 冯国英, 欧群飞 等. 重复脉冲泵浦管状固体激光器的介质温升[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(5): 685~688
- 8 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007. 144~150  
姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 144~150
- 9 Wang Ning, Lu Yutian, Kong Yong. 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. 用快速傅里叶变换法分析超高斯反射镜腔的光场分布[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1317~1322
- 10 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
- 11 Wang Yuye, Xu Degang, Wang Peng *et al.*. Single-mole quasi-CW passively Q-switched Nd:YAG laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(2): 143~147  
王与焯, 徐德刚, 王鹏 等. 准连续 TEM<sub>00</sub> 模被动调 Q Nd:YAG 激光器的研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(2): 143~147
- 12 Liu Junhai, Lü Junhua, Lu Jianren *et al.*. Mode matching in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 186~189  
刘均海, 吕军华, 卢建仁 等. 高功率端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器模匹配的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 186~189
- 13 Chen Haowei, Xie Huiming, Jia Sen *et al.*. High efficient all-solid-state Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO green laser with self-focus lens [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2007, **37**(4): 534~538  
陈浩伟, 解慧明, 贾森 等. 自聚焦透镜耦合 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 全固态绿光激光器[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2007, **37**(4): 534~538