

脉冲激光二极管双端抽运 Tm:YAG 棒瞬态热效应分析

金光勇 吴婧 吴春婷 范二赫 王超 陈薪羽 于永吉 谭雪春

(长春理工大学理学院固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 基于瞬态热传导方程,通过积分变换方法求解得到脉冲高斯光束双端抽运 Tm:YAG 棒的时变温度场解析表达式,进而求得时变热焦距。同时定量模拟,分析了不同抽运功率、重复频率与占空比对脉冲激光二极管双端抽运 Tm:YAG 棒轴向瞬态温度分布和时变热焦距的影响。模拟结果表明:随着脉冲抽运个数的增加,Tm:YAG 晶体棒内温度和热焦距整体均呈锯齿状分布,并最终趋于稳定的周期性分布;随着抽运功率、重复频率与占空比的增加,Tm:YAG 晶体棒整体温度升高,且棒两端面中心点与棒轴向中心点温差增大,而时变热焦距整体逐渐变短且波动范围变小。研究成果为进一步研究热效应补偿和谐振腔设计提供了理论依据。

关键词 激光器;脉冲单掺铥固体激光器;解析分析;瞬态热效应;双端抽运

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002002

Pulsed Laser Diode Dual-End Pumped Tm:YAG Rod Transient Thermal Effect Analysis

Jin Guangyong Wu Jing Wu Chunting Fan Erhe Wang Chao Chen Xinyu
Yu Yongji Tan Xuechun

(Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Based on transient heat conduction equation, pulse Gaussian beam dual-end pumped Tm:YAG rod time-varying temperature field analytical expression and the time-varying thermal focal length are obtained by the integral transform method. The effects of pumping power, repetition frequency and duty ratio on pulse laser diode dual-end pumped Tm:YAG rod axial transient temperature distribution and the time-varying thermal focal length are quantitatively analysed. Simulation results show that with the increase of pulse number, the temperature distribution and the thermal focal length of Tm:YAG crystal rod appear jagged and eventually get to the periodic distributions. As the increase of pumping power, repetition rate and duty ratio, the whole temperature of Tm:YAG crystal rod increases and the temperature difference between the Tm:YAG rod on both ends of the center and the axis center of rod becomes larger, while the time-varying thermal focal length gradually becomes shorter and the fluctuation range is smaller. The results provide theoretical basis for the further study of heating compensation and cavity design.

Key words lasers; pulsed thulium doped solid lasers; analytical analysis; transient thermal effect; dual-end pumped

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3580

1 引言

脉冲激光二极管(LD)双端抽运的单掺铥激光器输出波长在 $2\ \mu\text{m}$ 附近,处于人眼安全波段,并且大气传输透过性好,可作为激光成像雷达、多普勒相

干测风雷达和测量地球大气浓度和温度变化的差分吸收雷达的激光光源^[1-5]。但由于单掺铥晶体的增益截面较小,上能级寿命较长,且 $2\ \mu\text{m}$ 波段覆盖了水分子和 CO_2 的吸收峰,导致激光器产生的热效应

收稿日期: 2013-04-10; **收到修改稿日期**: 2013-05-08

基金项目: 吉林省科学技术厅基金(201201113)

作者简介: 金光勇(1971—),男,博士,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: jgycom@163.com(中国光学学会会员号: s0420110543)

严重,使得单掺钇激光器输出的光束质量差、功率低、稳定性较差,制约了激光器的发展,因此针对其热效应的分析是非常必要的^[6-7]。

对于脉冲 LD 双端面抽运单掺钇激光器,激光晶体内存在升、降温的时变过程,且抽运光空间分布及晶体对抽运光的吸收使得晶体热分布呈现空间复杂性。目前针对脉冲 LD 双端抽运单掺钇激光器瞬态热效应研究较少,尤其是二维瞬态温度分布和时变热焦距。结合脉冲 LD 双端抽运 Tm:YAG 晶体实际工作情况,利用积分变换法求解瞬态热传导方程,得到脉冲高斯光束双端抽运 Tm:YAG 棒的瞬态温度场解析式,进而求得时变热焦距。模拟讨论了两脉冲 LD 输出参数相同情况下,抽运光斑为 400 μm,重复频率为 70~100 Hz,抽运功率为 15~30 W 时,脉冲 LD 双端抽运 Tm:YAG 晶体轴向瞬态温度分布和时变热焦距变化情况。研究表明:随着抽运脉冲的持续抽运,Tm:YAG 棒内温度和热焦距均在一定范围内存在波动,并最终趋于稳定的周期性分布;随着两脉冲 LD 抽运功率、重复频率与占空比的增加,Tm:YAG 棒整体温度升高,且棒两端面中心点与棒轴向中心点温差增大,时变热焦距整体变短且波动范围变小。研究结果为热效应补偿和腔型设计提供了依据^[8]。

2 脉冲 LD 双端抽运 Tm:YAG 棒瞬态热效应理论分析

2.1 脉冲 LD 双端抽运 Tm:YAG 棒热模型

LD 经光纤输出的抽运光光强分布可以用高斯函数来近似^[9]。在柱坐标系下,建立脉冲 LD 双端抽运 Tm:YAG 棒模型。

设 Tm:YAG 晶体对 785 nm 抽运光的吸收系数为 β,晶体棒长为 L,半径为 b,抽运脉冲为矩形脉冲,脉宽为 τ、周期为 T',抽运光传播至棒内任意位置的光强为

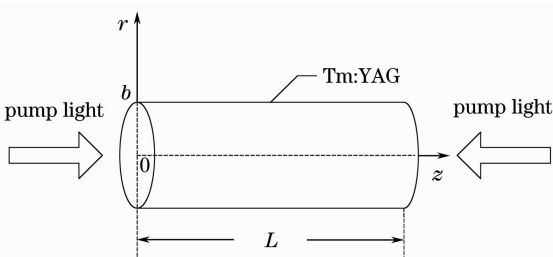


图 1 脉冲 LD 双端抽运 Tm:YAG 棒模型

Fig. 1 Pulse LD dual-end pumped Tm:YAG rod model

$$I(r, z, t) = \frac{2P}{\pi\omega^2} \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega^2}\right) G(t) \times \{\exp(-\beta z) + \exp[-\beta(L-z)]\}, \quad (1)$$

式中 P 为入射到棒端面的光功率,ω 为棒端面处高斯抽运光半径,认为其与光腰相等^[10],r,z 分别为径向和轴向坐标,G(t) 为描述抽运脉冲的时间包络函数。

$$G(t) = \frac{[\text{square}(2\pi ft, \tau/T') + 1]}{2}, \quad (2)$$

式中 square 为矩形方波函数,f 为抽运频率,t 为时间,τ/T' 为占空比。

脉冲高斯抽运光在棒内产生的热源分布为

$$q_v(r, z, t) = \frac{2P\beta\eta}{\pi\omega^2} \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega^2}\right) G(t) \times \{\exp(-\beta z) + \exp[-\beta(L-z)]\}, \quad (3)$$

式中 η 为热转换系数。

考虑 Tm:YAG 棒侧面被铝箔和铜热沉包裹,铜热沉持续通水冷却,温度保持为 20 °C,晶体棒两端面和空气接触,通过对流换热的形式,将热量传给空气。则脉冲 LD 双端抽运 Tm:YAG 棒热边界条件数学表达式为

$$T = T_w, \quad r = b, \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + hT = hT_e, \quad z = 0, \quad (5)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} + hT = hT_e, \quad z = L, \quad (6)$$

式中 h 为 Tm:YAG 晶体端面与空气间的对流换热系数,k 为 Tm:YAG 晶体热导率,T_w 为水冷温度,T_e 为 Tm:YAG 晶体初始温度。

2.2 双端抽运 Tm:YAG 棒的时变温度场求解

Tm:YAG 棒为各向同性介质且轴对称,则在单脉冲抽运阶段建立瞬态热传导方程可表示为

$$\rho c \frac{\partial T_1}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (7)$$

式中 ρ 为晶体密度,c 为晶体比热容。满足初始条件,即晶体初始温度为室温 T_0, 即

$$T_1(r, z, t = 0) = T_0. \quad (8)$$

在单脉冲抽运间隔期间建立瞬态热传导方程

$$\rho c \frac{\partial T_2}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad \tau \leq t \leq T'. \quad (9)$$

满足初始条件,即单脉冲抽运阶段最后时刻的温度为单脉冲抽运间隔期间的初始温度,

$$T_2(r, z, t) |_{t=\tau} = T_1(r, z, \tau). \quad (10)$$

以下利用积分变换方法结合边界条件(4)~(6)对方程进行求解。为了便于数学计算,设 Tm:YAG 晶体棒侧面相对温度为零,计算出棒某点温度后,再

加上水冷温度 T_w 即是该点的实际温度^[11-12]。

$n(n \geq 2)$ 个脉冲重复周期性抽运后在抽运阶段的温度场表达式为

$$T_{2n-1}(r, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)Z(\eta_p, z)}{N(\beta_m)N(\eta_p)} \exp\{-\alpha(\beta_m^2 + \eta_p^2)[t - (n-1)T']\} \int_{r'=0}^b \int_{z'=0}^L r' R_0(\beta_m, r')Z(\eta_p, z') \times T_{2n-2}(r', z', nT' - T') dr' dz' + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)Z(\eta_p, z)}{N(\beta_m)N(\eta_p)} \exp\{-\alpha(\beta_m^2 + \eta_p^2)[t - (n-1)T']\} \times \int_{t'=(n-1)T'}^t \exp\{\alpha(\beta_m^2 + \eta_p^2)[t' - (n-1)T']\} A(\beta_m, \eta_p, t') dt', \quad (11)$$

$n(n \geq 2)$ 个脉冲重复周期性抽运后在抽运间隔期间的温度场表达式为

$$T_{2n}(r, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)Z(\eta_p, z)}{N(\beta_m)N(\eta_p)} \exp\{-\alpha(\beta_m^2 + \eta_p^2)[t - \tau - (n-1)T']\} \int_{r'=0}^b \int_{z'=0}^L r' R_0(\beta_m, r')Z(\eta_p, z') \times T_{2n-1}(r', z', \tau + nT' - T') dr' dz' + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{R_0(\beta_m, r)Z(\eta_p, z)}{N(\beta_m)N(\eta_p)} \exp\{-\alpha(\beta_m^2 + \eta_p^2)[t - \tau - (n-1)T']\} \times \int_{t'=\tau+(n-1)T'}^t \exp\{\alpha(\beta_m^2 + \eta_p^2)[t' - \tau - (n-1)T']\} B(\beta_m, \eta_p, t') dt', \quad (12)$$

式中:

$$A(\beta_m, \eta_p, t') = \frac{\alpha}{k} \tilde{q}_v(\beta_m, \eta_p, t')G(t') + \alpha \frac{Z(\eta_p, z)}{k} \Big|_{z=0} hT_e \pi b^2 + \alpha \frac{Z(\eta_p, z)}{k} \Big|_{z=L} hT_e \pi b^2, \quad (13)$$

$$B(\beta_m, \eta_p, t') = \alpha \frac{Z(\eta_p, z)}{k} \Big|_{z=0} hT_e \pi b^2 + \alpha \frac{Z(\eta_p, z)}{k} \Big|_{z=L} hT_e \pi b^2, \quad (14)$$

$$\tilde{q}_v(\beta_m, \eta_p, t') = \int_{z'=0}^L \int_{r'=0}^b r R_0 Z(\eta_p, z') q_v(r', z', t') dr' dz', \quad (15)$$

$$R_0(\beta_m, r) = J_0(\beta_m r), \quad (16)$$

$$\frac{1}{N(\beta_m)} = \frac{2}{b^2 J_0'(\beta_m b)}, \quad (17)$$

$J_0(\beta_m r)$ 为零阶贝塞尔函数,特征值 β_m 是方程 $J_0(\beta_m b) = 0$ 的正根。

$$Z(\eta_p, z) = \eta_p \cos \eta_p z + (h/k) \sin \eta_p z, \quad (18)$$

$$\frac{1}{N(\eta_p)} = \frac{2}{[\eta_p^2 + (h/k)^2] \{L + [(h/k)/\eta_p^2 + (h/k)^2]\} + (h/k)}, \quad (19)$$

特征 η_p 值为方程 $\tan \eta_p L = \frac{\eta_p(h/k + h/k)}{\eta_p^2 - (h^2/k^2)}$ 的正根。

2.3 双端抽运 Tm:YAG 棒的时变热焦距求解

当激光器重复运转, Tm:YAG 棒的温度达到动态平衡时,棒径向存在温度梯度,由温度梯度引起的折射率变化为

$$\Delta n(r, z, t) = [T(0, z, t) - T(r, z, t)] \left(\frac{dn}{dT} \right). \quad (20)$$

则沿着晶体棒轴向传播的抽运光经过晶体棒时,在轴向无限小距离 dz 内引起的热致光程差为^[13]

$$d_{\text{OPD}}(r, z, t) = \Delta n(r) dz =$$

$$\frac{dn}{dT} \times [T(0, z, t) - T(r, z, t)] dz, \quad (21)$$

式中 $\frac{dn}{dT} = 7.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 为热光系数。

因此, Tm:YAG 棒中心与边缘处产生的时变热焦距为

$$f = \frac{r^2}{2d_{\text{OPD}}} = \frac{r^2}{2 \left\{ \left(\frac{dn}{dT} \right) \times \int_0^L [T(0, z, t) - T(r, z, t)] dz \right\}}. \quad (22)$$

3 抽运功率对 Tm:YAG 激光器瞬态热效应的影响

3.1 抽运功率对瞬态温度分布的影响

给出模拟时所用参数表,如表 1 所示。

表 1 模拟所用参数

Table 1 Parameters used in simulation

| Parameters | Value |
|---|-----------------------|
| Temperature of cooling liquid / °C | 20 |
| Initial temperature / °C | 25 |
| Heat transfer coefficient of air (h) / ($W \cdot cm^{-2} \cdot K^{-1}$) | 8×10^{-4} |
| Heat conductivity of Tm:YAG (K) / ($W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$) | 14×10^{-2} |
| Pump beam waist / cm | 400×10^{-4} |
| Heat fraction | 0.65 |
| Crystal length / cm | 1 |
| Crystal radius / cm | 0.08 |
| Density of Tm:YAG / (kg/cm^3) | 4560×10^{-6} |
| Specific heat capacity of Tm:YAG / ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) | 590 |
| Absorption coefficient of 3.5% Tm:YAG / cm^{-1} | 3.15 |

考虑两个脉冲 LD 的输出参数(抽运功率、重复频率、占空比等)相同,则当抽运功率分别为 15、20、25 W,重复频率为 100 Hz,占空比为 50%,其他模拟参数如表 1 所示,脉冲 LD 双端重复抽运 Tm:YAG 晶体轴向瞬态温度分布分别如图 2 所示。

由图 2(a)~(c)可以看出,随着脉冲抽运个数的增加,Tm:YAG 棒内温度分布整体呈锯齿状升高,经过一段时间后趋于稳定的周期性分布;同一时刻 Tm:YAG 棒轴向中心点($r=0, z=0.5$ cm)处温度最低,两端面中心点($r=0, z=0; r=0, z=1$ cm)温度最高且相等。抽运功率分别为 15、20、25 W 时,Tm:YAG 棒内温度分布分别经 11、13、15 个抽运脉冲达稳态,棒两端面中心点温度,分别为 28.4 °C、31.2 °C、33.9 °C,棒轴向中心点处温度分别是 27.4 °C、29.9 °C、32.4 °C。即 Tm:YAG 棒内温度随着抽运功率的增加而升高,并且棒两端面中心温度与棒轴向中心点温差增大。

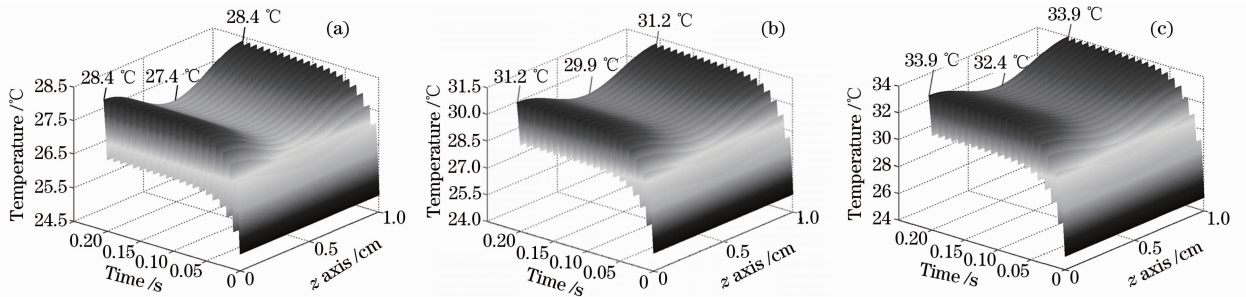


图 2 脉冲 LD 双端重复抽运 Tm:YAG 晶体轴向瞬态温度分布。抽运功率分别为(a) 15 W,(b) 20 W 和(c) 25 W

Fig. 2 Repeated pulse LD dual-end pumped Tm:YAG crystal axial transient temperature distribution.

Pump powers are (a) 15 W, (b) 20 W and (c) 25 W, respectively

3.2 抽运功率对变热焦距的影响

考虑两脉冲 LD 具有相同的输出参数,则当抽运功率分别为 15、20、25 W,重复频率为 100 Hz,占

空比为 50%,其他模拟参数如表 1 所示,脉冲 LD 双端重复脉冲抽运 Tm:YAG 晶体时变热焦距分别如图 3 所示。

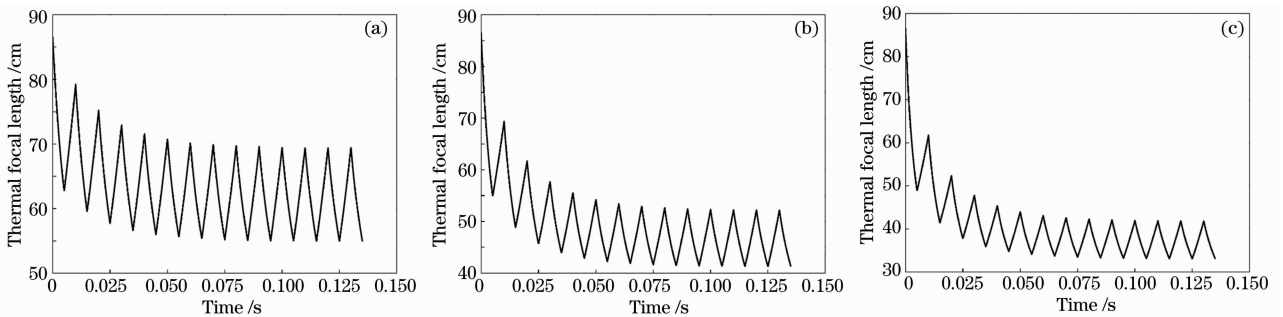


图 3 脉冲 LD 双端重复脉冲抽运 Tm:YAG 晶体时变热焦距。抽运功率分别为(a) 15 W,(b) 20 W 和(c) 25 W

Fig. 3 Repeated pulse LD dual-end pumped Tm:YAG crystal time-varying thermal focal length.

Pump powers are (a) 15 W, (b) 20 W and (c) 25 W, respectively

由图 3(a)~(c)可知,热焦距随着时间整体呈锯齿状减小,最终趋于稳定的周期性分布;且在脉冲抽运阶段,热焦距逐渐减小,脉冲抽运间隔期的热焦距逐渐增大。抽运功率为 15 W, Tm:YAG 棒热焦距经 11 个抽运脉冲达稳态,变化范围为 54.9~69.3 cm。抽运功率为 20 W 时, Tm:YAG 棒热焦距经 13 个抽运脉冲达稳态,变化范围为 41.2~52.2 cm。抽运功率为 25 W 时, Tm:YAG 棒热焦距经 15 个抽运脉冲达稳态,变化范围为 33.1~41.8 cm。由此分析可知,随着抽运功率的增加,稳态的时变热焦距变短且波动范围变小。

4 重复频率与脉宽占空比对 Tm:YAG 激光器瞬态热效应的影响

4.1 重复频率与脉宽占空比对瞬态温度分布的影响

考虑两个脉冲 LD 输出参数相同,则当抽运功

率为 30 W,重复频率分别为 70、80、90 Hz,占空比分别为 35%、40%、45%,其他模拟参数如表 1 不变时,脉冲 LD 双端重复抽运 Tm:YAG 晶体轴向瞬态温度分布分别如图 4 所示。

由图 4(a)~(c)可知,随着脉冲抽运个数的增加, Tm:YAG 棒整体温度呈锯齿状升高,并最终趋于稳态;同一时刻 Tm:YAG 棒轴向中心点 ($r=0, z=0.5$ cm) 处温度最低,两端面中心点 ($r=0, z=0; r=0, z=1$ cm) 温度最高且相等。 Tm:YAG 棒内温度分别经 11、13、21 个抽运脉冲达稳定的周期性分布,棒两端面中心点温度分别是 32.8、34.1、36.2 °C,棒轴向中心点处温度分别为 31.4、32.6、34.3 °C。即随着重复频率和占空比的增加, Tm:YAG 棒整体温度升高且棒两端面中心的温度和轴向中心点处温差变大。

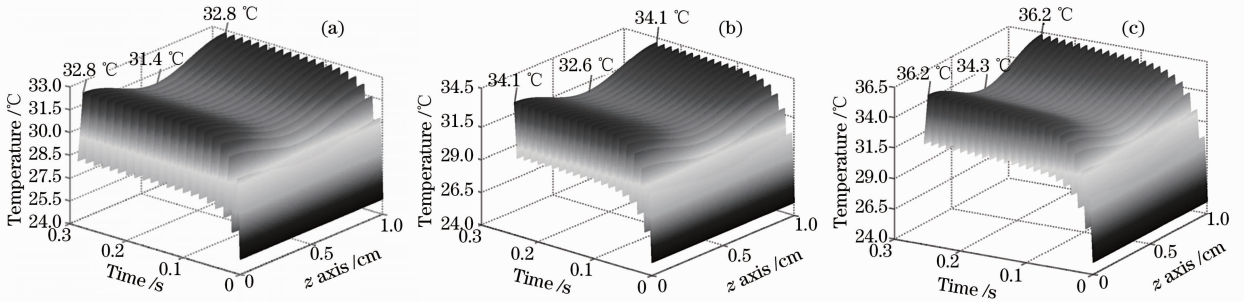


图 4 脉冲 LD 双端重复抽运 Tm:YAG 晶体轴向瞬态温度分布。

重复频率和占空比分别为 (a) 70 Hz, 35%; (b) 80 Hz, 40%; (c) 90 Hz, 45%

Fig. 4 Repeated pulse LD dual-end pumped Tm:YAG crystal axial transient temperature distribution.

Repetition frequencies and duty ratios are (a) 70 Hz, 35%; (b) 80 Hz, 40%; (c) 90 Hz, 45%, respectively

4.2 重复频率与脉宽占空比对变热焦距的影响

考虑两脉冲 LD 具有相同的输出参数,则当抽运功率为 30 W,重复频率分别为 70、80、90 Hz,占空比分别为 35%、40%、45%,其他模拟参数如表 1

不变时,脉冲 LD 双端重复脉冲抽运 Tm:YAG 晶体时变热焦距分别如图 5 所示。

由图 5(a)~(c)可知, Tm:YAG 棒热焦距分别经 11、13、21 个抽运脉冲达稳态。重复频率为

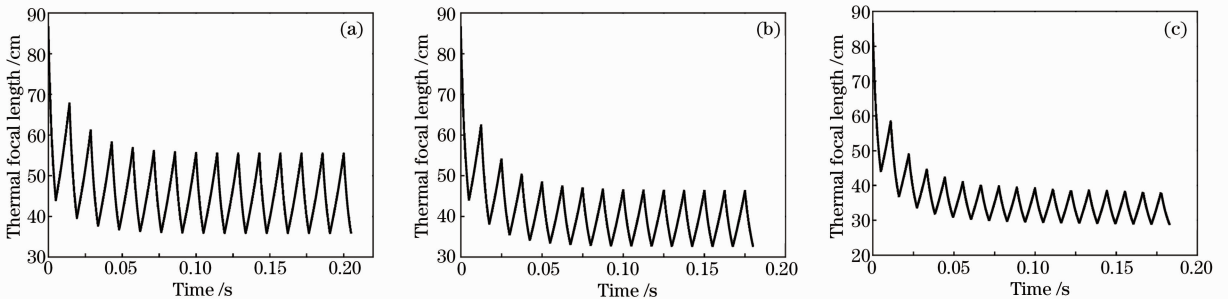


图 5 脉冲 LD 双端重复脉冲抽运 Tm:YAG 晶体时变热焦距。

重复频率和点空比分别为 (a) 70 Hz, 35%; (b) 80 Hz, 40%; (c) 90 Hz, 45%

Fig. 5 Repeated pulse LD dual-end pumped Tm:YAG crystal time-varying thermal focal length.

Repetition frequencies and duty ratios are (a) 70 Hz, 35%; (b) 80 Hz, 40%; (c) 90 Hz, 45%, respectively

70 Hz, 占空比为 35%, 达稳态时, Tm:YAG 棒热焦距在 35.9~55.4 cm 间变化; 重复频率为 80 Hz, 占空比为 40%, 达稳态时, Tm:YAG 棒热焦距在 32.6~46.3 cm 间变化; 重复频率为 90 Hz, 占空比为 45%, 达稳态时, Tm:YAG 棒热焦距在 28.8~38.5 cm 间变化。由此分析可知, 随着重复频率与占空比的增加, 达稳态后的时变热焦距变短且波动范围变小。

5 结 论

本文针对脉冲 LD 双端轴向抽运 Tm:YAG 棒, 考虑 Tm:YAG 晶体的实际工作环境, 即棒两端面与空气接触且棒侧面通水冷, 温度控制为恒温, 建立了晶体棒两端面对流换热, 边界恒温的热模型, 利用积分变换方法求解瞬态热传导方程, 并主要模拟分析了两脉冲 LD 输出参数相同时, 抽运光斑为 400 μm , 重复频率为 70~100 Hz, 抽运功率为 15~30 W, 脉冲 LD 双端抽运 Tm:YAG 晶体轴向瞬态温度分布和时变热焦距的变化情况。在上述工作条件下, Tm:YAG 棒内温度和热透镜焦距随时间呈锯齿状分布, 最终趋于稳定的周期性分布; 随着抽运功率、重复频率与占空比的增加, Tm:YAG 棒整体温度升高, 棒两端面中心点与棒中心点温差增大, 时变热焦距变短且波动范围变小。下一步工作将探讨不同单掺铥晶体结构、散热状态、较大抽运功率、重复频率, 甚至两个脉冲 LD 输出参数不相同等情况对单掺铥晶体内瞬态热效应的影响。

参 考 文 献

- 1 Wei Lei, Hu Xuehao, Han Long, *et al.*. Laser diode dual-end-pumped Tm:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502005.
魏 磊, 胡学浩, 韩 隆, 等. 激光二极管双端抽运 Tm:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502005.
- 2 Lin Zhifeng, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Experimental investigation of laser diode end pump Tm:YAG laser[J]. Chinese

- J Lasers, 2007, 34(2): 181-185.
林志锋, 高明伟, 高春清. 激光二极管端面抽运 Tm:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 181-185.
- 3 Ma Qinglei, Zong Nan, Xie Shiyong, *et al.*. Q-switched Tm:YAG laser intracavity-pumped by a 1064 nm laser[J]. Chinese Phys Lett, 2009, 26(12): 124211.
- 4 Zhang Yunshan, Gao Chunqing, Gao Mingwei, *et al.*. Frequency stabilization of a single frequency Q-switched Tm:YAG laser by using injection seeding technique[J]. Appl Opt, 2011, 50(21): 4232-4236.
- 5 Yufeng Li, Baoquan Yao, Yuezhu Wang, *et al.*. High efficient diode-pumped Tm:YAP laser at room temperature[J]. Chin Opt Lett, 2007, 5(5): 286-287.
- 6 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 40-42.
克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 40-42.
- 7 P Peterson, M P Sharma, A Gavrielides. Extraction efficiency and thermal lensing in Tm:YAG lasers[J]. Optical and Quantum Electronics, 1996, 28(6): 695-707.
- 8 H Nadgaran, M Sabaian. Pulsed pump: thermal effects in solid statelasers under super-Gaussian pulses[J]. Indian Academy of Sciences, 2006, 67(6): 1119-1128.
- 9 S Wang, H J Eichler, X Wang, *et al.*. Diode end pumped Nd:YAG laser at 946 nm with high pulse energy limited by thermal lensing[J]. Appl Phys B, 2009, 95(4): 721-730.
- 10 Zhang Shuaiyi, Huang Chunxia, Yu Guolei, *et al.*. Thermal effect of laser crystal by diode end-pump[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 Li Long, Nie Jianping, Shi Peng, *et al.*. Temperature field characteristic of YAG-Nd:YAG composite crystal rod end-pumped by laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 917-922.
李 隆, 聂建萍, 史 彭, 等. 激光二极管端面抽运 YAG-Nd:YAG 复合晶体棒温度场特性[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 917-922.
- 12 Song Xiaolu, Guo Zhen, Li Bingbin, *et al.*. Thermal relaxation time of crystal in pulsed laser diode end pumped solid state laser [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1132-1138.
宋小鹿, 过 振, 李兵斌, 等. 脉冲激光二极管端面抽运固体激光器中晶体的热弛豫时间 [J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1132-1138.
- 13 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.

栏目编辑: 宋梅梅