

文章编号: 1001-3806(2007)03-0253-04

2kJ 高能量钕玻璃激光器的热管理技术分析

田国周^{1,2}, 欧群飞^{2,3}, 钟 鸣², 叶大华², 吕百达¹

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064 2 西南技术物理研究所, 成都 610041; 3 中国科学院 光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 为了进一步提高激光器输出功率, 针对脉冲串工作的 2kJ 高能量钕玻璃固体激光器, 采用有限差分法, 对比研究了传统恒温水冷方式和采用传统水冷与加热控制相结合的新型热管理技术下的激光棒温度分布情况。结果表明, 采用新型热管理技术可以降低激光棒内的温度梯度, 确保高能量激光输出。

关键词: 激光技术; 高能量钕玻璃固体激光器; 热管理; 温度分布

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Thermal management technology for a 2kJ high energy Nd: glass laser

TIAN Guo-zhou^{1,2}, OU Qun-fei^{2,3}, ZHONG Ming², YE Da-hua², LÜ Baida¹

(1. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract To get higher laser output, the temperature distribution of a pulsed 2kJ high energy Nd: glass solid state laser was numerically studied by means of finite difference under two thermal management methods, i.e., the traditional method with a fixed cooling water temperature, and the novel method with an altering water temperature. It is shown that the temperature gradient in the laser rod can be limited to a low level and higher energy could be outputted if the novel thermal management method employed.

Key words laser technique; high energy Nd: glass laser; thermal management; temperature distribution

引 言

众所周知, 在设计固体激光器时, 抽运过程中激光介质热效应是必须要考虑的问题。热效应会降低光束质量, 甚至还会对激光工作物质造成破坏。目前, 国内外对激光介质热效应的研究在理论上基本成熟, 现有的热管理技术也基本能够满足常规固体激光器的需要^[1]。但是对于高能量输出的固体激光器, 如何选择合适有效的热管理技术就成为一个非常关键的技术难题。为此, 人们提出了各种各样的技术方案^[2~5], 如固体热容激光器、紧凑有源反射镜激光器、主振荡功率放大器、边抽运板条激光器、光纤激光器以及多台激光器输出光束相干合成技术等。

针对 2kJ 高能量钕玻璃固体激光器, 从理论分析了传统水冷方式和采用加热控制的新型热管理技术下的激光棒温度分布, 分析结果表明, 采用加热控制的新型热管理技术, 激光棒内的温度梯度大大降低, 可以确

保 2kJ 高能量激光输出^[6]。

1 理论分析

如图 1a 所示, 所设计的 2kJ 高能量钕玻璃固体激

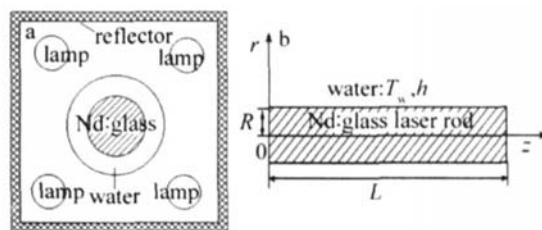


Fig 1 a—the end view of the pumping structure b—the side view of the laser rod and the coordinate definition

光器采用漫反射腔内 4 灯抽运方式。用 4 块漫反射板做成的漫反射器能使闪光灯发射的光更加均匀的入射到棒上。4 只闪光灯位于方形漫反射器的 4 角, 对激光棒进行侧面抽运。为了简化分析, 假设激光棒内的抽运光分布具有轴对称性, 故计算时只要考察其纵向剖面的上半部分即可。图 1b 中给出了计算采用的空间坐标系 (r, z), r 为半径方向, z 为纵向光轴方向。假设激光介质外表面 Σ 均受到冷却水的强制对流传热。

由于激光介质的温升范围并不大, 因而可以假设介质的热物性参数与温度无关。对于图 1 所示的系

作者简介: 田国周 (1979-), 男, 硕士, 现从事激光技术及应用研究。

E-mail: tianguozhou@163.com

收稿日期: 2006-04-25; 收到修改稿日期: 2006-05-17

统, 介质吸收抽运光引起的温度分布满足如下热传导方程及条件:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{r \partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q(r, z, t)}{\kappa} = \frac{\rho c_p}{\kappa} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1a)$$

$$\kappa \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\Sigma} = -h(T - T_w), \quad (\text{强制对流换热边界条件}) \quad (1b)$$

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (\text{初始条件}) \quad (1c)$$

式中, ρ 为介质密度, c_p 为介质比热容, κ 为导热系数; Σ 指激光介质外表面; h 为激光棒表面与冷却水之间的传热系数; T_w 为冷却水的温度, T_0 为初始时刻温度。 $q(r, z, t)$ 表示激光介质吸收抽运光产生的内热源强度。采用光线追迹方法^[8]可以获得图 1所示抽运结构内的激光棒吸收抽运光分布, 进而可以获得抽运过程中激光棒的内热源强度。

考虑脉冲重复频率较低、占空比较小的情况: 脉冲串工作时, 抽运脉冲持续时间为 3ms, 而脉冲与脉冲间隔为 15s, 每个脉冲串包含 10个脉冲, 串与串之间间隔 25ms, 可将一个周期分成两个阶段, 即脉冲抽运阶段和抽运后热扩散阶段来进行分析。在脉冲抽运阶段, 考虑到抽运持续时间比脉冲重复周期短两个数量级, 以及大尺寸钕玻璃介质导热性不是很好, 在脉冲抽运阶段, 可以忽略热扩散项。并且考虑到钕玻璃棒的长度远远大于棒直径的情况, 可以忽略轴向 (z 方向) 的热传导。于是可以将 (1a) 式分为如下两个阶段来表示:

$$T_m(r) = T_{m, in} + \frac{q(r) \Delta t}{\rho c_p}, \quad (\text{抽运阶段}) \quad (2a)$$

$$\frac{\rho c_p \partial T'_m(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T'_m(r, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial T'_m(r, t)}{r \partial r}, \quad (\text{扩散阶段}) \quad (2b)$$

(2a) 式中, Δt 表示抽运脉冲宽度, 取 $\Delta t = 3\text{ms}$, $T_m(r)$ 表示第 m 个抽运脉冲刚刚辐照过后的瞬时温度分布, $T_{m, in}$ 为第 m 个抽运脉冲来临之前的介质温度分布, 在此阶段中, 可以忽略介质中的热扩散过程。(2b) 式描述了热扩散阶段介质中的温度变化, 此阶段始于第 m 个脉冲刚过去, 止于第 $(m+1)$ 个脉冲到达之前, 由于在这个阶段中没有抽运光辐射, 因此为无内热源的扩散过程, 其中 $T'_m(r, t)$ 表示第 m 个脉冲过后至第 $(m+1)$ 个脉冲来临之前的时间段内的热扩散过程中的温度分布。

采用有限差分方法对上述微分方程进行数值计算。计算时, 首先根据初始条件 (1c) 式得 $T_{1, in} = T_0$, 再由 (2a) 式计算第 1 个抽运脉冲在辐照阶段引起的介质温度分布 T_1 ; 然后以此温度分布作为 T_1' 的初始条件, 再加上边界条件 (1b) 式, 求解扩散阶段微分方程

(2b) 式, 得到扩散阶段每个时刻的温度分布 T_1' 。第 2 个脉冲来临时, 有 $T_{2, in} = T_1'(t = t_{in})$, 其中 t_{in} 表示脉冲间隔时间。接着采用同样的方法来计算温度分布 T_2 和 T_2' 。以此类推, 就可以计算脉冲抽运过程中任意时刻的介质温度分布。

2 计算结果及分析

2.1 激光棒吸收抽运光分布

采用光线追迹方法^[7], 对图 1 所示的灯抽运结构下钕玻璃棒截面内的吸收抽运光分布进行了计算模拟。计算时采用的钕玻璃棒的参数见表 1, 采用的抽运灯发射光谱和钕玻璃吸收光谱见参考文献 [8]。

Table 1 The parameters of Nd: glass

parameter	values
radius R	20mm
length L	920mm
density ρ	2830 kg/m ³
specific heat c_p	750 J/(kg·K)
thermal conductivity κ	0.558 W/(m·K)

模拟结果如图 2 所示。

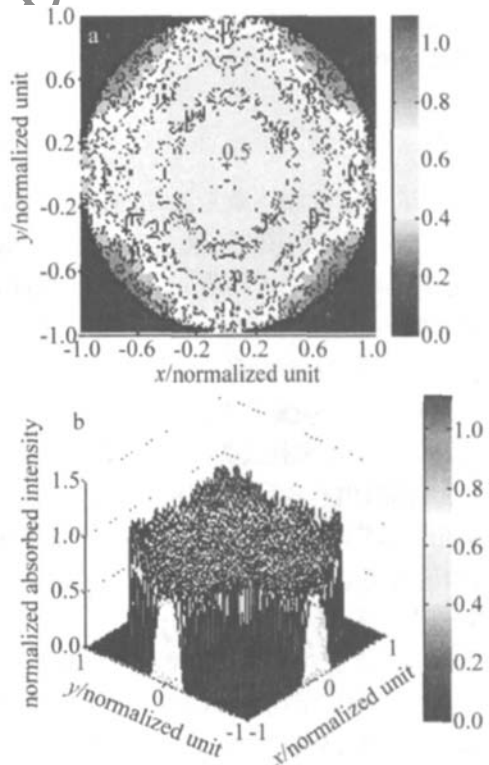


Fig 2 The absorbed pump light distribution in Nd: glass laser rod, under the four lamp pumping

图中出示采用如图 1 所示抽运结构时钕玻璃棒吸收的抽运光分布。从图 2 可以看出, 靠近灯的区域是强区, 灯之间的部分较弱, 但仍高于棒中心区域。中心部分的能量密度是强区的 50% 左右, 这主要是因为棒

的尺寸较大造成的。由吸收抽运光分布就可以获得激光棒在抽运阶段的内热源强度。为了便于简化计算,将激光棒内热源强度近似为轴对称抛物线分布。

2 2 激光棒中的温度分布

2 2 1 单个抽运脉冲引起的瞬态温升 不考虑抽运过程中的热传导,可以估算得出一个脉冲过后,激光棒内的瞬态平均温升为:

$$\Delta T = \frac{\eta E_{in}}{\rho_p (\pi R^2 L)} \quad (3)$$

对于输出为 2kJ 的高能钨玻璃激光器,假设每个脉冲需要输入电能 $E_{in} = 100\text{kJ}$,棒耗散热量效率 $\eta = 3\%$ 。根据 (3) 式,计算得到一个抽运脉冲过后激光棒内的平均温升为 $\Delta T \approx 2^\circ\text{C}$ 。根据激光棒吸收抽运光的分布情况,忽略热传导,一个抽运脉冲过后,激光棒内的瞬态温升近似为抛物线分布,如图 3 所示。

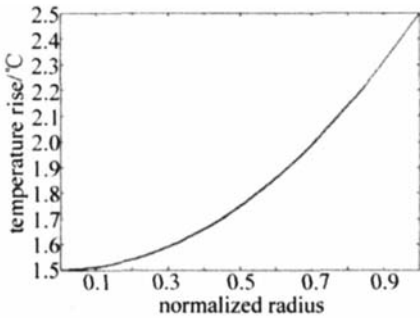


Fig 3 The given transient temperature rise distribution just after each pulse pumping

根据图 3 所示的单个抽运脉冲过后引起的瞬态温升分布,分别计算了传统冷却方式(冷却水温恒定)和新型热管理方式(传统水冷与加热控制相结合)下,激光棒脉冲串工作时的温升情况。

2 2 2 冷却水恒定时激光棒中的温度分布 若采用传统冷却方式,冷却液温度恒定为 $T_c = 20^\circ\text{C}$ 。假设冷却水与激光棒表面传热系数为 $h = 1000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。采用有限差分法,得到采用传统恒温水冷却的热管理技术时激光棒中的温度分布如图 4 所示。

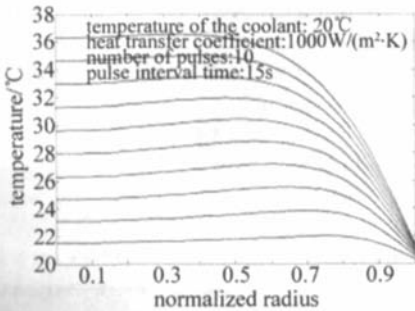


Fig 4 The variation of temperature distribution under traditional thermal management method

图 4 示出了传统水冷方式下脉冲串工作时激光棒内的温度分布随时间的变化情况。由图 4 可见,随着脉冲个数增加,激光棒中心温度逐渐升高,但激光棒表

面由于受到恒定水温的冷却,温度升高缓慢,由此导致激光棒内外温差逐渐增大。棒内较大的温度梯度将引起严重的热效应,严重降低输出光束质量。

2 2 3 采用新型热管理技术下的温度分布 在一个抽运脉冲结束时,棒内将形成边缘温度高中心温度低的温度分布,若采用传统水冷方法和加热控制相结合的新型热管理方法,即采用快速升高冷却液的温度的方法来降低激光棒中心和边界的温差。由于脉冲间隔远小于热时间常数^[9],当下一抽运脉冲来临时,棒还无法达到热平衡,下一个抽运脉冲形成的瞬态温度梯度将叠加在上一个温度梯度上。当输出一连串的脉冲后,再冷却载热剂和激光棒。采用新型热管理方法下的激光棒温度分布如图 5 所示。

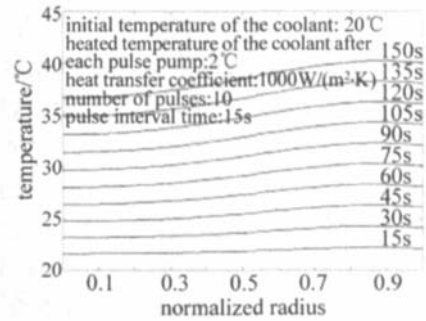


Fig 5 The variation of temperature distribution under novel thermal management method

图 5 示出了采用新型热管理方法的钨玻璃棒温度分布随时间变化的情况。计算时假设初始水温为 20°C ,每个脉冲过后立即将冷却水温度升高 2°C 。有图可见,采用加热控制的方法,导致激光棒表面的温度比中心的温度稍高,随着脉冲个数的增加,棒内温度分布呈整体升高趋势,但每个脉冲过后的棒内温度梯度变化缓慢。由此可见,采用新型热管理技术,由于棒内温度梯度较小,因此,热效应也就减少。

比较传统冷却方式和加热控制方式下的激光棒中的最大温度差,如图 6 所示。

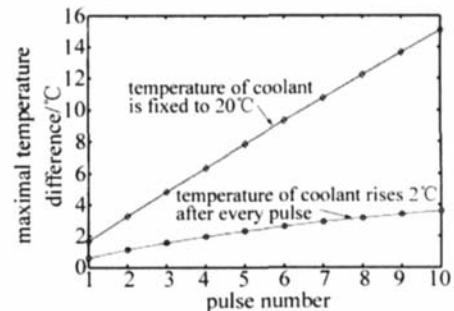


Fig 6 The variation of the maximum temperature difference in the laser rod

由图 6 可见,采用传统冷却,在 10 个脉冲结束时,激光棒中的最大温差将达到 15°C ,而采用每个脉冲后快速加热冷却液的方式,在 10 个脉冲结束时,激光棒中的最大温差还不到 4°C 。但是,比较图 4 和图 5 可

知,新型热管理技术下激光棒内整体温度比传统冷却方式下的温度要高,说明新型热管理方式下脉冲工作时间不能太长,比如经过 10 个脉冲后,激光器必须停止工作,期间将冷却水温度迅速降低,经过大约 25min 后激光棒的温度分布又恢复到初始状态,之后又可以进行下一个脉冲串工作。

3 结 论

对比研究了脉冲串工作的 2kJ 大能量钕玻璃固体激光器在传统水冷方式和新型热管理方式下的温度分布。结果表明,采用新型的热管理技术,脉冲串工作时在每个脉冲过后迅速加热水温,可以大大的降低激光棒中的温度梯度。由前面的分析,热效应的产生是由于由于抽运和冷却的不均匀产生的温度梯度造成的,采用新型的热管理技术,可以大大减小激光介质中的温度梯度,因此,由于温度梯度产生的热应力、热透镜、热致双折射现象必然会相应的减小,可以保证大能量输出的同时保持较高的光束质量。但由于采用加热控制后水温 and 激光棒内温度整体升高,因此在工作一个脉冲串后,必须对冷却水和激光棒进行降温控制,恢复激光棒温度到初始状态。由此可见,采用传统冷却和加热控制的新型热管理技术,可以实现高能量激光输出。

新型热管理技术和传统热管理技术最大的不同就

在于冷却液的温度,前者是在脉冲过后加温冷却液,脉冲串后再对冷却液进行降温;后者一般保持冷却液温度恒定不变。从技术实现上来说,可以把现有循环冷却水系统改造成可以迅速加热和制冷的新型热管理系统。目前,作者正进行试验工作,有关结果将另文报道。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Sh H. The heat managements of the solid-state laser [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics 2005 22(4): 497 ~ 509(in Chinese).
 - [2] MEI S Sh. Solid-state lasers marching to 100kW —— a pilot study on overseas development of high energy solid state lasers [J]. Laser & Optics Progress 2005, 42(10): 2 ~ 8(in Chinese).
 - [3] CHENG H, QU Q H, LÜ B D *et al*. Properties of Nd:glass rod lasers in the heat capacity operation [J]. Laser Technology, 2005 29(4): 347 ~ 349(in Chinese).
 - [4] LIU Sh. The solid-state heat capacity laser [J]. Laser & Optics Progress 2005, 42(11): 7 ~ 11(in Chinese).
 - [5] FENG G Y, LÜ B D, KONG F L *et al*. Experimental study of a Nd glass slab oscillator and two stage amplifier system of high beam quality [J]. Chinese Journal of Lasers 1998, A25(11): 965 ~ 969(in Chinese).
 - [6] ZHONG M. Vehicle solid tactical laser weapon system [J]. Sichuan Ordnance Journal 2005, 26(2): 3 ~ 7(in Chinese).
 - [7] ZHANG H, XU Sh X, FAN D Y. Pumping energy distribution in rod amplifier calculated with the Monte Carlo method [J]. Acta Optica Sinica 1997, 17(12): 601 ~ 608(in Chinese).
 - [8] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press 2003 356 ~ 409(in Chinese).
-
- (上接第 252 页)
- (XRD)和扫描电镜 (SEM)对薄膜的结构和表面开貌进行分析。发现在室温下溅射制作的 SnO₂ 薄膜为非晶态,经 300℃ 的高温退火后,SnO₂ 薄膜由非晶态变为多晶态,具有四方的金刚石的结构。CuO 掺杂的体积分数小于 0.05 时,其对 SnO₂ 薄膜结构并无多大的影响,当 CuO 掺杂的体积分数较大时,将使 SnO₂ 薄膜的衍射强度减少,而且衍射峰发生宽化,抑制了晶粒的生长。在金红石棱镜的底面上先溅射一层起 SPR 作用的金属 Ag 薄膜,然后再在金属 Ag 薄膜上溅射 CuO 为掺杂的 SnO₂ 传感膜,而且均在 300℃ 温度下退火,以 H₂S 为检测气体,SPR 实验表明,不同的 CuO 掺杂体积分数,SPR 的共振角不同,这可能是由于 CuO 掺杂体积分数的不同,导致薄膜的介电常数的不同,因而 SPR 的共振角不同。
- ### 参 考 文 献
- [1] HU M Y, ZHU X, QIL J N. Numerical simulation of otto structure in surface plasma wave light modulator [J]. Laser Technology, 2005 29(3): 325 ~ 327(in Chinese).
 - [2] NYLANDER C, LIEBERG B, LIND T. Gas detection by means of surface plasmons resonance [J]. Sensors and Actuators 1982, B3(1): 79 ~ 88.
 - [3] LIEBERG B, NYLANDER C, LUNDSTROM I. Surface plasmons resonance for gas detection and biosensing [J]. Sensors and Actuators 1983, B4(2): 299 ~ 304.
 - [4] SONG J J, HUANG Sh Zh, LIN W *et al*. Study on gas sensing character of nanosized SnO₂ thin film fabricated by magnetron reactive sputtering [J]. Journal of Zhangzhou Teachers College, 2004 17(1): 37 ~ 42(in Chinese).
 - [5] ZENG Zh F, YU G P, WEI Zh H *et al*. Study of nanocrystalline doped SnO₂ thin film prepared by reactive RF-sputtering [J]. Journal of Wuhan University, 2004 50(1): 55 ~ 59(in Chinese).
 - [6] HONG H P, WU SY, YANG M *et al*. Application of white light emitting diode to surface plasmon resonance sensor [J]. Sensors and Actuators 2001, B80(1): 89 ~ 94.
 - [7] RYZHKOV A S, VASILIEV R B, RUMYANTSEVA M N *et al*. Micro structure and electrophysical properties of SnO₂, ZnO and In₂O₃ nanocrystalline films prepared by reactive magnetron sputting [J]. Materials Science and Engineering 2002, B96(1): 268 ~ 274.
 - [8] BUSTIN R M, ROSS J V, ROUZUAD J N. Mechanism of graphite formation from kerogen: experiment evidence [J]. International Journal of Coal Geology, 1995 28(1): 1 ~ 36.