

钹玻璃、Nd:YAG 和 Nd:GGG 热容激光特性比较*

侯立群^{1,2}, 祖继锋¹, 董 玥^{1,2}, 朱健强¹

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 高功率激光物理实验室, 上海 201800; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 考虑固体热容激光器对工作介质的要求, 对比分析了掺钹的玻璃、YAG 和 GGG 的多种材料性能。并对三者激光工作周期内的瞬态温度场及热应力进行了数值模拟。结果表明: 在给定的边界及工作条件下, 当钹玻璃激光器以热容方式工作, 时间为 5 s 时, 介质最高升温超过 400 K, 最大热致应力为 25 MPa, 接近其断裂极限的 50%。在此条件下进行冷却, 当水温为 283 K 时, 需经过约 120 s 才基本恢复到初始工作状态。而 Nd:YAG 和 Nd:GGG 两种介质在相同输入工作条件下, 工作时间可达 10 s, 且温度分布相对平坦, 温差和热应力较小, 经水冷约 30 s 可恢复到初始状态。但模拟计算中, 发现 Nd:YAG 在冷却阶段的最大应力达 77 MPa, 已超过断裂阈值下限值的 50%。兼顾冷却时间、材料所能承受的应力及晶体生长尺寸, 以及实现 100 kW 的平均功率输出等因素, Nd:GGG 晶体是目前三者中比较适合于作为高平均功率、重复率热容方式工作的激光材料。

关键词: 热容激光; 瞬态温度场; 有限元分析; 钹玻璃; Nd:YAG; Nd:GGG

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

在激光实际应用中, 掺钹离子的固体激光器占有非常重要的地位。其中 Nd:YAG 因其增益高、热特性和机械特性良好等特性, 在科研、工业、医学和军事等领域得到重要应用。钹玻璃介质的生长尺寸很大, 易制成多种形状(如棒状、片状、板条), 储能良好, 目前在大型激光核聚变驱动器装置研制中具有不可替代的地位^[1]。Nd:GGG 与 Nd:YAG 介质的激光性能比较接近, 均在 20 世纪六七十年代被发现, 且被认为是较好的固体激光工作介质, 但由于当时无法生长性能优良的 Nd:GGG 晶体, 其制作成本也高于 Nd:YAG, 所以即使在中小功率激光器的应用中 Nd:GGG 晶体也一直无法超越 Nd:YAG 激光晶体。

热容固体激光器(Solid State Heat Capacity Laser, SSHCL)因其特殊的工作体制(激光的发射和冷却阶段分开)对激光介质提出了更高的技术要求。SSHCL 的概念由美国劳伦斯利弗莫尔实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)最早提出, 在初期的原理性实验中采用了钹玻璃介质, 之后的研究工作转向了使用 Nd:GGG 晶体^[2-6]。目前国内的一些研究单位也相应采取了相近的技术途径, 在 Nd:GGG 晶体生长不太成熟的阶段, 选择钹玻璃激光介质或 Nd:YAG 晶体完成初步的判定试验^[7]。目前 LLNL 研制的 SSHCL 已经获得平均功率 30 kW 的输出^[4], 预计 2007 年达到 100 kW, 而国内已报导的实验结果在数 kW^[8-10]。

针对目前 SSHCL 的技术进展, 有必要深入了解几种已有的、可供选择的热容激光材料的特性。因此本文将从材料的热性能、机械性能、激光储能、冷却过程等多个方面比较钹玻璃、Nd:YAG 和 Nd:GGG 三类有代表性固体激光介质的特性。利用有限元分析软件 ANSYS 对三者热容工作周期的瞬态温度场及热应力进行数值模拟, 计算结果将为 SSHCL 的工程研制及实际应用提供了初步的设计依据。

1 热容激光工作介质的技术要求

在热容方式下, 激光介质的比热容是一个重要参数。根据 Einstein 比热容公式, 固体材料的比定压热容 c_p 可表示为^[5]

$$c_p = \frac{3R\left(\frac{T_D}{T}\right)^2 e^{T_D/T}}{(e^{T_D/T} - 1)^2} \quad (1)$$

式中: T_D 为德拜温度, 对于石榴石类的晶体来说约为 750 K, R 为常数。在室温条件下, 激光介质的比热容值为温度的函数, 并随温度上升而增大。

* 收稿日期: 2006-03-17; 修订日期: 2006-05-16

作者简介: 侯立群(1976—), 女, 河南义马人, 博士研究生, 主要从事固体激光器单元技术的研究; hlqq@263.net。

SSHCL 工作介质的单位体积输出能量的理论极限值为^[5]

$$\frac{E_{\text{out}}}{V} = \eta_{\text{extr}} \frac{\rho c_p}{\chi} \Delta T \quad (2)$$

式中: E_{out} 为一个工作周期内输出激光的能量; V 为介质体积; η_{extr} 为系统提取能量的效率; ρ 为介质密度; χ 为光谱参数, 定义为激光介质吸收的热与激光上能级能量之比; ΔT 为工作周期内起始温度与终止温度之差。由式(2)可知, 热容激光器输出的最大能量与 c_p , ρ 和 ΔT 成正比。

SSHCL 的工作特点决定了获得高平均功率输出的技术途径是通过提高脉冲输出的重复频率来实现, 而非增加单脉冲能量。例如当保持单脉冲能量在一定数值的前提下, 把重复频率从 20 Hz 提高到 200 Hz, 则平均输出功率可以提高 10 倍。因此工作物质的选择应该遵循以下几个主要原则: (1) 工作温度范围 (ΔT) 大, 可承受高重复频率泵浦, 抗热冲击破坏阈值较高; (2) 材料密度大, 比热容大, 单位体积可提取的能量要高; (3) 介质的生长尺寸大、光学质量高; (4) 机械性能和热传导性能好等。

2 热容激光特性比较

2.1 材料性能

对于 SSHCL 来讲, 在激光发射阶段, 工作介质的温度是在不断升高的。针对大多数实际应用, 一般要求在激光发射结束后, 应使工作介质尽快冷却到初始工作温度状态, 以便进入下一个工作循环。从快速冷却的角度考虑, 应该选择热扩散率高的工作介质。

表 1 总结了钕玻璃(以国产 N31 磷酸盐钕玻璃为例)、Nd:YAG 和 Nd:GGG 介质的主要参数^[1,5,11]。可以看出, Nd:YAG 和 Nd:GGG 的热扩散率比钕玻璃高 10 倍以上, 断裂极限也高于钕玻璃, 因此在激光发射结束后, 可对 Nd:YAG 和 Nd:GGG 介质进行快速冷却。从激光特性来说, Nd:YAG 和 Nd:GGG 晶体具有较大的发射截面, 单位体积可提取能量为 (450 J) 钕玻璃的 1.5 倍。综合考虑上述因素, Nd:YAG 和 Nd:GGG 可作为热容方式工作的备选激光介质。

表 1 钕玻璃, Nd:YAG 和 Nd:GGG 主要参数
Table 1 Parameters of Nd:glass, Nd:YAG and Nd:GGG

laser	Nd:glass (N31)	Nd:YAG	Nd:GGG
heat capacity/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	750	590	380
thermal conductivity/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	0.56	10.39	6.43
density/(kg · m ⁻³)	2 830	4 560	7 060
thermal diffusivity/(m ² · s ⁻¹)	0.26 × 10 ⁻⁶	3.86 × 10 ⁻⁶	2.39 × 10 ⁻⁶
thermal expansion coefficient/K ⁻¹	10.7 × 10 ⁻⁶	6.9 × 10 ⁻⁶	8.0 × 10 ⁻⁶
Young modulus/Pa	51.6 × 10 ⁹	282 × 10 ⁹	220 × 10 ⁹
Poisson ratio	0.23	0.30	0.31
critical stress intensity/MPa	51	127~255	268
light absorption coefficient/m ⁻¹	380	410	300
size/cm	80	5	15
$\eta_{\text{extr}}(\rho c_p / \chi) \Delta T / \text{J}$	300	450	450

但对实现更高平均功率固体激光器而言, 所选择的激光介质尺寸与潜在的输出功率提升是密切相关的。即在相同的激光储能和能量转换效率等条件下, 大尺寸的晶体更易获得高平均功率输出。由于 Nd:YAG 晶体在生长过程中存在的固有缺陷, 使得在晶体内部存在较强的应力/去偏振区域, 限制了晶体可以切割的尺寸^[6], 目前 Nd:YAG 晶体可利用的口径尺寸约为 5 cm, 而 Nd:GGG 可以达到 15 cm 以上(可达 20 cm), 目前美国已做到 13 cm 左右。从这个角度考虑, Nd:GGG 是比 Nd:YAG 更适合于热容方式工作的激光介质, 应用潜力更大。

SSHCL 将通过提高重复频率来提高平均功率输出, 在重复率热容方式下, 大量泵浦废热在工作介质中具有累积效应, 热量往往来不及扩散, 由此带来了热效应的累积。脉冲间隔时间越短, 热扩散越少, 带来的热效应累积就越严重, 导致介质温升及热致应力等效应。与 Nd:YAG 和 Nd:GGG 晶体相比, 钕玻璃的热扩散系数较小, 直接结果之一是冷却时间明显增加, 同时, 热膨胀系数较大, 受热畸变比晶体严重, 热冲击阻抗也较低。因此, 即使目前钕玻璃制作尺寸(约 80 cm)比掺钕晶体的尺寸大很多, 但基于高重复率热容工作方式及其装置的

体积重量等因素考虑,Nd:GGG 仍比钕玻璃更适合作为 SSHCL 的工作介质。

2.2 介质瞬态温度场及热应力

从上面的分析中,已初步判断出 Nd:GGG 是 3 种介质中比较适合于 SSHCL 的工作介质。针对三者热容工作方式下的热致效应,本文借助有限元分析软件 ANSYS,分别对它们在相同泵浦和冷却条件下的瞬态温度场及热应力进行了数值模拟。

计算时选取的介质尺寸相同,为 5 cm×5 cm×1.2 cm,泵浦光强 4 MW/m²,材料性能参数参见表 1。在激光发射阶段,初始温度 T₀ 取 293 K,假设所有表面绝热(表面非绝热带来的温度梯度会导致有效孔径的降低,绝热条件可通过在介质表面涂绝热层或辅以绝热材料实现);在冷却阶段,只对两个泵浦面进行冷却,其它表面绝热,采用循环水冷却,表面传热系数取 h=1×10⁴(W·m⁻²·K⁻¹),水温 T_f=283 K。

图 1 给出了激光发射阶段 3 种介质沿 z 方向的温度分布曲线,图 2 为介质内最大温差随时间的变化曲线。结果表明,在绝热条件下,激光介质仅在 z 方向有温度梯度,三者的温度分布曲线均为抛物线型,对于热扩散系数较大的晶体来讲,表面吸收的热可以在相对较短的时间内向内部扩散,介质内外表面的温差较小,而钕玻璃热扩散系数最低,故内外温度梯度最大,并随时间的增加,温差加剧。通过计算得出,在 5 s 时,钕玻璃板条温度最大和最小值分别为 400 K 和 325 K,最高温升 107 K(相对于 T₀=293 K)。此时,最大热应力为 25 MPa,接近钕玻璃断裂极限的 50%,势必严重影响输出激光束质量。假设钕玻璃能够承受如此高的热冲击,则工作 10 s(实际达不到)时内外温差将达到 125 K,最高温度 489 K,最大等效热应力达 40 MPa,已接近其断裂阈值。此时将出现:介质变形光束质量变差,或断裂而无法工作,或激光器工作时间缩短,应及时停止发射激光,转而进入冷却阶段,但冷却时间却非常长(温差过大可能选择自然冷却)。解决办法之一是增加钕玻璃横向尺度,但玻璃的热冲击参数、热扩散系数及工作自身激光参数,仍限制钕玻璃无法通过提高重复率的办法来获得高平均功率输出,而依靠维持一定重复率(例如适当值 20 Hz),提高单脉冲能量的办法(要求单脉冲能量为 5 000 J 以上),在系统体积、工作时间及光束质量等指标限制的条件下,也无法实现 100 kW 平均功率输出。

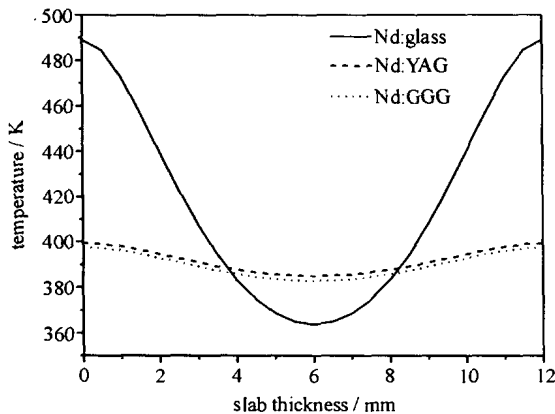


Fig. 1 Temperature distribution of Nd: glass, Nd:YAG and Nd:GGG

图 1 钕玻璃、Nd:YAG 和 Nd:GGG 温度分布曲线

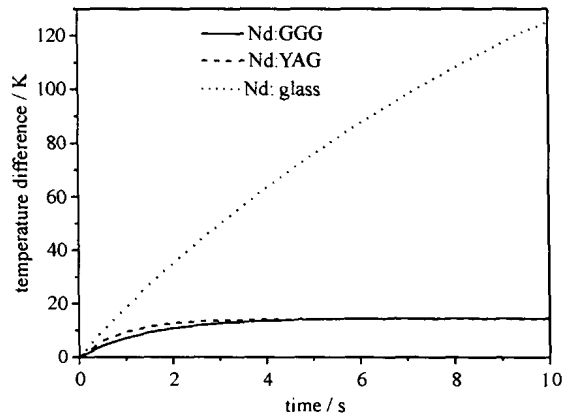


Fig. 2 Variation of maximum temperature difference with time

图 2 介质内外最大温差随时间的变化曲线

在热容激光器的冷却阶段,板条内的温度分布和激光发射阶段的温度分布相反,呈外低内高的抛物线。外低内高的温度分布导致板条表面受拉应力,心部受压应力,因此在冷却阶段应尽量减少介质内外温差,以降低介质断裂的可能。

在进行数值计算时,因钕玻璃的工作时间不可能达到 10 s,因此,分别针对钕玻璃工作时间为 5 s,Nd:YAG 及 Nd:GGG 工作时间为 10 s 的算例作为初始条件进行冷却计算。图 3~5 分别给出了三者表面温度 T_s 和中心线温度 T_c 随冷却时间的变化曲线。显然在本文计算选择的边界条件下,钕玻璃需要的冷却时间最长,约 120 s 后才能恢复到初始状态。相比之下,热扩散系数较大的 Nd:YAG,Nd:GGG 板条在 30 s 左右温度就可以降低到初始状态,且表面和内部的温度分布趋于均匀。

图 6 是冷却阶段三者最大热应力与各自断裂极限数值的对比图,可以看出,Nd:YAG 在冷却阶段的最大应力达 77 MPa,已高于断裂极限下限的 50%,超过了安全应力范围(一般为断裂极限的 20%)。假设针对某些特殊应用,要求热容激光工作介质能在 30 s 左右或更短时间内恢复到初始工作状态,以便使激光系统能进入下一个工作循环,兼顾冷却时间和材料所能承受的应力,应选择 Nd:GGG 晶体作为 SSHCL 的工作介质。

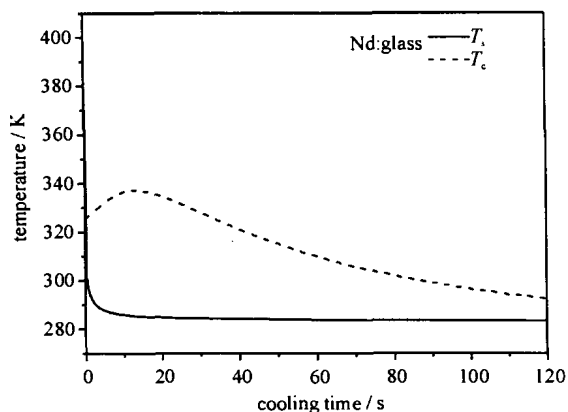


Fig. 3 Temperature of Nd:glass slab vs cooling time

图3 钕玻璃板条温度随冷却时间的变化曲线

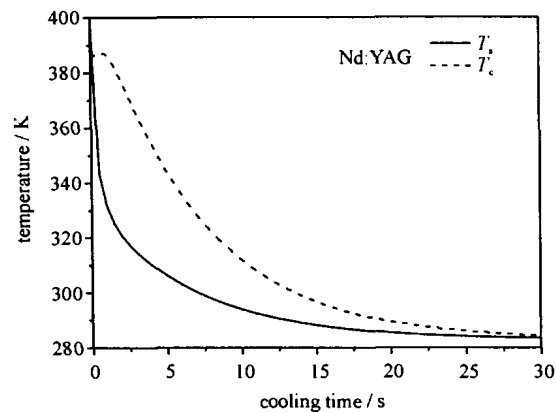


Fig. 4 Temperature of Nd:YAG slab vs cooling time

图4 Nd:YAG板条温度随冷却时间的变化曲线

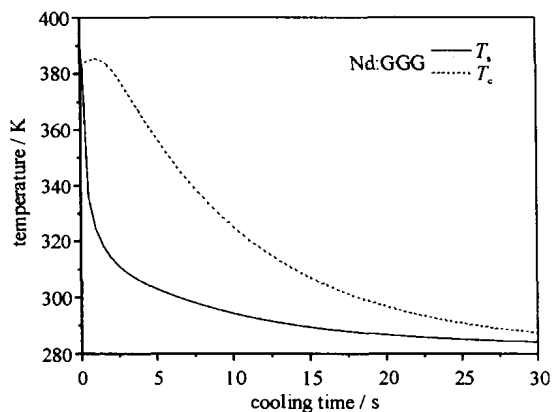


Fig. 5 Temperature of Nd:GGG slab vs cooling time

图5 Nd:GGG板条温度随冷却时间的变化曲线

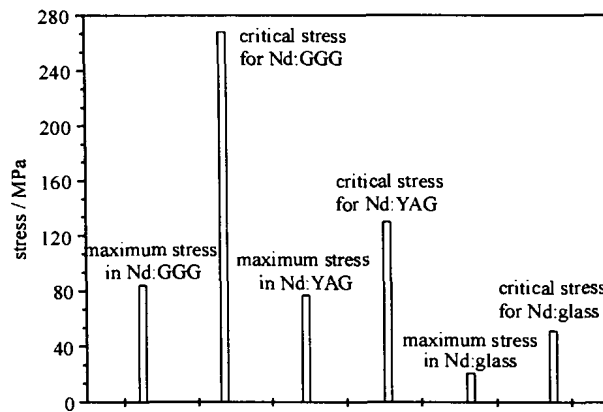


Fig. 6 Maximum stress during cooling period

图6 冷却阶段最大应力对比

3 结论

能够实现高平均功率输出(预计 100 kW)SSHCL 的工作机制要求激光工作物质具有良好的热学性能、光学性能和机械性能等。基于 SSHCL 总体及热管理系统设计和不同应用背景需求,针对发展高功率固体激光器常用的 3 种掺钕材料(钕玻璃、Nd:YAG 和 Nd:GGG) 在热容模式下的激光特性进行了分析与比较:利用 ANSYS 对 3 种材料在激光发射阶段和冷却阶段的瞬态温度场及热应力进行了数值模拟。结果表明,当在介质板条的厚度为 1.2 cm,泵浦光强为 4 MW/m^2 条件下,工作时间为 5 s 时,钕玻璃板条内外温差达 75 K,介质最高升温到 400 K,最大热应力接近钕玻璃断裂极限的 50%。若此时采用循环水来冷却介质,当冷却水温 283 K 时,需经过约 120 s 方可基本恢复到初始工作状态。而 Nd:YAG 和 Nd:GGG 介质在相同工作条件下的激光发射过程中,工作时间可达 10 s,且介质板条内外表面温度分布曲线相对较平坦,温差较小,采用水冷约 30 s 即恢复到初始状态。兼顾冷却过程中二者的最大热应力和其它因素(如生长尺寸),GGG 晶体是这 3 种掺钕介质中比较适合于作为高平均功率、重复率热容方式工作的激光材料。

参考文献:

- [1] 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社,2002:39-49. (Koechner W. Solid-state laser engineering. Beijing: Science Press, 2002: 39-49)
- [2] Rotter M D, Dane C B. A 10 kW solid-state heat-capacity laser system installed at HELSTF[J]. *Laser Science and Technology*, 2001, (12):1.
- [3] Rotter M D, Dane C B, Gonzales S A, et al. The solid state heat capacity laser[C]//Nineteenth Topical Meeting and Tabletop Exhibit. Santa Fe, New Mexico, 2004.
- [4] Hecht J. Laser weapons go solid-state[J]. *Laser Focus World*, 2004, 40(9): 61.
- [5] Albrecht G F, Sutton S B, George E V, et al. Solid state heat capacity disk laser[J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, 16(4): 605-625.
- [6] Rotter M D, Dane C B. Solid-state heat-capacity-laser review[C]//15th Solid State and Diode Laser Technology Review Technical Digest. Albuquerque, New Mexico, 2002: 21-24.

- [7] Sun Z P, Li R N, Bi Y, et al. Investigation on performance of high repetition diode-pumped heat-capacity Nd: YAG laser[J]. *Chin Phys Lett*, 2005, 22(2):339-342.
- [8] 蔡震, 胡浩, 蒋建锋, 等. 二极管泵浦 300 W 热容固体激光器[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(s0):49-52. (Cai Z, Hu H, Jiang J F, et al. 300 W diode-pumped solid state heat capacity laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(s0):49-52)
- [9] 刘列, 许晓军, 杨建坤, 等. 基于火花隙开关实现的固体热容激光器实验[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(6): 845-848. (Liu L, Xu X J, Yang J K, et al. Experiments of solid state heat capacity laser using spark switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(6): 845-848)
- [10] 彭钦军, 薄勇, 杨晓冬, 等. 2277 W 全固态热容激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(11):1477. (Peng Q J, Bo Y, Yang X D, et al. A 2277 W solid state heat capacity laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(11):1477)
- [11] Mudge D, Ostermeyer M, Veitch P J, et al. Power scalable TEM₀₀ CW Nd: YAG laser with thermal lens compensation[J]. *IEEE J of Selected Topics in Q E*, 2000, 6(4): 643-649.

Comparison of laser characteristics of neodymium doped glass, YAG and GGG operating in heat capacity mode

HOU Li-qun^{1,2}, ZU Ji-feng¹, DONG Yue^{1,2}, ZHU Jian-qiang¹

(1. *Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China;*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Considering some necessary factors in the design of SSHCL, material properties of Nd doped glass, YAG and GGG were compared. Transient temperature fields and thermal stress in these slab mediums during one working cycle were simulated. Numerical analysis results showed that the internal-external temperature difference in a neodymium doped glass slab was 75 K and the peak temperature value was 400 K when pumping time arrived 5 s. The maximum stress came to 50% of glass fracture limit. During subsequent water cooling period, the initial state was recovered after 120 s. On the same boundary conditions, Nd: YAG and Nd: GGG slabs could maintain relatively smooth temperature profile while the temperature rising and equivalent thermal stress were lower compared to glass. In later cooling phase, both of them could reach their operating commencement within 30 s. As cooling, the maximum stress of Nd: YAG overran 50% of the stress limit, thus increasing its tendency to fracture. Taken cooling time, fracture limit and obtainable size of the crystal into account, Nd: GGG should be the suitable active medium for high average power, repetitive frequency heat capacity laser.

Key words: Heat capacity laser; Transient temperature field; Finite element analysis; Nd:Glass; Nd:YAG; Nd:GGG