

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0037-04

二极管泵浦 Nd:YAG 圆片激光技术研究*

唐晓军, 周寿桓, 秘国江, 李彬彬

(固体激光技术国家重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 介绍了热容激光技术的发展历史及现状, 介绍了固体激光器热容方式工作的基本原理, 报道了二极管泵浦 Nd:YAG 圆片激光器热容方式工作的实验结果。用热像仪测量了激光器工作时增益介质通光面上的温度分布特性; 采用干涉测量的方法测量了工作中的增益介质的与光束传输方向相垂直的方向上的折射率分布特性; 结果表明片状固体增益介质热容方式工作对振荡光束波前畸变影响很小。给出了与光束传输方向相垂直的截面上增益介质的荧光分布。得到输出平均功率达 47.5 W, 此时的光-光转换效率为 17%。

关键词: 热容方式; 二极管泵浦; 片状工作物质

中图分类号: TN248

文献标识码: A

高平均功率高光束质量激光器有着广泛的用途。而二极管激光泵浦的固体激光器由于具有效率高、体积小、维护方便等诸多优点(相对于气体、化学、灯泵固体等激光器而言), 已成为新一代高平均功率激光器发展的重要方向。固体激光增益介质从结构上可分为三种类型, 棒状、片状和板条状, 经过几十年的研究, 各种增益介质结构的激光器获得了长足的发展; 由于圆片状结构的增益介质具有高的 TEM_{00} 模填充率、低的热效应(温度梯度与振荡光束的传播方向平行), 使该种增益介质结构的激光器成为了未来高平均功率高光束质量激光器的重要发展方向^[1]。

近年来由美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)开发出的固体热容激光器发展迅猛, 采用片状结构工作物质, 采用二极管激光面阵泵浦, 迄今平均输出功率已经超过了 30 kW, 是固体激光器目前达到的最高输出。

1995 年, WALTERS 等人在 IEEE 上发表了相关研究文章, 报到了热容限工作激光器的原理试验, 采用闪光灯泵浦、Nd:glass 棒状增益介质, 平均功率 1.4 kW, 工作时间 6 s^[2]。1996 年, LLNL 的 ALBRECHT 等人申请了“高能量猝发固体热容激光器”专利, 明确了热容工作的概念、原理^[3]。LLNL 的固体热容激光器项目得到了美国陆军空间和导弹防御司令部(SMDC)的资助。计划研制输出功率达 100 kW 的固体热容激光器。1998 年在 SPIE 上发表二极管泵浦热容激光器模型, 面泵浦, 增益介质圆片“之”字型排列, 非稳定谐振腔^[4]。2001 年, 闪光灯泵浦的 10 kW 级热容激光器成功演示, 实际输出平均功率为 13 kW, 每个脉冲能量为 640 J, 重复频率 20 Hz, 增益介质为片状 Nd:glass, 输出光束尺寸为 10 cm×10 cm, 光束质量优于 5 倍衍射极限, 靶场试验 6 s, 将 2 cm 厚钢板打了一个直径为 1cm 的孔^[5]。2003 年, 二极管泵浦热容激光器单片输出 2.8 kW, 工作时间 10 s, 增益介质为片状 Nd:GGG, 10 cm×2 cm×5 cm, 用四片二极管面阵泵浦, 每片 720 条, 脉冲重复频率 200 Hz^[6]。2004 年, 二极管泵浦热容激光器输出 30 kW, 工作时间 1 s, 增益介质为四片 Nd:GGG, 串结起来, 每片尺寸为 10 cm×2 cm×10 cm, 每个增益介质均由四片 720 条的二极管面阵泵浦^[7]。

本项研究工作着重探索二极管激光泵浦的 Nd:YAG 圆片的增益分布特性, 热分布特性, 及其对输出光束波前分布的影响情况。采用二极管激光面阵作为泵浦源, 导管透镜耦合; 泵浦光从 Nd:YAG 圆片的一个大面入射, 双程泵浦; 振荡光束从增益介质的另一面抽取能量。通过对增益介质通光面荧光分布、温度分布及折射率分布的测量来确定其增益分布及折射率的变化情况, 探讨高效高光束质量激光输出的优化原则及具体措施。

1 基本理论

固体激光介质因吸收泵浦光而发热, 而散热又要求对其表面进行冷却, 加热与冷却的共同作用导致介质内形成不均匀的温度分布和应力分布。导致激光材料中产生热透镜效应和热致双折射效应。从而引起输出光束质量的下降, 给进一步提高输出功率带来困难。历史上发展了许多改善或补偿激光工作物质热效应的方法,

* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-01-20

作者简介: 唐晓军(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事高功率固体激光技术的研究工作; 北京 8511-36 信箱。

比较有代表性的是将激光工作物质加工成板条状,让光束在激光晶体内呈“之”字型。但是各种方法都有各自的不足,只在一定程度上满足了部分需求。面对超高功率(50 kW 以上)、同时又要具有极好光束质量($M^2 \leq 3$)的需求,各种改善或补偿激光工作物质热效应的方案都面临极大挑战。由美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室提出的让固体激光器以热容方式工作,开拓了一种全新的思路^[3]。激光器工作分成二个独立而按顺序工作的阶段,在激光发射阶段,有源介质完全是绝热的,不存在冷却,在激光发射过程中,废热被沉积在有源介质中,有源介质受热而升温,直到某一最高可允许温度;然后停止激光发射,强制冷却有源介质直到初始温度。这样周而复始,实现固体激光器的热容方式工作。因为有源介质在激光发射过程中受热发生在介质整个体积内,介质内温度梯度较小,并与普通稳态工作的激光介质内梯度方向反相,这样介质内的热应力较小,使得该种方式工作的有源介质对输出光束质量的影响较小,且能接受更强的泵浦功率而不破裂。

经典热容方程确定从激光器可得到的能量。固体介质所能存储的热能由下式确定

$$E_{\text{heat}} = mc_p dT \quad (1)$$

式中: m 为有源介质的质量; c_p 为该种介质的比热, dT 为介质的温度增加量,则式(1)给出了有源介质吸收的热量 E_{heat} 。由介质的低温热容效应给出温度的下限,由介质中能级粒子数重新分布效应给出温度上限,这取决于所选的介质及系统设计,对于典型石榴石中的 Nd^{3+} ,温度的下限和上限分别是 200 K 和 400 K。则释放在介质中的热能,确定了热容固体激光所需的质量。对于一定的激光功率,释放入介质中的热能对于二极管泵浦而言是特别少的。这就是说,固体激光器以热容方式工作只有利用二极管泵浦才能获得所希望的性能,才能走向实用。

利用下面的式子可把释放入有源介质之中的热能 E_{heat} 与激光器输出的能量 E_{out} 联系起来,令 E_{ul} 为激光上能级储能:

$$E_{\text{out}} = \eta_{\text{extr}} E_{\text{ul}} \quad (2)$$

$$E_{\text{heat}} = E_{\text{ul}} X \quad (3)$$

$$E_{\text{out}} = (\eta_{\text{extr}}/X) E_{\text{heat}} = (\eta_{\text{extr}}/X) mc_p dT \quad (4)$$

式中: X 是作为热释放的能量与作为增益的上激光能级中的能量之比; η_{extr} 是激光器抽取效率。(4)式给出了热容方式工作的增益介质所能提供的输出的上限。

从上面的分析还应认识到热容工作原理适用于所有固体介质几何结构(棒状、板条状、圆片状)以及所有抽取方式(自由振荡、Q 开关、锁模等等)。

2 实验装置

如图 1 所示:采用尺寸为 43 mm×43 mm 的激光二极管面阵作为泵浦源,脉冲工作,最高占空比可达 8%;用导管透镜将泵浦光耦合到增益介质中,可起到压缩泵浦光斑截面积的作用,设计了 6.4 倍的压缩比;增益介质选择了 $\phi 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 圆片;谐振腔采用通常的平凹结构。

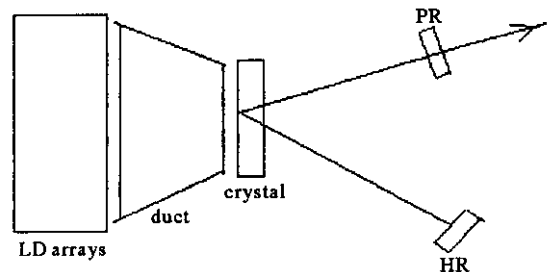


Fig. 1 Schematic diagram of experimental installation

图 1 实验装置示意图

3 实验内容

热容方式工作要求增益介质处在相对绝热的环境中,接受泵浦光照射后废热不是立即被冷却剂带走,而是存储在晶体内部,晶体因此而升温,从晶体的温度变化角度来说,热容方式工作是一种非平衡态工作,变化中的温场会给激光运转带来一系列的问题,不同的泵浦结构,不同的晶体质量,其影响都不一样。下面试图从几个方面入手,探索影响激光正常运转的各种因素。

3.1 增益介质工作时的温度分布测量

晶体处在我们所设计的隔热封装结构中,从一个大面接受泵浦辐射,振荡光与泵浦光的传输方向相同,采用热像仪测量晶体通光面上的温度变化及温度分布变化。

图 2(a)和图 2(b)为用不同的方式描述同一块晶体的同一次测量结果。图 2(a)是二维分布伪彩色显示,可以看出在晶体的通光面上温度分布极为平坦,与通光方向相垂直的温度梯度很小,说明在隔热处理较好的条件下,晶体以热容方式工作内部应力较小,对振荡光束的波前分布影响较小;图 2(b)为径向温度分布曲线,晶

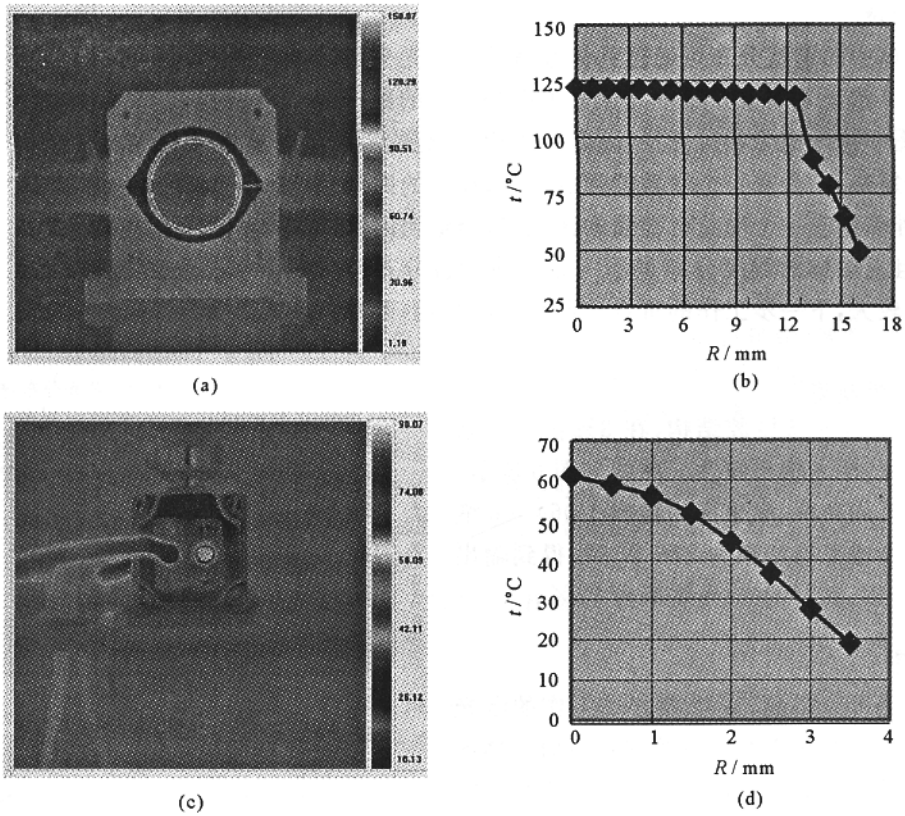


Fig. 2 Temperature profile in the gain medium

图2 增益介质的温度分布测量图

体中心同晶体边缘的温差最大不超过 4.5°C , 而晶体与其装夹结构外壳的温差大于 90°C 。上述测量是某一时刻的结果, 在其工作期限内, 不同时刻的测量结果表明晶体通光面上的温度的相对分布没有明显变化, 只是绝对值不同。

作为对比, 我们也给出了普通工作方式中增益介质的温度分布, 那是稳态分布。图 2(c) 为平面伪彩色编码显示, 图 2(d) 为径向温度分布曲线, 通光面上的温度梯度很大 (晶体中心和边缘的温差大于 40°C), 显然会存在强烈的热透镜效应及热致双折射效应。

3.2 折射率分布测量

测试分两步进行, 首先在没有对增益介质晶体进行泵浦时用相干平行光束测量晶体两通光面间的等厚干涉, 用 CCD 记录所得干涉条纹; 而后对晶体进行泵浦, 记录晶体工作时干涉图的变化。

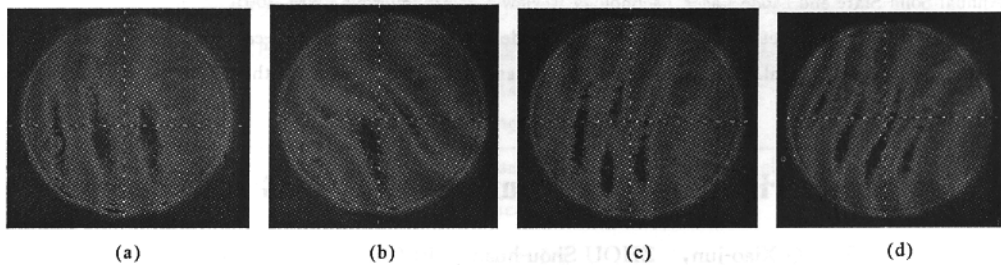


Fig. 3 Interferogram of the gain medium

图3 增益介质的折射率分布测量图

图 3(a) 是晶体没有泵浦时的干涉图, 图 3(b) 则是在晶体经过了一段时间的泵浦后所得的干涉图, 比较两图的差别可以得到晶体中不同位置处的光程差, 它包含了晶体内折射率分布的变化, 也包含了晶体两通光面的面型变化, 总体上反映了存储了废热的晶体对振荡光束的影响。图 3(c) 和图 3(d) 则是将晶体旋转 90° 后的测量结果, 图 3(c) 是未泵浦时的情况, 图 3(d) 是泵浦后的结果。可见在当时的的工作条件下, 片状增益介质热容方式工作其折射率分布变化不超过一个波长 (632.8 nm)。

3.3 荧光分布测量

增益介质晶体中的增益分布可通过晶体泵浦后的荧光分布测量来表征。图 4 给出了增益介质中与通光方向相垂直的截面上的荧光分布,图中横坐标为相对孔径,纵坐标为相对光强。可见荧光分布比较复杂,中心有一个增益较强的区域,在它的四周增益较弱,而最外面则有一个增益也很强的区域,这与最初的设想差异较大,并且与晶体的温度分布也不一致。该增益分布对振荡光束的影响较大,下一步工作的重点是调整泵浦结构,改善增益分布。

3.4 输入输出特性测量

采用如图 1 所示的谐振腔结构,在 3% 占空比条件下,测量了系统的输入输出特性。曲线如图 6 所示,横坐标为泵浦光平均功率,纵坐标为输出 1 064 nm 激光平均功率。在泵浦平均功率为 276 W 时,得到输出平均功率达 47.5 W,此时的光-光效率为 17%。

4 结论及展望

通过上述讨论可以得到,以热容方式工作的激光二极管泵浦固体激光器其增益介质的热效应对振荡光束的影响远小于通常情况下增益和冷却同时进行时的情况;非平衡态的影响可以通过合理的结构设计及泵浦耦合设计加以改善,泵浦结构设计对系统总体的性能影响巨大,是下一步工作的重点;另外,还要对已有实验数据进行进一步细致分析,期望会有更深入明确的结果。

参考文献:

- [1] Vetrovec J. Ultrahigh-average power solid-state laser[A]. Proc of SPIE [C]. 2002, **4760**: 491—505.
- [2] Walters C T, Dulaney J L, Campbell B E, et al. Nd-glass burst laser with kW average power output [J]. *IEEE J Quant Electr*, 1995,**31**(2): 293—299.
- [3] Albrecht G F, George E V, Krupke W F, et al. High energy bursts from a solid state laser operated in the heat capacity limited regime[P]. Patent Number: 5526372, Jun 11, 1996.
- [4] Albrecht G F, Sutton S B, George E V, et al. The heat capacity disk laser[A]. Proc of SPIE[C]. 1998, **3343**:661—666.
- [5] Dane C B, Flath L, Rotter M, et al. Army solid-state laser program: Design, operation, and mission analysis for heat capacity laser[A]. Proc of 14th Annual Solid-State and Diode Laser Technology Review[C]. Albuquerque, NM,2001.
- [6] Rotter M D, Dane C B, Gonzales S, et al. Recent progress in diode-pumped, solid-state heat-capacity lasers[R]. UCRL-JC-151482. 2003.
- [7] Rotter M D, Dane C B, Fochs S, et al. Solid-state heat-capacity lasers: good candidates for the marketplace[J]. *Photonics Spectra*, 2004; 44—52.

Characteristics of diode pumped Nd:YAG disk laser

TANG Xiao-jun, ZHOU Shou-huan, BI Guo-jiang, LI Bin-bin

(National Key Laboratory of Solid-State Laser, P. O. Box 8511-36, Beijing 100015, China)

Abstract: The development and current status of solid-state heat capacity lasers are described. The basic principle of a high power solid-state heat capacity laser is introduced. The experimental results of a diode-pumped Nd:YAG heat capacity disk laser are presented. Temperature profile in the gain medium is obtained. An interferogram of the gain medium is described. Fluorescence profile in the gain medium is described. Result indicates such a gain medium has little effect on the wavefront aberration of the beam. An average power of 47.5 W and an optical efficiency of 17% are obtained.

Key words: Heat-capacity laser; Diode pumped; Disk laser

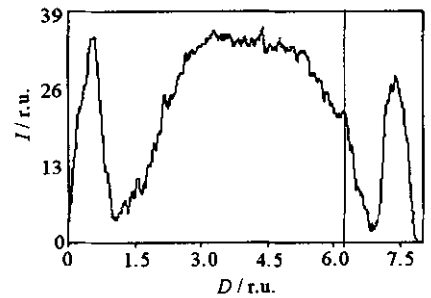


Fig. 4 Fluorescence profile in the gain medium

图 4 荧光分布测量图

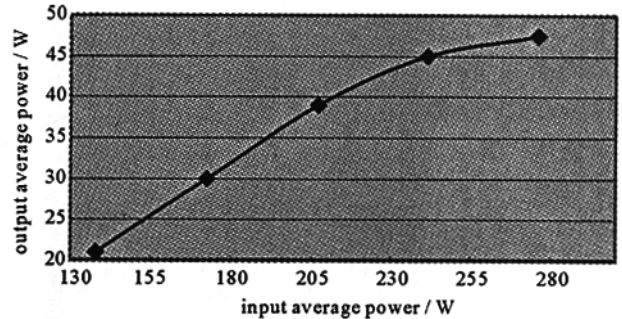


Fig. 5 Experimentally measured output average power vs input average power

图 5 输入输出特性曲线