

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0041-04

# 增益介质可交换的固体热容激光技术

唐晓军, 周寿桓, 秘国江, 吕华昌, 张申金

(华北光电技术研究所固体激光技术国家重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 比较了固体激光器实现高平均功率输出的几种可行方案, 介绍了热容激光技术的发展历史及现状及固体激光器热容方式工作的基本原理, 分析了固体激光器以热容方式工作的优缺点, 提出了一种新型的快速交换增益介质的激光系统设计方案, 并通过模拟试验加以检验。

**关键词** 激光技术; 固体热容激光器; 传导冷却; 交换增益介质

**中图分类号** T248.1 **文献标识码** A

## Study on Solid-State Heat Capacity Laser Technology with Exchangeable Gain Medium

TANG Xiao-jun, ZHOU Shou-huan, BI Guo-jiang, LÜ Hua-chang, ZHANG Shen-jin

(State Key Laboratory of Solid-State Laser, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** The feasible schemes for solid-state laser to realize high average-power output are compared, and the development and the current status of heat capacity laser are described. The basic principle of the solid-state heat capacity laser (SSHCL) is introduced, and the advantage and the disadvantage of the SSHCL are analyzed. A new type laser with rapid gain medium exchange is proposed, and simulated experiments are carried out to test it.

**Key words** laser technique; solid-state heat capacity laser; conduction cooled; gain medium exchange

### 1 引 言

固体激光向高平均功率、高光束质量发展的最主要制约因素是增益介质的热效应。以德国斯图加特大学 Adolf Giesen 为首的研究小组发明的薄片式有源反射镜固体激光器在单片输出超过 1kW 以后, 进一步提高输出, 定标放大, 出现了困难; 以美国波音公司的 John Vetrovec 为首的研究小组提出的紧凑有源反射镜概念设计<sup>[1]</sup>虽然预计了超高平均功率输出的切实可行性, 但存在不少重大的技术难关, 目前还未见到较高平均功率输出的试验报道。

而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和二极管激光面阵抽运, 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。进一步提高输出平均功率, 不存在原则性的技术困难。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<sup>[2]</sup>。2001 年, 闪光灯抽运的 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<sup>[3]</sup>, 2003 年, 激光二极管抽运 Nd:GdGG 固体热容激光器输出激光达 10 kW<sup>[4]</sup>; 2004 年, 激光二极管抽运固体热容激光器输出 30 kW<sup>[5]</sup>。不过固体激光器以热容方式工作的最大缺点就是输出持续时间过短, 增益介质的冷却恢复时间较长, 为解决此问题, 增益介质可交换的概念被引入设计中, 以便克服固体热容激光器工作间歇期过长的问題。

### 2 基本原理

固体激光增益介质因吸收抽运光而发热, 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, 导致增益介质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

**作者简介:** 唐晓军(1971—), 男, 北京人, 中国电子科技集团公司第十一研究所高级工程师, 硕士, 主要从事高功率固体激光技术的研究。E-mail: txj0012@vip.sina.com

输出功率带来困难。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,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,增益介质不冷却,在激光发射过程中,废热被沉积在增益介质中,增益介质受热而升温,直到某一最高可允许温度;然后停止激光发射,强制冷却增益介质直到初始温度;这样周而复始,实现固体激光器的热容方式工作。因为增益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增益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增益介质对输出光束质量的影响较小,且能接受更强的抽运功率而不破裂。

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  $m$  为增益介质的质量,  $C_p$  为该种介质的比热,  $dT$  为介质的温度增加量, 则(1) 式给出了增益介质吸收的热量  $E_{\text{heat}}$ 。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  $\text{Nd}^{3+}$ , 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器所需的质量。

令  $E_{\text{ul}}$  为激光上能级储能, 可把释放入增益介质之中的热  $E_{\text{heat}}$  与激光器输出的能量  $E_{\text{out}}$  联系起来

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

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

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

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,  $\eta_{\text{extr}}$  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上限。

从上面固体热容激光器工作的原理可以看出, 增益介质输出激光的同时迅速升高温度, 在高平均功率条件下, 很快达到温度上限, 输出激光的持续时间只有几秒钟, 而同样的这块增益介质从高温开始冷却, 恢复到初始状态, 需要分钟量级的时间。

为了弥补此种不足, 提出了一种增益介质可交换的设计理念, 达到热容限的增益介质迅速移出谐振腔, 到专门设计的制冷回路进行冷却, 而另外备份的同样的增益介质同时移入谐振腔, 实现短暂间歇的持续激光输出。这种设计思想, 从原理上讲并不复杂, 但是具体实现起来, 兼顾抽运耦合的均匀高效, 谐振腔的精确调校, 冷却增益介质的切实可行, 还是颇具

挑战性的。

首先, 抽运耦合方式要给增益介质的快速移动提供便捷的空间, 其次, 冷却方式要适应增益介质的交替, 就是所有该位置的增益介质共用一套抽运源, 一套冷却系统; 第三, 增益介质的交替变换不能影响谐振腔的准直特性, 对结构设计的精度要求很高。

分析现有的各种抽运耦合方案, 平行光端面耦合方案最为可行, 抽运光和振荡激光在  $Z$  方向传播, 增益介质在  $X-Y$  平面内交替运动, 如图 1 所示。

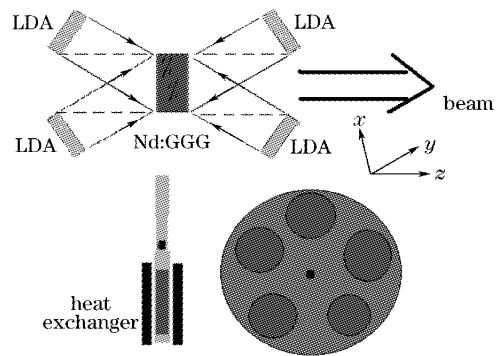


图 1 原理示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the design

按照图 1 所示的结构安排激光二极管抽运源、增益介质、冷却系统、激光传输通道, 可以实现增益介质的快速交换, 显然激光二极管面阵不能紧贴增益介质, 利用紧耦合抽运方案高效抽运增益介质; 从增益介质的侧面耦合抽运光由于受到增益介质运动通道的阻挡, 同样不能实现, 虽然该种抽运方式在片状增益介质较大孔径条件下可以有较高的耦合吸收效率(抽运光在增益介质中的传输路径比端抽运要长)。

同样冷却方案设计也要兼顾高效均匀冷却和增益介质的快速交换, 不同的增益介质要在同一位置利用同一套冷却系统。分析各种制冷方案, 无需冷却结构和增益介质直接接触, 也不需要维持局部压力的静态气体传导冷却方案成了唯一可行的技术途径; 热交换通过增益介质的两个大面进行, 如图 1 所示在  $Z$  方向进行热交换, 同样要让出增益介质的侧面, 保证增益介质在  $X-Y$  平面内可沿特定路径自由移动。实现方法就是用高度抛光、平整度非常好的热沉紧贴增益介质的两个大面, 不直接接触, 保持非常小的距离(小于 0.1 mm), 中间填充高热导间质(例如氦气), 增益介质和热沉之间的热交换通过直接辐射和中间间质的传导实现。热沉内部采用微通道结构, 通过冷却水制冷和控温, 可与激光二极管面阵的制冷控温兼容, 如图 2 所示。

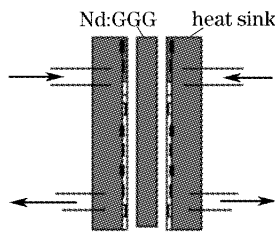


图 2 冷却器示意图

Fig. 2 A schematic diagram of heat exchanger

至于增益介质交换对谐振腔准直特性的影响,如图 3 所示,假设增益介质装夹结构的机械定位精度控制在 0.05 mm。以此为基准分别考虑振荡光束反射通过增益介质和透射通过增益介质两种情况,以增益介质的通光孔径为  $\phi 150$  mm,厚度 10mm 为例,经过简单计算可知,反射式由于增益介质交换引起的定位变化可导致反射光束偏转大于  $1'$ ,这足以引起谐振腔准直特性的显著变化,导致输出功率的明显波动。所以反射式进行增益介质的交换困难巨大。

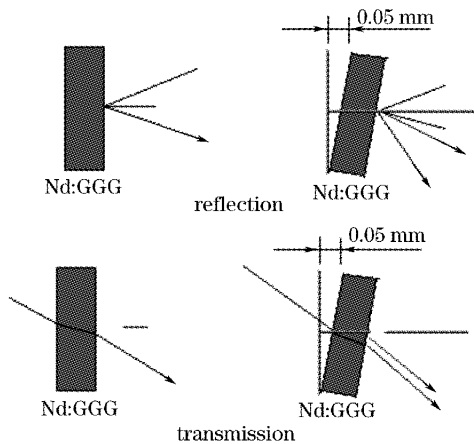


图 3 准直特性分析

Fig. 3 Analysis of collimation

再考虑透射式的情况,先假定增益介质的两个端面是平行的,增益介质交换引起的定位变化不会改变透过增益介质的激光束的传输方向,只引起光束位置的平移,利用上述数据,不难计算出这种平移只有几个微米,对于通光孔径为  $\phi 150$  mm 的光束而言,影响甚小。

考虑到实际增益介质的端面平行度加工有一个精度限制,一般在  $10''$  左右,不失一般性,假设增益介质为楔角  $10''$  的光楔,其他条件同上,如图 4 所示。计算可知,透过增益介质的光束,其传输方向因增益介质交换引起的偏转也在  $10''$  量级。在谐振腔设计上考虑到这个因素,并进一步提高机械定位精度和

增益介质端面的平行度,在透射式条件下,增益介质的交换设计不会导致谐振腔准直特性的显著变化。

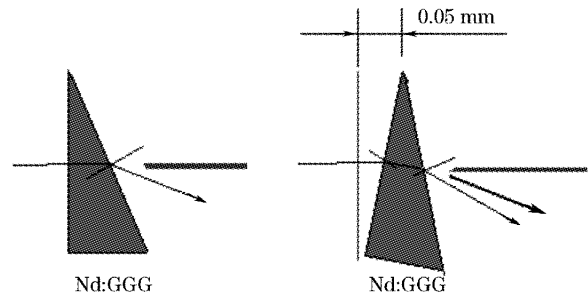


图 4 偏转示意图

Fig. 4 Analysis of deflexion

### 3 模拟实验装置介绍

采用片状结构的 Nd:GdGG 作为增益介质,高占空比的激光二极管面阵双向抽运,棱镜透镜组整形变换耦合,以实现均匀抽运,谐振腔结构采用普通的平凹腔设计,增益介质模块放置了两片可互换的增益介质,采用静态气体传导冷却技术冷却增益介质,两片增益介质晶体可交替进行激光输出,冷却恢复。原理如图 5 所示。

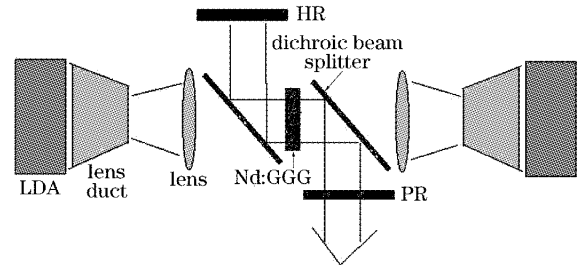


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 A schematic diagram of experimental setup

### 4 结果及讨论

在输出功率达到 264 W 的条件下,测量了增益介质的温度分布(图 6)以及荧光分布(图 7)。

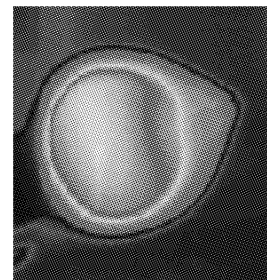


图 6 增益介质的温度分布测量图

Fig. 6 Temperature profile in the gain medium

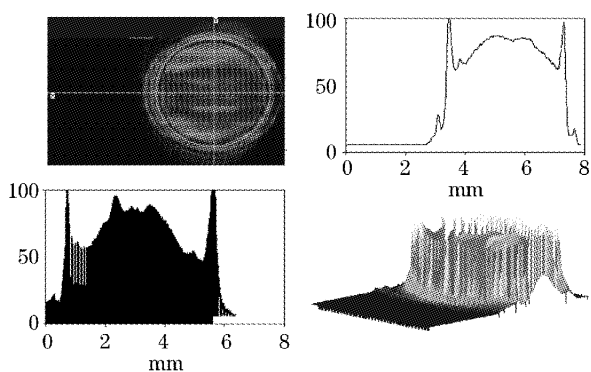


图 7 荧光分布测量图

Fig. 7 Fluorescence profile in the gain medium

温度分布是在输出激光 3 s 以后用红外热像仪测量的, 荧光分布则是在同样注入条件下测量的, 显然此种条件下增益均匀性不很理想, 不过也可以初

步验证增益介质的可交换设计效果。实验中, 增益介质的交替引起输出功率的变化在 10 W 左右, 也实现了比自然散热快一倍的冷却速度, 增益介质自然散热一分钟下降 20 °C, 传导冷却一分钟下降 40 °C。

## 参 考 文 献

- 1 J. Vetrovec. Ultrahigh-average power solid-state laser [C]. *SPIE*, 2002, **4760**: 491~505
- 2 G. F. Albrecht, E. V. George, W. F. Krupke *et al.*. High energy bursts from a solid state laser operated in the heat capacity limited regime [P]. United States Patent Number: 5526372, 1996
- 3 M. D. Rotter, C. B. Dane. A 10-kW solid-state heat-capacity laser system installed at HELSTF, white sands missile range [R]. UCRL-TB-136126. 2001
- 4 M. D. Rotter, C. B. Dane, S. Gonzales *et al.*. Recent progress in diode-pumped, solid-state heat-capacity lasers [R]. UCRL-JC-151482. 2003
- 5 M. D. Rotter, C. B. Dane, S. Fochs *et al.*. Solid-state heat-capacity lasers: good candidates for the marketplace [J]. *Photonics Spectra*, 2004, **38**(8): 44~52