·特约报告 ·

文章编号:1001-5078(2006)增刊-800-04

# LD 抽运 Nd GGG热容激光器实验研究

唐晓军<sup>1</sup>,张申金<sup>2,1</sup>,秘国江<sup>1</sup>,吕华昌<sup>1</sup>,周寿桓<sup>1,2</sup>

(1.固体激光技术国家重点实验室,北京 100015; 2.西安电子科技大学技术物理学院,陕西 西安 710071)

摘 要:报道了激光二极管抽运单片 Nd GGG热容激光器,实验获得平均输出功率为 1.49 kW 的激光输出,光 -光转换效率为 24.1%。同时对介质不同截面内抽运光、温度及温度梯度分 布的瞬态三维分布进行了计算模拟。

关键词:热容激光器;激光二极管;端面抽运;Nd GGG;抽运光分布;温度分布 中图分类号:TN248.1 文献标识码:A

## Experiment Study of LD Pumped Nd GGG Heat Capacity Laser

TANG Xiao-jun<sup>1</sup>, ZHANG Shen-jin<sup>2,1</sup>, B I Guo-jiang<sup>1</sup>, LÜHua-chang<sup>1</sup>, ZHOU Shou-huan<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Solid-State Laser, Beijing 100015, China;

2 School of Technology Physics, Xidian University, Xi an 710071, China)

**Abstract:** A laser diode end pumped single chip Nd GGG heat capacity laser was designed and the output power was 1. 49kW with an optical-optical efficiency of 24. 1%. The transient three-dimensional pump distribution, temperature and temperature gradient distribution in medium of heat capacity laser are simulated by the ray tracing method and the finite element method

Key words: heat capacity laser, laser diode; end pumped; Nd GGG; pump distribution; temperature distribution

## 1 引 言

近几年来,固体热容激光技术研究十分活跃,自 从 1995年 Walters报道了以热容模式工作为原理激 光器的实验以来<sup>[1]</sup>,固体热容激光器的指标不断被 刷新,截止到 2004年,报道的输出功率已经超过了 30kW<sup>[2-3]</sup>。与常规的高平均功率固体激光器的工 作方式不同<sup>[4]</sup>,热容激光器工作时,不对介质进行 冷却,将废热贮存在介质内,不工作时再对介质进行 冷却,将废热贮存在介质内,不工作时再对介质进行 冷却,其作时间和冷却时间交替进行<sup>[5]</sup>。这种工作 方式的优点是:工作时,介质表面受到压应力,而不 是张应力,介质内的温度梯度、热应力和光程畸变也 相对较小,激光光束质量较高,输出平均功率可大幅 提高。

本文对激光二极管 (laser diode, LD)阵列端面 抽运 Nd GGG热容激光器进行了初步的理论和实验 研究,实验获得了单片 Nd GGG平均功率为 1.49 W 的激光输出,光 - 光转换效率为 24.1%。采用 光线追迹法,同时考虑了 LD 在快轴和慢轴方向的 发散特性,得到介质不同截面内抽运光的三维分布; 采用有限元法,并考虑了介质内不均匀分布的内热

作者简介:唐晓军(1971-),男,高级工程师,一直从事二极管 抽运高功率固体激光技术研究工作,曾负责重点任务 RCG-442B激 光器、九五高效能固体激光器、高功率 Nd YAG激光复合技术等课 题,发表论文 5篇,获国家科技进步奖二等奖一项。 收稿日期:2006-06-27;修订日期:2006-07-19

源,得到介质内温度和温度梯度的瞬态三维分布。

2 设计模型

LD端面抽运 Nd GGG热容激光器的结构如图 1所示,取介质的中心为坐标系的原点,z轴沿激光 传输方向。

实验中采用 70 ×10 mm的 Nd GGG介质。谐 振腔为平凹腔,全反镜为平凹镜,曲率半径为 1m,输 出耦合镜的透过率为 5%。采用中科院半导体所 生产的 LD 阵列,LD 阵列在快轴方向和慢轴方向 半高全宽的发散角分别为 3 和 10°。每个 LD 阵 列由 33 ×4个 LD条组成,在 LD 阵列后面放置焦 距为 200 mm的平凸柱透镜,对慢轴方向的光束进 行压缩。4个 LD 阵列对称排布,对 Nd GGG的两 个端面对称抽运,以期望在介质内得到较为均匀 的增益分布。



图 1 LD抽运 Nd GGG热容激光器结构 Fig 1 structure of LD pumped Nd GGG heat capacity laser 1. plano-concave reflector, 2 output mirror, 3 LD; 4. plane convex lens, 5. Nd GGG

#### 3 计算模拟结果

当 LD 抽运光的传播方向为 z 轴时,则 LD 抽运 光基横模的光强分布表示为<sup>161</sup>:

$$I(x, y, z) = I_0(x, y, z) \cdot \exp \left[ (-2) \left( \frac{x^2}{\frac{2}{x(z)}} + \frac{y^2}{\frac{2}{y(z)}} \right) \right]$$
(1)

其中, L (x, y, z)为抽运光束中心位置处光强; x (z)和 y(z)分别是厄米 高斯光束在 z处沿 x轴和 y轴的半宽度。

根据介质的吸收特性,介质内的内热源 q<sub>v(x,y,z)</sub> 可表示为:

$$q_{v(x, y, z)} = \times I_s \times \times e^{\times L}$$
(2)

式中, 为转化为热的光能在吸收的总抽运光能中 所占的比例; <u>1</u>为经过柱透镜压缩后,抽运光在介质 表面分布, 为 Nd GGG的吸收系数;L为抽运光在 介质内传播距离。

介质内的温度和温度梯度分布与介质的物性参数、几何结构及边界条件等有关。在圆柱坐标系中, 固体介质的瞬态热传导方程为<sup>171</sup>:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{C_p} \left[ \frac{\partial T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z^2} + \frac{q_v}{k} \right]$$
(3)

式中, *r*和 *z*分别为介质的半径和轴线方向; *T*为介 质内的温度; *t*为时间; *k*、、*C<sub>p</sub>*分别为介质的导热系 数、密度、比热容; *q*,为介质内的内热源。介质的初 始温度为 25,侧面弱约束,以便于固定介质,同时 有利于介质自由膨胀。

根据式 (1),同时考虑 LD在快轴和慢轴方向的 发散特性,利用光线追迹法,得到介质端面的抽运光 分布,如图 2所示,其中,四个二极管阵列的抽运光 功率为 6 19 kW。由计算模拟的结果可知:在 x轴 方向,抽运光近似为高斯分布,从介质中心向两侧边 缘,强度逐渐降低;在 y轴方向上,抽运光近似为平 顶分布。经过拟合,介质端面抽运光的分布近似为:

 $I_{(x, y)} = (1 \times 10^{6}) \times e^{-\frac{2x^{2}}{0.03^{2}}}$ x [ - 0 035, 0 035 ]; y [ - 0 02, 0 02 ] (4)



Fig 2 end pump Nd GGG distribution

结合式 (1) ~式 (4),计算模拟得到介质任意截 面内的抽运光分布。垂直于 z轴不同截面内抽运光 分布分别如图 3、图 4和图 5所示,其中取 = 0.4mm<sup>-1</sup>, =50%。

从图 3~图 5中可以看出:在垂直于 z轴的不同 截面内,抽运光分布与介质表面抽运光分布规律基 本相同。由于介质的吸收特性,抽运光成两端面强、 中心低的不均匀分布。由于抽运光的发散特性,在 介质的 x轴、y轴方向,抽运光成中心强、两侧低的 不均匀分布。从以上讨论可以看出:由于 LD在快 轴和慢轴方向的发散特性及介质的吸收特性,造成 了介质内抽运光分布的不均匀,进而在介质内造成 了不均匀分布的内热源。



图 3 z=0mm截面内抽运光分布





图 4 z=2mm 截面内抽运光分布

Fig 4 pump distribution of z = 2mm



图 5 z=4mm 截面内抽运光分布

2

Fig 5 pump distribution of z = 4mm

利用有限元法,并考虑介质内不均匀分布的内 热源,取介质的四分之一作为计算模拟的实体模型, 得到 1. 2s时,介质内温度以及温度梯度的三维分 布,单位分别为 和 ·m<sup>-1</sup>,分别如图 6、图 7所 示,介质的初始温度为 25 。



图 6 介质内温度场分布

Fig 6 temperature distribution of medium



图 7 介质内温度梯度分布

Fig 7 temperature gradient distribution of medium

从图 6~图 7中可以看到,介质内温度的最大 值为 78 1 ,出现在介质两端面的中心处,温度分布 沿着 x轴方向逐渐降低,在 z轴方向为两端面高、中 心低,在 y轴方向上明显存在抽运区和非抽运区。 在非抽运区与抽运区交界处,温度迅速降低,在非抽 运区的大部分区域内,温度还保持在 25 的初始温 度,这主要是因为抽运光的抽运时间较短。

显然,在 x轴和 y轴方向,存在较大的温度梯度,这使得介质内的应力分布复杂化,除中心高温处存在压应力外,在非抽运区与抽运区交界处还存在

较大的张应力。原因是矩形孔径的抽运光与圆形孔 径的介质难以达到较好的形状匹配,介质内的抽运 分布直接影响到了增益介质的应力分布。这种较大 的温度梯度的存在,限制了激光器的输出功率及工 作时间,消除这种温度梯度,是下一步改进激光器结 构设计的重点。

#### 4 实验结果

采用如图 1所示的实验装置,激光器工作 1.2s 后,实验测得介质端面中心温度为 81.0 ,与计算 模拟的值相近。



#### 图 8 输出功率与抽运功率关系

Fig 8 output power vs pump power



图 9 热容激光器激光输出波形

Fig 9 output laser pulse of heat capacity laser

从实验和计算模拟的结果可以看出:介质的最高温升不超过 60 ,比固体热容激光器可容忍的 100~200 的温升小很多,但考虑到上文计算模拟 给出的结果,在介质表面会存在较大的张应力,为防

止增益介质破裂,应该控制热容激光器的工作时间 不超过 1.2 % 测得激光器输出功率与抽运功率关 系如图 8所示,其中激光器工作时间为 0.5 % 抽运 功率为 6.19kW 时,实验测得激光器输出平均功率 为 1.49kW,光光转换效率为 24.1%,激光输出波 形如图 9所示。

#### 5 结 论

本文报道了 LD 阵列端面抽运高平均功率 Nd GGG热容激光器,采用光线追迹法和有限元法对 介质不同截面内抽运光、温度及温度梯度的瞬态三 维分布进行了模拟,模拟同时考虑了 LD 在快轴和 慢轴方向的发散特性及介质内抽运光分布的不均匀 性。实验获得了 1.49kW 的激光输出,光 - 光转换效 率为 24.1%,实验验证了计算模拟结果的正确性。

### 参考文献:

- W alters C T, Dulaney J L, Campbell B E, et al Nd glass burst laser with kW average power output[J]. IEEE J. Quant Electron, 1995, 31(2): 293 - 299.
- [2] Dane C B, Flath L, Rotter M, et al A my 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.
- [3] Rotter M D, Dane C B, Fochs S, et al Solid state heat-capacity lasers: good candidates for the marketp lace
   [J]. Photonics Spectra, 2004: 44 - 52
- [4] Albrecht G F, Sutton S B, et al Solid State Heat Capacity Laser[J]. Laser and Particle Beams, 1998 16(4): 605 - 625.
- [5] Rotter M D, Mitchell S Diode-pumped Nd GGG laserfirst light [J]. Laser Science and Technology. 2002, (12): 1.
- [6] 宁继平,蔡志强,陈志强,等.LD侧面抽运的 Nd YAG 激光器抽运均匀性研究 [J].中国激光,2004,31(4):
  390-394.
- [7] 赵镇南. 传热学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2002.