

## 热助推泵浦 Nd:YAG 激光器热性能研究

晏思平,王德良,路英宾,王颖麟,高剑波,陈德章,卿光弼  
(西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

**摘要:**采用热助推泵浦技术,实现了 885 nm LD 热助推泵浦的板条 Nd:YAG 脉冲激光器运转。从粒子跃迁机理上对热助推泵浦方式做了理论分析,并通过实验验证了 885 nm 热助推泵浦相对于 802 nm 泵浦的优势。885 nm 热助推泵浦的光光效率比 802 nm 泵浦方式提高了 26%,废热产生则减少了约 23%,结果表明热助推泵浦方案在热性能相对传统泵浦有明显的优势。

**关键词:**激光器;热效应;热助推泵浦

**中图分类号:**TN248.1 **文献标识码:**A

### Study on thermal characteristics of Nd:YAG lasers under thermally boosted pumping

YAN Si-ping, WANG De-liang, LU Ying-bin, WANG Ying-lin, GAO Jian-bo  
CHEN De-zhang, QING Guang-bi  
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Thermally boosted pumping scheme is adopted, pulse laser emission successfully is demonstrated in a slab Nd:YAG crystal under LD thermally boosted pumping at 885 nm. Theoretical analysis of thermally boosted pumping has been done according to particle transition, experimental comparing between 885 nm thermally boosted pumping and 802 nm traditional pumping has been done. The optical-to-optical conversion efficiency has increased 26% than traditional pumping, and heat generated is about 23% less than traditional pumping. Results reveals that thermally boosted pumping scheme has more advantage in thermal characteristics than traditional pumping scheme.

**Key words:** lasers; thermal effects; thermally boosted pumping

#### 1 引言

热助推泵浦方式是由以色列科研人员 Raphael Lavi 等提出的<sup>[1]</sup>,是指将处于由基态能级受热分裂出的斯塔克能级上的激活离子直接抽运到激光上能级 $^4F_{3/2}$ ,而传统泵浦方式是将基态能级中的激活离子抽运到能级 $^4F_{5/2}$ ,再弛豫到 $^4F_{3/2}$ 能级。热助推泵浦方式相比于传统泵浦方案能减少泵浦光光子和激光光子间的斯托克斯频移,提高斯托克斯效率,将激射过程中产生的废热降低,能有效缓解 Nd:YAG 激光晶体中的废热问题。目前 885 nm 热助推泵浦方式已经获得了连续的 1064 nm<sup>[2]</sup>, 1340 nm<sup>[3]</sup>, 946 nm<sup>[4]</sup>的激光输出,并已实验验证了 885 nm 泵

浦方式相对传统 808 nm 泵浦在阈值、斜率效率以及产生废热等方面具有优势<sup>[5]</sup>。国外相关报道大部分都是关注连续工作方式端面泵浦的激光器系统,要得到大功率的激光输出,仍需要采用侧面泵浦方式。脉冲工作方式在激光测距,激光制导方面有很广泛的应用。本文对 885 nm LD 热助推泵浦的板条 Nd:YAG 脉冲激光器进行了实验研究,并与传统的 $^4F_{5/2}$ 泵浦方式在热性能方面进行了对比实验。

基金项目:预研基金项目(No. 9140A02012107BQ39)资助。

作者简介:晏思平(1985-),男,硕士研究生,现主要从事全固态激光技术的研究。E-mail:yansiping@gmail.com

收稿日期:2009-07-07;修订日期:2009-08-27

## 2 理论模型

从粒子跃迁理论可知 885 nm 泵浦方式是 Nd:YAG 四能级系统中效率最高的一种泵浦方式。下面估算了 885 nm 和 808 nm 两种泵浦方式下,晶体在泵浦过程中废热的产生情况。晶体内产生的总热量为:

$$P_H = P_H(\text{NR}) + P_H(\text{RAD}) \quad (1)$$

其中,  $P_H(\text{NR})$  为无辐射跃迁产生的热量;  $P_H(\text{RAD})$  为受激辐射产生的热量。

$$P_H(\text{NR}) = (1 - \eta_{qe})P_{\text{abs}} \quad (2)$$

$P_{\text{abs}}$  为吸收的泵浦光功率,  $\eta_{qe}$  为量子效率。

$$P_H(\text{RAD}) = P_H(\text{QU}) + P_H(\text{Stokes}) \quad (3)$$

$P_H(\text{QU})$  是由于固体激光器中存在的浓度猝灭、频率上转换等寄生效应所产生的热量;  $P_H(\text{Stokes})$  为斯托克斯频移所产生的热量, 其中:

$$P_H(\text{QU}) = \eta_{qe}(1 - \eta_{qu})P_{\text{abs}} \quad (4)$$

$$P_H(\text{Stokes}) = \eta_{qe}\eta_{qu}[1 - \lambda_p/\lambda_l]P_{\text{abs}} \quad (5)$$

其中,  $\eta_{qu}$  是描述由于浓度猝灭、频率上转换等效效应所产生的热量的系数。将式(4)和式(5)综合得到:

$$\frac{P_H}{P_{\text{abs}}} = 1 - (\eta_{qe}\eta_{qu})\frac{\lambda_p}{\lambda_l} \quad (6)$$

在吸收相同泵浦功率  $P_{\text{abs}}$  时, 在不同波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  泵浦下产生的废热之比为:

$$\frac{P_{H1}}{P_{H2}} = \frac{\lambda_l - \eta_{qe1}\eta_{qu1}\lambda_{p1}}{\lambda_l - \eta_{qe2}\eta_{qu2}\lambda_{p2}} \quad (7)$$

由于热助推泵浦方式在理论上不存在量子效率损耗, 所以量子效率系数取 1<sup>[1]</sup>, 808 nm 泵浦方式的量子效率系数取 0.90<sup>[1]</sup>, 系数  $\eta_{qu}$  都取 0.95, 激光波长为 1064 nm, 泵浦波长为 885 nm 和 808 nm, 在吸收泵浦光功率  $P_{\text{abs}}$  相同的时候, 885 nm 热助推泵浦方式产生废热的情况较传统 808 nm 泵浦方式要减少约 40%。

## 3 实验

实验采用的脉冲 Bar 条分两组排列, LD 阵列(中国科学院半导体研究所制)发光区域面积为 5 mm × 23 mm, 该面阵总峰值功率为 1600 W, 脉宽 250 μs, 中心波长为 885 nm (15 °C), 线宽为 6.8 nm。为了对比验证热助推泵浦方式相比于传统 808 nm 泵浦方式在斜率效率和产生废热等方面的优势, 定制了与 885 nm 泵浦模块相同结构参数, 波长为 802 nm (16 °C) 的半导体泵浦模块。选择 802 nm 泵浦模块是因为 Nd:YAG 在 802 nm 处的吸收系数和 885 nm 处相当, 802 nm 与 885 nm 泵浦能在晶体内保持相同的增益分布; 并且 802 nm 与

808 nm 泵浦光波长  $\Delta\lambda$  差仅为 6 nm, 由式(7)可知 802 nm 与 808 nm 泵浦时晶体内产生的废热相当, 802 nm 能够代表 808 nm 泵浦与 885 nm 泵浦进行热性能的比较。晶体为东骏激光有限公司提供的掺杂浓度为 1.2% 的 Nd:YAG, 尺寸为 5 mm × 8 mm × 30 mm, 两端镀 1064 nm 增透膜, 其余侧面打毛。激光器系统工作频率为 1 Hz, 采用散热片被动散热。由于 Nd:YAG 在 885 nm 处的吸收谱线宽度为 2.5 nm, 为保证 885 nm LD 发射谱线与晶体吸收谱线有最大的交集, 采用了 LabTech 公司的 H500 型水冷器, 对泵浦模块严格控温以减小 LD 泵浦模块中心波长的漂移。LD 阵列电源采用 BeamTech, Inc 的 LAB 9800 Laser Diode Driver 电源。激光器谐振腔采用平平腔, 腔长 80 mm, 输出镜透过率为  $T = 35\%$ , 实验装置如图 1 所示。

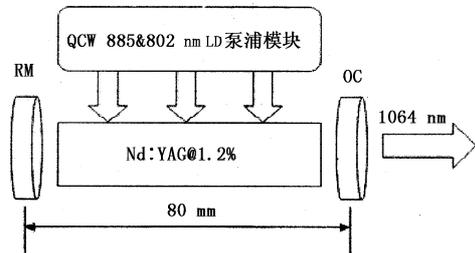


图1 885 nm LD 泵浦板条 Nd:YAG 激光器装置

Fig. 1 schematic of 885 nm LD side-pumped slab Nd:YAG laser

## 4 结果

图 2 是激光系统在 885 nm LD 与 802 nm LD 两种不同泵浦方式下所获得的输入输出特性。由于两种波长的泵浦光吸收系数相当, 约为  $1.7\text{cm}^{-1}$ , 吸收长度约为 8 mm。在靠近起振阈值的情况下, 相对吸收光的光效率区别不是很明显。当吸收能量越来越大的时候, 885 nm 泵浦方式光效率的优势越来越明显, 在吸收能量都达到 250 mJ 时, 802 nm 泵浦方案与 885 nm 泵浦方式光效率分别为 23% 和 29%。

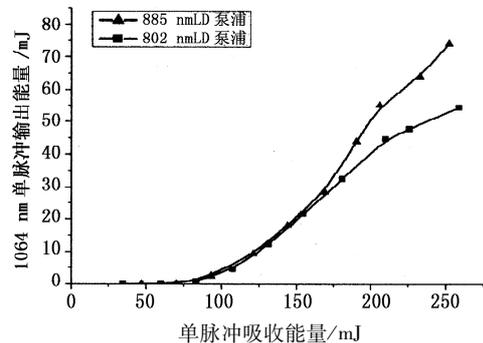


图2 两种泵浦方案的输入输出特性(相对吸收光)

Fig. 2 characteristic curve of two pumping scheme (Vs absorption)

理论计算得出,885 nm 热助推泵浦方式产生的废热较 808 nm 传统泵浦方式要少约 40%。接下来,将通过实验验证热助推泵浦方式在产生废热方面的优势。由于实验中用的两个泵浦模块的输入输出特性有细微的差别,并考虑到两泵浦模块线宽 6.8 nm 左右,虽然 802 nm 与 885 nm 的吸收系数相当,但在 802 nm 处的吸收线宽要远宽于 885 nm 处的 2.5 nm,通过调节电流,最终,802 nm LD 模块工作在 105 A 电流条件下与 885 nm LD 模块工作在 130 A 电流条件下,晶体吸收了相同的单脉冲能量 225 mJ。实验中将激光器工作频率提高到 10 Hz,激光器工作 10 min,用点温计测量了晶体在这一过程中的温升情况,实验结果如图 3 所示。

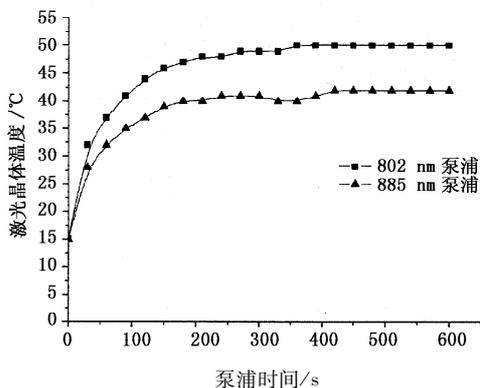


图3 两种泵浦方案的温升情况

Fig. 3 temperature increasing of two pumping scheme

实验室环境温度为 15 °C,当工作 10 min 后,885 nm 泵浦下 Nd:YAG 晶体表面温度稳定在 42 °C,而 802 nm LD 泵浦下晶体表面温度则稳定在了 50 °C。根据热力学当中的热传导、对流和热辐射理论可知,当晶体内部传递到晶体表面的热量与晶体通过热传导、对流热辐射方式传递到周围环境当中的热量相当时,晶体表面温度才会趋于恒定,而热传导、对流和热辐射所传递的热量  $Q$  和晶体与环境温度梯度  $\Delta T$  成正比关系。通过该理论,可以间接得

出 885 nm 泵浦方式的发热量要比 802 nm 泵浦方式减少了约 23%。

## 5 结论

实验表明从基态的热斯塔克能级直接将钕离子抽运到激光上能级的热助推泵浦方式相比传统的 $^4F_{5/2}$ 泵浦方式而言,在光光效率和废热产生方面都有显著的优势。废热减少约 23%,与理论计算的理想结果有较大差距,主要是半导体泵浦模块的线宽 6.8 nm 与 885 nm 处的吸收线宽 2.5 nm 相差较大造成,这一因素也导致了 885 nm 泵浦方式的光光效率不高,采用窄线宽的 885 nm LD 泵浦源和改进泵浦结构以增加对泵浦光的吸收都能有效提高光光效率并进一步减小发热量。此外,采用吸收系数更大、吸收线宽更宽(如 Nd:YVO<sub>4</sub> 等)和高掺杂浓度的激光晶体会利于提高热助推泵浦激光器的性能。

## 参考文献:

- [1] Lavi R, Jackel S. Thermally boosted pumping of neodymium lasers [J]. Applied Optics, 2000, 39 ( 18 ): 3093 - 3098.
- [2] Lavi R, Jackel S, Tal A, et al. 885 nm high-power diodes end-pumped Nd: YAG laser [J]. Opt. Communication, 2001, 195 (5) :427 - 430.
- [3] Pavel N, Taira T. Efficient 1.06 and 1.34  $\mu\text{m}$  laser emission of highly-doped Nd:YAG under 885 nm diode pumping into the emitting level [C]//IEEE, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005:71 - 71.
- [4] Lupei V, Aka G, Vivien D. Quasi-three-level 946 nm CW laser emission of Nd:YAG under direct pumping at 885 nm into the emitting level [J]. Opt. Communication, 2002, 204, 399 - 405.
- [5] Goldring S, Lavi R, Tal A, et al. Direct pumping of four level lasing materials[J]. SPIE, 2003, 4968:74 - 78.