

# 多波长泵浦传导冷却激光器的宽温稳定输出

俞嘉威, 王超\*

长春理工大学物理学院, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2024年5月8日; 录用日期: 2024年6月10日; 发布日期: 2024年6月17日

## 摘要

本研究采用多波长bar条模块, 有效的抑制了温度漂移对激光输出稳定性的影响, 控制晶体的热效应。通过一体化热沉结构设计, 改善激光器温控系统控温压力, 减少冷却传导系统体积、重量。设计了LD阵列泵浦源、泵浦结构以及传导冷却方式, 实现全固态激光器的无水冷却稳定输出。激光器重复频率10 Hz, 在控温30°C时连续工作时间3 min, 获得平均脉冲能量17.03 mJ, 最大脉冲能量17.5 mJ, 能量不稳定性3.13%, 可在10°C~40°C范围内稳定输出。

## 关键词

多波长泵浦, 全固态激光器, 传导冷却

# Wide Temperature Stable Output of a Multi-Wavelength Pumped Conductively Cooled Laser

Jiawei Yu, Chao Wang\*

Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: May 8<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 10<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 17<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this study, a multi-wavelength bar module is used to effectively suppress the influence of temperature drift on the laser output stability and control the thermal effect of the crystal. Through the integrated heat sink structure design, the temperature control pressure of the laser tempera-

\*通讯作者。

ture control system is improved, and the volume and weight of the cooling conduction system are reduced. The LD array pump source, pump structure and conduction cooling mode are designed to realize the stable output of all solid-state laser without water cooling. The repetition rate of the laser is 10 Hz, the continuous working time is 3 min when the temperature is controlled at 30°C, the average pulse energy is 17.0 mJ, the maximum pulse energy is 17.5 mJ, and the energy instability is 3.13%. The laser can be stably output in the range of 10°C~40°C, which can meet the applicable test of various platforms.

## Keywords

Multi-Wavelength Pump, DPL, Conductively Cooled

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当前激光二极管泵浦固体激光器已经在工业、航天、军事等许多领域得到广泛的应用, 其凭借其效率高、寿命长、能量损耗较低、热负载较少、质量较轻、体积较小等优势在激光制导、激光测距、激光雷达和激光指示等方面获得大量的使用。这些领域中的应用对全固态激光器提出了严苛的高低温、环境适用性以及质量功耗方面的应用要求[1]。

在 2004 年, 唐志强等人就报道了一台 1 J、500 Hz、15 ns 的 LD 泵浦的电光调 QNd:YAGMOPA 系统, 其中使用了三级放大级, 因此具有很大的体积[2]。随着当前机载、弹载、甚至星载激光器的不断发展, 其对激光器小型化、集成化的要求越来越高, 因而通过多级放大方案来实现更高重频、更大能量的激光输出就不适宜, 这对于激光器的本振输出提出了更高的要求。

自传导冷却这一散热方式被证实可行以来, 人们已经使用多种方案试图减少热效应, 以此对传导冷却全固态激光器进行研究, 其中包括改善增益介质、改善光场分布的均匀性以及腔内补偿。2005 年 Nieuwsma 和 Wang 开发了一种用于高空机载瞄准系统的 4 面泵浦固体激光器[3]。这些二极管 bar 条和激光棒通过位于吊舱外壳内循环气流中的散热片进行传导冷却。通过使用非稳定 OPO 腔设计, 获得了 20 Hz 峰值输出为 350 mJ、11.8 mm·mrad 的激光输出。2009 年 Ming Ling 等研究了一种新型三角形钳位 - 网格状结构电导冷却棒状 Nd: YAG 激光器, 获得了 12 ns、98 mJ、20 Hz 的激光输出[4]。

2011 年, Liu Qiang 等通过双棒串接的方式, 采用变反射率镜(VRM)和高反射凸镜(HRM)作为腔镜来补偿激光棒的热透镜效应, 在两个激光棒之间放置一个的石英旋转器来补偿热退偏, 在 100 Hz 下获得了高达 388 mJ 的输出, 斜率效率为 36%。脉冲宽度为 15 ns [5]。2013 年 C. Evangelatos 等通过 885 nm 直接泵浦多段键合晶体棒中的 Nd<sup>3+</sup> 离子至上激光能级来优化光束的能量分布, 减轻了激光器的热效应, 在 100 Hz 处实现 2 mJ 的被动 Q 开关脉冲能量, 保持 M<sup>2</sup> 优于 1.3 的高斯模式分布[6]。2015 年 Qi Yang 等设计了一种自制的泵浦模块来均匀化泵浦强度, 开发了一种高能量、短脉冲宽度的紧凑型二极管侧面泵浦传导冷却 Nd:YLF 板条激光器, 在重复频率 50 Hz 下获得了 160 mJ、9 ns 的 1047 nm 红外光[7]。2016 年, QIU J.S.等采用了分束放大合束的方案, 激光系统的能量提取效率为 50.68%, 在重复频率为 100 Hz 时, 单脉冲能量为 9.25 μJ 的单纵模种子注入下, 获得了 3.36 J 的脉冲能量, 脉冲宽度为 7.1 ns, 远场光斑为衍射极限的 1.71 倍, 能量稳定性(RMS)为 1.07% [8]。2017 年 Atsushi Sato 等开发了一种 70 Hz、104 mJ

的  $2\ \mu\text{m}$  传导冷却调 Q 激光器, 其 Tm, Ho:YLF 棒可传导冷却至  $-80^\circ\text{C}$ , 光束质量因数  $M^2 \leq 1.5$  [9]。2017 年, Li Chaoyang 等报道了一种紧凑型光电调 Q 传导冷却纳秒激光器。采用带有可变反射率镜的不稳定腔实现了 142 mJ 的脉冲序列, 脉宽为 10 ns, 在 1064 nm 处的重复率为 80 Hz, 光光转换效率为 10.3% [10]。2022 年李刚等通过采用 2 路 50 Hz 激光, 进行偏振合束, 实现百赫兹激光的输出, 获得了平均能量 112 mJ, 能量稳定性优于  $\pm 9\%$ , 脉冲宽度 10.8 ns, 光束质量达到了 11 mm·mrad 的激光输出 [11]。

当前, 全固态激光器的研究方向主要集中在三个方面: (1) 更大的输出能量; (2) 更高的输出重频及工作时长; (3) 更小型化的体积要求。但脉冲能量的提高、重频、时长的增加以及小型化的需求必然会对激光器的散热造成更大的压力, 使得晶体的热效应更加的严重, 同时降低激光器的输出稳定性以及光学性能。本文旨在通过采用多波长泵浦模块的方式降低整机的控温压力, 在有限的体积重量要求下, 达到无水冷激光器高性能稳定输出。

## 2. 理论分析

Nd:YAG 晶体的吸收光谱图如图 1 所示。从图中可以看出, 晶体存在多个吸收峰, 其中 808 nm 为最佳的吸收峰, 此时的吸收效率最佳。但 LD 阵列受到温度变化的影响, 其输出波长会随着温度漂移, 漂移量一般约为  $0.256\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ , 这将造成激光输出效率下降, 影响激光的稳定性。为了有效的控制泵浦源波长漂移量, 提高激光输出稳定性, 选用了多波长 LD 阵列, 通过 TEC 模块与控温系统控制泵浦源温度, 以此获得不同温度下激光输出性能。

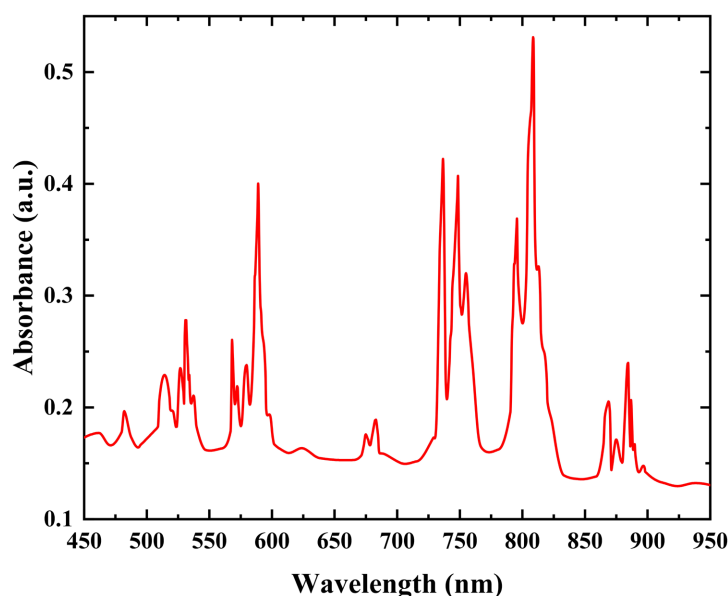


Figure 1. Nd:YAG crystal absorption spectra

图 1. Nd:YAG 晶体吸收光谱图

在理想情况下, 认为在泵浦均匀、侧面无限大时, 温度梯度应为严格垂直于泵浦面的一维分布, 在实际情况下, 泵浦源输出的 808 nm 能够与 Nd:YAG 晶体的吸收峰较好的匹配, 但仍会有约 30% 的能量以热量的形式存在晶体的内部。并且由于泵浦光模块波长的漂移、晶体尺寸的限制等因素, 会造成废热加剧, 沉积的热量将会使得晶体内部温度的不均匀分布, 进而造成的径向温度梯度将会产生晶体的热效应。热效应对激光器的影响很大, 直接引发激光的输出能量不稳、光束质量变差、效率下降, 激光器将难以长时间的维持激光稳定输出。为了有效地控制泵浦模块升温造成的泵浦波长漂移, 采用了多波长泵浦模

块, 在 20°C、100 A 时测得泵浦波长如图 2 所示。此时泵浦源的波长峰值分别为 790.8、794.4 和 800.8 nm, 经过对不同温度下、不同泵浦电流下泵浦源波长的测量, 可以得到 GS04 泵浦模块的漂移值分别为 0.243 nm/°C、0.063 nm/A。

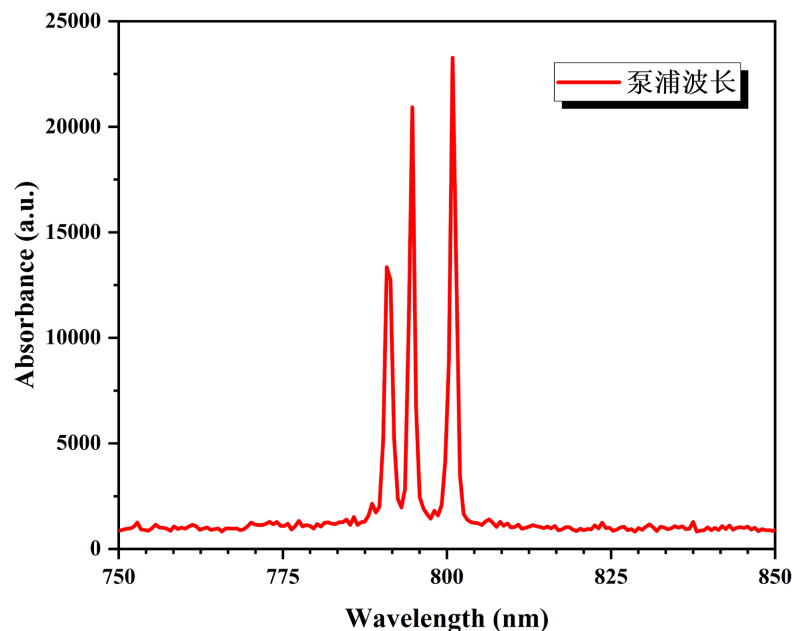


Figure 2. Pump wavelength diagram

图 2. 泵浦波长示意图

### 3. 实验装置

采用掺杂浓度为 1 at.% 的圆棒状 Nd:YAG 晶体, 其尺寸为  $\Phi 4 \times 50$  mm, 全反镜采用曲率半径为 2000 mm 凹面镜(M1), 镀有 1064 nm 高反射率(HR), 曲率半径为 5000 mm 输出镜(M2)在通光面镀有 1064 nm 波长的高透膜(HT@1064nm, T = 20%), 来实现能量的稳定输出。激光器腔长为 150 mm。泵浦模块直接泵浦晶体, 放置于晶体的侧面, 有效的缩短距离。我们采用由 1 个 4 bar 堆叠和微通道散热片组成的泵浦模块(GS04, Focuslight), 垂直于结的平面方向的发散角半宽为 35°, 输出中心波长为  $808 \pm 3$  nm, FWHM 宽度  $\leq 4$  nm, bar 条间距 0.43 mm, 最大电流 200 A, 峰值功率 400 W。激光器结构示意图如图 3 所示。

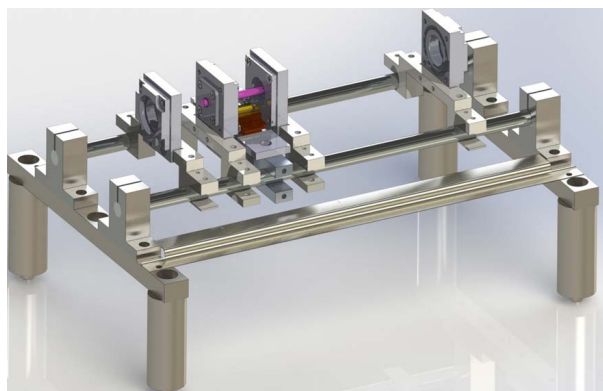


Figure 3. Schematic diagram of laser structure

图 3. 激光器结构示意图

输出能量由能量计(NovaII + PE-25BF-C, OPHIR)测量。输出波长由光谱仪(AvaSpec-2048-NIR256, AVANTES)测量。脉冲重复频率由光电探测器(DET10A/M, ThorLabs)和数字示波器(TDO3054 型, Tektronix, Inc.)记录。采用 TEC 模块与控温系统控制泵浦源温度, 以此模拟不同环境温度。激光器测量示意图如下图 4 所示。

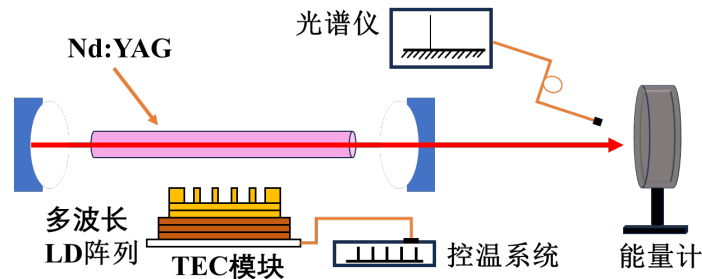


Figure 4. Laser measurement schematic diagram  
图 4. 激光器测量示意图

#### 4. 实验结果与讨论

对不同温度下对多波长模块输出波长的测量, 能够发现其多个泵浦波长的设计有效的控制了由于波长漂移造成的晶体吸收效率下降的问题, 改善了控温系统压力。如图 5 所示, 为不同温度下的激光输出能量。图 6 为 30°C 时激光输出波长测量图。在 40°C 时获得了, 最高能量 17.75 mJ 的 1064.1 nm 激光输出, 此时的光 - 光转换效率为 9.53%,

为获得激光器的稳定性, 对其进行了稳定性输出测量, 测量结果如下图 7 所示。激光器在重复频率 10 Hz, 控温 30°C 时连续工作时间 3 min, 获得平均脉冲能量 17.03 mJ, 最大脉冲能量 17.5 mJ, 能量不稳定性 3.13%。

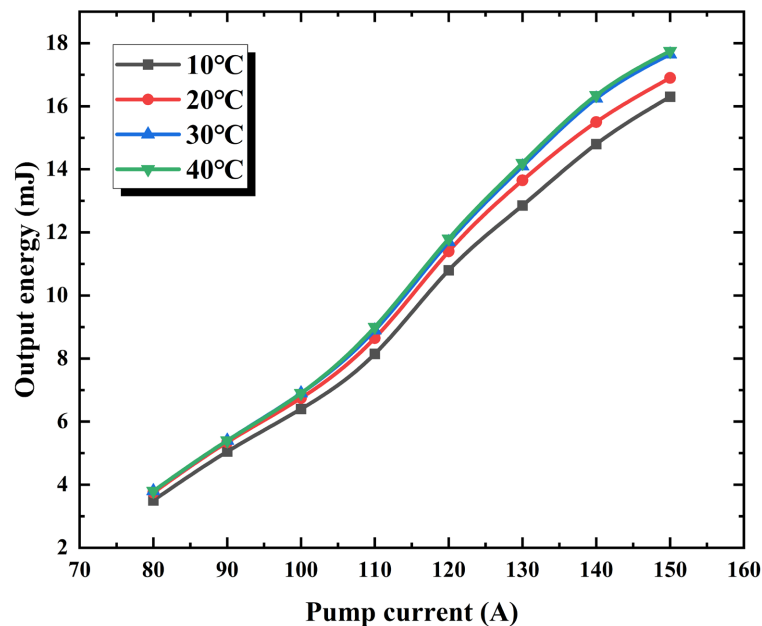
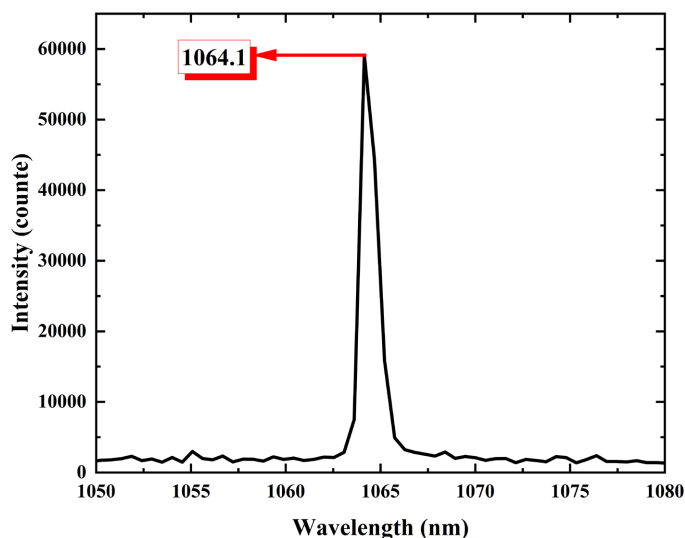
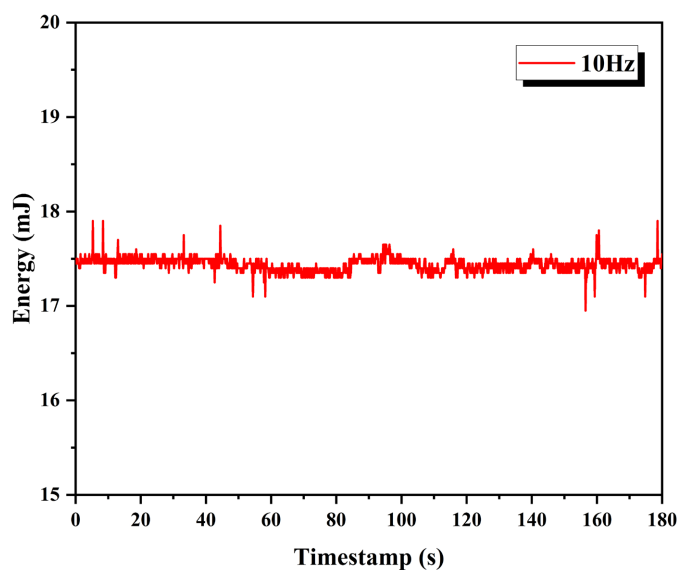


Figure 5. Diagram of laser output energy at different temperatures  
图 5. 不同温度下激光输出能量示意图



**Figure 6.** Diagram of laser output energy at different temperatures  
**图 6.** 激光输出波长测量图



**Figure 7.** Laser output stability measurement diagram  
**图 7.** 激光输出稳定性测量示意图

## 5. 结论

研究采用了一体化热沉结构, 改善激光器温控系统控温压力, 减少冷却传导系统体积、重量。通过采用多波长 bar 条模块, 有效的抑制了温度漂移对激光输出稳定性的影响, 控制晶体的热效应。设计了 LD 阵列泵浦源、泵浦结构以及传导冷却方式, 实现全固态激光器的无水冷稳定输出。激光器重复频率 10 Hz, 在控温 30℃时连续工作时间 3 min, 获得平均脉冲能量 17.03 mJ, 最大脉冲能量 17.5 mJ, 能量不稳定性 3.13%, 可在 10℃~40℃范围内稳定输出。

## 基金项目

国家自然科学基金(批准号: U20A20214, 62275031, 11974060), 重庆市自然科学基金(批准号:

CSTB2022NSCQ-MSX1027), 吉林省教育厅科学技术研究项目(编号: JJKH20230797CY), 吉林省自然科学基金(批准号: 20210101154JC)资助的课题。

## 参考文献

- [1] Shang, P., Bai, L., Wang, S., Cai, D. and Li, B. (2023) Research Progress on Thermal Effect of LD Pumped Solid State Laser. *Optics & Laser Technology*, **157**, 108640. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108640>
- [2] Tang, C., Gao, Q., Chai, Z., Wu, D., Tong, L., Gao, S., et al. (2004). 1-J 500-Hz MOPA Solid State Laser Pumped by Diodes. *Solid State Lasers and Amplifiers*, Strasbourg, 26-30 April 2004, 26-30. <https://doi.org/10.1117/12.554288>
- [3] Nieuwsma, D.E. and Wang, J. (2005). Design of an Advanced Diode-Pumped Solid State Laser for High-Altitude Airborne Operations. *SPIE Proceedings*, Honolulu, 8-12 November 2004, 8-12. <https://doi.org/10.1117/12.580348>
- [4] 凌铭, 武志超, 谭雪春, 等. LD 侧面泵浦 Nd:YAG 无水冷调 Q 脉冲激光器[J]. 红外与激光工程, 2007(S1): 20-23. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2276.2007.z1.082>
- [5] Liu, Q., Liu, J. and Gong, M. (2011) Dual-Rod, 100 Hz, 388 mJ Nanosecond Nd:YAG Oscillator. *Applied Optics*, **50**, Article 1186. <https://doi.org/10.1364/ao.50.001186>
- [6] Evangelatos, C., Bakopoulos, P., Tsaknakis, G., Papadopoulos, D., Avdikos, G., Papayannis, A., et al. (2013) Continuous Wave and Passively Q-Switched Nd:YAG Laser with a Multisegmented Crystal Diode-Pumped at 885 Nm. *Applied Optics*, **52**, Article 8795. <https://doi.org/10.1364/ao.52.008795>
- [7] Yang, Q., Ma, J., Lu, T., Ma, X. and Zhu, X. (2015). 160mj and 9ns Electro-Optics Q-Switched Conductively Cooled 1047nm Nd:YLF Laser. *SPIE Proceedings*, Chengdu, 25-29 August 2014, 25-29. <https://doi.org/10.1117/12.2064316>
- [8] Qiu, J.S., Tang, X.X., Fan, Z.W., Wang, H.C. and Liu, H. (2016) Two-beam Combined 336 J, 100 Hz Diode-Pumped High Beam Quality Nd:YAG Laser System. *Applied Optics*, **55**, Article 5630. <https://doi.org/10.1364/ao.55.005630>
- [9] Sato, A., Aoki, M., Ishii, S., Otsuka, R., Mizutani, K. and Ochiai, S. (2017) 7.28-W, High-Energy, Conductively Cooled, Q-Switched Tm, Ho:YLF Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, **29**, 134-137. <https://doi.org/10.1109/lpt.2016.2629763>
- [10] Li, C., Lu, C., Li, C., Zang, Y., Yang, Z., Han, S., et al. (2017) Compact Conductively Cooled Electro-Optical Q-Switched Nd:YAG Laser. *Optical Engineering*, **56**, Article 1. <https://doi.org/10.1117/1.oe.56.11.116115>
- [11] 李刚, 卜英华, 李龙骧, 等. 百赫兹百毫焦全固态纳秒激光器技术研究[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 803-808. <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0407003>