

文章编号: 1000-7032(2023)11-2027-06

紧凑高效型百瓦级 2 μm 棒状 Tm:YAG 激光器

吴健宏^{1,2,3}, 杜仕峰^{1,2,4*}, 高 昀^{1,2,4}, 王海龙^{1,2,4}, 陈玲芝^{1,2,4},
王志超^{1,2,4*}, 薄 勇^{1,2,4}, 崔大复^{1,2,4}, 彭钦军^{1,2,4}

(1. 中国科学院理化技术研究所 固体激光重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院理化技术研究所 功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 齐鲁中科光物理与工程技术研究院, 山东 济南 250000)

摘要: 报道了一种结构紧凑、高效率、高功率的 2 μm 棒状 Tm:YAG 激光器。通过优化设计三向激光二极管 (LD) 侧面泵浦激光模块, 提高了晶体棒内泵浦光的功率密度。激光谐振腔采用平平腔结构, 包含单个激光模块, 几何腔长为 88 mm, 整台激光器结构简单、紧凑且体积小。激光模块通过一个水冷机进行冷却, 在冷却温度为 12 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 获得了最大功率为 119 W、波长为 2.02 μm 的激光输出, 光-光转换效率为 19.6%, 斜率效率达 32.7%。该激光器可在最大输出功率下连续稳定运转 2 h, 功率波动小于 1%, 晶体端面及光学元件表面不结霜。实验测得 x 和 y 方向的光束质量因子分别为 21.01 和 21.68。这种紧凑、可靠、高效的百瓦级 2 μm 激光器对于医疗和科学研究等应用具有重要意义。

关键词: 激光器; Tm:YAG; 棒状晶体; LD 侧面泵浦; 2 μm ; 结构紧凑

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230174

Compact and Efficient Hundred-watt Level 2 μm Rod Tm:YAG Laser

WU Jianhong^{1,2,3}, DU Shifeng^{1,2,4*}, GAO Yun^{1,2,4}, WANG Hailong^{1,2,4}, CHEN Lingzhi^{1,2,4},

WANG Zhichao^{1,2,4*}, BO Yong^{1,2,4}, CUI Dafu^{1,2,4}, PENG Qinjun^{1,2,4}

(1. Key Laboratory of Solid State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Function Crystal and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Institute of Optical Physics and Engineering Technology, Qilu Zhongke, Jinan 250000, China)

* Corresponding Authors, E-mail: shifengdu@mail.ipc.ac.cn; wangzhichao@mail.ipc.ac.cn

Abstract: We report a compact, high-efficiency, and high-power 2 μm rod-type Tm:YAG laser. By optimizing the design of the threefold laser diode (LD) side-pumped laser module structure, the pump power density inside the crystal rod was increased. The laser resonator adopted a flat-flat cavity configuration, incorporating a single laser module, with a geometric cavity length of 88 mm and the complete laser structure was simple and compact with small footprint. The laser module was cooled by a water chiller, under a crystal cooling temperature of 12 $^{\circ}\text{C}$, we obtained a maximum output power of 119 W at a wavelength of 2.02 μm , with an optical-to-optical efficiency of 19.6% and a slope efficiency of 32.7%. The laser can operate stably for 2 hours at maximum output power with power fluctuations below 1%, and no water condensation was observed on the crystal end faces and optical element surfaces. The measured beam quality factors in the x and y directions were 21.01 and 21.68, respectively. This compact, reliable, and efficient hundred-watt level 2 μm laser is of great significance for applications in medical and scientific research.

收稿日期: 2023-07-27; 修订日期: 2023-08-17

基金项目: 国家高层次人才科技专项(SQ2022RA24910010); 中国科学院重点技术人才计划

Supported by National Special Support Program for High-level Talents Science and Technology (SQ2022RA24910010); Chinese Academy of Sciences (CAS) Key Technology Talent Program

Key words: lasers; Tm:YAG; rod crystal; LD side-pumping; 2 μm ; compact structure

1 引 言

2 μm 激光具有高人眼安全性且位于水分子及 CO_2 吸收峰附近,该波段的高功率激光器可广泛应用于差分吸收激光雷达、微创医疗手术、大气环境检测以及材料加工等领域^[1-4]。此外,2 μm 激光还可以作为可靠的光学参量振荡器(OPO)泵浦源,直接产生中远红外波段激光^[5-6]。除了兼顾高功率激光输出外,许多应用对激光系统轻量化和可靠性的需求不断提高,因此,结构紧凑、近室温工作的高功率 2 μm 激光器有助于推动其在相关领域的应用。

激光二极管(LD)侧面泵浦棒状增益介质具有结构简单、热分布均匀、吸收效率高等优点^[7],因此是研制紧凑型高功率激光器的理想方案之一。基于 Tm^{3+} 离子掺杂晶体的 $^3\text{F}_4-^3\text{H}_6$ 辐射跃迁可直接获得 2 μm 激光输出^[8]。在众多基质晶体材料的选择中,Tm:YAG 具有较高的热导率和良好的机械性能,有利于实现激光器高功率稳定运转^[9]。此外,Tm:YAG 制备工艺成熟,加工成本低,有利于大规模生产从而满足激光器广泛应用的需求。Tm:YAG 晶体的吸收带位于 785 nm 附近,与商用 LD 的发射波长相匹配。其高效的交叉弛豫过程可以迅速积累上能级粒子数,使其成为近室温下直接产生 2 μm 激光的理想增益介质^[10]。目前,国内外报道的侧面泵浦棒状 Tm:YAG 激光器输出功率已经达到了百瓦级水平^[11-14]。2002 年,Lai 等^[12]设计了一种复合抛物面聚光器(CPC),通过波长为 785 nm 的三个 LD 阵列对棒状 Tm:YAG 晶体进行侧面泵浦,并利用单个激光模块搭建了谐振腔长度为 125 mm 的平平腔。在晶体冷却温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,该激光器最终实现了 150 W 的激光输出,中心波长为 2.02 μm ,光-光转换效率达 16.3%,在输出功率为 135 W 的条件下,平均光束质量因子 M^2 为 34。为了实现百瓦级激光输出,单个激光模块的 Tm:YAG 激光器需要在低冷却温度下运转,然而该温度下晶体端面容易结霜并损伤光学膜层,从而降低了激光器的可靠性。因此,研究人员开始探索多个激光模块串接的方法,以实现近室温下的高功率激光输出。2013 年,中国科学院理化技术研究所团队报道了一种三个侧面

泵浦 Tm:YAG 激光模块串接的激光器,其谐振腔长度为 615 mm。在 $8\text{ }^\circ\text{C}$ 的冷却温度下,最终实现了 267 W 的 2.07 μm 连续波激光输出,光-光转换效率达 20.7%,斜率效率为 29.8%,平均光束质量因子 M^2 为 25.4^[14]。然而,多个激光模块串接的高功率 Tm:YAG 激光器结构相对复杂,需要外接多台水冷机和驱动电源,导致系统体积庞大,实用性受限。

限制 Tm:YAG 激光器在室温下实现高功率输出的主要因素在于 Tm^{3+} 的准三能级结构,其下能级粒子数分布会随温度升高而增加,导致重吸收损耗也显著增加^[15],所以需要借助强泵浦方式获得更多的粒子数反转。除此之外,设计结构紧凑的激光器还必须应对高强度泵浦引起的晶体热效应,以及可能导致晶体碎裂的问题,这对热管理措施提出了更高的要求。因此,在棒状 Tm:YAG 激光器研究中,实现近室温下的高功率激光输出并保持系统结构紧凑仍然面临着挑战。

本文报道了一种近室温运转、结构简单紧凑的百瓦级棒状 Tm:YAG 激光器。通过光线追迹法模拟了泵浦光在晶体内的分布,并据此优化了三向侧面泵浦的激光模块结构,提高了晶体内泵浦光的功率密度。模块选用了低掺杂浓度双端键合的 Tm:YAG 晶体棒以降低重吸收损耗并减缓热透镜效应。激光器的谐振腔采用平平对称短腔结构,该结构腔内往返损耗和衍射损耗低,其几何腔长仅 88 mm。在冷却温度为 $12\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,实现了最大功率 119 W 的 2.02 μm 激光输出,光-光转化效率和斜率效率分别为 19.6% 和 32.7%。在最大输出功率条件下,功率波动小于 1%,测得的平均光束质量因子 $M^2 < 21.5$ 。

2 实验装置与理论分析

图 1 为三向侧面泵浦 Tm:YAG 激光模块横截面示意图。该激光模块尺寸为 $78\text{ mm} \times 103\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,由陶瓷漫反射器、Tm:YAG 晶体棒、石英玻璃管、LD 阵列组成。Tm:YAG 晶体棒的直径为 3 mm,总长度为 74 mm,端面均镀对 2.02 μm 增透膜。其中晶体棒两端通过扩散键合技术键合了 19 mm 未掺杂的 YAG,掺杂区域为 36 mm。该设计可以有效降低晶体棒内部的热梯度差,从而减

缓由折射率梯度变化引起的热透镜效应^[16]。Tm³⁺的掺杂浓度为 3%, 对于 Tm³⁺的准三能级系统, 较低掺杂有利于减少上转换发光和重吸收损耗, 从而降低激光器的阈值。与此同时, 低吸收系数在紧凑的侧面泵浦结构中有助于实现均匀的泵浦光吸收, 进而改善晶体棒的热效应。晶体棒放置在玻璃管的中心并通过冷却水进行冷却。三个 LD 阵列通过铜热沉连接控温, 并且间隔 120° 对称放置在一个特质陶瓷反射器外侧。该激光模块利用一个水冷机同时对 LD 阵列和 Tm:YAG 晶体进行冷却。实验中的 LD 阵列和晶体的冷却水流量通过实验优化后分别设定为 4.5 L/min 和 8 L/min, 冷却温度为 (12±0.2) °C, 确保水流迅速带走热量。在该温度下, LD 阵列的中心波长在最大驱动电流时为 780.5 nm, 发射谱线的半峰全宽 (FWHM) 约为 1.7 nm, 匹配了 Tm:YAG 较宽的吸收带^[17]。陶瓷反射器内表面对泵浦光的反射率 > 97%, 泵浦光通过反射器上 37 mm 长、3 mm 宽的狭缝入射, 经过玻璃棒和冷却水折射的补偿照射到晶体棒表面。未被吸收的泵浦光经过陶瓷反射器多次反射可被晶体充分吸收。

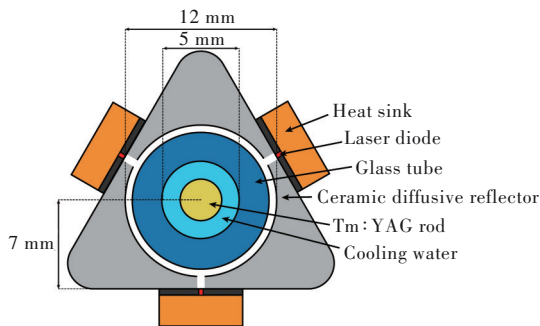


图 1 三向侧面泵浦 Tm:YAG 激光模块横截面示意图
Fig.1 Cross-sectional diagram of three fold side-pumped Tm:YAG laser module

为了在近室温的条件下实现高功率激光输出, 通过缩短 LD 阵列与晶体棒之间的距离可以提高耦合吸收效率, 进而提高泵浦光功率密度; 但是, 泵浦光分布的均匀性将会相应地变差^[18], 从而影响晶体棒内的热梯度分布。因此, 在保证均匀性的前提下, 利用 Zemax 软件基于光线追迹法对泵浦光在晶体棒内的分布进行模拟, 以优化激光模块器件尺寸获得较高的耦合吸收效率。最终设计的陶瓷反射器内径为 12 mm, 玻璃管内径为 5 mm, 厚度为 2.5 mm, 此时 LD 阵列发光面到晶体棒轴线的距离为 7 mm。通过软件模拟, 泵浦光在

晶体棒内的理论分布如图 2 所示。从图 2 可以看出, 泵浦光在晶体棒内分布较为均匀, 晶体棒中心吸收强度略高于周围区域吸收强度。经计算可得该激光模块的耦合吸收效率约为 80%, 即单位体积内的泵浦光平均功率密度约为 1.9 W/mm³, 几乎是之前报道的两倍^[11,14]。如此高的泵浦光功率密度有利于在近室温条件下提高输出功率和光-光转换效率。同时, 高均匀泵浦也有助于降低晶体棒内的热梯度, 减少折射率梯度变化对光束的传输和聚焦特性的影响, 从而改善光束质量。

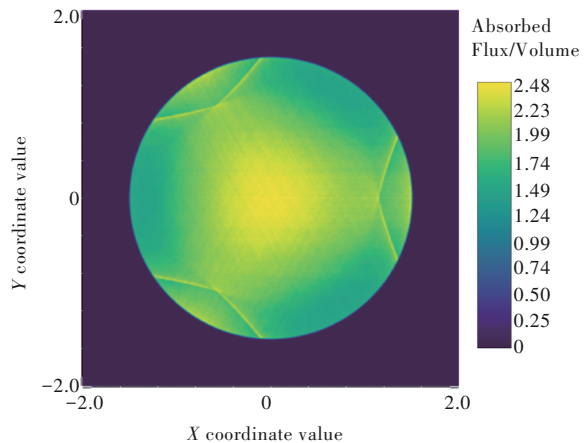


图 2 模拟的 Tm:YAG 晶体棒中心截面的泵浦光分布
Fig.2 Simulated distribution of pump light in Tm:YAG crystal rod at central section

Tm:YAG 激光实验装置如图 3 所示。激光谐振腔由单个激光模块和两个平面镜 M1 和 M2 构成, 几何腔长为 88 mm, 激光系统的占地面积仅为 88 mm×103 mm (不包括水冷机)。平面高反镜 M1 表面镀有对 2.02 μm 的高反膜 (R>99.5%), 输出耦合镜 M2 对 2.02 μm 激光部分透射。为了最大化实现高功率输出, 通过 Findlay-Clay 方法^[19]计算了 M2 的最佳耦合透过率, 其值约为 8%。由于实验室缺少该透过率的耦合输出镜, 因此, 我们选取了透过率为 6% 和 9.6% 的耦合输出镜进行后续实验。

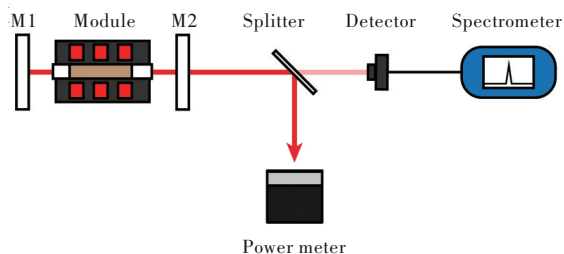


图 3 Tm:YAG 激光系统实验装置图
Fig.3 Schematic of experimental setup for Tm:YAG laser system

同时,为了防止晶体端面和光学器件表面结霜,实验室的温度保持在 22 °C,控制相对湿度<30%。

3 结果与讨论

3.1 激光输出特性

首先,对激光器的输出性能进行测试。使用功率计(Gentenc-EO, MAESTRO)测量了透过率为 6% 和 9.6% 的耦合输出镜时,不同泵浦功率下 Tm:YAG 激光器的连续波输出功率,具体结果如图 4 所示。当输出耦合率为 6% 时,该激光器的功率阈值大约为 200 W,随着泵浦功率的增加,输出功率线性增长。当总的泵浦功率达到最大 609 W 时,该激光器的最高输出功率可达 119 W,光-光转换效率为 19.6%,斜效率为 32.7%。在输出耦合率为 9.6% 的情况下,激光器的阈值提高至约 255 W。这是由于激光器的阈值功率密度与耦合输出损耗呈正相关关系^[15]。当泵浦功率达到最大时,最高输出功率可达 110 W,光-光转换效率为 18%,斜效率为 35%。根据综合实验结果,选用 6% 的输出耦合镜进行后续实验。值得注意的是,在实验过程中未观察到激光输出有饱和现象,这表明可以通过进一步增加泵浦功率来提高激光器的输出功率。

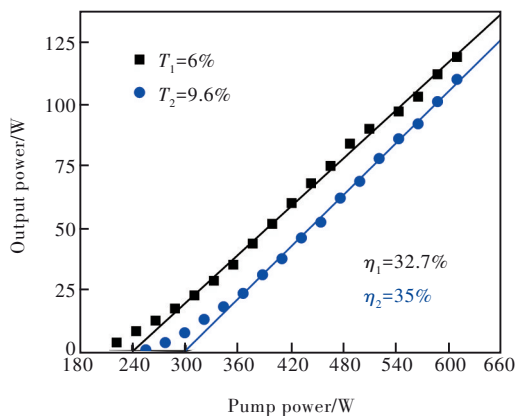


图 4 不同透过率耦合输出镜时 Tm:YAG 激光器输出功率随泵浦功率的变化关系

Fig.4 Output power of Tm:YAG laser versus pump power for different output couplers

3.2 激光输出光谱

图 5 给出了使用光谱仪(OceanOptics, NIR-Quest256, 探测范围 850~2 500 nm,分辨率<10 nm)测得的 Tm:YAG 激光输出光谱。从图中可以看出 Tm:YAG 激光的中心波长为 2.02 μm ,谱线宽度约为 13 nm。

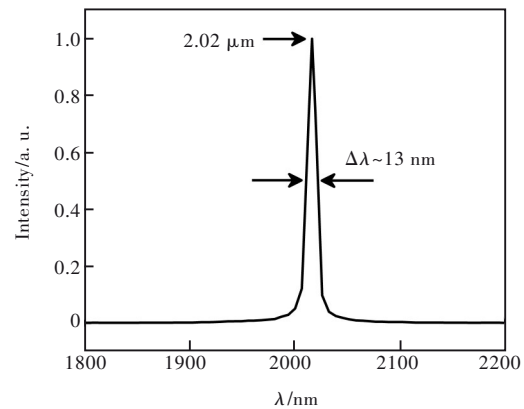


图 5 Tm:YAG 激光输出光谱

Fig.5 Output spectrum of Tm:YAG laser

3.3 激光输出稳定性

为了评估该激光器的稳定性和可靠性,在最大输出功率下,记录了激光器连续运行 2 h 的功率波动数据,结果如图 6 所示。测量结果表明,Tm:YAG 激光器的最大平均输出功率为 118.8 W,功率波动小于 1%。从图中可观察到,输出功率呈现出微小的周期性起伏,这一现象可能源自水冷机控温精度的波动以及工作电流的不稳定^[20]。在近室温条件下,晶体端面及其他光学器件没有出现结霜现象,同时晶体没有出现损伤,这表明该激光器具备长时间稳定工作的能力,能够满足相关领域对功率稳定和装置可靠性的要求,具有广泛的应用价值和前景。

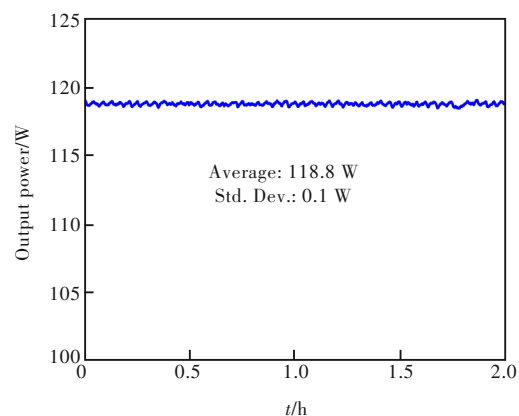


图 6 2 h 内 Tm:YAG 激光器输出功率稳定性测量

Fig.6 Measured output power stability of Tm:YAG laser over 2 h

3.4 激光光束特性

在最大输出功率条件下,对 Tm:YAG 激光器输出的光束质量因子 M^2 进行了测量。激光输出光束经过两个楔形镜反射后通过一个焦距为 150 mm 的平凸透镜聚焦。利用红外相机(Spiricon Pyrocam IIIHR)测量沿光轴不同距离处的光斑 4-sigma 直径,结果如图 7

所示。使用 BeamSquared® 光束质量分析软件对测量数据进行拟合, 得到了激光输出光束在 x 和 y 方向上的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 21.01 和 21.68。插图是红外相机在焦点附近采集的远场光斑二维强度分布, 表明 Tm:YAG 激光器为多横模模式运转。

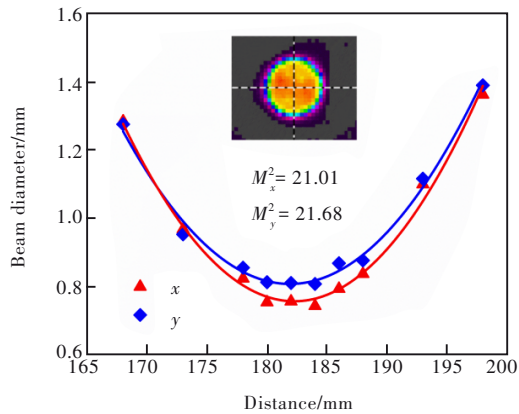


图 7 在最大输出功率下测得的 Tm:YAG 激光器在 x 和 y 轴方向的光束质量。插图: 光束的二维强度分布。

Fig.7 Measurement of the beam quality factor for the Tm:YAG laser at the maximum output power. Inset: far-field two-dimensional beam intensity distribution.

4 结 论

本文通过理论模拟对 LD 侧面泵浦的 Tm:YAG 激光模块结构进行优化设计, 提高了晶体

棒内泵浦光功率密度, 结合高效的热管理和谐振腔优化, 实现了近室温下高功率和高效率的 2.02 μm 激光输出。激光模块中 LD 阵列和晶体的温度控制在近室温 12 $^{\circ}\text{C}$ 。经实验优化后选用透过率为 6% 的输出镜, 在泵浦功率为 609 W 时, Tm:YAG 激光的最大输出功率为 119 W, 中心波长为 2.02 μm , 对应的光-光转换效率为 19.6%, 斜率效率达 32.7%。实验测得的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 21.01 和 21.68。在最大输出功率下, 该激光器在 2 h 内的功率波动小于 1%, 且没有观察到晶体端面或光学器件结霜以及晶体损伤等现象。除此之外, 该激光器模块和谐振腔的设计简单紧凑, 相对于光纤耦合 LD 端泵的 Tm:YAG 激光器而言, LD 侧泵 Tm:YAG 激光器光学元件数量少, 几何腔长短, 且易于调整和维护。同时模块仅采用一个水冷机进行冷却, 大幅减少了整个激光系统的体积。这种结构紧凑、可靠性高的百瓦级 2 μm 棒状 Tm:YAG 激光在医疗和科研等各领域具有广泛的应用前景和使用价值。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230174>.

参 考 文 献:

- [1] 蔡宇航, 张俊旋, 陈晓, 等. 侧面抽运(Tm, Ho):YLF 晶体传导冷却百纳秒脉冲激光器 [J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1301005.
CAI Y H, ZHANG J X, CHEN X, *et al.* Side-pumped, conductively cooled (Tm, Ho):YLF pulsed laser with more than one-hundred-nanosecond pulse width [J]. *Chin. J. Lasers*, 2021, 48(13): 1301005. (in Chinese)
- [2] 韩文国, 延凤平, 冯亭, 等. 高功率掺铥光纤激光器及其在生物组织切割中的应用 [J]. 发光学报, 2021, 42(5): 708-716.
HAN W G, YAN F P, FENG T, *et al.* High-power thulium-doped fiber laser and its application in biological tissue cutting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(5): 708-716. (in Chinese)
- [3] FU Q S, NIU C, LIU J G, *et al.* LD end-pumped Tm:YAG acousto-optic Q-switched double-pulse laser [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2021, 119: 103923.
- [4] MINGAREEV I, WEIRAUCH F, OLOWINSKY A, *et al.* Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [5] COLE B, GOLDBERG L, CHINN S, *et al.* Compact and efficient mid-IR OPO source pumped by a passively Q-switched Tm:YAP laser [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(5): 1099-1102.
- [6] 王云鹏, 王飞, 赵东旭. Cr²⁺:ZnSe 全固态中红外激光器 [J]. 中国光学, 2016, 9(5): 563-568.
WANG Y P, WANG F, ZHAO D X. All solid state Mid-IR laser of Cr²⁺:ZnSe [J]. *Chin. Opt.*, 2016, 9(5): 563-568. (in Chinese)
- [7] 李耀, 李阳, 王超. LD 面阵侧面泵浦 Nd:YAG 晶体吸收光场研究 [J]. 中国光学, 2018, 11(2): 206-211.

- LI Y, LI Y, WANG C. Absorption light field of side-pumped Nd:YAG crystal in LD planar arrays [J]. *Chin. Opt.*, 2018, 11(2): 206-211. (in Chinese)
- [8] 丁本利, 周雄, 夏海平, 等. 796 nm 二极管泵浦连续波 1.88 W Tm:LYF 激光器 [J]. *发光学报*, 2020, 41(7): 819-825.
- DING B L, ZHOU X, XIA H P, *et al.* 796 nm diode-pumped 1.88 W continuous-wave Tm:LYF laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(7): 819-825. (in Chinese)
- [9] SUN F F, DU S F, GAO H W, *et al.* 130 mJ compact diode side-pumped Tm:Ho:YAG laser at 2.1 μm [J]. *Opt. Commun.*, 2022, 505: 127517.
- [10] 傅燕青, 康世亮, 关尚升, 等. Tm³⁺/Ho³⁺共掺含 BaF₂ 纳米晶氟硅酸盐玻璃陶瓷 2 μm 发光性能 [J]. *发光学报*, 2021, 42(1): 37-43.
- FU Y Q, KANG S L, GUAN S S, *et al.* Luminescence properties of Tm³⁺/Ho³⁺ doped BaF₂ nanocrystalline fluorosilicate glass ceramics at 2.0 μm [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(1): 37-43. (in Chinese)
- [11] LAI K S, PHUA P B, WU R F, *et al.* 120 W continuous-wave diode-pumped Tm:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(21): 1591-1593.
- [12] LAI K S, XIE W J, WU R F, *et al.* A 150 W 2-micron diode-pumped Tm:YAG laser [C]. *Advanced Solid State Lasers 2002, Québec City, Canada*, 2002: WE6.
- [13] CAO D, PENG Q J, DU S F, *et al.* A 200 W diode-side-pumped CW 2 μm Tm:YAG laser with water cooling at 8 °C [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, 103(1): 83-88.
- [14] WANG C L, NIU Y X, DU S F, *et al.* High-power diode-side-pumped rod Tm:YAG laser at 2.07 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(31): 7494-7497.
- [15] 满达, 牛燕雄, 王彩丽. Tm:YAG 激光器的波长可调谐理论和实验研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0114001.
- MAN D, NIU Y X, WANG C L. Theoretical model and experimental study for wavelength tunable Tm:YAG laser [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2015, 35(1): 0114001. (in Chinese)
- [16] ZHANG H L, BIAN J T, SUN D L, *et al.* Improvement of 2.8 μm laser performance on LD side-pumped LuYSGG/Er:LuYSGG/LuYSGG bonding crystal [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2023, 158: 108840.
- [17] YUMOTO M, SAITO N, URATA Y, *et al.* 128 mJ/pulse, laser-diode-pumped, Q-switched Tm:YAG laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(1): 364-368.
- [18] LEE S, KIM S K, YUN M, *et al.* Design and fabrication of a diode-side-pumped Nd:YAG laser with a diffusive optical cavity for 500-W output power [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(6): 1089-1094.
- [19] LIU H Y, BIAN Q, BO Y, *et al.* Compact 200 W level linearly polarized microsecond-pulse Nd:YAG oscillator with nearly diffraction-limited beam quality [J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61(19): 5614-5618.
- [20] 王君立, 尹福昌, 宋正勋, 等. 高稳定输出功率的全固态激光器 [J]. *发光学报*, 2011, 32(8): 830-833.
- WANG J L, YIN F C, SONG Z X, *et al.* An all-solid-state laser with high stability output power [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(8): 830-833. (in Chinese)



吴健宏(1999-),男,山东潍坊人,硕士研究生,2021年于安徽大学获得学士学位,主要从事固体激光技术的研究。
E-mail: wujianhong21@mails.ucas.ac.cn



王志超(1985-),男,四川资阳人,博士,高级工程师,2012年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事全固态激光技术及其应用研究。
E-mail: wangzhichao@mail.ipc.ac.cn



杜仕峰(1979-),男,湖北利川人,博士,高级工程师,硕士生导师,2009年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事全固态激光及其变频激光技术的研究。
E-mail: shifengdu@mail.ipc.ac.cn