

## Tm:YLF 激光器温度场分布计算与实验

李 岩, 张艺轩, 纳全鑫, 高明伟, 高春清

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘 要:**设计并研究了双晶四端泵浦的 Tm:YLF 激光器。利用 Ansys 软件中的稳态热分析模块计算了散热底板水通道在热交换系数分别为  $1000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 、 $4000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 、 $8000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$  和  $15000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$  以及采用 TEC 制冷时对应的晶体夹具及散热底板的温度分布。根据计算结果,在采用水温  $16\text{C}$  中等强制对流及以上时与 TEC 制冷控温  $18\sim 20\text{C}$  时对 Tm:YLF 晶体冷却效果近似,可近似等效于 TEC 制冷。根据模拟计算的结果,设计了可用光纤耦合半导体激光器泵浦的 U 型腔结构 Tm:YLF 激光器。在采用  $16\text{C}$  冷却水直接冷却晶体夹具时,单晶双端泵浦和双晶四端泵浦的 Tm:YLF 输出功率分别达到了  $25.9\text{ W}$  和  $46\text{ W}$  的激光输出,对应的斜效率分别为  $40.7\%$  和  $37.1\%$ 。在实验过程中,晶体夹具未出现温度过高。实验结果说明设计的直接传导冷却系统可有效地冷却泵浦功率在  $140\text{ W}$  时的双晶四端泵浦结构 Tm:YLF 晶体。

**关键词:** Tm:YLF 激光器; Ansys 稳态热分析; 直接传导冷却

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0506001

## Temperature distribution calculation and experiments of Tm:YLF laser

Li Yan, Zhang Yixuan, Na Quanxin, Gao Mingwei, Gao Chunqing

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The structure of double-crystal four-end pumped Tm:YLF laser was designed and studied. By using steady-state thermal analysis module in the Ansys software, the temperature distributions of the two crystal-clamps and cooling plate were calculated with the heat exchange coefficients of the cooling plate channels given as  $1\ 000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ ,  $4\ 000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ ,  $8\ 000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$  and  $15\ 000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ . Meanwhile, the temperature distributions when the cooling-plate was assumed as a TEC cooler with temperatures of  $18\text{C}$  and  $20\text{C}$  were calculated, respectively. According to the calculated results, the cooling effect when the cooling-plate was given as medium convection intensity or higher would be equal to the result when taking the cooling-plate as TEC with temperature of  $18\text{C}$  and  $20\text{C}$ . According to the simulation results, a U-shape Tm:YLF laser was designed pumped by fiber coupled laser diode. The output lasers with powers of  $25.9\text{ W}$  and  $46\text{ W}$  were achieved from single crystal and double crystals when the Tm:YLF crystal clamps and cooling plate were directly cooled by  $16\text{C}$  cold water, corresponding

收稿日期:2016-09-10; 修订日期:2016-10-20

基金项目:国家自然科学基金(61378021)

作者简介:李岩(1982-),男,博士生,主要从事  $2\ \mu\text{m}$  波段固体激光器方面的研究。Email: 19820801@bit.edu.cn

导师简介:高春清(1967-),男,教授,博士,主要从事新型激光器件与技术,光电子信息技术方面的研究。Email: gao@bit.edu.cn

to slope efficiencies of 40.7% and 37.1%, respectively. No over high temperature was observed in the whole experiment. The experiment results indicate that the designed direct conduction cooling system can effectively remove the heat load in single-crystal dual-end and double-crystal four-end pumped Tm:YLF laser.

**Key words:** Tm:YLF laser; Ansys steady-state thermal analysis; directly conduction cooled

## 0 引言

由于半导体激光器具有较高的电光转换效率并且体积小、寿命长,因此已被广泛地应用作固体激光器的泵浦源<sup>[1]</sup>。基于半导体激光器泵浦的固体激光器已经被广泛地应用于测量大气溶胶散射<sup>[2-3]</sup>、激光主动成像<sup>[4]</sup>以及测速<sup>[5]</sup>等方面。其中,2 μm 波段的激光由于可被生物组织强烈吸收并且位于人眼安全波段范围内,因此被广泛地应用于医疗<sup>[6]</sup>、远程遥感以及通过光参量振荡器(OPO)在室温下产生 3~5 μm 波段的中红外激光<sup>[7-8]</sup>以替代低温 Fe:ZnSe 中红外激光器<sup>[9]</sup>。采用 Tm:YLF 发射的 1.9 μm 激光泵浦 Ho<sup>3+</sup>获得 2.1 μm 激光输出的方案,具有量子缺陷小<sup>[10]</sup>、热负载低以及效率高等优点,已经成为获得 2 μm 激光的主要方法。目前采用波长 792 nm 波段的激光二极管泵浦 Tm:YLF 激光器作为 Ho<sup>3+</sup>全固态激光器的泵浦源已经受到了广泛地关注。这种方式主要有以下三种优势:Tm<sup>3+</sup>粒子具有交叉弛豫效应,因此具有较高的量子效率;YLF 晶体具有负热透镜效应,在高功率输出时可获得较好的光束质量;Tm:YLF 发射光谱覆盖 Ho<sup>3+</sup>吸收峰,因此具有较高的转换效率。

近些年来,采用激光二极管泵浦的 Tm:YLF 激光器得到了快速发展。2013 年,德国夫琅禾费研究所利用自由空间输出的激光二极管双端泵浦 Tm:YLF 板条晶体,采用传导冷却方式制冷,输出功率达到 200 W<sup>[11]</sup>。但板条结构的固体激光器在垂直于光轴的两个方向发散角较大,所以光束质量较差。采用光纤耦合输出的激光二极管可使泵浦光场更加均匀,从而获得更高光束质量的激光输出。2015 年,哈尔滨工业大学利用光纤耦合的激光二极管采用双晶四端泵浦 Tm:YLF 晶体,使用半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)对晶体冷却,

输出功率为 108 W,对应的斜效率为 39%<sup>[12]</sup>。但是,利用 TEC 对高功率泵浦的晶体进行制冷需要 PID 电路控制系统,并伴随着 TEC 所产生的额外热负载,增加了激光器整体的复杂程度。

文中,笔者通过采用 Ansys 软件对直接热传导冷却以及 TEC 冷却的晶体散热系统进行分析计算,获得了晶体夹具及散热底座的温度分布。通过与 TEC 直接冷却的 Tm:YLF 晶体系统的计算结果对比,发现当采用水温 16℃并达到中等强制对流(8 000 W/(m<sup>2</sup>·℃))及以上时,与采用 TEC 制冷控温 18℃与 20℃对应的晶体夹具温度分布近似。实验利用四台光纤耦合输出的激光二极管端面泵浦两个 Tm:YLF 晶体,利用文中设计的直接传导冷却装置,获得了功率为 46 W 的连续激光输出。说明文中所设计的直接传导冷却结构可用于冷却双晶四端泵浦结构的 Tm:YLF 晶体从而实现高功率输出,大幅度精简了 Tm:YLF 激光器系统结构。

## 1 Tm:YLF 冷却系统设计与模拟计算

实验采用的 Tm:YLF 晶体掺杂浓度为 2.5 at.%,晶体沿 *a* 轴切割成 4 mm×4 mm×20 mm。采用一对铜质夹具将晶体固定在散热底板表面,并采用厚度为 0.1 mm 的铝箔包裹,以提高晶体与夹具之间的导热能力。散热底板长宽高分别为 99 mm×79 mm×14 mm,内部含有三个直径 Φ8 mm 的冷却水通道。为防止铜质散热底板表面被氧化影响与晶体夹具的导热能力,表面采用镀铬处理。晶体夹具固定在铜质散热底板之上,为使底板与晶体夹具得到充分接触散热底板表面与晶体夹具之间同样垫有厚度 0.1 mm 的铝箔。冷却水机采用并行通水冷却方式通过散热底板,冷却水温度设置为 16℃,温控精度±1℃。

根据实验经验,设 Tm:YLF 晶体的热透镜  $f=-300$  mm,在模拟计算中设晶体内振荡光直径为

460 μm。当对晶体进行双端泵浦时,根据泵浦光的吸收公式:

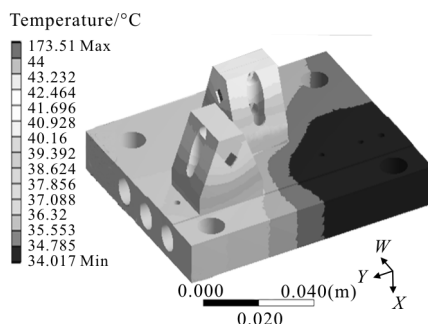
$$\eta=1-\exp(-2I) \quad (1)$$

吸收系数在单端泵浦时(40W)测得为~1.0cm<sup>-1</sup>,晶体对泵浦光的吸收效率为~86%。将晶体内振荡光产生的热功率近似计算为:

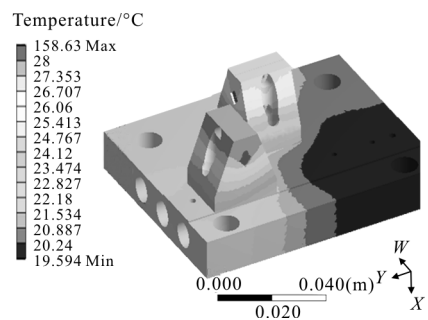
$$P_{\text{heat}}=P_{\text{pump}}\times\eta-P_{\text{output}} \quad (2)$$

因此每个晶体在振荡光模体内的热辐射功率可近似设为 40 W,因此将晶体发热模型等效为晶体中心存在直径 460 μm 长 20 mm 的热源,热辐射功率为 40 W。

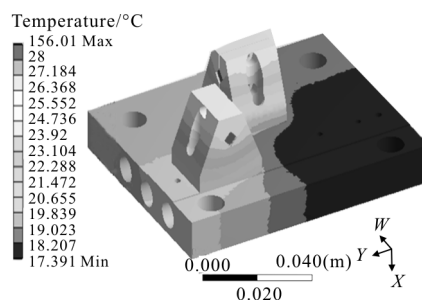
散热底板中的冷却水通道采用设定热交换系数来模拟制冷效果。根据经验值,水与铜接触时对应的热交换系数在 1 000~15 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)之间,所以分别在热交换系数为 1 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)、4 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)、8 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)和 15 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)时计算了晶体夹具及水冷板的温度,初始温度设为 16℃。采用 Ansys 软件中的稳态热分析模块对系统划分网格,每个网格单元长度为 1 mm,最小边缘长度为 0.5 mm,网格总数为 633406。计算结果分别如图 1(a)、(b)、(c)和(d)所示。



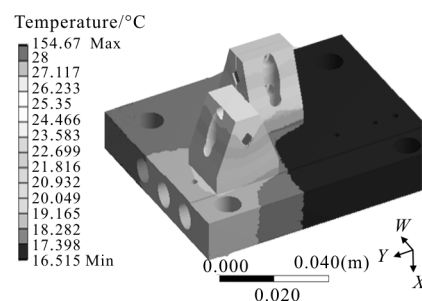
(a) 热交换系数  
(a) Heat convection coefficient



(b) 热交换系数  
(b) Heat convection coefficient



(c) 热交换系数  
(c) Heat convection coefficient



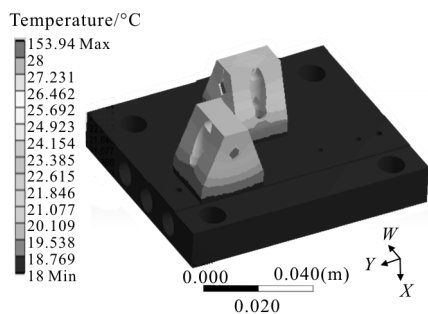
(d) 热交换系数  
(d) Heat convection coefficient

图 1 晶体夹具及底板温度模拟计算结果

Fig. Simulation of temperature distribution of crystal clamps and cooling plate

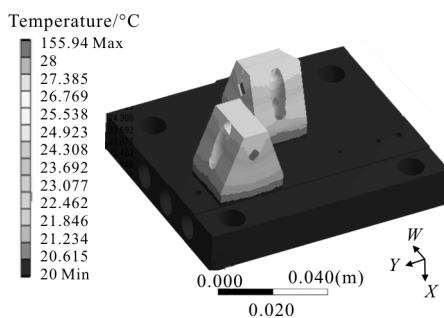
图 1 中夹具中心方形位置为 Tm:YLF 晶体。为了能够显示出晶体夹具及散热底板的温度分布情况,图 1(a)、(b)、(c)和(d)的等温线除晶体部分之外,颜色-温度表征值调节至 28℃。从计算结果可以看出,最高温度位于晶体中心处,晶体夹具及散热底板对应的颜色-温度表征值均在 28℃以下,因此可完整地表示出晶体外的温度场分布。在热交换系数设为最小值 1 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)即处于自然对流时,晶体中心温度为 173.5℃,晶体夹具最高温度为 43~45℃。当热交换系数设为 4 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)、8 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)和 15 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)即处于不同的强制对流条件时,晶体夹具温度由 43~45℃降低至 25~27℃之间,说明随着热交换系数升高,晶体夹具温度迅速下降,并趋于 25℃,晶体中心温度则由 173.5℃降低至 160℃以下,如图 1(b)、(c)和(d)所示。

由于激光晶体一般采用 TEC 制冷,同样模拟计算了在 TEC 制冷下晶体的温度分布,并与冷却水直接制冷做了对比。在这里假设水冷底板由 TEC 制冷,温度分别设为 18℃和 20℃,计算结果如图 2 所示。



(a) 设底板温度为 18℃

(a) Assumed cooling plate temperature as 18 °C



(b) 设底板温度为 20℃

(b) Assumed cooling plate temperature as 20 °C

图 2 TEC 对晶体夹具制冷模拟计算结果

Fig.2 Simulation of crystal clamps cooled by TEC

当设底板温度为 18℃与 20℃时,晶体温度分别为 154℃和 156℃,与采用热交换系数 8000 W/(m<sup>2</sup>·℃)和 15 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)对应直接水冷计算的结果近似。说明采用 16℃冷却水在中等及以上的强制对流对晶体冷却效果与采用 TEC 温度控制在 18~20℃时,对于晶体中心发热功率 40 W 的冷却效果近似,可替代 TEC 制冷。

## 2 Tm:YLF 激光器实验验证

根据模拟计算结果,搭建的 Tm:YLF 激光器光路结构如图 3 所示。谐振腔采用 U 型结构的平凹腔,腔长 122 mm。M1 为平面输入镜 (I.C., Input Coupler),镀有 792 nm 波段的增透膜及 1.9 μm 波段的高反膜,R1 和 R2 为 45°反射镜,均镀有 792 nm 增透膜和 1.9 μm 高反膜,M2 为曲率半径 R=200 mm 的输出镜(O.C., Output Coupler)。Tm:YLF 晶体内的振荡光直径为~460 μm。为避免水吸收对振荡光的影响,采用厚度为 0.1 mm 的 F-P 调谐振荡光的波长,以避开水气吸收峰。

泵浦源为波长 792 nm 的光纤耦合输出激光二极管,纤芯直径 200 μm,数值孔径 0.22NA,最大输出功率 40 W。采用光纤准直器为光纤输出的泵浦光准直,准直后的光斑为~15.8 mm,发散角小于 1.5 mrad。通过采用焦距为 100 mm 的聚焦镜将泵浦光耦合至晶体内部,晶体内部对应的泵浦光直径为~560 μm。

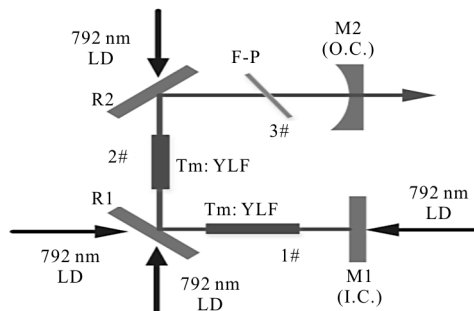


图 3 双晶四端泵浦 Tm:YLF 激光器结构

Fig.3 Configuration of double-crystal four-end pumped Tm:YLF laser

当 U 型腔内仅在 1# 位置放置 Tm:YLF 晶体时,采用透过率为 20%的输出耦合镜(O.C.),谐振腔在泵浦功率为 72.9 W 时,输出功率达到 25.9 W,斜效率为 40.7%,实验结果如图 4 所示。

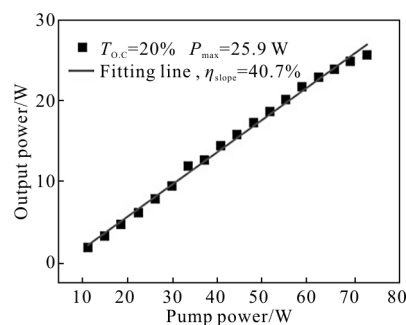


图 4 Tm:YLF 单晶双端泵浦结果

Fig.4 Experiment result of single crystal dual-end pumped Tm:YLF

为进一步提高激光输出功率,腔内 1# 和 2# 位同时放置 Tm:YLF 晶体,对所放置的两根 Tm:YLF 晶体四端同时泵浦。由于腔内增益介质及泵浦功率均增加一倍,因此采用透过率 40%的输出耦合镜,以提高谐振腔内的功率提取效率,实验结果如图 5 所示。当泵浦功率超过 80 W 时,谐振腔内大气中的水气对振荡光出现较强的吸收,疑似振荡光的波

长恰好红移至水气的吸收峰,当快速增加电流,泵浦功率超过 130 W 时,振荡光波长已越过水吸收峰,吸收振荡光现象消失。为避免水吸收峰对振荡光的影响,采用厚度为 0.1 mm 的 F-P 标准放置于 3# 位,在低功率时波长调节至 1907.2 nm,随着泵浦功率的增加,波长红移至~1909 nm,振荡光可有效地避开水吸收峰,从而使输出功率达到 46 W,对应的斜效率为 37.1%。

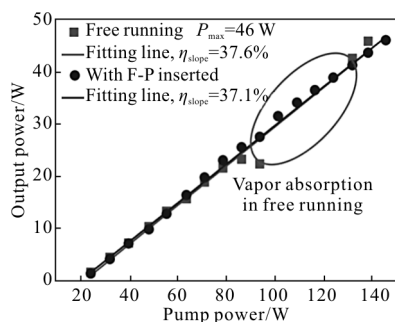


图 5 Tm:YLF 双晶四端泵浦结果

Fig.5 Experiment result of double-crystal four-end pumped Tm:YLF

相对于单晶双端泵浦,双晶四端泵浦 Tm:YLF 斜效率偏低,这主要是由于在 2# 位上的晶体内部振荡光直径略大于 1# 位的 Tm:YLF 晶体。由于腔内放置两块 Tm:YLF 晶体,谐振腔内的增益相对具有更高的增益,因此输出的谱线相对于单晶双端泵浦更宽,从而使斜效率稍有下降。

### 3 结论

首先设计了 Tm:YLF 激光器冷却系统,并利用 Ansys 稳态热分析模块在不同的热交换系数条件下对晶体夹具的冷却效果,也仿真了采用 TEC 对晶体夹具冷却的效果。通过对比发现,当采用水温 16℃并设散热底板中冷却水通道在中等强制对流(8 000 W/(m<sup>2</sup>·℃)及以上时,与采用 TEC 制冷并将温度设置为 18℃与 20℃时的晶体温度近似,可替代 TEC 对晶体进行制冷。

根据模拟计算的结果,搭建了单晶双端泵浦及双晶四端泵浦 Tm:YLF 激光器在对单个 Tm:YLF 晶体进行双端泵浦并采用 16℃冷却水对晶体夹具进行直接传导冷却时,获得了最高输出功率 25.9 W,

对应的斜效率为 40.7%。当采用两根 Tm:YLF 晶体进行双晶四端泵浦时,泵浦功率超过 80 W 时,腔内振荡光出现水吸收并影响了激光输出。在腔内插入 F-P 后,可以有效地避开水吸收峰,并获得了 46 W 的输出功率,对应的斜效率 37.1%,与参考文献[12]报道的斜效率接近。说明设计的 Tm:YLF 冷却系统可有效地冷却双晶四端泵浦结构的 Tm:YLF 晶体,并可达到接近 TEC 冷却晶体时对应的激光输出效率,大大精简了 Tm:YLF 激光器结构。

根据此实验模拟计算结果,通过进一步优化晶体夹具,可用于板条结构的双晶四端泵浦 Tm:YLF 激光器,有望获得更高的功率输出。

### 参考文献:

- [1] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2015(4): 517-534. (in Chinese)
- [2] Yang Yang, Zhao Yuan, Qiao Lijie, et al. Atmospheric transmission property of 1.06μm laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(1): 15-19. (in Chinese)
- [3] Lv Weiyu, Yuan Ke'e1, Wei Xu, et al. A mobile lidar system for aerosol and water vapor detection in troposphere with mobile lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 190-196. (in Chinese)
- [4] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsen. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging[J]. *Chinese Optics*, 2015(1): 28-38. (in Chinese)
- [5] Li Xiuming, Huang Zhanghua, Li Xiangyu, et al. Two-dimensional point laser Doppler velocimeter for velocity measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2627-2632. (in Chinese)
- [6] Oleg L Antipov, Nikita G Zakharov, Michael M Fedorov, et al. Cutting effects induced by 2 μm laser radiation of CW Tm:YLF and CW and Q-switched Ho:YAG lasers on ex-vivo tissue[J]. *Medical Laser Application*, 2003, 26(2): 67-75.
- [7] Gary D Spiers, Robert T Menzies, Joseph Jacob, et al. Atmospheric CO<sub>2</sub> measurements with a 2 μm airborne laser absorption spectrometer employing coherent detection [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(14): 2098-2111.
- [8] Budni P A, Pomeranz L A, Lemons M L, et al. Efficient

- mid-infrared laser using 1.9- $\mu\text{m}$ -pumped Ho:YAG and ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(5): 723-728.
- [9] Ke Changjun, Kong Xinyi, Wang Ran, et al. Research progress on mid-IR Fe:ZnSe laser technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016(3): 136-142. (in Chinese)
- [10] Bowman S R, Feldman B J. Demonstration and analysis of a holmium quasi-two-level laser [C]//SPIE, 1992: 46-54.
- [11] Li J, Yang S H, Meissner A, et al. A 200 W INNOSLAB Tm:YLF laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 256 - 258.
- [12] Shen Y J, Yao B Q, Qian C P, et al. 108-W diode-end-pumped slab Tm:YLF laser with high beam quality [J]. *Applied Physics B*, 2015, 118(4): 555-559.