

# LD 双端同向偏振泵浦 Tm : YLF 激光器

王睿明, 李 玥, 周冠龙, 刘景良, 陈薪羽  
(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**基于同向偏振泵浦技术,实现了 LD 双端同向偏振泵浦 Tm : YLF 激光器的 1.9  $\mu\text{m}$  高效输出。在激光器实际运行状态下,对晶体内温度分布进行了模拟仿真并开展实验研究。实验采用偏振分束器和半波片,使两束不同方向的泵浦光转换为同向偏光注入晶体。晶体掺杂浓度为 3% . at, 尺寸为 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  14 mm。激光器采用长度为 80 mm 的“L”形平凹腔。输出镜透过率  $T = 15\%$ , 曲率半径  $R = 150$ 。当泵浦功率为 47.42 W 时实现了 14.72 W 的功率输出。波长为 1907.6 nm, 线宽为 1.26 nm。光束质量为  $M_x^2 = 3.19$  和  $M_y^2 = 3.29$ , 斜效率为 37.24%, 光 - 光转化效率为 31%。

**关键词:**同向偏振泵浦; 温度分布; 1.9  $\mu\text{m}$ ; Tm : YLF

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.013

## LD double ended co-polarization pumped Tm : YLF laser

WANG Rui-ming, LI Yue, ZHOU Guan-long, LIU Jing-liang, CHEN Xin-yu  
(College of Sciences, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:**Based on the co-polarization pumping technology, the 1.9  $\mu\text{m}$  high-efficiency output of LD double ended co-polarization pumped Tm : YLF laser is realized. The temperature distribution of Tm : YLF crystal pumped by LD double end co-polarization was simulated and experimentally studied. The experiment used a split beam splitter to convert the pump light into the homogeneous polarization injection and built an L-shaped plano-concave cavity laser by 80 mm length. The crystal doping concentration was 3 at. % and the size were 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  14 mm, the transmittance of the output mirror is 15 %. The power output achieved 14.72 W when the pump power is 47.42 W. At this time, the wavelength of the beam is 1907.6 nm, the linewidth is 1.26 nm, the mass is  $M_x^2 = 3.19$  and  $M_y^2 = 3.29$ , the slope efficiency is 37.24 %, and the light-to-light conversion efficiency is 31 %.

**Keywords:**double ended co-polarization pumped; temperature distribution; 1.9  $\mu\text{m}$ ; Tm : YLF

### 1 引言

1.9  $\mu\text{m}$  波段激光处于人眼安全范围,且对大气有较高的透过率。在激光遥感、医疗卫生、军事领域有着重要的应用。由于 1.9  $\mu\text{m}$  波段处于大气窗口,是激光遥感和探测的理想光源,目前应用在测风雷达、卫星空间遥感等方面,拥有很大的前景。在医

学方面也有很大的应用价值,用于微创手术有切除精度高,伤口小出血少的优点,极大程度减轻了患者的痛苦,也减少了术后感染的风险。随着 1.9  $\mu\text{m}$  激光技术的进步,在军事领域有很大潜力。可用于探测爆炸物,并且作为战斗和导弹的重要制导手段,同时也能够对敌方进行红外激光对抗,达到干扰和

作者简介:王睿明(1996-),男,硕士研究生,主要从事激光物理与新型激光器等方面的研究。E-mail:946995587@qq.com

通讯作者:陈薪羽(1986-),女,研究员,博士生导师,博士,主要从事激光物理与新型激等方面的研究。

E-mail:chenxinyucust@163.com

收稿日期:2020-10-15

软杀伤的效果<sup>[1-5]</sup>。由于 Tm : YLF 激光器<sup>[6-7]</sup>出的 1.9  $\mu\text{m}$  波段处于 Ho 晶体吸收峰,也可以作为 Ho 激光器的泵浦源<sup>[8-12]</sup>。YLF 晶体有较长的上能级寿命,相比于 YAP、YAG 没有热致双折射,光损伤阈值高等优点,但是 Tm : YLF 晶体热脆裂极限较低,由于泵浦光产生的废热,容易造成晶体内部形成温度梯度,在高功率时导致晶体碎裂。目前 Tm : YLF 激光器输出功率主要受限于温度所引起的晶体内部热效应,并影响激光器转化效率。Tm : YLF 是一种各向异性晶体,具有两个偏振方向,本实验利用这一特性,采用 LD 同向偏振泵浦的方式,将双端的泵浦光转换为同向偏振方向再注入晶体。相比非同向偏振泵浦,优化了泵浦结构,改善晶体热效应,避免了晶体的两端因吸收光聚焦强度不均而引起晶体炸裂。有效提高了晶体对泵浦光的吸收效率,进而提升了激光器的输出功率。

## 2 理论与模拟

LD 双端偏振泵浦 Tm : YLF 晶体激光器模型如图 1 所示,泵浦光分别为  $I_1$ 、 $I_2$ , 泵浦光焦点分别为  $z_1$ 、 $z_2$ , 晶体四个侧面包裹在水冷装置中。

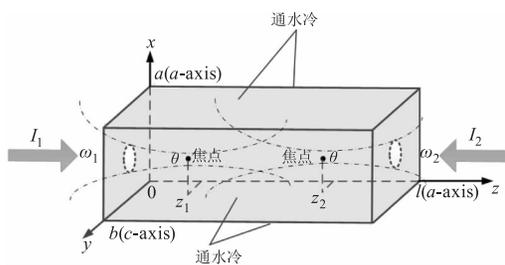


图 1 LD 双端偏振泵浦 Tm : YLF 晶体模型示意图

Fig. 1 The physical model of Tm : YLF crystal with LD double ended polarization pump

两束泵浦光的光强分布函数分别可以表示为:

$$\begin{cases} I_1(x, y, z) = \frac{P_{in1}}{\pi [\omega_{p1}^2 + (z - z_1)^2 \theta_1^2]} \cdot \exp \left[ -2 \frac{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2}{\omega_{p1}^2 + (z - z_1)^2 \theta_1^2} \right] \\ I_2(x, y, z) = \frac{P_{in2}}{\pi [\omega_{p2}^2 + (z - z_2)^2 \theta_2^2]} \cdot \exp \left[ -2 \frac{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2}{\omega_{p2}^2 + (z - z_2)^2 \theta_2^2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

泵浦光强在偏振方向的投影如图 2 所示,  $I_\sigma$  为泵浦光强投影到  $x$  方向的偏振分量,  $I_\pi$  为泵浦光强

投影到  $y$  方向的偏振分量。

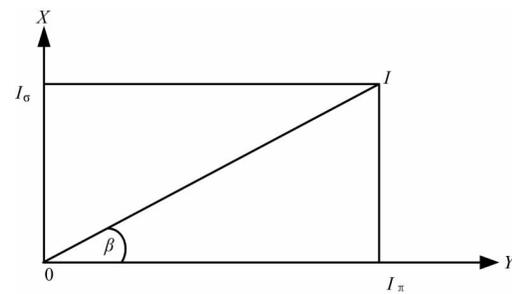


图 2 泵浦光强在偏振方向的投影示意图

Fig. 2 Schematic projection diagram of the pump light intensity in polarization direction

考虑 Tm : YLF 晶体对泵浦光的吸收,则根据 Lambert-Beer 定律<sup>[13]</sup>, 可得:

$$\begin{aligned} I_\pi &= I_0 \cos^2 \beta \exp(-\alpha_\pi d) \\ I_\sigma &= I_0 \sin^2 \beta \exp(-\alpha_\sigma d) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $d$  为吸收深度;  $I_0$  为泵浦光强分布函数;  $\beta$  为偏振方向投影的夹角;  $\alpha_\pi$ 、 $\alpha_\sigma$  分别为 Tm : YLF 晶体在  $\pi$ 、 $\sigma$  偏振方向的泵浦吸收系数。

根据泵浦光偏振理论,建立了在稳态条件下 LD 双端偏振泵浦 Tm : YLF 晶体热分析模型,如图 1 所示。室温为  $T_a$ , 晶体的两个端面与空气接触,进行热交换,四个侧面保持恒定的水冷温度  $T_w$ 。

稳态条件下, LD 双端偏振泵浦 Tm : YLF 晶体的热传导方程可以表示为:

$$\kappa_x \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \kappa_y \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \kappa_z \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} + Q_v(x, y, z) = 0 \quad (0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, 0 \leq z \leq l) \quad (3)$$

其中,  $T(x, y, z)$  为 Tm : YLF 晶体任意一点温度;  $\kappa_x$ 、 $\kappa_y$ 、 $\kappa_z$  分别为 Tm : YLF 沿坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的热传导系数;  $Q_v(x, y, z)$  为单位体积内的热源密度函数。

边界条件为:

$$\begin{cases} T(x, b, z) = T_w \\ T(x, 0, z) = T_w \\ T(a, y, z) = T_w \\ T(0, y, z) = T_w \\ -\kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} + h_a T(x, y, 0) = h_a T_a \\ \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l} + h_a T(x, y, l) = h_a T_a \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $h_a$  是空气和晶体之间的对流传热系数。

利用 Comsol 软件模拟分析,当双端泵浦功率为 50 W,束腰半径为 430  $\mu\text{m}$  时,LD 双端非同向偏振泵浦与同向偏振泵浦 Tm : YLF 晶体的温度场分布情况。

在非同向偏振泵浦时晶体温度分布如图 3 所示,最高温度为 344 K,晶体通光轴最大温差为 4.6 K。在同向偏振泵浦时晶体温度分布如图 4 所示,最高温度为 332 K,晶体通光轴最大温差为 3.3 K。相比非同向偏振泵浦时最高温度低 12 K,晶体通光轴最大温差低 1.3 K。在同向偏振泵浦晶体时通光方向的温差较小,远低于晶体最高点温度与最低点的温差,晶体在通光方向因热分布不均而产生的应力破坏远小于晶体破损阈值。通过模拟可看出采用同向偏振泵浦增益介质的方法在提高增益介质的有效泵浦光吸收效率的同时热效应较小。

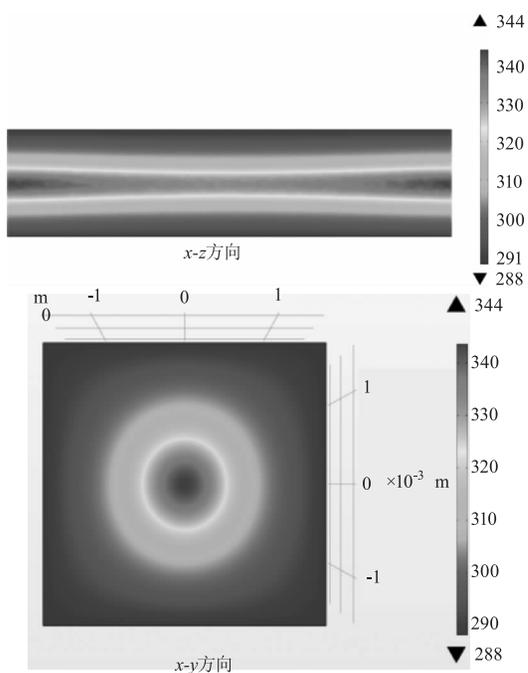


图 3 LD 双端非同向偏振温度分布图  
Fig. 3 Distribution of LD double ended non-co-directional polarization temperature

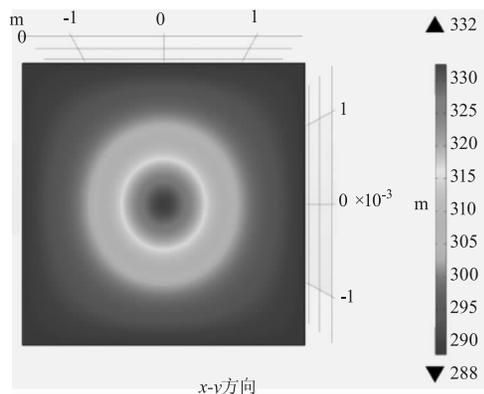
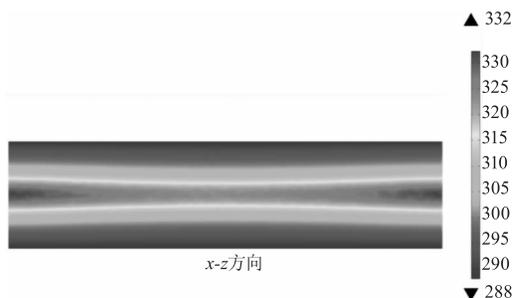


图 4 LD 双端同向偏振温度分布图  
Fig. 4 Distribution of LD double ended co-directional polarization temperature

### 3 实验装置

LD 同向偏振双端泵浦 Tm : YLF 激光器实验装置如图 5 所示,泵浦源使用输出波长为 792 nm 的 LD 光纤耦合模块。Tm : YLF 晶体的尺寸为 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  14 mm,沿  $a$  轴切割,掺杂浓度为 3 %。晶体用铝箔包裹置于紫铜热沉,采用水循环水冷机的制冷,温度设置为 17  $^{\circ}\text{C}$ 。采用长度为 80 mm 的“L”形谐振腔。

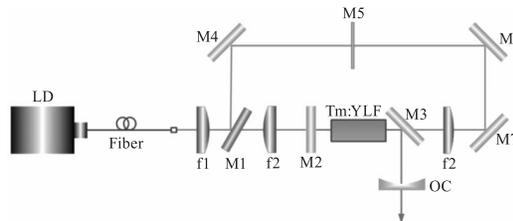


图 5 LD 同向偏振双端泵浦 Tm : YLF 激光器实验装置示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup of LD double ended co-polarization pumped Tm : YLF laser

泵浦光经平凸透镜  $f_1$  聚焦透射至镀有 792 nm 偏振分光器 M1,泵浦光变为偏振光。 $\pi$  偏振光经平凸透镜  $f_2$  聚焦透射至镀 792 nm 抗反膜和 1910 nm 高反膜的激光全反镜 M2,经激光全反镜 M2 透射入射至 Tm : YLF 激光晶体。 $\sigma$  偏振光经过  $f_1$ ,由全反镜 M4 反射至半波片 M5 后转变为  $\pi$  偏振光, $\pi$  偏振光经全反镜 M6、M7 反射至平凸透镜  $f_2$ ,M4、M6、M7 镀有 792 nm 高反膜。经平凸透镜  $f_2$  后透射至两面分别镀 1910 nm 高反膜及 792 nm 高透膜的 45 $^{\circ}$ 激光全反镜 M3,经 45 $^{\circ}$ 激光全反镜 M3 透射入射至 Tm : YLF 激光晶体,Tm : YLF 晶体吸收同向  $\pi$  偏振泵浦光产生 1910 nm 激光辐射,经平凹输出耦合镜 OC 耦合输出。

#### 4 实验结果

采用以上实验装置搭建实验,激光器输出特性如图6所示,当不加入半波片的LD双端非同向偏振泵浦 $Tm:YLF$ 激光器,注入47.43 W的功率时,能够输出激光14.28 W,斜效率为36.13%。当半波片插入谐振腔时,LD双端同向偏振泵浦 $Tm:YLF$ 激光器,相应的斜效率为37.26%,提升1.13%,由于插入半波片后同向偏振的泵浦光泵浦 $Tm:YLF$ 晶体,增加了晶体的吸收效率,通过优化泵浦结构,有效提高了晶体的增益。

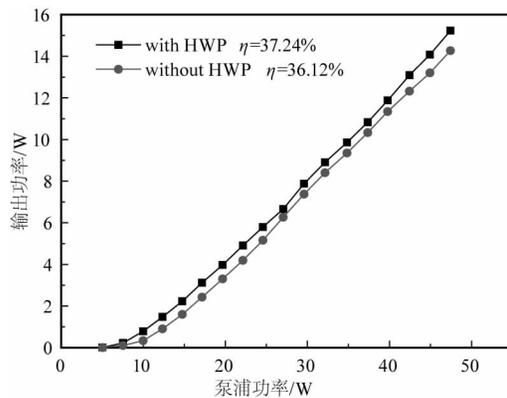


图6 LD双端偏振泵浦 $Tm:YLF$ 激光器的输出特性

Fig. 6 Output characteristics of LD double-ended polarization pumped  $Tm:YLF$  laser

使用以色列OPHIR公司研制的L150A-V1功率计,在不同耦合输出镜参数下测量激光器的输出功率。实验结果如图7所示。

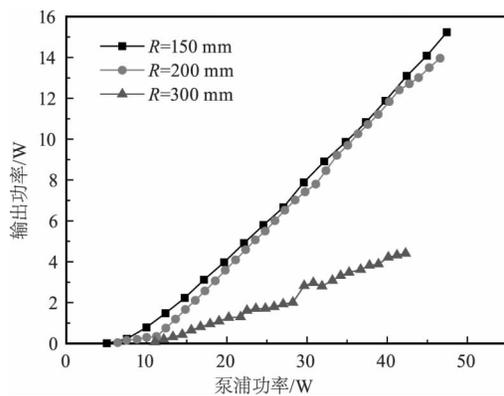


图7 不同曲率半径下的LD同向偏振双端泵浦 $Tm:YLF$ 激光器的输出特性

Fig. 7 Output characteristics of LD co-polarized double-ended pumped  $Tm:YLF$  laser under different radius of curvature

输出耦合镜曲率半径和透过率分别为 $R=150$  mm,  $T=15\%$ 时,LD双端共注入47.45 W时,激光器的输出功率为15.22 W,泵浦阈值功率为

5.01 W,相应的斜效率和光-光转换效率分别为37.22%, 32.07%。当 $R=200$  mm时,泵浦阈值功率为6.52 W,光-光转换效率和斜效率分别为30.02%, 38.54%。当 $R=300$  mm时,泵浦阈值功率为10.87 W,光-光转换效率和斜效率分别为9.89%, 13.86%。由此看出,当输出耦合镜曲率半径增加,激光器的泵浦阈值功率随之增加;腔内损耗也随之增加;输出功率随之降低;光-光转换效率和斜效率随之降低。激光器的最佳参数分别为,谐振腔长度 $L=80$  mm,输出耦合镜透过率和曲率半径为 $T=15\%$ ,  $R=150$  mm。

如图8所示,LD同向偏振双端泵浦 $Tm:YLF$ 激光器输出激光的中心波长为1907.6 nm,线宽1.26 nm。光束质量如图9所示,光束质量分析仪采用美国SPIRICON公司的Pyrocam III型,测量得出光束质量为 $M_x^2=3.19$ 和 $M_y^2=3.29$ 。



图8 LD同向偏振双端泵浦 $Tm:YLF$ 激光器输出光谱图

Fig. 8 Output spectrum of LD double ended co-polarization pumped  $Tm:YLF$  laser

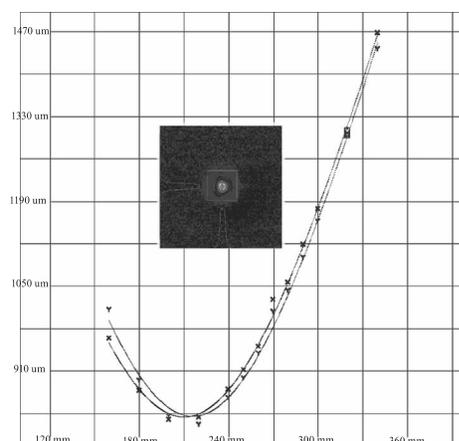


图9 LD同向偏振双端泵浦 $Tm:YLF$ 激光器的光束质量

Fig. 9 Beam quality of LD double ended co-polarization pumped  $Tm:YLF$  laser

## 5 结 论

本文采用了同向偏振泵浦技术,最终实现了 LD 双端同向偏振泵浦 Tm : YLF 激光器的  $1.9 \mu\text{m}$  高效输出。实验根据输出耦合镜不同曲率半径对激光器输出功率影响进行分析,当输出耦合镜曲率半径  $R = 150 \text{ mm}$ ,透过率  $T = 15 \%$  为最佳参数;谐振腔长度  $80 \text{ mm}$ 。实验采用偏振分光器和半波片使泵浦光转换为同向偏振光注入晶体,当泵浦功率为  $47.42 \text{ W}$  时实现了  $14.72 \text{ W}$  的功率输出。波长为  $1907.6 \text{ nm}$ ,线宽  $1.26 \text{ nm}$ 。斜效率为  $37.24 \%$ ,光-光转化效率为  $31 \%$ 。通过优化泵浦结构,使晶体温度分布更均匀,改善晶体热效应,有效提高了激光晶体增益。

## 参考文献:

- [1] Renz G, Bohn W. Two-micron thulium-pumped-holmium laser source for dircm applications[J]. Proc. SPIE, 2007, 6552:02-1-02-15.
- [2] Renz G, Bohn W. A  $2 \mu\text{m}$ -pump-laser-based dircm system and aero-optics in the mid-IR [J]. Proc. SPIE, 2007, 6738:0B1-0B12.
- [3] Frith G, Mc Comb T, Samson B, et al. Latest developments in  $790 \text{ nm}$ -pumped Tm-doped fibre laser systems for dircm applications[J]. Proc. SPIE, 2008, 7115:07-1-07-7.
- [4] Elder I. High average power thulium fibre laser pumped mid-IR source[J]. Proc. SPIE, 2007, 6738:04-1-04-10
- [5] Budni P A, Ibach C, Setzler S, et al.  $50 \text{ mJ}$ , Q-switched,  $2.09 \mu\text{m}$  holmium laser resonantly pumped by a diode-pumped  $1.9 \mu\text{m}$  thulium laser[J]. Opt. Lett., 2003, 28(12):1016-1018.
- [6] A. Berrou, O. J. P. Collett, D. Morris, et al. Comparative study of high power Tm : YLF and Tm : LLF slab lasers in continuous wave regime [J]. Opt. Express., 2018, 26(8):10559.
- [7] C. T. Wu, F. Chen, R. Wang, et al. Diode-end-pumped linear-polarized single-longitudinal-mode operation of a Tm : LuAG laser at room temperature[J]. Laser. Phys. Lett., 2010, 6(10):707-710.
- [8] R. Sroka, T. Pongratz, G. Scheib, et al. Impact of pulse duration on Ho : YAG laser lithotripsy; treatment aspects on the single-pulse level[J]. World. J. Urol., 2015, 33(4):479-85.
- [9] T. Bende, B. Jean, M. Derse, et al. Holmium : YAG thermokeratoplasty; treatment parameters for astigmatism induction based upon spherical enucleated human eyes[J]. Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol., 1998, 236(6):405-409.
- [10] T. Russell. Coherent lidar airborne wind sensor; flight test results at  $2 \mu\text{m}$  and  $10 \mu\text{m}$  [J]. App. Opt., 1996, 35(36):7117-7128.
- [11] J. R. Yu, B. C. Trieu, M. Petrosb, et al. Advanced  $2 \mu\text{m}$  solid-state laser for wind and  $\text{CO}_2$  lidar applications[J]. Proc. SPIE, 2006, 6409:64091C1-64091C11.
- [12] I. Mingareev, N. Gehlich, T. Bonhoff, et al. Principles and applications of trans-wafer processing using a  $2 \mu\text{m}$  thulium fiber laser [J]. Int. J. Adv. Manuf. Tech., 2016, 84(9-12):2567-2578.
- [13] 胡之德, 赵正风. 分光光度分析法[M]. 宁夏人民出版社, 1987.