

基于脉冲管制冷机的低温 Tm:YAG 激光器

张 斌^{1,2} 李建国¹ 蔡京辉¹

(¹ 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 研究了一种低温条件下(120 K 以下)运行的光纤耦合激光二极管(LD)端面抽运的 Tm:YAG 激光器。LD 中心波长为 785 nm(15 °C), 光纤芯径为 400 μm, 数值孔径为 0.22。Tm:YAG 晶体尺寸 3 mm×3 mm×8 mm, Tm³⁺ 掺杂原子数分数为 3%。采用一种新型小型脉冲管制冷机制冷, 具有冷端无振动、结构简单、寿命长的优点。将制冷机冷头与包裹晶体的紫铜热沉连接以冷却晶体, 并置于真空环境中, 防止结霜现象的发生。通过控制晶体温度, 得到了激光器在 80~290 K 温区内, 阈值功率和输出功率随工作温度的变化关系。在晶体温度为 80 K, 抽运功率为 9 W 时, 得到功率为 3.78 W 的 2.013 μm 连续激光输出, 光光效率为 42%, 斜率效率为 44.9%。

关键词 激光器; Tm:YAG 激光器; 激光二极管抽运; 脉冲管制冷机; 低温运行

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0102001

Cryogenic Operation of Tm:YAG Laser Based on Pulse Tube Cooler

Zhang Bin^{1,2} Li Jianguo¹ Cai Jinghui¹

(¹ *Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)
(² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract A fiber-coupled laser diode (LD) end-pumped Tm:YAG laser operated under cryogenic condition is studied. The central wavelength of the fiber-coupled LD is 785 nm at 15 °C, with fiber core diameter of 400 μm and numerical aperture of 0.22. The Tm:YAG crystal, with the dimension of 3 mm×3 mm×8 mm, is doped with Tm³⁺ with atomic fraction of 3%. Pulse tube cryocooler used to cool the crystal in the experiment is a new type of micro-cryocooler with the advantages of no vibration in the cold end, simple structure and long lifetime. The copper heat embedded with Tm:YAG crystal is attached to the cold head of the cryocooler and then fixed in a vacuum chamber to prevent frost. By adjusting the crystal temperature, the dependence of threshold and output power of Tm:YAG laser on crystal temperature in the range of 80~290 K is investigated. When the crystal temperature is 80 K, the highest continuous wave output power of 3.78 W at 2.013 μm under the pumping power of 9 W is achieved, corresponding to optical-optical conversion efficiency of 42%, and slope efficiency of 44.9%.

Key words lasers; Tm:YAG laser; laser diode pumping; pulse tube cooler; cryogenic operation

OCIS codes 140.3320; 140.3480; 140.3580

1 引 言

掺 Tm³⁺ 激光器输出波长在 2 μm 附近, 接近水的吸收峰, 对大气的穿透性强且具有人眼安全、对人体组织穿透深度浅的优点, 在激光相干雷达、遥感、医疗等领域有广阔的应用前景^[1]。从 20 世纪 90 年代开始, 各国学者对掺 Tm³⁺ 激光器进行了深入的研究^[2-7]。1998 年, Bolling 等^[8] 在室温条件下, 用

785 nm 波长抽运光端面抽运 Tm:YAG 晶体, 得到了 4.1 W 的 2.013 μm 激光输出, 光光效率为 30.3%。1999 年, Li 等^[9] 报道了一种激光二极管(LD)抽运的 Tm:YAG 激光器, 采用热电制冷器(TEC)控制晶体温度, 在 -20 °C 和 20 °C 时, 激光器的阈值功率分别为 0.26 W 和 0.57 W, 温度的升高使阈值功率增加了约 119%。2000 年, Lai 等^[10] 用

收稿日期: 2013-08-09; **收到修改稿日期**: 2013-08-27

作者简介: 张 斌(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事脉冲管制冷机与固态激光器耦合等方面的研究。

E-mail: zhangbin86.32@163.com

导师简介: 蔡京辉(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事脉冲管制冷机技术及应用等方面的研究。

E-mail: jhcai@mail.ipc.ac.cn

3 个 LD 侧面抽运 Tm:YAG 晶体,得到了 120 W 的 2 μm 连续激光输出,光光效率达 25.2%,斜率效率为 31.2%。2007 年,林志锋等^[11]采用 785 nm 光纤耦合半导体激光器作为抽运源,在 Tm:YAG 为 5 $^{\circ}\text{C}$ 时,获得了 4.04 W 的连续激光输出,斜率效率为 35.4%,光光效率为 26.4%。2011 年,Zhang 等^[12]用 795 nm 波长的 LD 端面抽运 Tm:YAG 晶体,并用 TEC 控制晶体的温度,在 15 $^{\circ}\text{C}$ 时得到了 12.3 W 的 1.94 μm 连续激光输出,光光效率为 31.6%,斜率效率为 38.2%。

由于掺 Tm³⁺ 激光器的准三能级特性,温度对其性能有较大影响。在常温下,Tm³⁺ 激光器下能级热粒子数较多,阈值较高,需要强抽运光以实现粒子数反转,而高的抽运能量会导致 Tm³⁺ 的激发态吸收,产生更多热量。随着温度的降低,Tm³⁺ 激光器下能级热粒子数减少,阈值降低,激光器的性能明显改善。但由于低温制冷系统的复杂性,国内外关于低温下(120 K)工作的 Tm:YAG 激光器的报道较少^[13-14]。

脉冲管制冷机出现于 20 世纪 60 年代,并从 20 世纪 80 年代中期以来得到迅速发展。作为一种新型低温制冷机,脉冲管制冷机去掉了传统制冷机在低温端的运动部件排出器,其冷端几乎没有振动。此外脉冲管制冷机具有结构简单、寿命长和电磁干扰小等优点,在航空航天、低温电子学、光学等领域有广阔的应用前景^[15-16]。本文采用脉冲管制冷机作为 Tm:YAG 激光器的低温冷却系统,使 Tm:YAG 激光器达到 120 K 以下的低温状态,并测试了激光器在 80~290 K 区间内的输出特性。在该激光器中,去掉了以往笨重的冷却系统且使晶体工作在低温状态下,具有结构简单轻巧、阈值低、效率高等优点,具有较高的实用价值。

2 低温 Tm:YAG 激光器系统

2.1 Tm:YAG 激光器

实验所用 LD 端面抽运 Tm:YAG 激光器结构原理图如图 1 所示。采用上海熙隆光电生产的 LD 作为抽运源,其 15 $^{\circ}\text{C}$ 时中心波长为 785 nm,半峰全宽约为 3 nm,输出波长随温度的漂移系数为 0.28 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。采用光纤耦合方式传导抽运光,光纤芯径为 400 μm ,数值孔径为 0.22,抽运光经过 1:1 光学耦合系统后聚焦在 Tm:YAG 晶体上。所用晶体的外形尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 8 mm,Tm³⁺ 的原子数分数为 3%,两端面均镀 785 nm 增透膜(透射

率 $T > 99.8\%$)和 2020 nm 增透膜($T > 99.8\%$)。谐振腔采用平凹腔结构形式,腔长 30 mm,输入镜为平面镜,一面镀 785 nm 增透膜($T > 99.8\%$),另一面镀 2020 nm 全反膜(反射率 $R > 99.8\%$);输出镜为平凹镜,曲率半径为 150 mm,对 2020 nm 激光的透射率为 3%。由于激光器工作在低温状态下,为了防止结雾结霜现象的发生,将低温激光器放在真空环境中工作。镜片 M1 和 M2 分别为真空室的入射镜和输出镜,M1 两面均镀 785 nm 高透膜,M2 两面均镀 2020 nm 高透膜。

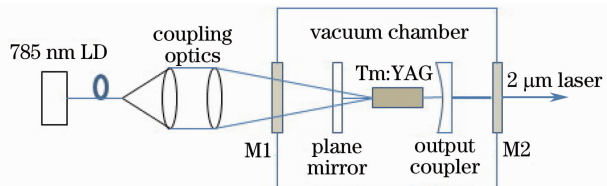


图 1 LD 端面抽运 Tm:YAG 激光器原理图

Fig. 1 Schematic of LD end-pumped Tm:YAG laser

2.2 脉冲管制冷机

为达到低温制冷温度,脉冲管制冷机采用高纯氦气(沸点为 4.3 K)作为制冷工质,制冷机外形结构如图 2 所示。压缩机活塞做往复运动,使工质在脉冲管内产生膨胀和压缩过程循环发生的交变流动,从而在冷头处产生制冷效应,并不断把热量从冷头抽运送到脉管热端^[17-19]。在实验中,Tm:YAG 晶体用钢膜包裹后夹在紫铜热沉中,热沉与脉冲管制冷机冷头连接,以达到降低晶体温度的目的。为避免低温条件下结霜现象对激光工作的影响,将制冷机冷头和激光谐振腔置于真空环境当中。

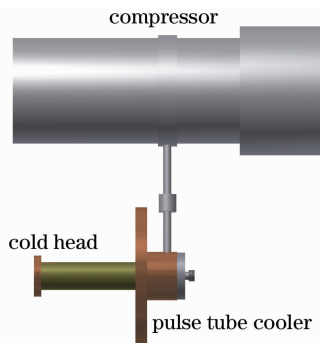


图 2 脉冲管制冷机结构图

Fig. 2 Configuration of pulse tube cooler

图 3 为开启制冷机后,Tm:YAG 晶体的降温曲线图。这一过程中,激光器没有工作,因而没有热负载,经过约 15 min 的时间,晶体的温度从室温(300 K 左右)逐渐降低到 45 K 的最低温度。

脉冲管制冷机的制冷温度主要受压缩机输入功

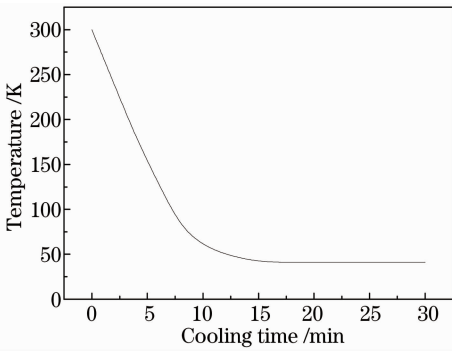


图3 Tm:YAG 晶体降温曲线

Fig. 3 Temperature falling of Tm:YAG crystal rate and cold head thermal load influence, its relationship is shown in Fig. 4. Under the same compressor input power, when there is no thermal load, the cooling temperature is the lowest. As the cold head thermal load increases, the cooling temperature increases approximately linearly. When the thermal load is the same, increasing the compressor input power can reduce the cooling temperature of the cold head.

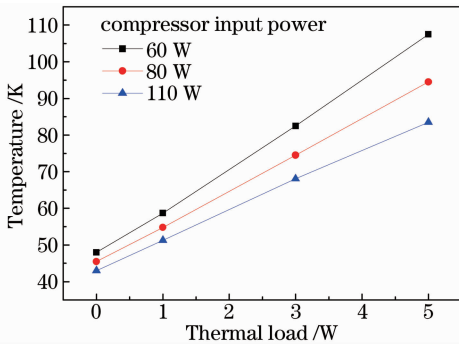


图4 脉冲管制冷机制冷性能曲线

Fig. 4 Cooling performance of pulse tube cooler

In the design of the coupling between the Tm:YAG laser and the pulse tube cooler, the heat generated in the crystal is the thermal load of the cooler. In addition, a heating film is pasted on the copper heat sink of the crystal to assist in controlling the working temperature of the laser crystal. By adjusting the compressor input power, the output optical power and the heating film heating power, the Tm:YAG crystal temperature can be controlled between 80 K and 290 K, and the working performance of the laser in this temperature range is studied.

3 实验结果与分析

在不同晶体工作温度下,785 nm LD 端面抽运 Tm:YAG 激光器的抽运功率和 $2.013 \mu\text{m}$ 激光输出功率的关系曲线如图 5 所示。在晶体温度为 80 K,抽运功率为 9 W 时,得到 3.78 W 的 $2.013 \mu\text{m}$ 连续激光输出,光光效率为 42%,斜率效率为 44.9%。随着晶体温度的升高,激光输出功率明显减小,光光效率也相应减小。在 290 K 的常温条件下,抽运功率为 9 W 时, $2.013 \mu\text{m}$ 连续激光输出功率降为 1.18 W,

相应的光光效率为 13.1%,斜率效率为 26.94%。

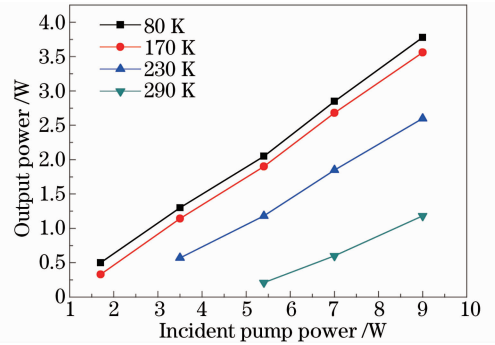


图5 不同晶体温度下 Tm:YAG 激光器输出功率与抽运功率的关系

Fig. 5 Output power of Tm:YAG laser versus pump power under different crystal temperatures

图6为在 80~290 K 温区内,温度对 Tm:YAG 激光器输出特性的影响。在 80~170 K 区间内,温度对 Tm:YAG 激光器输出功率的影响较小;而在 170~290 K 温度范围内,随着温度的升高,输出功率近似线性降低。这是因为 Tm:YAG 激光器属于准三能级系统,激光上能级位于 3F_4 多重态最低斯塔克能级上,下能级位于 3H_6 基态多重态较高斯塔克能级上。根据玻尔兹曼比值可知,随着温度的升高,下能级热粒子数显著增加,反转粒子数降低,激光阈值升高,因而激光功率降低。

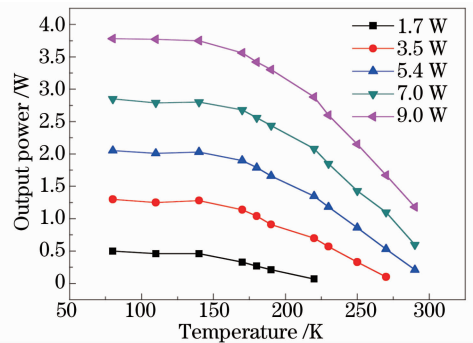


图6 不同抽运功率下 Tm:YAG 激光器输出功率与温度的关系

Fig. 6 Output power of Tm:YAG laser versus temperature under different pump powers

图7为实验测得的温度对 Tm:YAG 激光器阈值的影响曲线。由图 7 可知,晶体温度处于 170 K 以下的低温状态时,阈值的变化较小,如在 80 K 时,激光器阈值仅为 0.5 W;在 170~290 K 温区内,阈值功率随晶体温度升高而迅速增加,在 290 K 时,阈值功率升高到 4.4 W。

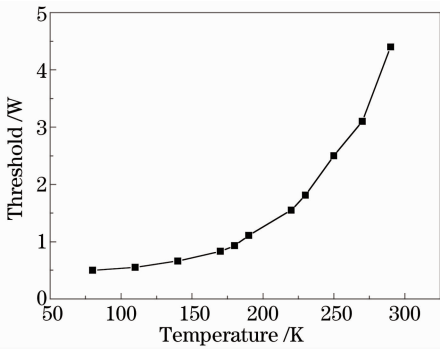


图 7 温度对 Tm:YAG 激光器阈值的影响

Fig. 7 Threshold power of Tm:YAG laser versus crystal temperature

4 结 论

Tm:YAG 激光器作为一种准三能级激光系统, 温度对其输出特性有重要影响。随着温度的降低, 下能级热粒子数减少, 激光器阈值降低, 因而在低温条件下可以得到更高的光光转换效率。采用脉冲管制冷机作为制冷设备, 并通过设计的温控系统, 实现了激光二极管端面抽运的 Tm:YAG 激光器在 80~290 K 温区内的 2.013 μm 连续激光输出, 得到了激光输出功率和激光器阈值随温度的变化关系。在晶体温度为 80 K, 抽运功率为 9 W 时, 得到 3.78 W 的 2.013 μm 连续激光输出, 光光效率为 42%, 斜率效率为 44.9%。作为一种高效的小型低温制冷机, 脉冲管制冷机替代了水冷系统, 并使 Tm:YAG 晶体工作在低温状态下。整个系统具有结构小巧、可移动、阈值低、效率高的特点, 在空间和地面均具有较强的实用性。

参 考 文 献

- 1 Zhao Yuanyuan, Hou Xia, Chen Weibiao. Research and progress of 2 μm all-solid-state lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(6): 20-24.
赵媛媛, 侯霞, 陈卫标. 2 μm 全固态激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(6): 20-24.
- 2 D Cao, Q Peng, S Du, *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.
- 3 P B Meng, B Q Yao, G Li, *et al.*. Comparative investigation of efficient diode-pumped c-cut Tm:YAP laser emitting at 1.94 and 1.99 μm[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(2): 351-354.
- 4 Zhang Xinlu, Wang Yuezhu, Yao Baoquan. Theoretical investigation of a laser diode-pumped quasi-three-level 2 μm (Tm, Ho):YLF laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 787-792.
张新陆, 王月珠, 姚宝权. 激光二极管抽运的准三能级 2 μm (Tm, Ho):YLF 激光器的理论研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(6): 787-792.
- 5 Zhang Xiaofu, Xu Yiting, Li Chengming, *et al.*. A continuous-wave diode-side pumped Tm:YAG laser with output 51 W[J].

- Chin Phys Lett, 2008, 25(10): 3673-3675.
- 6 Chunting Wu, Yonlun Ju, Yufeng Li, *et al.*. Diode-end-pumped composite Tm:YAG rod with undoped ends at room temperature [J]. *Chin Opt Lett*, 2008, 6(8): 594-596.
- 7 Wang Yuezhu, Duan Xiaoming, Ke Liang, *et al.*. Room temperature efficient continuous wave laser diode-end-pumped Tm:YAP laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1710-1713.
王月珠, 段小明, 柯亮, 等. 室温下高效率连续波激光二极管端面抽运 Tm:YAP 激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1710-1713.
- 8 C Bolling, W A Clarkson, R A Hayward, *et al.*. Efficient high-power Tm:YAG laser at 2 μm, end-pumped by a diode bar[J]. *Opt Commun*, 1998, 154(1-3): 35-38.
- 9 Li Cheng, Song Jie, Shen Deyuan, *et al.*. Diode-pumped high-efficiency Tm:YAG lasers [J]. *Opt Express*, 1999, 4(1): 12-18.
- 10 K S Lai, P B Phua, R F Wu, *et al.*. 120-W continuous-wave diode-pumped Tm:YAG laser [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(21): 1591-1593.
- 11 Lin Zhifeng, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Experimental investigation of laser diode end pump Tm:YAG laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(2): 181-185.
林志锋, 高明伟, 高春清. 激光二极管端面抽运 Tm:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2007, 34(2): 181-185.
- 12 Z Zhang, N J Ruan, F Zhou, *et al.*. High power continuous wave Tm:YAP laser dual-end-pumped by laser diode at 795 nm [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(6): 1078-1080.
- 13 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Dong Liqiang, *et al.*. Experimental study of Tm, Ho:YLF laser cooled by liquid N₂ [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(s1): 32-34.
姚宝权, 王月珠, 董力强, 等. 低温下运行的 LD 抽运 Tm, Ho:YLF 激光器[J]. *中国激光*, 2004, 31(s1): 32-34.
- 14 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, He Wanjuan, *et al.*. High efficient CW Tm, Ho:YLF laser pumped by fiber-coupled diodes [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(7): 881-884.
姚宝权, 王月珠, 贺万骏, 等. 低温下运行的光纤耦合激光二极管抽运 Tm, Ho:YLF 激光器[J]. *中国激光*, 2005, 32(7): 881-884.
- 15 J Liang, Y Zhou, W Zhu, *et al.*. Study on miniature pulse tube cryocooler for space application [J]. *Cryogenics*, 2000, 40(3): 229-233.
- 16 Yang Luwei. Progress of stirling-type high frequency pulse tube coolers and development of prototypes driven by commercial linear compressors [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2003, 31(3): 1-6.
杨鲁伟. 斯特林型高频脉冲管制冷机的现状与样机研制 [J]. *低温与超导*, 2003, 31(3): 1-6.
- 17 Chen Guobang, Tang Ke. Principles of Micro-Cryocoolers [M]. Beijing: Science Press, 2009. 177-180.
陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 177-180.
- 18 Gao Chengming, He Yaling, Chen Zhongxin, *et al.*. Configuration, theory and application progress of pulse tube cryocoolers [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2001, 29(2): 12-20.
高成名, 何雅玲, 陈钟欣, 等. 脉管制冷机结构、理论及实用化等方面的进展 [J]. *低温与超导*, 2001, 29(2): 12-20.
- 19 Wang Xilong, Wang Guoping, Cai Jinghui, *et al.*. Experimental measurements of flow characteristics in a high frequency pulse tube cooler [J]. *J Engineering Thermophysics*, 2005, 26(3): 365-368.
王希龙, 王国平, 蔡京辉, 等. 高频脉管制冷机流动特性实验分析 [J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(3): 365-368.