

双波长连续锁模Tm:LuAG固体激光器

袁 振, 张明霞, 董 忠, 孙 锐, 陈 晨, 令维军*

天水师范学院, 激光技术研究所, 甘肃 天水

Email: wjlingts@sina.com

收稿日期: 2020年9月2日; 录用日期: 2020年9月15日; 发布日期: 2020年9月22日

摘 要

本实验以InGaAs半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为锁模启动元件在Tm:Lu₃Al₅O₁₂ (Tm:LuAG)激光器中实现了双波长连续锁模运转。采用1.5%, 3%和5%的输出镜, 当腔内未插入SESAM时, 最大连续输出功率分别为680 mW、1.09 W和1.4 W。当腔内插入SESAM后, 仅在1.5%输出镜下实现了稳定双波长连续锁模运转, 对应的输出波长为2020.3 nm和2023.2 nm, 脉冲宽度为63.2 ps, 重复频率为97.9 MHz, 最大平均输出功率135 mW。结果表明: Tm:LuAG晶体是2 μm波段优良的双波长晶体。

关键词

Tm:LuAG激光器, 双波长, 半导体可饱和吸收镜, 连续锁模

Dual Wavelength CW Mode-Locked Tm:LuAG Solid State Laser

Zhen Yuan, Mingxia Zhang, Zhong Dong, Rui Sun, Chen Chen, Weijun Ling*

Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui Gansu

Email: wjlingts@sina.com

Received: Sep. 2nd, 2020; accepted: Sep. 15th, 2020; published: Sep. 22nd, 2020

Abstract

In this experiment, an InGaAs semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is used as a mode-locked starting element to realize dual-wavelength continuous-wave (CW) mode-locked operation in Tm:Lu₃Al₅O₁₂ (Tm:LuAG) laser. With 1.5%, 3% and 5% output mirrors, the maximum CW output power is 680 mw, 1.09 w and 1.4 W respectively. When SESAM is inserted into the cavi-

*通讯作者。

ty, a stable dual-wavelength mode-locked operation is realized only with 1.5% output mirror. The corresponding output wavelengths are 2020.3 nm and 2023.2 nm; the pulse duration is 63.2 ps; the repetition rate is 97.9 MHz; the maximum average output power is 135 mW. The results show that Tm:LuAG crystal is an excellent dual-wavelength crystal in 2 μm band.

Keywords

Tm:LuAG Laser, Dual-Wavelength, Semiconductor Saturable Absorber Mirror, Continuous Mode Locking

Copyright © 2020 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

中红外波段的激光在国内外的工业、国防、医学中具有重要的应用价值,其中 2~3 μm 激光处于大气透明窗口,在眼科手术、痕量气体监测(如氨气 NH_3 监测, N_2O 气体监测)以及大气遥感探测等应用方向起着举足轻重的作用[1] [2]。该波段的高功率激光是产生 3~5 μm 中红外波段以及 8~14 μm 远红外波段光学参量振荡器和光学参量放大器十分理想的泵浦源。综上所述,获得 2~3 μm 的中红外光源(激光)具有十分重要的应用价值和科学意义[3] [4] [5]。尤其是该波段的双波长锁模激光器,在太赫兹激光脉冲的产生和高精光谱分辨中具有重大的应用前景。

要想获得较高的峰值功率和较窄的脉冲宽度的超短激光脉冲,就必须采用锁模技术,就是使激光器中纵模各个相邻频率间的间隔相等并且固定为公式(1),公式(1)为激光器纵模频率间隔,其中 c 为光的传播速率 3.0×10^8 m/s, L 为激光器的腔长。并且要保持相同的相位差[6]。

$$\Delta\nu_q = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

本文采用的是被动锁模,被动锁模即在激光谐振腔内插入一些可饱和吸收材料,来调节激光腔内色散和损耗,使其满足锁模条件时,就会产生一系列的锁模脉冲。

被动锁模材料有诸如单壁碳纳米管(SWCNTs)、双臂碳纳米管(DWCNT)、半导体可饱和吸收镜(SESAM)、过渡金属二硫化物和石墨烯等,其中较为常用的锁模元件就是 SESAM,自从 SESAM 首次应用于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 激光器实现锁模后,SESAM 锁模技术打开了超快脉冲激光领域的大门[7] [8] [9] [10]。SESAM 锁模技术在 2 μm 波段的激光应用也颇为广泛,SESAM 因性能稳定、操作简单、结构紧凑等优点,已被广泛应用于各个领域,其中铟镓砷衬底的 SESAM 被广泛应用于 2 微米掺铥激光晶体的锁模[11] [12]。

($\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)晶体具有良好的导热特性和较宽的发射光谱,还具有良好的化学辐射稳定性、较强的机械硬度和优异的导热性,因此其是作为固体激光增益介质的理想选择。Tm:LuAG 晶体有两个吸收峰(782 nm 和 788 nm)和三个发射峰(1780 nm、1884 nm、2023 nm),从 Tm:LuAG 晶体的光谱图来看其发射光谱大致是连续分布的,因此 Tm:LuAG 晶体可以作为连续可调谐激光的晶体[13] [14] [15] [16]。在晶体结构上 Tm:LuAG 晶体与 YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)在分子结构上较为相似,均属于立方晶系,因此二者在物理性质上也较为相近,导热率除外,因为 YAG 晶体的导热率会随着掺杂浓度(如掺 Tm^{3+} 、 Ho^{3+})的增加而下降,这会引起“热透镜效应”,相反 Tm:LuAG 晶体的导热率不会随着掺杂浓度的增加而变化[17],因此可以在

较高的掺杂浓度下实现高功率运转。由于 Tm:LuAG 晶体中 Tm^{3+} 和 Lu^{3+} 的质量相差不大, 对原子之间的共振能量传递是较为有利的, 此外 Tm:LuAG 晶体的吸收波长为 788 nm 和 782 nm, 这个波段有效的避开了水的吸收波段, 从而激光在空气中传播损耗小, 受水和二氧化碳吸收影响较小, 利于泵浦源泵浦, 从而功率损失小, 更利于产生高功率超短脉冲激光[18]。Tm:LuAG 晶体的上能级荧光寿命约为 11.9 ms, 这样导致激光输出阈值较低, 有利于实现高能量调 Q 输出。且晶体的发射截面小, 量子效率高, 易获得连续激光锁模[19] [20]。

2004 年 K. Scholeberg 等人利用 LD 泵浦 Tm:LuAG 激光器实现了激光用于空间激光雷达系统主振荡器单模运转[21], 2019 年我们组在 Tm:LuAG 晶体利用自制的双壁碳纳米管(DWCNT)实现了双波长调 Q 锁模瓦级激光器, 输出波长为 2016 nm 和 2032 nm, 当泵浦功率调至 20 W 时, 激光器最大调 Q 锁模运转平均功率为 1.092 W, 其斜效率为 6.11%, 调制深度近似为 100%, 重复频率为 106.4 MHz。同年哈尔滨工业大学陈毅等人以 790 nm LD 作为泵浦源在 Tm:LuAG 中实现了声光锁模输出平均功率为 335 mW, 波长为 2023.2 nm, 在 81.60 MHz 的重复频率下, 脉冲宽度为 240 ps。2020 年我们利用 790 nm LD 作为泵浦源在 Tm:LuAG 晶体中实现了调 Q 锁模运转, 其最大平均输出功率为 200 mW, 重复频率为 108.7 MHz, 调制深度接近 100% [22], 为实现全固态商业化的 Tm:LuAG 激光器奠定了基础[23]。

纵观国内外研究报道, Tm:LuAG 激光器相关研究比较少。本文中实验采用实验室自搭建的掺钛蓝宝石激光器作为抽运源, 用传统经典 5 镜 X 型腔, 在用提拉法生长的 Tm:LuAG 晶体所搭建的 X 型折叠腔中插入 SESAM 实现了双波长连续锁模, 获得了最大平均输出功率为 135 mW, 脉冲宽度为 63.2 ps, 重复频率为 97.9 MHz, 输出光波长分别为 2020.3 nm 和 2023.2 nm 的双波长连续锁模激光输出。

2. 实验装置

自搭建掺钛蓝宝石激光器抽运的 Tm:LuAG 被动锁模激光器的实验装置如图 1 所示, 本实验采用经典传统 X 型 5 镜折叠腔结构, 这样做的目的是能够获得较高的腔内功率密度, 尽可能的降低腔内损耗, 更易于实现锁模。图中掺钛蓝宝石激光器最大激光输出功率为 7 W, 调谐范围为 720~850 nm, 调节腔内双折射滤光片使抽运源激光调谐至 787.2 nm, 即调谐至本次实验所用 Tm:LuAG 晶体的一个强吸收峰, 将抽运源的输出光通过聚焦镜 L ($f = 150$ mm, 对抽运光的透过率 $T > 95\%$) 和泵浦镜 M1 (曲率半径为 100 mm), 聚焦到 $3 \times 3 \times 5$ mm³, 4% Tm^{3+} a 切布儒斯特角通光面抛光的晶体中心, 输出半径为 14 μm 的抽运光斑, 抽运光斑继续穿过 Tm:LuAG 晶体到 M2 平凹镜(曲率半径为 75 mm), 其中 M1 和 M2 镜对 780~800 nm 的光透过率 $> 97\%$, 对 1850~2150 nm 的光反射率 $R > 99\%$, M1 和 M2 均为德国 Layertec 生产, M3 为平凹反射镜($R = 100$ mm), 对 1850~2150 nm 的光反射率 $R > 99\%$, 曲率半径为 100 mm 目的是为了保证激光稳定运行且大于 SESAM 的饱和通量, 在进行连续光实验时, M4 所在的位置即为图 1 中 SESAM 的位置, 将 SESAM 插入腔内即把 M4 替换为 SESAM, 放在平凹反射镜的焦点附近, M4 为平面反射镜。根据 ABCD 矩阵理论, 模拟计算腔内振荡光, 计算出 Tm:LuAG 晶体中光束腰半径约为 28 μm , 实验中采用的 SESAM 参数为 SAM-2000-2-10ps-4.0-25.0s-e, 抽运光在晶体光斑大小为 28 μm , 抽运系数接近 0.5, 即抽运光束腰半径(光斑大小)与振荡光束腰半径的比值等于 0.5。

为了减少晶体在运转时由于温度高而产生的热透镜效应, 本实验采用恒温水冷循环系统对实验使用的晶体进行控温。再将晶体包裹在钢箱中并将其嵌入紫铜水冷夹中, 紫铜水冷夹通过环形水管与水冷设备连接, 水冷设备温度恒温控制在 12 $^{\circ}\text{C}$, 温控精度 $\leq 0.2^{\circ}\text{C}$, 通过微调 SESAM 的距离, SESAM 的腔束腰变化范围会很宽[24]。

由于抽运光在增益介质中分布不均匀, 光斑在增益介质中横向纵向径向的功率密度均有微变化, 因此为了得到激光器的最佳效率, 就需要考虑抽运光与振荡光空的模式匹配[25]。考虑抽运条件下最佳透过

率公式(2), 式中 δ_0 为实验中腔内固有损耗, N 为 Tm:LuAG 晶体的折射率, 结合腔内色散损耗以及平凹镜镀膜工艺等因素, 本实验选择输出镜为 1.5%、3% 和 5% 的输出镜。

$$T_{out} = \sqrt{N\delta_0} - \delta_0 \quad (2)$$

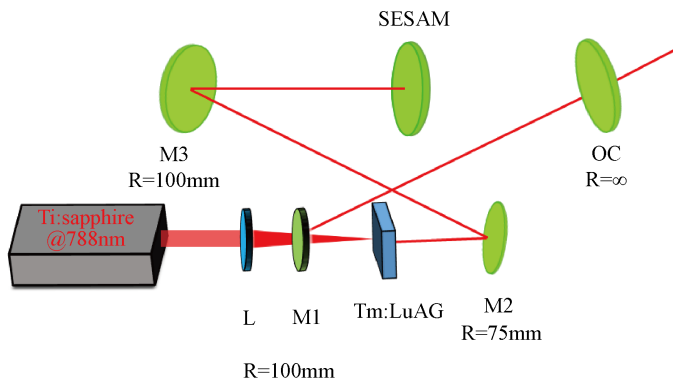


Figure 1. Experimental setup schematic

图 1. 实验装置原理图

3. 实验结果分析与讨论

实验环境温度控制在 20℃ 左右, 湿度控制在 30% 以下, 先进行连续光运转实验, 即先在激光谐振腔内不插入 SESAM, 实现了 Tm:LuAG 激光器的连续波运转。在无激光运转条件下, Tm:LuAG 晶体对泵浦光的吸收率约为 89.8%, 选用了 3 种不同的透过率输出镜进行实验, 在 5% 的输出镜下最大输出功率为 1.4 W, 对应斜效率为 47.25%, 采用 1.5% 和 3% 的输出镜, 最大输出功率分别为 680 mW 和 1.09 W, 对应斜效率分别为 22.45% 和 36.25%。连续光运转下, 输出功率和泵浦功率关系, 如图 2 所示。

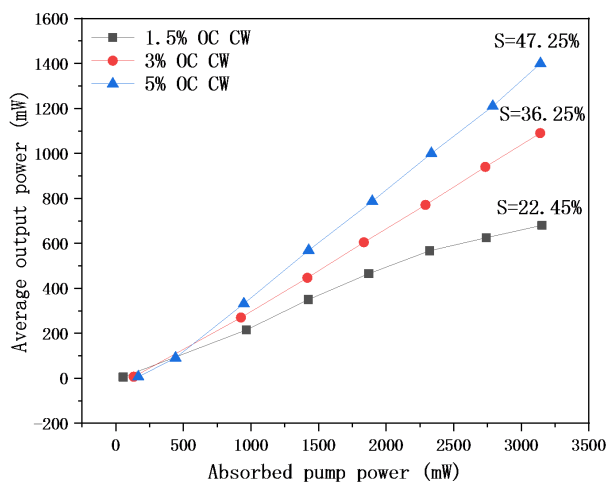


Figure 2. The average output power of continuous wave versus the pump power

图 2. 连续光输出功率随泵浦功率变化图

为实现锁模实验, 实验中选用了 1.5% 的输出镜, 因为其可以降低腔内损耗, 提高腔内功率密度, 从而启动锁模运转。在谐振腔中插入 SESAM, 并仔细调整 SESAM 与反射镜的位置。如图 2 所示, 连续光出光阈值(晶体吸收泵浦功率)为 54 mW。如图 3 所示, 连续锁模的阈值为 1157 mW, 即当晶体吸收功率

为 1157 mW 时激光器进入稳定的连续锁模状态；连续锁模的阈值比连续光的阈值高，这是由于腔内插入 SESAM 导致腔内损耗增大[26] [27]。因此，连续锁模的阈值要高于连续光出光阈值。

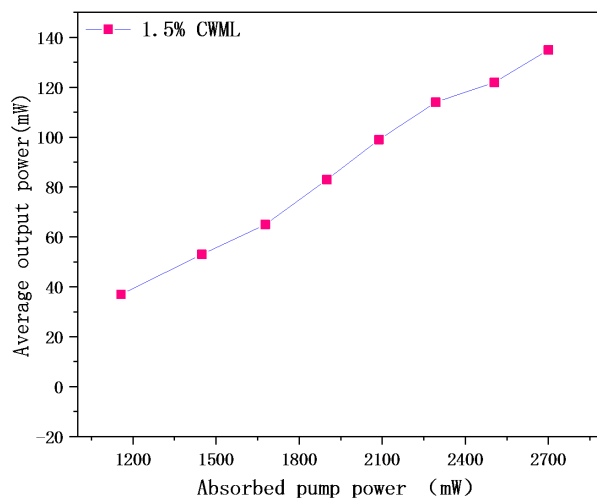


Figure 3. The average output power of mode locking versus the pump power

图 3. 锁模输出功率随泵浦功率变化图

在最大泵浦功率为 3.14 W 时，激光器最大连续锁模平均输出功率为 135 mW，斜效率为 6.5%，当泵浦功率进一步增大时，由于高功率泵浦光在晶体内引入了高热量负荷，导致连续锁模变得不稳定。由实验数据可知，选用 3% 和 5% 输出镜下的输出功率和斜效率更高，但腔内损耗大难以启动锁模运转，而 1.5% 输出镜下的启动阈值更低易于获得锁模运转，因此，在锁模实验中我们选择了 1.5% 的输出镜。本实验的连续锁模是自启动的，在实现连续锁模激光输出后在实验环境下保持锁模稳定。为了测得本实验的锁模参数以及稳定性，采用快速光电二极管(ET-500)连接美国力科示波器(LeCroy WaveRunner8254M)测量脉冲序列，如图 4 所示，图中连续锁模脉冲序列的扫描时间为 200 $\mu\text{s}/\text{div}$ ，锁模脉冲序列的重复频率为 97.954 MHz，根据激光锁模重复频率理论公式 1，可知其与 1.5 m 腔长重复频率相对应。

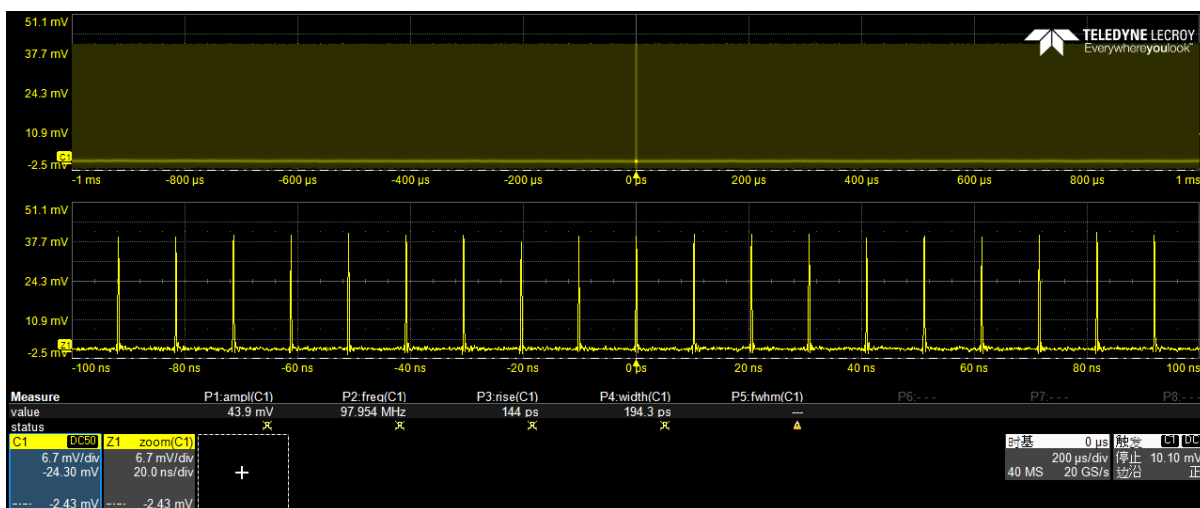


Figure 4. Mode-locked pulse trains

图 4. 锁模脉冲序列

在锁模运转状态下,我们采用自相关仪对锁模脉冲宽度进行测量,结如图 5 所示,锁模脉宽为 63.2 ps。试验中发现,当腔内功率密度增加到一定程度调节端镜至某个固定位置时,激光锁模进入双波长运转状态,利用德国布鲁克光谱仪(INVENIO-R)测量锁模双波长光谱如图 6 所示,光谱具有两个输出峰分别为 2020.3 nm 和 2023.2 nm。

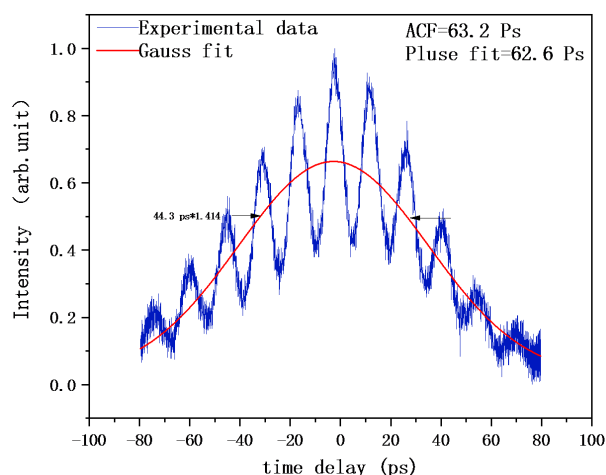


Figure 5. Pulse width diagram of mode locking

图 5. 锁模脉冲宽度

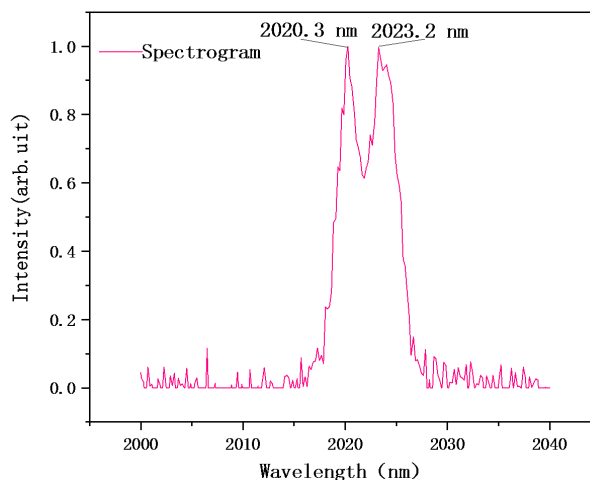


Figure 6. RF spectrum of CWML Tm:LuAG laser

图 6. 连续锁模 Tm:LuAG 激光器光谱图

4. 结论

综上所述,本文采用自搭建的掺钛蓝宝石激光器作为抽运源,利用铟镓砷 SESAM 作为锁模启动元件在 Tm:LuAG 全固态激光器中实现了连续锁模运转。当选用 5%的输出镜时,连续光最高输出功率为 1.4 W,斜效率为 44.5%。腔内插入 SESAM 时,实现连续锁模的泵浦阈值功率为 1.3 W。当最大泵浦功率为 3.14 W 时,最大连续锁模输出功率为 135 mW,对应的斜效率为 6.5%,对应脉宽为 63.2 ps。结果表明 Tm:LuAG 晶体有望成为 2 μm 波段高功率双波长固体激光晶体的优秀候选晶体,下一步我们将提高抽运功率,改善腔内损耗,优化谐振腔参数,进一步提升实验效果,得到较窄的脉宽和更高的功率。

基金项目

国家自然科学基金(批准号: 11774257, 61564008, 11647008, 11504416)、甘肃省高等学校产业支撑计划项目(批准号: 2020C-23)、天水市科技支撑计划自然科学基金项目(2018-FZJHK-3392)、天水师范学院研究生创新引导项目(TYCX1901)。

参考文献

- [1] 孙锐, 陈晨, 令维军, 等. 2017 nm 和 2029 nm 双波长 Tm:LuAG 调 Q 锁模激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214004.
- [2] Liu, X., Han, D., Sun, Z., *et al.* (2013) Versatile Multi-Wavelength Ultrafast Fiber Laser Mode-Locked by Carbon Nanotubes. *Scientific Reports*, **3**, Article No. 2718. <https://doi.org/10.1038/srep02718>
- [3] 陈晨, 令维军, 孙锐, 等. 全固态 Tm:LuAG 双波长瓦级调 Q 锁模激光器[J]. 光电子, 2019, 9(4): 214-220.
- [4] Louchet, A., Du, Y.L., Bretenaker, F., *et al.* (2007) Optical Coherent Manipulation of a Spin Wave in tm:YAG. *IEEE Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 1-2. <https://doi.org/10.1109/QELS.2007.4431690>
- [5] Keller, U., Miller, D.A.B., Boyd, G.D., Chiu, T.H. and Asom, M.T. (1992) Solid-State Low-Loss Intracavity Saturable Absorber for Nd:YLF Lasers: An Antiresonant Semiconductor Fabry-Perot Saturable Absorber. *Optics Letters*, **17**, 505-507. <https://doi.org/10.1364/OL.17.000505>
- [6] Ling, W.J., Xia, T., Dong, Z., You, L.F., Zhang, M.X., Zuo, Y.Y., Li, K., Liu, Q. and Lu, F.P. (2019) Passively Mode-Locked Tm, Ho:LLF Laser at 1895 nm. *Journal of Optics*, **48**, 209-213. <https://doi.org/10.1007/s12596-019-00528-y>
- [7] 令维军, 孙锐, 陈晨, 等. 基于反射式 MoS₂ 可饱和吸收体调 Q 锁模 Tm:LuAG 激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 248-253.
- [8] Louchet, A., Le Du, Y., Bretenaker, F., *et al.* (2008) Optical Excitation of Nuclear Spin Coherence in a Tm(3+):YAG Crystal. *Physical Review B*, **77**, 998-1002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.195110>
- [9] Müller, R., Fuhrberg, P., Teichmann, H.O., *et al.* (2005) Pulsed and cwCr, Tm:YAG Laser with Simultaneous Diode and Flash Lamp Excitation. *Optics & Laser Technology*, **37**, 570-576. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.08.004>
- [10] Yang, K.J., Luan, C., Zhao, S.Z., Feng, T.L., He, J.L., Dekorsy, T., Mircea, G. and Zheng, L.H. (2017) Diode-Pumped Mode-Locked Tm:LuAG 2 μm Laser Based on GaSb-SESAM. *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*, Munich, 25-29 June 2017, CAP 27. <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2017.8086322>
- [11] Peterson, P., Sharma, M.P. and Gavrielides, A. (1996) Extraction Efficiency and Thermal Lensing in Tm:YAG Lasers. *Optical & Quantum Electronics*, **28**, 695-707. <https://doi.org/10.1007/BF00411303>
- [12] 孙晓亮. 脉冲 LD 抽运 Tm:Lu AG 声光调 Q 激光器的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2015: 24-43.
- [13] Ling, W.J., Xia, T., Dong, Z., Zhang, M.X., Zuo, Y.Y., Li, K., Lu, F.P., Liu, Q., Zhao, X.L. and Wang, Y.G. (2018) Low Threshold 1895 nm Mode-Locked Laser Based on Double Wall Carbon Nanotubes. *Acta Optica Sinica*, **38**, Article ID: 0614001. <https://doi.org/10.3788/AOS201838.0614001>
- [14] Kmetec, J.D., Kubo, T.S., Kane, T.J. and Grund, C.J. (1994) Laser Performance of Diode-Pumped Thulium-Doped Y₃Al₅O₁₂, (Y, Lu)₃Al₅O₁₂, and Lu₃Al₅O₁₂ Crystals. *Optics Letters*, **19**, 186-188. <https://doi.org/10.1364/OL.19.000186>
- [15] 冯天利. 全固态中红外 2 μm 波段激光特性研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2015: 45-70.
- [16] Yang, K.J., Bromberger, H., Ruf, H., Schäfer, H., Neuhaus, J., Dekorsy, T., Grimm, C.V.B., Helm, M., Biermann, K. and Künzel, H. (2010) Passively Mode-Locked Tm, Ho:YAG Laser at 2 μm Based on Saturable Absorption of Inter-subband Transitions in Quantum Wells. *Optics Express*, **18**, 6537-6544. <https://doi.org/10.1364/OE.18.006537>
- [17] Ma, J., Xie, G.Q., Zhang, J., Yuan, P., Tang, D.Y. and Qian, L.J. (2014) Passively Mode-Locked Tm:YAG Ceramic Laser Based on Graphene. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **21**, 50-55. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2361785>
- [18] 蒋硕. 主动锁模 Tm:LuAG 激光器的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [19] Schmidt, A., Koopmann, P., Huber, G., Fuhrberg, P., Choi, S.Y., Yeom, D.I., Rotermund, F., Petrov, V. and Griebner, U. (2012) 175 fs Tm: Lu₂O₃ Laser at 2.07 μm Mode-Locked Using Single-Walled Carbon Nanotubes. *Optics Express*, **20**, 5313-5318. <https://doi.org/10.1364/OE.20.005313>
- [20] Beil, K., Fredrich-Thornton, S.T., Tellkamp, F., Peters, R., Kränkel, C., Petermann, K. and Huber, G. (2010) Thermal and Laser Properties of Yb:LuAG for kW Thin Disk Lasers. *Optics Express*, **18**, 20712-20722. <https://doi.org/10.1364/OE.18.020712>

-
- [21] Feng, T., Yang, K., Zhao, J., Zhao, S., Qiao, W., Li, T., Dekorsy, T., He, J., Zheng, L., Wang, Q., Xu, X., Su, L. and Xu, J. (2015) 1.21 W Passively Mode-Locked Tm:LuAG Laser. *Optics Express*, **23**, 11819-11825.
<https://doi.org/10.1364/OE.23.011819>
- [22] 陈晨, 许强, 孙锐, 等. 调 Q 锁模运转的全固态 Tm:LuAG 陶瓷激光器[J/OL]. 红外与激光工程, 1-8.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.tn.20200210.2356.006.html>, 2020-02-11.
- [23] 田义. 被动调 Q 与锁模 Tm:YAP 激光器的理论与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 35-45.
- [24] Feng, T.L., Yang, K.J., Zhao, S.Z., *et al.* (2015) Efficient CW Dual-Wavelength and Passively Q-Switched Tm: Lu AG Lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **27**, 7-10.
- [25] 孙锐, 陈晨, 令维军, 等. 基于氧化石墨烯的瓦级调 Q 锁模 Tm:LuAG 激光器[J]. 物理学报, 2019, 68(10): 127-132.
- [26] Hecht, J. (2010) A Short History of Laser Development. *Applied Optics*, **49**, F99-F122.
<https://doi.org/10.1364/AO.49.000F99>
- [27] 杨延召. 连续 Ho:YAG 陶瓷声光锁模技术及其稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 5-21.