

Watt-Level Dual-Wavelength Q-Switched Mode-Locked All-Solid-State Tm:LuAG Laser

Chen Chen^{1,2}, Weijun Ling^{1*}, Rui Sun^{1,2}, Qiang Xu², Yani Zhang³, Mingxia Zhang¹, Zhen Yuan¹

¹Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui Gansu

²Institute of Physics and Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji Shaanxi

³School of Arts and Sciences, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an Shaanxi

Email: *wjlingts@sina.com

Received: Dec. 6th, 2019; accepted: Dec. 19th, 2019; published: Dec. 26th, 2019

Abstract

Employing double-walled carbon nanotube (DWCNT) by vertical growth method as a saturable absorber, we demonstrate a high-power and dual-wavelength passively Q-switched mode-locked (QML) operation of an all-solid-state Tm:Lu₃Al₅O₁₂ (Tm:LuAG) laser, and the wavelength is 2016 nm and 2032 nm. In this experiment, the laser is pumped by laser diode (LD), and when the pump power is greater than 6.52 W, the laser enters into a stable Q-switched mode-locked operation state by using 5% output coupler. When the pump power reaches 20 W, the Q-switched mode-locking output power is 1092 mW, the slope efficiency is 6.11%, the repetition frequency is 106.4 MHz, the corresponding single pulse energy is 10.26 nJ. Furthermore, the modulation depth is close to 100%.

Keywords

Tm:LuAG Laser, DWCNT Saturable Absorber, Q-Switched Mode-Locked, Dual-Wavelength

全固态Tm:LuAG双波长瓦级调Q锁模激光器

陈晨^{1,2}, 令维军^{1*}, 孙锐^{1,2}, 许强², 张亚妮³, 张明霞¹, 袁振¹

¹天水师范学院激光技术研究所, 甘肃 天水

²宝鸡文理学院物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡

³陕西科技大学文理学院, 陕西 西安

Email: *wjlingts@sina.com

收稿日期: 2019年12月6日; 录用日期: 2019年12月19日; 发布日期: 2019年12月26日

*通讯作者。

摘要

以垂直生长法自制的双壁碳纳米管(Double wall carbon nanotube, DWCNT)作为可饱和吸收体,在全固态Tm:Lu₃Al₅O₁₂ (Tm:LuAG)激光器中实现了高功率双波长的调Q锁模运转,输出波长分别为2016 nm和2032 nm。以激光二极管(Laser diode, LD)为抽运源,选用5%的输出镜,当泵浦功率大于6.52 W,激光运转进入稳定调Q锁模状态。增加泵浦功率到20 W时,对应调Q锁模运转下的输出功率为1092 mW,斜效率为6.11%,重复频率为106.4 MHz,调制深度接近100%。

关键词

Tm:LuAG激光器, DWCNT可饱和吸收体, 调Q锁模, 双波长

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前 2 μm 超快激光在分子光谱学、激光医疗和材料加工等领域有着广泛的应用,引起了广大学者的极大兴趣[1]。其中 2 μm 双波长同步锁模的高功率激光器通过差频技术能够产生相干太赫兹辐射[2] [3],不仅如此,还在差分雷达、光通信以及远程空间探测等方面应用十分广泛[4]。更为重要的是将 2 μm 波段激光用作泵浦源,使用光学参量技术能够得到 3~5 μm 波段激光,其在光电对抗和红外制导领域有着举足轻重的地位。通常采用被动锁模技术来实现超短激光脉冲,主要因为该技术有着成本低廉、结构简易和效率较高的优点。自从 SESAM (Semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)于 1992 年首次在全固态的 Nd:YLF 激光器中作为锁模启动原件开始[5], SESAM 锁模技术就被确定为超短激光脉冲产生的革命性技术。目前该技术在 2 μm 超短激光脉冲中的应用也十分广泛[6] [7]。然而, SESAMs 存在制造复杂、工作带宽较窄以及成本较高等问题[8],导致探索新型宽带可饱和吸收体显得非常必要。

碳纳米管材料的吸收光谱范围从 500 nm 到 2500 nm,还具有杰出的导电和传热机能[9],更为重要的是其制作过程简便、成本较低。碳纳米管可以分为单壁碳纳米管(Single-walled Carbon nanotubes, SWCNTs)和多壁碳纳米管(Multi-walled Carbon nanotubes, MWCNTs)。双壁碳纳米管为最简单的多壁碳纳米管,拥有超快回复时间、高损伤阈值和优异的化学稳定性[10] [11]。山东大学首次使用 Tm:YAP 激光器中使用 DWCNT 可饱和吸收体实现了 41 ps 的锁模运行,并且最高输出功率为 375 mW [12]。去年本课题组在 Tm, Ho:LLF 激光器中采用 DWCNT 可饱和吸收体实现了低阈值调 Q 锁模运转,并且输出功率为 234 mW [13]。

YAG 材料具有稳定的结构,较好的导电和光学特性[14] [15],在 2 μm 波段激光中已经被证明为出色的增益介质[16] [17]。由于 Tm³⁺和 Y³⁺之间存在明显的质量差异,导致在 Tm³⁺高掺杂情况下, YAG 表现出明显的水解[18],而 Tm³⁺和 Lu³⁺的质量相差较小,因此 LuAG 作为 2 μm 激光增益介质的热性能更加均匀[19]。除此之外, LuAG 材料比常规的 YAG 材料更加的坚固,拥有更高的损伤阈值[20]。目前,山东大学使用 SESAM 在 Tm:LuAG 激光器中得到最大输出功率为 1.21 W 的超短激光脉冲输出[21],这是目前在 2 μm 锁模固体激光器中得到的最大输出功率。不久之后,山东大学在此基础上得到脉冲宽度短至 13.6 ps 的激光输出[22]。本课题组通过以钛蓝宝石为泵浦源,分别在 DWCNT [23]、氧化石墨烯[24]和 MoS₂ [25]

可饱和吸收体中得到调 Q 锁模运转。本次实验采用激光二极管为泵浦源, 其具有结构简单、电 - 光转换效率高、光束质量好和成本低等特点, 成为当前激光技术发展主要方向之一[26]。

本文通过传统的 X 型腔, 以输出为 790 nm 的 LD 为抽运源, 在 Tm:LuAG 激光器中加入双壁碳纳米管可饱和吸收体, 实现了高功率双波长的调 Q 锁模运行。在 5% 输出镜下获得最大输出功率为 1092 mW 的调 Q 锁模激光输出, 输出波长分别为 2016 nm 和 2032 nm, 重复频率为 106.4 MHz, 单脉冲能量为 10.26 nJ, 调制深度接近于 100%。

2. 实验装置

LD 抽运的 Tm:LuAG 被动调 Q 锁模激光器的实验装置如图 1 所示(实验装置图通过 Solidworks 软件绘制而成), 采用 X 型折叠腔能够获得较高的腔内强度, 有利于锁模脉冲的产生。LD 的工作波长为 790 nm, 最高输出功率为 30 W, 纤芯的直径为 105 μm 。实验中采用掺杂铥离子(Tm³⁺)浓度为 5% 以及尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 5 mm 的 Tm:LuAG 材料为增益介质。使用过程中需要沿着它的布儒斯特角进行切割, 并对两个通光面进行抛光处理。为了降低激光晶体在实验过程中的热透镜效应, 需要对其进行冷却处理。首先将晶体用铝箔包裹, 其次把它安装在紫铜冷却片中, 最后采用恒温水循环冷却系统冷却夹在紫铜冷却片内的晶体, 恒温水的温度稳定在 11 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

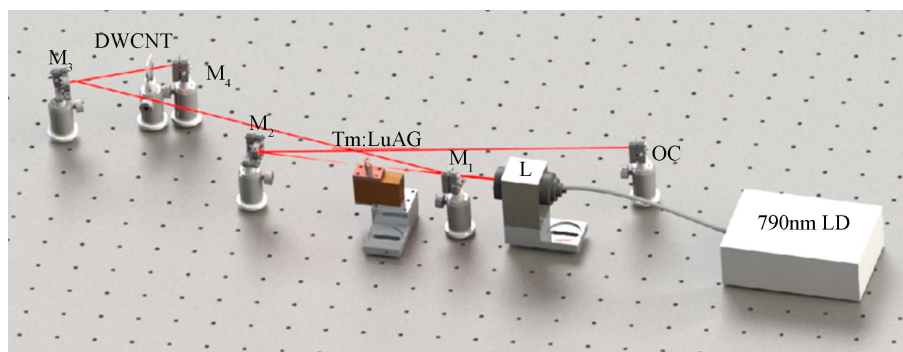


Figure 1. Experimental device schematic

图 1. 实验装置原理图

通过聚焦系统 L 对 LD 抽运源进行聚焦, L 的聚焦倍率为 1:0.8, 透过率为 95%, 工作距离为 49.2 mm, 外径大小为 37.5 mm。在激光谐振腔中 M₁ 和 M₂ 分别表示为曲率半径为 75 mm 和 100 mm 的平凹镜, 其对 790 nm 波段的抽运光高透, 而对 1800~2100 nm 波段的振荡光高反。选取平凹反射镜 M₃ 的曲率半径为 100 mm, 其对 1800~2100 nm 波长激光反射率大于 99.9%, 主要作用将激光脉冲聚焦到平面高反镜(M₄)上。M₄ 对 1800~2050 nm 波段反射率大于 99.9% 的平面高反镜。OC 为输出耦合镜(Output Coupler, OC), 通过公式(1)谐振腔最佳透过率与泵浦功率之间的关系[27], 其中 σ 为晶体发射截面, τ_f 为发射寿命, λ_p 为泵浦光波长, P_m 为泵浦功率, α_p 吸收系数, L 为晶体长度, δ_0 为腔内损耗, $\overline{W_p}$ 为平均泵浦光斑半径, W_o 为振荡光斑半径。通过 Matlab 模拟公式(1)得到图 2, 从图中可以看出在泵浦功率为 20 W 时, 谐振腔的最佳透过率 T 约为 0.046。因此, 考虑到光学玻璃镀膜在加工中的实际情况, 所以选取透过率分别为 0.03 和 0.05 的输出镜进行对比实验。

$$T = \sqrt{\frac{4\sigma\tau_f\lambda_p P_m [1 - \exp(1 - \alpha_p L)] \times \delta_0}{\pi hc (\overline{W_p}^2 + W_o^2)}} - \delta_0 \quad (1)$$

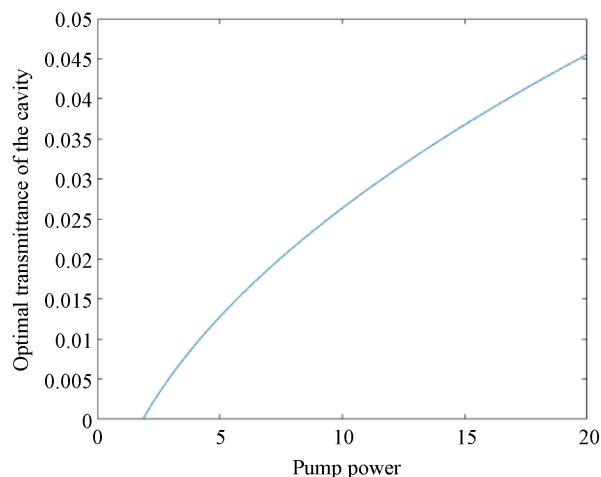


Figure 2. Optimal cavity transmittance versus pump power

图 2. 谐振腔最佳透过率随泵浦功率变化图

实验中 DWCNT 可饱和吸收体放置于 M_3 焦点附近。利用 ABCD 矩阵模拟激光腔内振荡光斑，可以计算出晶体中最小光腰半径为 $55.5 \mu\text{m}$ 以及 DNCNT 可饱和吸收体表面光斑约为 $193.7 \mu\text{m}$ ，启动锁模时，可饱和吸收体上表面功率密度约为 $41.22 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

3. 实验结果分析与讨论

按照上述光路图进行设计。当激光腔内未插入 DWCNT 可饱和吸收体，进行连续光运转。相应的输出功率与泵浦功率曲线如图 3 所示。在 3% 和 5% 输出镜下的出光阈值分别为 0.715 W 和 0.938 W，相对应的斜效率分别是 10.15% 和 10.83%，最高输出功率为 1860 mW 和 2078 mW。

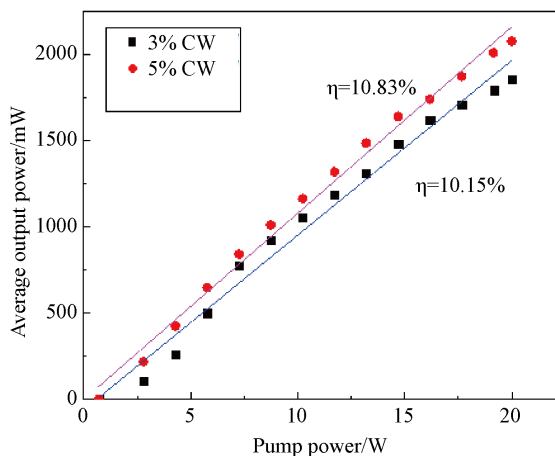


Figure 3. The average output power versus the pump power in CW

图 3. 连续光输出功率随泵浦功率变化图

为了启动锁模，将透射式的 DWCNT-SA 嵌入腔中，输出曲线如图 4 所示。首先选用 3% 的输出镜，与连续光相比，出光阈值增加到 1.31 W。当泵浦光功率高于 5.05 W 时，激光进入稳定调 Q 锁模状态：泵浦光功率增加到 20 W 时，最高输出功率为 1028 mW，斜效率为 5.77%。在 5% 输出耦合镜下的出光阈

值为 1.98 W，当泵浦功率高于 6.52 W 时，激光进入稳定调 Q 锁模运转，最高功率为 1092 mW，斜效率为 6.11%。通过实验数据可知，发现在 5% 输出镜下的输出功率和斜效率较高，而 3% 输出镜拥有更低的锁模启动阈值，所以可以根据不同的需求来选取合适的输出镜。本实验中主要使用 3% 输出镜来进行研究。

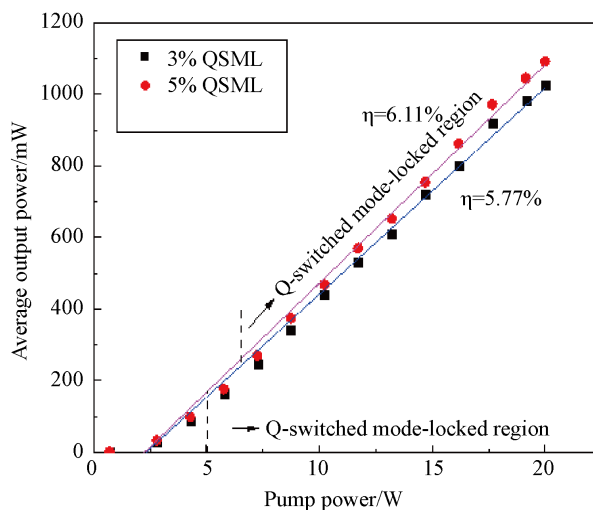


Figure 4. The average output power of mode locking versus the pump power

图 4. 锁模输出功率随泵浦功率变化图

本实验的调 Q 锁模脉冲光谱通过(AvaSpec-NIR256-2.5 TEC)分析仪来获得，如图 5 所示，中心波长在 2016 nm 和 2032 nm。

图 6 为锁模脉冲序列图。本实验通过快速光电二极管(ET-500)连接的数字示波器(RIGOL, DS4034)来测量脉冲序列。图中调 Q 锁模脉冲序列的扫描时间分别为 100 μ s 和 10 ns，调 Q 锁模脉冲的调制深度接近于 100%，重复频率为 106.4 MHz，与 1.3 m 的腔长锁模脉冲理论相对应。

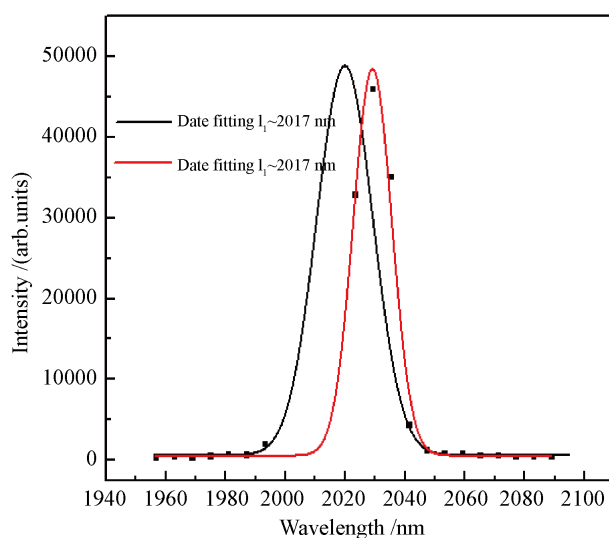


Figure 5. The emission spectrum of the mode locking laser

图 5. 锁模光谱图

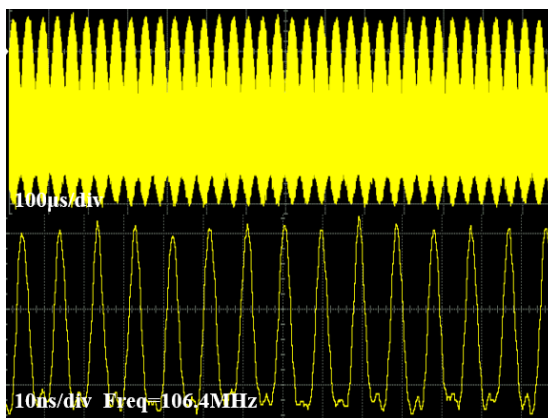


Figure 6. Mode-locked pulse trains

图 6. 锁模脉冲序列

4. 结论

综上所述, 本文采用垂直生长法生长的 DWCNT 为可饱和吸收体。利用该吸收体, 在 Tm:LuAG 全固态激光器中实现了高功率双波长的调 Q 锁模运转。在 5% 的输出镜下, 连续光最高输出功率为 2078 mW, 斜效率为 10.83%。将 DWCNT 可饱和吸收体放入腔内, 激光进入稳定的调 Q 锁模状态的阈值功率为 6.52 W。当泵功率达到 20 W 时, 在中心波长为 2016 nm 和 2032 nm 处得到 1092 mW 最大输出功率, 斜效率为 6.11%, 重复频率和平均单脉冲能量分别为 106.4 MHz 和 10.26 nJ。实验表明 DWCNT 可以作为 2 μm 固体激光器的被动调 Q 锁模器件。LD 泵浦有着成本低廉的优点, 在工业生产中的运用非常广泛。后期我们将提高泵浦功率, 改善可饱和吸收体的质量, 优化谐振腔的参数, 争取在获得调 Q 锁模的条件下实现高功率的连续锁模运转。

基金项目

国家自然科学基金(批准号: 11774257, 61564008, 11647008, 11504416)、陕西省国际科技合作与交流项目(2018KW-016)、宝鸡市重大科技专项计划项目(2015CXNL-1-3)、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] Ebrahim-Zadeh, M. and Vodopyanov, K. (2016) Mid-Infrared Coherent Sources and Applications: Introduction. *Journal of the Optical Society of America B*, **33**, MIC1. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.00MIC1>
- [2] Majkić, A., Zgonik, M., Petelin, A., Jazbinšek, M., Ruiz, B., Medrano, C. and Günter, P. (2014) Terahertz Source at 9.4 THz Based on a Dual-Wavelength Infrared Laser and Quasi-Phase Matching in Organic Crystals OH1. *Applied Physics Letters*, **105**, Article ID: 141115. <https://doi.org/10.1063/1.4897639>
- [3] Chang, J.H., Wang, T.T., Zhang, C., Ge, Y.X. and Tao, Z.H. (2013) Compact and Tunable mid-ir Light Source Based on a Dual-Wavelength Fiber Laser. *Chinese Physics Letters*, **30**, Article ID: 114206. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/30/11/114206>
- [4] Walsh, B.M. (2009) Review of Tm and Ho Materials; Spectroscopy and Lasers. *Laser Physics*, **19**, 855. <https://doi.org/10.1134/S10546660X09040446>
- [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] Wang, Y.C., Xie, G.Q., Xu, X.D., Di, J.Q., Qin, Z.P., Suomalainen, S., Guina, M., Härkönen, A., Agnesi, A., Griebner, U., Mateos, X., Loiko, P. and Petrov, V. (2015) SESAM Mode-Locked Tm:CALGO Laser at 2 μm . *Optical Materials Express*, **6**, 131. <https://doi.org/10.1364/OME.6.000131>
- [8] Kong, L.C., Xie, G.Q., Yuan, P., Qian, L.J., Wang, S.X., Yu, H.H. and Zhang, H.J. (2015) Passive Q-Switching and Q-Switched Mode-Locking Operations of 2 μm Tm: CLNGG Laser with MoS₂ Saturable Absorber Mirror. *Photonics Research*, **3**, A47-A50. <https://doi.org/10.1364/PRJ.3.000A47>
- [9] Iijima, S. and Ichihashi, T. (1993) Single-Shell Carbon Nanotubes of 1-nm Diameter. *Nature*, **363**, 603. <https://doi.org/10.1038/363603a0>
- [10] Hasan, T., Sun, Z., Tan, P., Popa, D., Flahaut, E., Kelleher, E.J. and Privitera, G. (2014) Double-Wall Carbon Nanotubes for Wide-Band, Ultrafast Pulse Generation. *ACS Nano*, **8**, 4836-4847. <https://doi.org/10.1021/nn500767b>
- [11] Yang, Q., Wang, Y.G., Liu, D.H., Liu, J., Zheng, L.H., Su, L.B. and Xu, J. (2011) Dual-Wavelength Mode-Locked Yb:LuYSiO₅ Laser with a Double-Walled Carbon Nanotube Saturable Absorber. *Laser Physics Letters*, **9**, 135. <https://doi.org/10.1002/lapl.201110111>
- [12] Qu, Z.S., Wang, Y.G., Liu, J., Zheng, L.H., Su, L.B. and Xu, J. (2012) Passively Mode-Locked 2- μm Tm: YAP Laser with a Double-Wall Carbon Nanotube Absorber. *Chinese Physics B*, **21**, Article ID: 064211. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/6/064211>
- [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] Stoneman, R.C. and Esterowitz, L. (1990) Efficient, Broadly Tunable, Laser-Pumped Tm:YAG and Tm:YSGG CW Lasers. *Optics Letters*, **15**, 486-488. <https://doi.org/10.1364/OL.15.000486>
- [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] Koopmann, P., Lamrini, S., Scholle, K., Fuhrberg, P., Petermann, K. and Huber, G. (2011) Efficient Diode-Pumped Laser Operation of Tm:Lu₂O₃ around 2 μm . *Optics Letters*, **36**, 948-950. <https://doi.org/10.1364/OL.36.000948>
- [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., Friedrich-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] 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. In: *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*, Optical Society of America, Washington DC, CAP 27. <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2017.8086322>
- [23] 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): 1214003.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Hecht, J. (2010) A Short History of Laser Development. *Applied Optics*, **49**, F99-F122. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000F99>
- [27] 李斌. 二极管泵浦 Nd:YVO₄ 固体激光器谐振腔及耦合系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2013.