

基于简易线性腔的高重复频率、高平均功率 Tm:YAP克尔透镜锁模激光器

黄龙舞*, 申昶昶, 石飞过, 刘志军, 迟连焕, 陈建硕, 张存灿, 苗旺

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月11日

摘要

采用简单的线性结构, 首次实现了脉冲重复频率为GHz的克尔透镜锁模Tm:YAP激光器。实验中无需在谐振腔中加入任何附加器件, 仅依靠晶体的三阶非线性效应即可实现锁模。在泵浦功率为7.27 W时, 激光器已能在连续锁模状态下稳定运行。当泵浦功率增加至9.66 W时, 在2068 nm处获得了2.80 W的最大平均输出功率, 脉冲宽度为33.61 ps, 重复频率高达3.04 GHz。这是Tm离子掺杂自锁模固体激光器的最大输出功率。该工作为在2 μm 波段产生高功率、高重复频的超快脉冲激光提供了一种新的途径。

关键词

固体激光器, Tm:YAP, 锁模激光器

High Repetition Rate and High Average Power Tm:YAP Kerr-Lens Mode-Locked Laser Based on a Simple Linear Cavity

Longwu Huang*, Changchang Shen, Feiguo Shi, Zhijun Liu, Lianhuan Chi, Jianshuo Chen, Cuncan Zhang, Wang Miao

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: January 28, 2026; accepted: February 25, 2026; published: March 11, 2026

Abstract

A Kerr-lens mode-locked Tm:YAP laser operating at a gigahertz-level pulse repetition frequency

*通讯作者。

文章引用: 黄龙舞, 申昶昶, 石飞过, 刘志军, 迟连焕, 陈建硕, 张存灿, 苗旺. 基于简易线性腔的高重复频率、高平均功率 Tm:YAP 克尔透镜锁模激光器[J]. 光电子, 2026, 16(1): 1-8. DOI: 10.12677/oe.2026.161001

was first demonstrated using a simple linear cavity configuration. Mode locking is achieved exclusively through the third-order nonlinearity of the crystal, without requiring any additional optical components in the resonant cavity. Stable continuous mode-locking operation is realized at a pump power of 7.27 W. When the pump power is increased to 9.66 W, a maximum average output power of 2.80 W is obtained at 1991.2 nm, with a pulse width of 33.61 ps and a repetition frequency as high as 3.04 GHz. This represents the highest output power achieved in self-mode-locked solid-state lasers doped with Tm ions. This work provides a new approach for generating high-power, high-repetition-rate ultrafast pulses in the 2 μm wavelength band.

Keywords

Solid-State Laser, Tm:YAP, Mode-Locked Laser

Copyright © 2026 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

发射波长在 2 μm 波段的超快激光具有脉冲宽度窄、峰值功率高等特点,被广泛应用于超快动力学研究、高精度有机材料加工、激发高次谐波等诸多领域[1]-[6]。基于 Tm 离子的 $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 能级间辐射跃迁,被视为实现 2 μm 波段激光输出的理想机制之一。此外,泵浦过程中能级间的交叉弛豫现象可有效提升泵浦光利用率,进而可实现更高效的激光输出。迄今为止,Tm 离子掺杂 2 μm 超快脉冲激光器已在多种基质材料中通过主动锁模与被动锁模技术实现[7]-[14]。从这些报道来看,主动锁模技术在实现高重复频率和高输出功率方面有一定优势,但因不可避免调制器件引入的额外损耗、会有输出脉冲宽度较宽、稳定性欠佳等问题。被动锁模技术具有结构简单、输出脉冲窄等优势,但由于可饱和吸收体受波长影响较大,且低饱和通量和低抗损伤阈值,使其在高功率应用中面临挑战,同时因可饱和吸收体的加入使其很难实现高重复频率激光输出。基于高功率、高重复频率 2 μm 脉冲在光通信、光谱学及精密光学采样等领域展现的显著吸引力,提升其输出功率和重复频率的研究具有重要意义,这就需要通过新型调制机制与紧凑化结构设计得以实现。

自锁模是一种被认为适合高功率、超快脉冲激光输出的特殊的锁模方式,其主要机理是利用激光增益介质本身的克尔效应引发光束自聚焦,自聚焦效应与抽运激光聚焦在增益介质内形成的三维光阑(软光阑)相结合,相当于一个快饱和吸收体,对脉冲的前后沿起压缩作用,从而实现锁模。目前,基于 Yb 离子和 Nd 离子掺杂的克尔透镜锁模(KLM)超快固体激光器已在 1 μm 波段得到广泛研究[15]-[21];与之相比,2 μm 附近的 KLM 技术因克尔效应较弱且存在强水分子吸收带而面临显著挑战[22][23]。第一台 Tm³⁺ 掺杂自锁模超快固体激光器在 2017 年才被报道出来,该激光器利用 Er:Yb 光纤主振荡器功率放大器对 Tm³⁺:Sc₂O₃ 单晶进行带内泵浦,实现了重复频率为 95 MHz 功率为 1 W 的脉冲输出[24],需要指出的是该系统重复频率较低且结构相对复杂。同年 CHO 等人通过抑制自脉冲现象成功实现了克尔透镜锁模的 Tm:YAG 固体激光器,输出功率高达 1.22 W,脉冲宽度低至 3 ps,重复频率高达 3.376 GHz。该研究为 2 μm 波段低成本泵浦自锁模激光器的高功率、高重复频率超快脉冲的发展提供了新的思路[25]。

Tm:YAP 晶体是一种极具潜力的中红外激光增益介质,已在连续激光器和调 Q 激光器中得到证实[26]-[29]。该晶体具有较大的非线性折射率($n_2 = 7.3 \times 10^{-11} \text{ cm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$),使其更容易实现自锁模操作[30]。高

受激发射截面、优异的机械强度、良好的热导率以及较高的断裂应力，这些特性不仅能够有效降低断裂风险，同时也更有利于实现高效的激光输出。此外，较宽的发射谱线可使其具备良好的调谐潜力，可有效避免空气中水和二氧化碳的强烈吸收，有利于实现更稳定的激光输出。基于上面的事实，有可能实现高功率稳定的自锁模 Tm:YAP 激光器。

在这篇文章中，我们首次报道了一种基于紧凑型双凹腔结构的高功率、高重复频率自锁模 Tm:YAP 激光器。实验表明，其脉冲重复频率高达 3.04 GHz。在入射泵浦功率低至 7.27 W 时即可产生稳定的连续自锁模脉冲激光。当泵浦功率增加至 9.66 W 时，激光器的最大平均输出功率达到 2.8 W，对应的斜率效率和光 - 光转换效率分别为 31.9% 和 28.9%。据我们所知，这是迄今为止基于 Tm 掺杂自锁模激光器中实现的最高平均输出功率。

2. 实验装置

GHz 自锁模 Tm:YAP 激光器实验装置如图 1 所示。泵浦源是一个输出波长为 792 nm 的商用激光二极管，光纤直径为 100 μm 数值孔径为 0.22，最大输出功率为 12 W。泵浦光首先通过一个焦距为 40 mm 的准直镜(L1)进行准直，然后通过一个焦距为 75 mm 的汇聚透镜(L2)进行聚焦，泵浦光在晶体中的光腰半径约为 94 μm 。增益介质选用沿 c 轴切割、掺杂浓度为 5at.% 的 Tm:YAP 晶体，其尺寸为 $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ ，前后端面均镀有 792 nm 和 1.9~2.1 μm 的增透涂层($R < 0.5\%$)。为确保激光输出稳定，使用铝箔包裹晶体后将其装入紫铜镀铬的热沉中，借助热电制冷片将晶体温度精准控制在 288 k，同时配备水循环装置对热电制冷片进行降温处理。输入镜(M1)是曲率半径为 100 mm 镀有 792 nm 高透($T > 97.5\%$)和 1.9~2.1 μm 高反膜($R > 99.5\%$)的凹面镜，输出耦合器(M2)采用在 1.9~2.1 μm 透射率为 10% 曲率半径为 50 mm 的凹面镜，用于研究自锁模 Tm:YAP 激光器的输出性能。实验中使用一个相干公司的功率计(PM30, Coherent)对平均输出功率以及功率稳定性进行测量；利用上升时间为 28 ps 的 InGaAs PIN 红外快速探测器(ET-5000, Electro-Optics Technology)连接一个带宽为 8 GHz 的示波器(MSO64 6-BW-8000, Tektronix, 上升时间 50 ps)对锁模脉冲波形进行检测；借助带宽为 32 GHz 的射频频谱分析仪(N9010B, Keysight)对自锁模激光频率谱进行测量；采用波长计(771A, Bristol)测量输出激光的光谱；同时运用光束质量分析仪(WinCamD-IR-BB, Data Ray)对输出激光的光斑轮廓及尺寸进行分析。

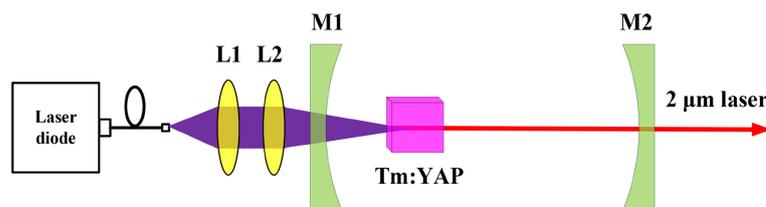


Figure 1. Experimental setup of the self-mode-locked Tm:YAP laser
图 1. 自锁模 Tm:YAP 激光器实验装置

3. 谐振腔设计

因需要实现稳定的自锁模激光输出，因此需考虑泵浦光与腔内激光的模式匹配问题，通过计算不同泵浦功率下的热透镜效应，并结合 ABCD 矩阵光学谐振腔理论，得到激光振荡光斑半径随泵浦功率的变化规律，如图 2 所示。图中绿色实线代表振荡光光斑半径，红色划线代表泵浦光的光斑半径，可以看出当泵浦功率超过 7.5 W 时，振荡光光斑半径稳定维持在 126 μm 左右，该腔模参数完全满足激光器自锁模运行的腔模比要求。

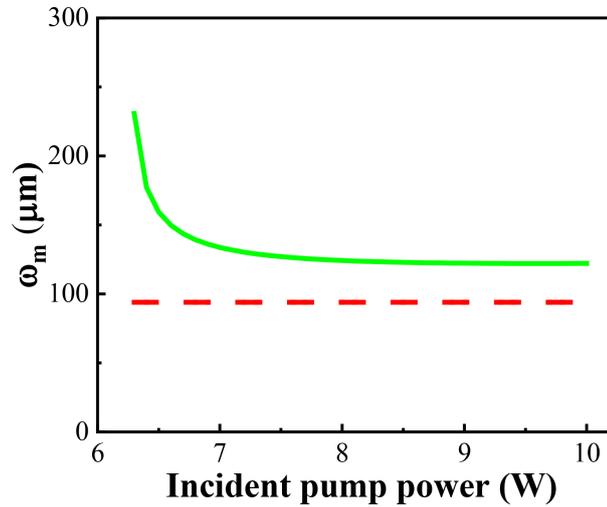


Figure 2. Variation of oscillation spot radius with injected pump power
图 2. 振荡光斑半径大小随注入泵浦功率的变化关系

4. 结果与讨论

通过精细调节激光谐振腔和泵浦光斑在激光晶体中的位置，成功实现了 Tm:YAP 激光器稳定的自锁模操作，其平均输出功率随入射泵浦功率的变化关系如图 3 所示。激光器的阈值在 0.876 W 左右，在注入泵浦功率小于 7.27 W 时，激光器运转在不稳定的调 Q 锁模状态，这是由于 Tm 离子的基态重吸收效应造成的，图 3 插图(a)展示了时间跨度为 20 μs 的调 Q 锁模脉冲序列。随着注入泵浦功率的增加，基态重吸收逐渐被漂白，在注入泵浦功率大于 7.27 W 时调 Q 锁模现象消失，获得了稳定的连续自锁模激光输出；插图(b)展示了达到连续锁模后时间跨度 20 μs 的脉冲序列。继续增加泵浦功率，输出功率随泵浦功率线性增加，自锁模 Tm:YAP 激光器一直为稳定的连续锁模状态。在注入泵浦功率为 9.66 W 时，获得了最高的平均输出功率 2.80W，斜率效率和光光转换效率分别为 31.9%和 28.9%。为保护谐振腔不被损坏，注入泵浦功率没有进一步增大。

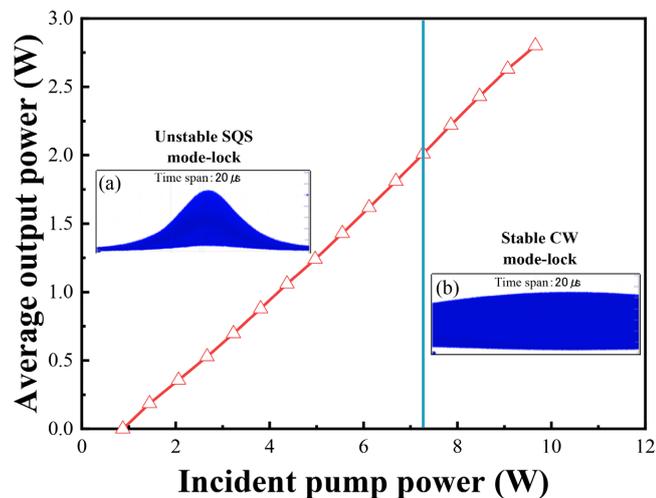


Figure 3. Average output power of the self-mode-locked Tm:YAP laser as a function of incident pump power. The insets show typical mode-locked pulse trains in the Q-switched mode-locking and continuous mode-locking regimes, respectively

图 3. 自锁模 Tm:YAP 激光器平均输出功率随入射泵浦功率的关系，插图分别展示了调 Q 锁模和连续锁模状态中的典型锁模脉冲序列

在最高平均输出功率下，测量了输出光谱，如图 4 所示，光谱结果表明，中心波长为 1991.2 nm，对应的线宽为 0.30 nm。使用带宽为 8 GHz 的示波器测量记录了时间跨度为 4 ns 和 1 μ s 的脉冲序列，如图 5 所示。相邻两个脉冲的间隔约为 329 ps，这对应于谐振腔的往返时间。从波形可以看出，输出的锁模激光脉冲序列平整且没有直流信号，说明所得到的锁模脉冲较为稳定。由于示波器带宽原因，我们未能测得真实的脉冲宽度，同时因实验室使用的自相关仪灵敏度和损伤阈值较低，实验中也未能获得自相关信号。根据傅里叶变换关系，在高斯拟合下锁模激光器时间带宽积最小值为 0.44，因此可以估算出锁模脉冲宽度的最小值为 20.07 ps，根据以前的研究，实际锁模脉冲的上升时间可以定义为[31]。

$$t_r = \sqrt{t_m^2 - t_p^2 - t_0^2},$$

式中， t_r 为实际锁模脉冲的上升时间， t_m 为数字示波器测量到的脉冲的上升时间， t_p 为高速 InGaAs 光电探测器的上升时间， t_0 为数字示波器的上升时间，上升时间分别为 63.30 ps，28 ps 和 50 ps。可以计算出真实的脉冲宽度约为 33.61 ps，对应的时间带宽积为 0.74，表明脉冲是频率啁啾的。

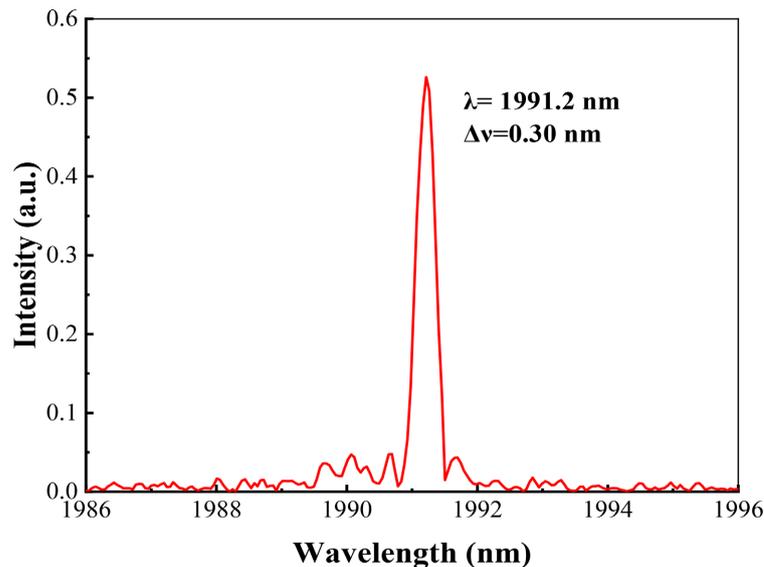


Figure 4. Spectrum of the self-mode-locked Tm:YAP laser at the maximum average output power
图 4. 自锁模 Tm:YAP 激光器在最高平均输出功率下的光谱

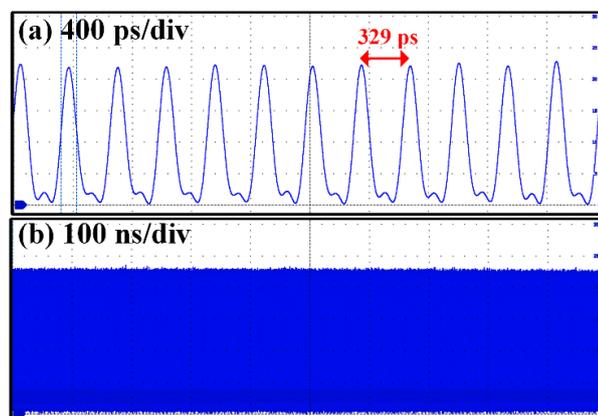


Figure 5. Pulse temporal sequences of the self-mode-locked Tm:YAP laser at time scales of 4 ns and 1 μ s
图 5. 4 ns 和 1 μ s 下自锁模 Tm:YAP 激光器的脉冲时间序列

为进一步证明锁模脉冲的稳定性, 在最高平均输出功率下, 对自锁模 Tm:YAP 激光器的射频谱进行测量。图 6(a)展示了频率跨度为 14 GHz 时的锁模激光射频谱信号, 我们成功地观测到 Tm:YAP 自锁模激光器在 3.04 GHz、6.08 GHz、9.12 GHz、和 12.16 GHz 的所有基频、二频、三频和四频, 由于光电探头的带宽为 12.5 GHz, 因此未测量更大频率跨度的射频信号。同时测量了在频率跨度为 80 MHz 时的射频谱, 如图 6(b)所示, 基频为 3.04 GHz, 与 98.58 mm 的光腔长度相匹配, 输出锁模激光的射频谱信号信噪比大于 50 dB, 说明该自锁模激光器的稳定性较好。

在最大平均输出功率为 2.80 W 时, 使用光束质量分析仪测量了自锁模 Tm:YAP 激光器的二维远场光束分布, 如图 7(a)所示。可以看出, 输出激光为基横模(TEM00), 计算出沿着 x 方向和 y 方向上的 M² 因子分别为 1.31 和 1.36。最后对自锁模 Tm:YAP 激光器半小时内的功率稳定性进行了测量, 如图 7(b)所示, 在测量时间范围内, 均方根误差(RMS)为 0.39%, 说明激光器输出较为稳定。

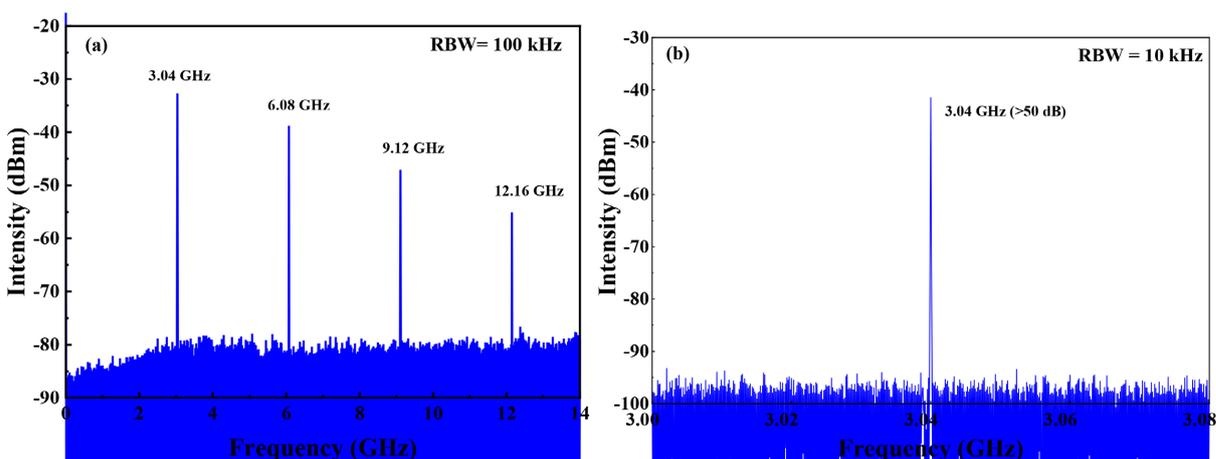


Figure 6. (a) Radio frequency spectrum of the continuous self-mode-locked Tm:YAP laser over a frequency range of 14 GHz. (b) Radio frequency spectrum of the continuous self-mode-locked Tm:YAP laser over a frequency range of 80 MHz
图 6. (a) 在 14 GHz 的频率范围内, 连续自锁模 Tm:YAP 激光器的射频谱。(b) 在 80 MHz 频率范围内的连续自锁模 Tm:YAP 激光器的射频谱。

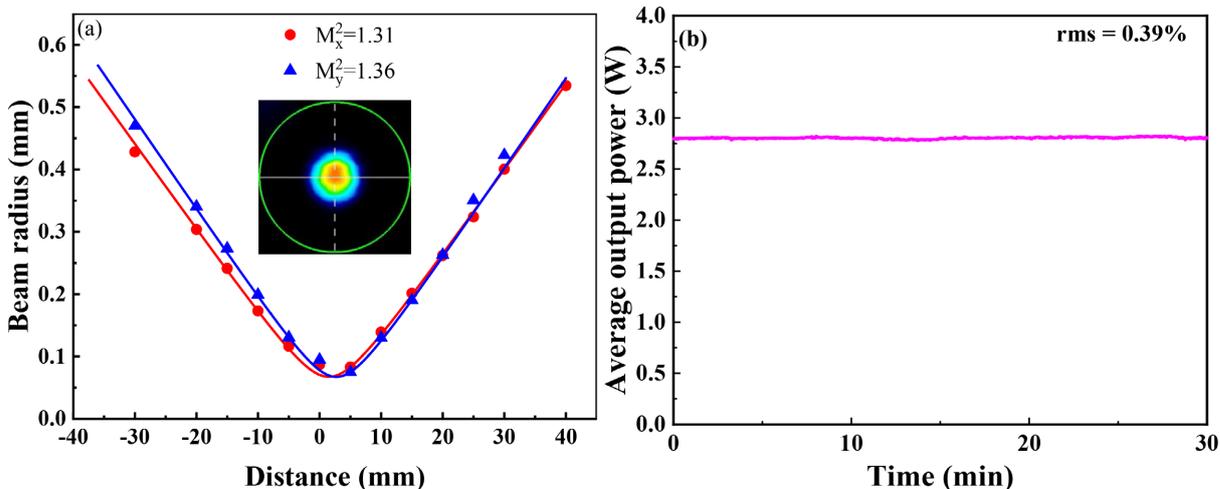


Figure 7. (a) M² measurement of the self-mode-locked Tm:YAP laser at an average output power of 2.80 W (inset: showing the two-dimensional far-field beam profile). (b) Power stability measurement of the self-mode-locked Tm:YAP laser
图 7. (a) 在 2.80W 的平均输出功率下的自锁模 Tm:YAP 激光器的 M² 测量(插图: 示出二维远场光束轮廓)。(b) 自锁模 Tm:YAP 激光器的功率稳定测量。

5. 总结

综上所述, 我们成功实现了高重复频率、高输出功率、低阈值的克尔透镜锁模 Tm:YAP 激光器, 在入射泵浦功率为 9.66 W 时, 获得了最大的输出功率 2.80 W, 斜率效率和光光转换效率分别为 31.9%和 28.9%, 在 x 和 y 方向 M^2 因子分别为 1.31 和 1.36, 实验结果表明, Tm:YAP 晶体在高功率、高重复频率超快激光器领域具有显著的应用潜力。

参考文献

- [1] Yao, W., Wang, Y., Ahmed, S., Hoffmann, M., van Delden, M., Musch, T., *et al.* (2023) Low-Noise, 2-W Average Power, 112-Fs Kerr-Lens Mode-Locked Ho:CALGO Laser at 2.1 μm . *Optics Letters*, **48**, 2801-2804. <https://doi.org/10.1364/ol.489893>
- [2] Gattass, R.R. and Mazur, E. (2008) Femtosecond Laser Micromachining in Transparent Materials. *Nature Photonics*, **2**, 219-225. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.47>
- [3] Popmintchev, T., Chen, M., Arpin, P., Murnane, M.M. and Kapteyn, H.C. (2010) The Attosecond Nonlinear Optics of Bright Coherent X-Ray Generation. *Nature Photonics*, **4**, 822-832. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.256>
- [4] Singh, U.N., Walsh, B.M., Yu, J., Petros, M., Kavaya, M.J., Refaat, T.F., *et al.* (2015) Twenty Years of Tm:Ho:YLF and Lulif Laser Development for Global Wind and Carbon Dioxide Active Remote Sensing. *Optical Materials Express*, **5**, Article 827. <https://doi.org/10.1364/ome.5.000827>
- [5] Godard, A. (2007) Infrared (2-12 μm) Solid-State Laser Sources: A Review. *Comptes Rendus. Physique*, **8**, 1100-1128. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2007.09.010>
- [6] Smolski, V.O., Yang, H., Gorelov, S.D., Schunemann, P.G. and Vodopyanov, K.L. (2016) Coherence Properties of a 26-75 μm Frequency Comb Produced as a Subharmonic of a Tm-Fiber Laser. *Optics Letters*, **41**, Article 1388. <https://doi.org/10.1364/ol.41.001388>
- [7] Tyazhev, A., Soulard, R., Godin, T., Paris, M., Brasse, G., Doualan, J., *et al.* (2018) Passively Mode-Locked Diode-Pumped Tm³⁺:YLF Laser Emitting at 1.91 μm Using a Gaas-Based SESAM. *Laser Physics Letters*, **15**, Article 045807. <https://doi.org/10.1088/1612-202x/aaa9aa>
- [8] Luan, C., Yang, K., Zhao, J., Zhao, S., Li, T., Zhang, H., *et al.* (2017) Diode-Pumped Mode-Locked Tm:Luag Laser at 2 μm Based on GaSb-SESAM. *Optics Letters*, **42**, Article 839. <https://doi.org/10.1364/ol.42.000839>
- [9] Schmidt, A., Choi, S.Y., Yeom, D., Rotermund, F., Mateos, X., Segura, M., *et al.* (2012) Griebner. Femtosecond Pulses near 2 μm from a Tm:KLuW Laser Mode-Locked by a Single-Walled Carbon Nanotube Saturable Absorber. *Applied Physics Express*, **5**, Article 092704. <https://doi.org/10.1143/apex.5.092704>
- [10] Lagatsky, A.A., Koopmann, P., Fuhrberg, P., Huber, G., Brown, C.T.A. and Sibbett, W. (2012) Passively Mode Locked Femtosecond Tm:Sc₂O₃ Laser at 21 μm . *Optics Letters*, **37**, 437-439. <https://doi.org/10.1364/ol.37.000437>
- [11] Hou, J., Zhang, B., Su, X., Zhao, R., Wang, Z., Lou, F., *et al.* (2015) High Efficient Mode-Locked Tm:YAP Laser Emitting at 1938nm by Sesam. *Optics Communications*, **347**, 88-91. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.03.009>
- [12] Pinto, J.F., Rosenblatt, G.H. and Esterowitz, L. (1992) Continuous-Wave Mode-Locked 2- μm Tm: YAG Laser. *Optics Letters*, **17**, Article 731. <https://doi.org/10.1364/ol.17.000731>
- [13] Kalachev, Y.L., Mikhaylov, V.A. and Shcherbakov, I.A. (2009) Diode Pumped Actively Mode-Locked Tm:YALO₃ Laser. *Laser Physics*, **19**, 1079-1082. <https://doi.org/10.1134/s1054660x09050351>
- [14] Mužík, J., Kubeček, V., Jelínek, M. and Vyhlídal, D. (2014) 1.2 W Actively Mode-Locked Tm:Ylf Laser. *SPIE Proceedings*, 5 December 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2087428>
- [15] Xie, G.Q., Tang, D.Y., Zhao, L.M., Qian, L.J. and Ueda, K. (2007) High-Power Self-Mode-Locked Yb: Y₂O₃ Ceramic Laser. *Optics Letters*, **32**, 2741-2743. <https://doi.org/10.1364/ol.32.002741>
- [16] Liang, H.C., Chen, R.C.C., Huang, Y.J., Su, K.W. and Chen, Y.F. (2008) Compact Efficient Multi-GHz Kerr-Lens Mode-Locked Diode-Pumped Nd: YVO₄ Laser. *Optics Express*, **16**, 21149-21154. <https://doi.org/10.1364/oe.16.021149>
- [17] Liang, H.C., Chang, H.L., Huang, W.C., Su, K.W., Chen, Y.F. and Chen, Y.T. (2009) Self-Mode-Locked Nd:GdVO₄ Laser with Multi-GHz Oscillations: Manifestation of Third-Order Nonlinearity. *Applied Physics B*, **97**, 451-455. <https://doi.org/10.1007/s00340-009-3568-y>
- [18] Liang, H.C., Huang, Y.J., Huang, W.C., Su, K.W. and Chen, Y.F. (2010) High-Power, Diode-End-Pumped, Multigigahertz Self-Mode-Locked Nd:YVO₄ Laser at 1342 Nm. *Optics Letters*, **35**, 4-6. <https://doi.org/10.1364/ol.35.000004>
- [19] Huang, Y.J., Liang, H.C., Chen, Y.F., Zhang, H.J., Wang, J.Y. and Jiang, M.H. (2011) High-Power 10-GHz Self-Mode-

- Locked Nd:LuVO₄ Laser. *Laser Physics*, **21**, 1750-1754. <https://doi.org/10.1134/s1054660x11190169>
- [20] Liu, J., Yang, J., Wang, W., Zheng, L., Su, L. and Xu, J. (2011) Kerr-Lens Self-Mode-Locked Laser Characteristics of Yb:Lu₂SiO₅ Crystal. *Chinese Physics Letters*, **28**, Article 074220. <https://doi.org/10.1088/0256-307x/28/7/074220>
- [21] Zhuang, W.Z., Chang, M.T., Liang, H.C. and Chen, Y.F. (2013) High-Power High-Repetition-Rate Subpicosecond Monolithic Yb:KGW Laser with Self-Mode Locking. *Optics Letters*, **38**, 2596-2599. <https://doi.org/10.1364/ol.38.002596>
- [22] Zhao, Y., Wang, L., Chen, W., Loiko, P., Wang, Y., Pan, Z., *et al.* (2021) Kerr-Lens Mode-Locked Tm-Doped Sesquioxide Ceramic Laser. *Optics Letters*, **46**, Article 3428. <https://doi.org/10.1364/ol.431067>
- [23] Cao, X., Zhu, Q., Xian, A., Liu, Y., Liu, G., Li, L., *et al.* (2022) Ultrafast Tm:CaYAlO₄ Laser with Pulse Regulation and Saturation Parameters Evolution in the 2 μm Water Absorption Band. *Optics & Laser Technology*, **152**, Article 108096. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108096>
- [24] Tokurakawa, M., Fujita, E. and Kränkel, C. (2017) Kerr-Lens Mode-Locked Tm³⁺:Sc₂O₃ Single-Crystal Laser In-Band Pumped by an Er:Yb Fiber MOPA at 1611 Nm. *Optics Letters*, **42**, Article 3185. <https://doi.org/10.1364/ol.42.003185>
- [25] Cho, C.Y., Chen, Y.F., Zhang, G., Chen, W.D. and Liang, H.C. (2017) Exploring the Self-Mode Locking of the 2 μm Tm:YAG Laser with Suppression of the Self-Pulsing Dynamic. *Optics Letters*, **42**, Article 5226. <https://doi.org/10.1364/ol.42.005226>
- [26] Mi, S., Li, J., Wei, D., Yang, K., Yang, C., Yao, B., *et al.* (2021) 105 W Continuous-Wave Diode-Pumped Tm:YAP Slab Laser with High Beam Quality. *Optics & Laser Technology*, **138**, Article 106847. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106847>
- [27] Neustadter, Y., Horovitz, G., Nahear, R., Suliman, N. and Noach, S. (2025) High Peak Power Passive Q-Switched Widely Tunable Tm:YAP Laser. *Optics & Laser Technology*, **181**, Article 112062. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112062>
- [28] Li, G., Yao, B.Q., Meng, P.B., Ju, Y.L. and Wang, Y.Z. (2010) Efficient Continuous Wave and Q-Switched Operation of a Dual-End-Pumped C-Cut Tm:YAP Laser. *Laser Physics*, **20**, 1871-1876. <https://doi.org/10.1134/s1054660x10190102>
- [29] Kang, P., Zhang, S., Zhang, X. and Huang, J. (2022) High Power Self-Q-Switched Tm:YAP Solid State Laser Based on the Ground State Reabsorption. *Infrared Physics & Technology*, **123**, Article 104117. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104117>
- [30] Zhang, S., Zhang, X., Huang, J., Wang, T., Dai, J. and Dong, G. (2018) Self-Mode-Locking Operation of a Diode-End-Pumped Tm: YAP Laser with Watt-Level Output Power. *Laser Physics*, **28**, Article 035804. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aa9f64>
- [31] Kang, P., Zhang, X., Jing, X., Shen, C., Huang, J., Wang, Y., *et al.* (2024) High-Power, Gigahertz Repetition Frequency Self-Mode-Locked Ho:GdVO₄ Laser Resonantly Pumped by a Tm-Doped Fiber Laser. *Optics Letters*, **49**, Article 2073. <https://doi.org/10.1364/ol.519796>