中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

同带泵浦的Tm:CYA调Q锁模激光器

孙堂正 李云飞 谭晶荣 杜晓娟 丁嘉宇 任舒婷 许浩 王翀 杨金芳 张明霞 朱永乐 董忠 令维军

Tm:CYA Q-switched mode-locked laser realized by tandem-pumping

SUN Tang-zheng, LI Yun-fei, TAN Jing-rong, DU Xiao-juan, DING Jia-yu, REN Shu-ting, XU Hao, WANG Chong, YANG Jin-fang, ZHANG Ming-xia, ZHU Yong-le, DONG Zhong, LING Wei-jun

引用本文:
孙堂正, 李云飞, 谭晶荣, 杜晓娟, 丁嘉宇, 任舒婷, 许浩, 王翀, 杨金芳, 张明霞, 朱永乐, 董忠, 令维军. 同带泵浦的Tm:CYA调Q锁模激光器[J]. 中国光学, 2024, 17(4): 764–770. doi: 10.37188/CO.2023–0162
SUN Tang-zheng, LI Yun-fei, TAN Jing-rong, DU Xiao-juan, DING Jia-yu, REN Shu-ting, XU Hao, WANG Chong, YANG Jin-fang, ZHANG Ming-xia, ZHU Yong-le, DONG Zhong, LING Wei-jun. Tm:CYA Q-switched mode-locked laser realized by tandem-pumping[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 764-770. doi: 10.37188/CO.2023-0162

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023–0162

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碲化铋倏逝场锁模器件的超快光纤激光器

Ultrafast fiber laser based on bismuth telluride evanescent field mode–locked device

中国光学（中英文）. 2022, 15(3): 433 https://doi.org/10.37188/CO.2021–0216

1.6 μm波段锁模光纤激光器

1.6 μm band mode–locked fiber laser

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1387 https://doi.org/10.37188/CO.2021–0128

可提升被动锁模光纤激光器计算效率的分步傅里叶全局误差局部能量法

SSFM–global–error–local–energy method for improving computational efficiency of passively mode–locked fiber laser

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 733 https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022–0016

半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展

Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 895 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0143

窄线宽1064 nm光纤激光泵浦高效率中红外3.8 μm MgO:PPLN光参量振荡器

High efficiency mid–infrared 3.8 μm MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth 1064 nm fiber laser

中国光学（中英文）. 2021, 14(2): 361 https://doi.org/10.37188/CO.2020–0169

半导体激光器系统输出混沌激光研究进展

Research progress of optical chaos in semiconductor laser systems

中国光学（中英文）. 2021, 14(5): 1133 https://doi.org/10.37188/CO.2020–0216

文章编号　2097-1842(2024)04-0764-07

同带泵浦的 Tm:CYA 调 Q 锁模激光器

孙堂正[1,2], 李云飞[1,2], 谭晶荣[1,2], 杜晓娟[1,2], 丁嘉宇[1,2], 任舒婷[1,2], 许　浩[1,2],
王　翀[1,2], 杨金芳[1,2], 张明霞[1,2], 朱永乐[1,2], 董　忠[1,2], 令维军[1,2]*
（1. 甘肃省全固态激光工程研究中心, 甘肃 天水 741001;
2. 集成电路封装与测试教育部工程研究中心, 甘肃 天水 741001）

摘要: 以半导体可饱和吸收镜 SESAM 作为锁模启动元件, 利用同带泵浦技术首次在 Tm:$CaYALO_4$(Tm:CYA) 激光器实现了被动调 Q 锁模运转。光路采用 X 型四镜腔结构, 泵浦源采用 Er:$Y_3Al_5O_{12}$(Er:YAG) 固体激光器, 其中心波长为 1 650 nm。分别采用 0.5%、1.5%、3% 和 5% 透过率的输出耦合镜, 对激光器连续光输出和锁模输出特性进行研究。结果表明: 当采用 5% 透过率的输出耦合镜时, 激光器的输出特性最好; 当激光器在连续光运转情况下, 得到了 894 mW 的最高功率和 16% 的最大斜效率输出; 将连续光功率优化至最高, 在光路中加入 SESAM 锁模元件后, 当吸收泵浦功率大于 1.86 W 时, 激光运转进入不稳定的调 Q 状态; 当吸收泵浦功率提高到 5.7 W 时, 实现了稳定的被动调 Q 锁模运转; 吸收泵浦功率达到 6.99 W 时, 采用 5% 透过率的输出耦合镜, 获得了最高输出功率为 399 mW 的锁模脉冲激光; 此时调 Q 包络下重复频率为 98.11 MHz, 脉冲宽度为 619.4 ps, 对应的最大单脉冲能量为 4.07 nJ, 调 Q 包络中锁模脉冲调制深度接近 100%。实验结果证明, 同带泵浦技术可以用于激光器以产生调 Q 锁模脉冲, 为超短脉冲激光的产生提供了一种新的泵浦方式。

关　键　词: Tm:CYA 激光器; 同带泵浦; 半导体可饱和吸收镜 (SESAM); 调 Q 锁模
中图分类号: TN248.1　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2023-0162

收稿日期: 2023-09-15; **修订日期:** 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62165012); 甘肃省重点研发计划(No. 21YFIGE300); 甘肃省高等学校产业支撑引导项目(No. 2020C-23); 甘肃省教育厅: 教育揭榜挂帅项目(No. 2021jyjbgs-06); 甘肃省高等学校创新基金项目(No. 2021B-190); 秦州区科技计划(No. 2021-SHFZG-1442); 2023 年甘肃省高校青年博士支持项目(No. 2023QB-013); 天水师范学院 2022 年科研创新平台建设专项(No. PTJ2022-06); 天水师范学院研究生创新引导项目(No. TYCX2235); 甘肃省优秀研究生创新之星项目(No. 2022CXZX-796, No. 2023CXZX-792)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62165012); Key R&D Program of Gansu Province (No. 21YFIGE300); Gansu Provincial Higher Education Industry Support and Guidance Project (No. 2020C-23); Gansu Provincial Department of Education: Education Unveiling and Leading Project (No. 2021jyjbgs-06); Gansu Provincial Higher Education Innovation Fund Project (No. 2021B-190); Qinzhou District Science and Technology Plan (No. 2021-SHFZG-1442); 2023 Gansu Provincial University Young Doctoral Support Project (No. 2023QB-013); Tianshui Normal University 2022 special project for the construction of scientific research and innovation platform (No. PTJ2022-06); Tianshui Normal University Graduate Innovation Guidance Project (No. TYCX2235); Gansu Province Outstanding Graduate Innovation Star Program (No. 2022CXZX-796, No. 2023CXZX-792)

Tm:CYA Q-switched mode-locked laser realized by tandem-pumping

SUN Tang-zheng[1,2], LI Yun-fei[1,2], TAN Jing-rong[1,2], DU Xiao-juan[1,2], DING Jia-yu[1,2], REN Shu-ting[1,2], XU Hao[1,2], WANG Chong[1,2], YANG Jin-fang[1,2], ZHANG Ming-xia[1,2], ZHU Yong-le[1,2], DONG Zhong[1,2], LING Wei-jun[1,2]*

(1. *Gansu All-Solid State Laser Engineering Research Center*, *Tianshui* 741001, *China*;
2. *Integrated Circuit Engineering Research Center of the Ministry of Education*, *Tianshui* 741001, *China*)

* *Corresponding author*, *E-mail*: *wjlingts@sina.com*

Abstract: Passively Q-switched mode-locked operation was realized for the first time by inserting a semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) as a mode-locking element into a Tm:$CaYALO_4$(Tm:CYA) laser using tandem-pumping technology. The laser cavity adopted an X-type four-mirror cavity structure, and the pumping source was an Er:$Y_3Al_5O_{12}$(Er:YAG) solid-state laser with a central wavelength of 1 650 nm. Output coupling mirrors with transmittances of 0.5%, 1.5%, 3%, and 5% were used to study the laser's continuous wave (CW) output and mode-locking output characteristics. The experimental results show that the laser has the best output characteristics when an output coupling mirror with a transmittance of 5% is used. The maximum power of 894 mW and the maximum slope efficiency of 16% were obtained when the laser operated in the CW regime. After the CW power was optimized to the highest, the mode-locked element SESAM was added to the optical path. When the absorbed pump power became greater than 1.86 W, the laser operation entered an unstable Q-switched state; when the absorbed pump power increased to 5.7 W, a stable passively Q-switched mode-locked operation was achieved; when the absorbed pump power reached 6.99 W, a mode-locked pulse laser with a maximum output power of 399 mW was obtained by using the output coupling mirror with transmittance of 5%. At that time, the repetition frequency under the Q-switched envelope was 98.11 MHz, the pulse width was 619.4 ps, and the corresponding maximum single pulse energy was 4.07 nJ. The mode-locked pulse modulation depth in a Q-switched envelope was observed to be close to 100%. The above results show that tandem-pumping technology can be used in lasers to generate Q-switched mode-locked pulses, which provides a new pumping method for generating ultrashort pulse lasers.

Key words: Tm:CYA laser; tandem-pumping; semiconductor saturable absorption mirror (SESAM); Q-switched mode-locked

1　引　言

2 μm 波段激光对应空气中水和二氧化碳的吸收峰, 可以广泛应用于环境监测、激光手术、军事对抗等领域, 还可以将其作为泵浦源, 实现更长波段的中红外激光输出, 应用前景十分广阔[1-3]。由于掺铥激光器在 1900~2 100 nm 范围内可以产生高效的激光输出, 近年来受到了人们的广泛关注。

Tm^{3+}属于准三能级结构, 介于三能级和四能级系统之间, 其具有的能量较低, 在室温下也存在一定的粒子数, 形成了与三能级系统和四能级系统不同的性质。从 Tm^{3+}的能级图可知利用掺铥介质获得 2 μm 激光通常有两种方法。第一种是利用波长为 790 nm 左右的商用半导体激光器 (Laser Diode, LD) 作为泵浦源, 通过交叉弛豫的方式获得 2 μm 激光, 但这种方法会增加晶体的上能级转换损耗, 在晶体内部容易产生热积累, 从而造成激光晶体的热脆裂; 另一种是采用同带泵浦

的方法，同带泵浦技术指使用泵浦光直接将粒子激发到上能级，利用 Stark 分裂形成子能带，在两个子能带之间实现激光的发射。该技术最大的特点就是量子效率高，其量子效率可以超过 90%，消除了激发态粒子通过非辐射跃迁到激光上能级产生的热量和激发态能量上转换带来的问题，有效降低了激光器的热效应，从根本上克服了传统泵浦方式带来的热问题，十分适合高能量脉冲激光的实现。

本实验利用 Tm^{3+}在 1.6~1.7 μm 范围内存在的另一条吸收带，采用该波段激光对掺铥的增益介质进行同带泵浦，使其同处于一个大能级，能有效提高量子效率，获得近衍射极限的激光输出。采用同带泵浦掺 Tm^{3+}离子的固体激光器也早已有报道。2001 年，Cornacchia 等首次采用 1.682 μm 同带泵浦方案在 Tm, Ho:YLF 激光器中实现了 2 μm 激光运转[4]。实验结果表明，该方案可以有效减少粒子上转换损耗，提高转换效率。2011 年，Wang 等人报道了一种由 Er:YAG 激光器同带泵浦的 Tm:YAG 陶瓷激光器，激光的最大输出功率为 7.3 W，斜率效率为 62.3%[5]。2016 年，Antipov 等报道了一种波长为 1670 nm 的激光泵浦的 $Tm:Lu_2O_3$ 陶瓷激光器，连续光输出功率达到 23 W[6]。2016 年，江苏师范大学侯晓君课题组泵浦 Er:YAG 陶瓷晶体得到 1645 nm 的激光，接着将其作为泵源泵浦 Tm:CYA 晶体得到 2 μm 激光输出，获得最高输出功率为 1.2 W，斜效率为 56.3%[7]。同年，姚伟超由 1.7 μm 拉曼光纤激光器同带泵浦 Tm:CYA 晶体，得到了 6.8 W 的高功率连续光输出[8]。2021 年，丁宇等利用掺 Er^{3+}拉曼光纤激光器作为泵浦源，其中心波长为 1678 nm，泵浦 $Tm:Y_2O_3$ 晶体，得到了 2051 nm 激光输出，最高斜效率为 63.3%[9]。这些实验结果均表明，同带泵浦技术在产生 2 μm 波长激光方面具有良好的应用潜力。

铝酸钙钇 ($CaYAlO_4$, CYA) 属于 $ABCO_4$ 型化合物 (其中 A 为 Ba、Sr 或 Ca，B 为 Y 或其他稀土元素，C 为 Ga 或 Al)[10]，是具有 K_2NiF_4 型 (四方的钙钛矿层状) 的正方晶系，$ABCO_4$ 型化合物的晶体也被称为无序晶体。无序结构晶体中的激活离子能级在晶格场的作用下会发生分裂，其光谱具有非均匀展宽效果。实验中选用 Tm:CYA 晶体作为增益介质，因为 Tm:CYA 的光谱存在非均匀展宽的现象，具有较宽的吸收光谱和发射光谱，支持飞秒脉冲的产生，可以实现宽范围的波长调谐，再加上其易于生长，具有高导热系数、机械硬度大和稳定的化学结构等优点，是实现高功率超快激光运转的理想增益介质[11]。在固体锁模激光器中引起了广泛的关注。要获得 2 μm 波段激光脉冲，目前的主要方式是利用被动锁模技术。被动锁模技术具有效率高、响应快、操作方便、容易实现等优点。其中，调 Q 锁模阶段处于调 Q 运转到锁模运转的过渡阶段，因为其输出脉冲具有大脉冲能量和高峰值功率的特性，所以调 Q 锁模脉冲在远程探测中具有特殊的应用价值[12]。目前，已经被证明可以作为锁模启动元件，实现激光器被动锁模的材料有半导体可饱和吸收镜 (SESAM)、石墨烯 (Graphene)、过渡金属硫化物 (TMD)、碳纳米管 (CNT) 等[13-16]。SESAM 是其中最常用的可饱和吸收体，利用 SESAM 实现被动锁模的激光器具有结构简单、操作方便和运行稳定等优点，目前已经广泛应用于产生皮秒和飞秒脉冲激光。2017 年，江苏师范大学周伟等人采用 790 nm LD 作为泵浦源，使用 SESAM 在 Tm:CYA 激光器中实现了输出功率达到 1 W、波长在 1874~1973 nm 范围可调谐的锁模激光[17]。同年，上海交通大学的谢国强组使用 LD 作为泵浦源，利用 SESAM 锁模元件，并在光路中插入 CaF_2 棱镜对以补偿色散，在 Tm:CYA 激光器中首次实现了飞秒脉冲锁模，脉冲宽度为 496 fs，最大平均输出功率为 531 mW[18]。2021 年，Wang 等人通过 SESAM 锁模方式在 Tm, Ho: CALGLO 振荡器中获得了 46 fs 的锁模脉冲激光[19]。2021 年，本课题组通过对比 3 种 SESAM 作为锁模启动元件的锁模效果，研究分析了 $Tm:LuScO_3$ 激光器的被动调 Q 锁模运转特性[20]。2022 年，Wang 等人用基于 GaSb 的 SESAM 在 Tm,Ho:CALGO 激光器中产生了短至 52 fs 的脉冲，平均输出功率为 376 mW[21]。可以看出，使用 SESAM 实现掺铥激光器被动锁模具有很大的应用前景。

本文利用同带泵浦技术首次在 Tm:CYA 激光器中实现了稳定的调 Q 锁模运转。实验中泵浦源是中心波长为 1650 nm 的 Er:YAG 固体激光器，锁模启动元件为 SESAM，输出镜的透过

率为 5%, 获得了中心波长为 1 944.4 nm, 最大功率为 399 mW 的锁模输出, 锁模脉冲重复频率为 98.11 MHz, 最大单脉冲能量为 4.07 nJ。

2　实验装置

Tm:CYA 被动调 Q 锁模激光器实验装置如图 1 所示。采用中心波长为 1 650 nm 的 Er:YAG 固体激光器作为泵浦源, 所用增益介质中, Tm^{3+} 离子的掺杂浓度为 5%, 尺寸为 3.3 mm×3.2 mm×4.5 mm。Tm:CYA 晶体采用布儒斯特角切割后, 其两端面均被抛光。采用布儒斯特角切割晶体可以增加晶体的抗损伤能力并有效降低损耗, 同时为了减少激光器运转时晶体产生的热透镜效应, 防止晶体热碎裂。采用铟箔包裹晶体并将其放置于紫铜水冷夹中, 由 12 °C 恒温循环水冷却。

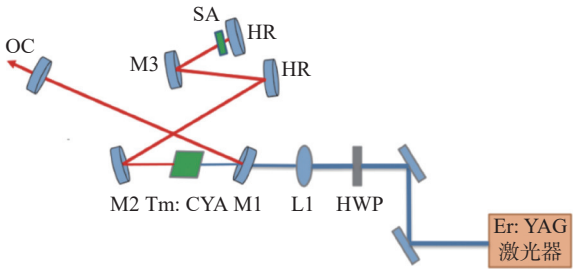


图 1　实验装置原理图

Fig. 1　Schematic diagram of the experimental device

谐振腔采用典型的 X 型折叠腔, 有利于减小增益介质处振荡光斑的大小, 降低锁模阈值。考虑到激光偏振态对于晶体吸收率的影响, 采用半波片将进入腔内的光束转偏振到 P 偏振光。聚焦透镜 L1 焦距为 100 mm, 对泵浦光进行聚焦。M1、M2 均是曲率半径为 100 mm 的泵浦镜, 其镀膜对泵浦光的透过率大于 95%, 对振荡光反射率大于 99%。利用 ABCD 矩阵模拟计算腔内振荡光, 得到晶体中的振荡光斑半径约为 31 μm。将连续光功率优化至最高, 为保证 SESAM 稳定运行, 选择曲率半径为 100 mm 的平凹反射镜, 其对振荡光反射率大于 99%, 将 SESAM 置于 M3 焦点附近, 紧靠着 HR 插入腔内, SESAM 表面光斑的半径约为 49 μm。启动锁模所用的可饱和吸收体为德国 BATOP 公司商业生产的透射式可饱和吸收体 SA-2000, 吸收率为 1%, 弛豫时间为 10 ps, 损伤阈值约为 3 mJ/cm^2。

3　实验结果分析与讨论

分别选用透过率为 0.5%, 1.5%, 3% 和 5% 的输出耦合镜, 在连续光运转情况下, 进行了对比实验。得到的连续光最高输出功率分别为 240 mW, 372 mW, 660 mW 和 894 mW, 对应斜率分别为 3.88%、6.02%、10.68% 和 16%。连续光运转情况下, 激光器输出功率与泵浦功率的变化关系如图 2 所示。

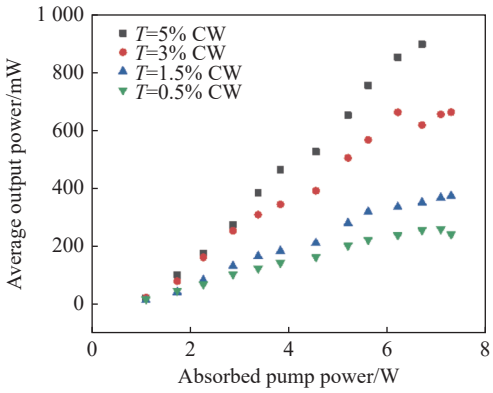


图 2　连续光输出功率随吸收泵浦功率变化图

Fig. 2　The output power of continuous laser varies with the absorption pump power

由图 2 可知, 采用 5% 透过率的输出耦合镜时输出功率最高。如继续增加输出镜透过率至 9%, 发现最高输出功率下降。因此基于输出功率及实际锁模效果, 选用 5% 透过率的输出镜进行后续实验。在腔内插入 SESAM 后, 逐渐增加泵浦功率, 当吸收泵浦功率达到 1.86 W 时, 激光器进入了不稳定的调 Q 状态。当泵浦功率增加到 5.7 W 时, 激光器进入稳定调 Q 锁模状态。当泵浦功率达到 6.99 W 时, 激光器最高输出功率为 399 mW。锁模输出功率随泵浦功率变化曲线由图 3 所示。

为了考察调 Q 脉冲的变化特性, 实验进一步研究了调 Q 脉冲重复频率和脉冲宽度随泵浦功率的变化。在实验中发现, 随着泵浦光功率的逐渐增大, 调 Q 包络的脉宽会逐渐变窄, 调 Q 脉冲的重复频率则逐渐增大, 当吸收泵浦功率从 5.18 W 增加到 7.49 W 时, 调 Q 脉冲重复频率从 22.8 kHz 增加到 3 532 kHz, 包络脉冲宽度从 1 μs 减小到 780 ns。如图 4 所示。

图 5(彩图见期刊电子版) 所示为光谱仪 (AvaSpec-NIR 256-2.5 TEC) 测量得到的连续光和锁模脉冲输出光谱图。连续光中心波长为 1 956.6 nm，锁模脉冲中心波长为 1 944.4 nm。可以看出，当激光器进入调 Q 锁模运转阶段后，相比连续光的光谱，锁模光谱出现蓝移现象。这主要归因于 SESAM 的插入，使 1 956.6 nm 波段的增益受到抑制，使得 1 944.4 nm 波段增益更高。

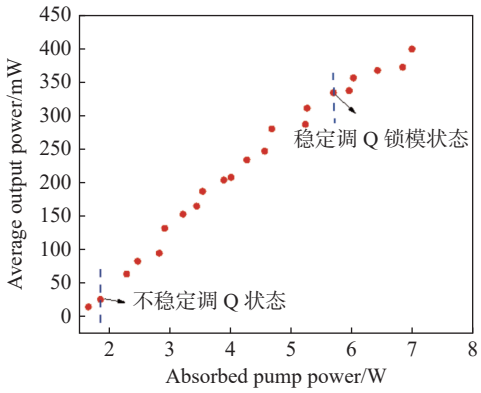


图 3 锁模输出功率随泵浦功率变化图

Fig. 3 The average output power of the mode-locking laser versus the absorbed pump power

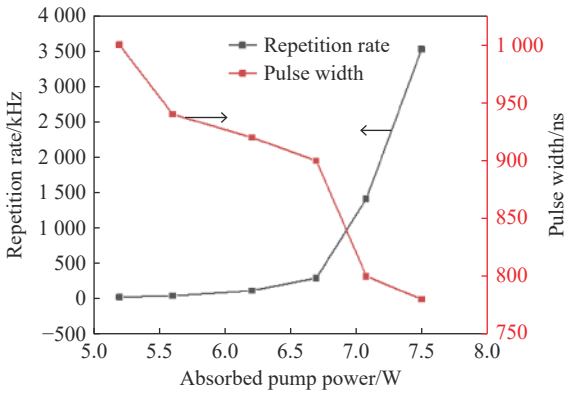


图 4 调 Q 脉冲重复频率和脉冲宽度与吸收的泵浦功率的变化关系

Fig. 4 The Q-switched pulse repetition rate and pulse width versus the absorbed pump power

使用光电二极管 (ET-5 000, Electro-Optics Technology) 连接示波器 (MSO6, Tektronix)，得到了稳定的锁模序列，如图 6 所示。示波器所选扫描时间为 100 μs 和 10 ns，可以看出锁模较为稳定。

调 Q 包络下的锁模脉冲重复频率为 98.11 MHz，锁模脉冲的宽度为 619.4 ps，如图 7 所示。可见，其符合 1.5 m 腔长所对应的理论重复频率。若能继续提高泵浦功率，则有望实现连续锁模。

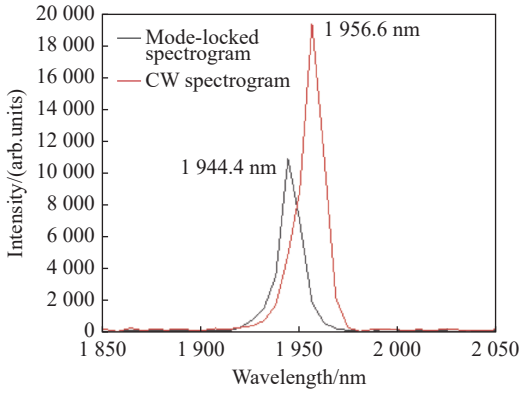


图 5 连续光和锁模激光光谱图

Fig. 5 The CW and mode-locked laser spectrogram

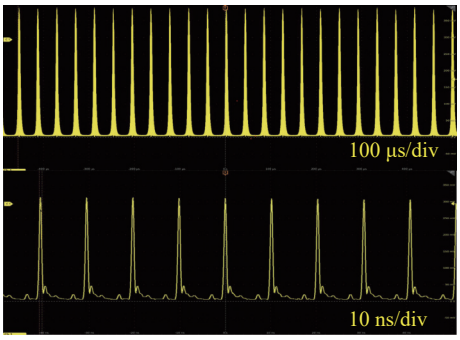


图 6 纳秒和微秒时间刻度下的脉冲锁模序列

Fig. 6 The Q-switched mode-locked pulse trains in nanosecond and microsecond time scales, respectively

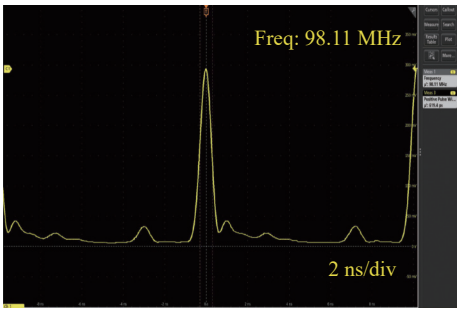


图 7 锁模脉冲重复频率和脉冲宽度

Fig. 7 Repetition frequency and pulse width of the mode-locked pulse

4 结 论

综上所述，本文采用中心波长为 1 650 nm 的 Er:YAG 固体激光器作为泵浦源，基于同带泵浦技术，使用 SESAM 作为锁模启动元件，通过搭建 X 型谐振腔实现了输出波长为 1 944.4 nm 的 Tm:CYA 激光器调 Q 锁模运转。使用透过率为 5% 的输出镜时，此时连续光最高输出功率达到 894 mW，斜率效率达到 16%，对应被动调 Q 锁模

最大输出功率达到 399 mW, 最大单脉冲能量为 4.07 nJ。锁模脉冲的重复频率为 98.11 MHz, 理论上与 1.5 m 腔长的重复频率对应。光谱和激光性能均表现出 Tm:CYA 晶体作为 2 μm 超快激光增益介质的优势。

本研究首次在同带泵浦的 Tm:CYA 激光器中, 使用 SESAM 实现调 Q 锁模运转且锁模效果较好, 此前并未有类似成果。实验结果表明在同带泵浦的掺铥激光器中, 使用 SESAM 可以实现稳定锁模脉冲, 是实现超短脉冲激光的有效手段。本研究对 2 μm 波段被动调 Q 锁模固体激光器的研究具有一定意义。因泵源波长与晶体吸收峰不够匹配, 接下来将会尝试调谐泵源波长以期获得更高的输出功率, 并尝试更换锁模元件, 在腔内插入色散补偿元件, 控制腔内色散, 希望能够实现连续锁模运转。

参考文献:

[1] BELYAEV A N, CHABUSHKIN A N, KHRUSHCHALINA S A, *et al*.. Investigation of endovenous laser ablation of varicose veins in vitro using 1.885-μm laser radiation[J]. *Lasers in Medical Science*, 2016, 31(3): 503-510.

[2] 田俊涛, 李辉, 赵莉莉, 等. 温度调谐 $ZnGeP_2$ 长波红外光参量振荡器[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(4): 861-867.
TIAN J T, LI H, ZHAO L L, *et al*.. Tunable long-wave infrared optical parametric oscillator based on temperature-adjustable ZnGeP2[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 861-867.

[3] 吴玲, 娄岩, 侯欣宜, 等. 2-μm MOPA 结构全光纤激光器输出特性研究[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(2): 399-406.
WU L, LOU Y, HOU X Y, *et al*.. Output characteristics of an all-fiber laser with a 2-μm MOPA structure[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 399-406.

[4] CORNACCHIA F, DI LIETO A, MARONI P, *et al*.. A cw room-temperature Ho, Tm: YLF laser pumped at 1.682 μm[J]. *Applied Physics B*, 2001, 73(3): 191-194.

[5] WANG Y, SHEN D Y, CHEN H, *et al*.. Highly efficient Tm: YAG ceramic laser resonantly pumped at 1617 nm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4485-4487.

[6] ANTIPOV O, NOVIKOV A, LARIN S, *et al*.. Highly efficient 2 μm CW and Q-switched Tm^{3+}: Lu_2O_3 ceramics lasers in-band pumped by a Raman-shifted erbium fiber laser at 1670 nm[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2298-2301.

[7] 侯晓君, 肖薇, 李永锟, 等. 1645nm 陶瓷激光共振泵浦 Tm: $CaYAlO_4$ 激光器[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 44-47.
HOU X J, XIAO W, LI Y K, *et al*.. 1645 nm ceramic laser resonantly pumped Tm: $CaYAlO_4$ laser[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(1): 44-47. (in Chinese).

[8] YAO W C, WU F, ZHAO Y G, *et al*.. Highly efficient Tm: $CaYAlO_4$ laser in-band pumped by a Raman fiber laser at 1.7 μm[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(14): 3730-3733.

[9] 丁宇, 苗宇, 蔡军, 等. 高效率连续波运转 Tm: Y_2O_3 中红外固体激光器 (特邀)[J]. 光电技术应用, 2021, 36(5): 53-56,65.
DING Y, MIAO Y, CAI J, *et al*.. High efficiency continuous wave Tm: Y_2O_3 mid-infrared solid laser (Invited)[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2021, 36(5): 53-56,65. (in Chinese).

[10] 王皖燕, 严秀莉, 周健飞, 等. 浮区法生长 Tm^{3+}: $CaYAlO_4$ 晶体的研究[J]. 人工晶体学报, 2000, 29(S1): 92.
WANG W Y, YAN X L, ZHOU J F, *et al*.. Study on single crystal growth of Tm^{3+}: $CaYAlO_4$ by floating zone method[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2000, 29(S1): 92. (in Chinese).

[11] QIN Z P, LIU J G, XIE G Q, *et al*.. Spectroscopic characteristics and laser performance of Tm: $CaYAlO_4$ crystal[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(10): 105806.

[12] 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]. 红外与激光工程, 2021, 50(4): 20190563.
CHEN CH, XU Q, SUN R, *et al*.. Q-switched mode-locked all-solid-state Tm: LuAG ceramic laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20190563. (in Chinese).

[13] 孙锐, 陈晨, 令维军, 等. 2017 nm 和 2029 nm 双波长调 *Q* 锁模 Tm: LuAG 激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214004.
SUN R, CHEN CH, LING W J, *et al*.. Dual-wavelength passively *Q*-switched mode-locked Tm: LuAG laser operating at 2017 nm and 2029 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1214004. (in Chinese).

[14] 袁振, 令维军, 陈晨, 等. 高单脉冲能量被动调 Q 锁模 Tm, Ho: LLF 激光器[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(8):

20210349.

YUAN ZH, LING W J, CHEN CH, *et al*.. High single pulse energy passively Q-switched mode-locked Tm, Ho: LLF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210349. (in Chinese).

[15] 张明霞, 周珑, 令维军, 等. 调 *Q* 锁模运转的 Tm: ZBLAN 薄片激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(0): 0114011.

ZHANG M X, ZHOU L, LING W J, *et al*.. *Q*-switched mode-locked thin-disk Tm: ZBLAN laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(0): 0114011.

[16] 孙锐, 令维军, 陈晨, 等. 2089 nm 调 *Q* 锁模 Tm, Ho: CaYAlO4 激光器[J]. 发光学报, 2020, 41(3): 301-307.

SUN R, LING W J, CHEN CH, *et al*.. Passively *Q*-switched mode-locked Tm, Ho: $CaYAlO_4$ laser operating at 2089 nm[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(3): 301-307. (in Chinese).

[17] ZHOU W, XU X D, XU R, *et al*.. Watt-level broadly wavelength tunable mode-locked solid-state laser in the 2 μm water absorption region[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 583-587.

[18] KONG L CH, XIE G Q, QIN ZH P, *et al*.. Diode-pumped mode-locked femtosecond 2-μm Tm: $CaYAlO_4$ laser[J]. arXiv preprint arXiv: 1707.03818, 2017.

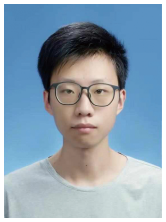
[19] WANG L, CHEN W D, ZHAO Y G, *et al*.. Sub-50 fs pulse generation from a SESAM mode-locked Tm, Ho-codoped calcium aluminate laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2642-2645.

[20] 张明霞, 袁振, 杜晓娟, 等. 被动调 *Q* 锁模运转 Tm: $LuScO_3$ 陶瓷激光器特性[J]. 发光学报, 2021, 42(7): 1049-1056.

ZHANG M X, YUAN ZH, DU X J, *et al*.. Characteristics of passively *Q*-switched mode locked Tm: $LuScO_3$ ceramic laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(7): 1049-1056. (in Chinese).

[21] WANG Y CH, LOIKO P, ZHAO Y G, *et al*.. Polarized spectroscopy and SESAM mode-locking of Tm, Ho: CALGO[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7883-7893.

作者简介：



孙堂正(1999—), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 2021 年于江苏第二师范学院取得学士学位, 主要从事超快激光技术方面的研究。E-mail: 210700788@qq.com

令维军(1968—), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 硕士生导师, 2005 年于中国科学院物理研究所获得博士学位, 主要从事光超短激光脉冲产生及放大方面的研究。E-mail: wjlingts@sina.com