

# 基于纯水可饱和吸收体的 1.9 $\mu\text{m}$ 波段 被动调 $Q$ 和锁模掺铥光纤激光器\*

戴川生<sup>1) #</sup> 董志鹏<sup>2) #</sup> 林加强<sup>1)</sup> 姚培军<sup>1) †</sup> 许立新<sup>1)</sup> 顾春<sup>1)</sup>

1) (中国科学技术大学物理学院, 核探测与核电子学国家重点实验室, 安徽省光电子科学与技术重点实验室,  
先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230026)

2) (厦门大学电子工程系, 厦门 361005)

(2021 年 11 月 18 日收到; 2022 年 4 月 5 日收到修改稿)

构建了纯水作为可饱和吸收体的被动调  $Q$  和锁模掺铥光纤激光器. 通过陶瓷套管将纯水固定在两个光纤跳线头之间, 调整水层厚度可以分别实现调  $Q$  和锁模操作. 调  $Q$  状态下的最大输出功率为 0.531 mW, 此时的重复频率为 53.45 kHz, 脉冲宽度为 3.01  $\mu\text{s}$ . 锁模状态下的最大输出功率为 2.28 mW, 重复频率为 17.69 MHz, 脉冲宽度为 1.42 ps. 本文使用纯水作为可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器, 其具有皮秒级的响应时间、低廉的价格和极高的损伤阈值, 可为掺铥全光纤脉冲激光器提供一种新方案.

**关键词:** 掺铥光纤激光器, 可饱和吸收体, 调  $Q$ , 锁模

**PACS:** 42.55.Wd, 42.55.-f, 42.60.Fc, 42.60.Gd

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212125

## 1 引言

超短脉冲光纤激光器具有稳定性好、结构紧凑、单脉冲能量高等优点, 近年来工作在 1.8—2.1  $\mu\text{m}$  光谱范围内的超短脉冲激光受到了广泛的关注, 其在激光光谱学、生物医学、光通信和传感等领域具有广泛应用<sup>[1–7]</sup>. 产生脉冲的方法主要有两种: 主动调制和被动调制. 主动调制需要通过外部调制器(声光/电光调制器)来实现, 但这不仅增加了成本, 还降低了系统的便携性; 被动调制只需要在腔内加入一个振幅自调制器件, 不需要任何外部器件. 目前报道的被动调  $Q$  和锁模光纤激光器主要是基于非线性偏振演化 (nonlinear polarization evolution, NPE)<sup>[8–10]</sup> 以及可饱和吸收体 (saturable absorber,

SA) 实现. 然而, 基于 NPE 技术的调  $Q$  和锁模激光器对腔内偏振变化敏感, 难以应用于成熟的激光产品. 利用 SA 进行被动调  $Q$  和锁模操作被认为是获得脉冲激光的一种方便和低成本的方法. 一个好的 SA 应该具有较大的调制深度、较高的损伤阈值、超快的恢复时间和宽带可饱和吸收性.

适用于 1.9  $\mu\text{m}$  光谱区域被动调  $Q$  和锁模激光器的 SA 有多种类型, 如半导体饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)<sup>[11]</sup>、石墨烯<sup>[12]</sup>、碳纳米管<sup>[13,14]</sup>、黑磷<sup>[15]</sup>、过渡金属硫化物<sup>[16]</sup>等. 虽然 SESAM 的制作工艺已经成熟, 但是其狭窄的工作带宽和昂贵的成本限制了自身的应用. 而石墨烯、碳纳米管、黑磷、过渡金属硫化物等二维材料具有损伤阈值较低的缺点. 最近, 有相关研究报道将纯水作为 SA 具有损伤阈值高、价格低廉、

\* 先进激光技术安徽省实验室主任基金 (批准号: 2019122502) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: yap@ustc.edu.cn

散热性能好、稳定性高的优点. 2019 年, Xian 等<sup>[17]</sup>利用纯水 SA 实现了被动调  $Q$  掺铒光纤激光器. 据我们所知, 目前还没有利用纯水 SA 实现被动锁模操作的报道, 实际上水分子对于 1.80—1.95  $\mu\text{m}$  波段的光具有很强的吸收能力<sup>[18,19]</sup>, 所以本文尝试在这个波段内利用纯水 SA 实现锁模操作.

本文实现了一种基于纯水 SA 的掺铒全光纤脉冲激光器. 通过陶瓷套管将纯水固定在两个螺纹型/物理接触 (ferrule contactor/physical contact, FC/PC) 光纤跳线头之间, 调整水层厚度可以分别实现调  $Q$  和锁模操作. 利用纯水作为 SA 的材料极大地降低了激光器成本, 且由于水分子的结构非常稳定, 所以纯水 SA 的稳定性和损伤阈值较高. 本文为掺铒全光纤脉冲激光器提供了一种新方案.

## 2 实验原理与结构

每个水分子具有两个氢氧键, 其能量吸收过程与氢氧键的伸缩振动和弯曲振动有关. 近红外光谱中有 5 个显著的水的吸收波段, 分别出现在 0.76, 0.97, 1.19, 1.45 和 1.94  $\mu\text{m}$ <sup>[18]</sup>. 1.45  $\mu\text{m}$  附近的吸收带与氢氧键的伸缩振动有关, 1.94  $\mu\text{m}$  附近的吸收带与氢氧键的弯曲振动有关<sup>[17,20,21]</sup>. 2.0  $\mu\text{m}$  附近水的吸收光谱如图 1 所示. 水的频率相关振动能量弛豫时间为 1 ps<sup>[20,21]</sup>, 远短于增益介质的上能级寿命, 因此纯水可以作为快速 SA 来实现锁模操作.

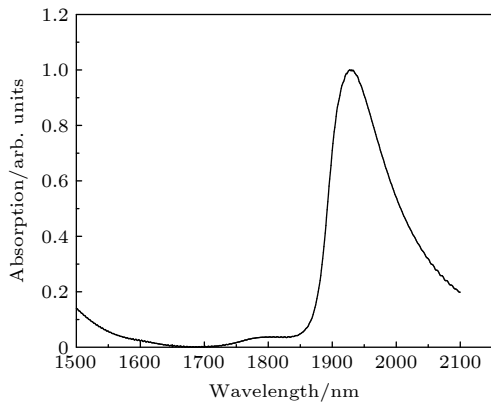


图 1 纯水的吸收光谱

Fig. 1. Absorption spectrum of pure water.

实验结构如图 2 所示, 该环形腔包含 1.5 m 长的掺铒光纤, 其型号为 Nufern SM-TSF-9/125, 由 1550 nm 连续光激光器通过 1550/2000 nm 波分复用器进行泵浦. 采用偏振无关隔离器保证激光器的

单向工作. 通过插入偏振控制器来调节激光在腔内的偏振状态, 以获得最佳工作状态. 将纯水 SA 通过陶瓷套管固定在两个 FC/PC 光纤跳线头之间, 实验中用到的陶瓷套管取自 FC/PC 光纤连接器, 纯水为纯度 99.99% 的去离子水. 首先取出一盆纯水, 将陶瓷套管完全浸没在纯水中并去除套管内的空气. 然后将一对光纤跳线头用纯水擦拭后分别插入陶瓷套管的两端, 跳线头之间的间隙充满纯水, 该步骤全程在纯水中操作, 以防止间隙中出现气泡. 轻轻推动跳线头便可以改变间隙的大小从而调节水层的厚度, 因此很容易获得不同调制深度的 SA, 这是液体 SA 的独特优势. 用 90:10 的光耦合器从激光腔中耦合出 10% 的腔内能量作为输出. 环形腔的总长度约为 11.31 m, 腔内无源光纤的型号均为 Nufern SM-1950, 环形腔总色散处于负色散区域. 利用光谱分析仪 (ANDO AQ6317B) 和 2 GHz 射频频谱分析仪 (AV4021) 分别测量激光器的光谱和射频频谱特性, 时域特性则由 4 GHz 示波器 (Teledyne LeCroy WaveRunner 640Zi) 和自相关仪 (APE PulseCheck SM250) 记录.

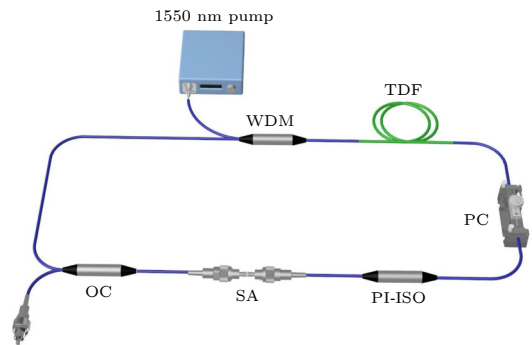


图 2 纯水 SA 掺铒光纤激光器的实验结构 TDF, 掺铒光纤; WDM, 波分复用器; PI-ISO, 偏振无关隔离器; PC, 偏振控制器; OC, 光耦合器; SA, 可饱和吸收体

Fig. 2. Experimental setup of pure water-SA Tm-doped fiber laser: TDF, Tm-doped fiber; WDM, wavelength division multiplexer; PI-ISO, polarization independent isolator; PC, polarization controller; OC, optical coupler; SA, saturable absorber.

## 3 实验结果与讨论

当泵浦功率提高到 152 mW 时, 通过改变水层厚度和调节 PC 可以获得被动调  $Q$  脉冲输出, 图 3(a)—(c) 分别是泵浦功率为 152, 238, 311 mW 时的调  $Q$  脉冲序列, 显微镜下测量得到此时的水

层厚度大约为 0.2 mm. 当泵浦功率增加时, 脉冲的重复频率变高, 这是调  $Q$  脉冲的典型特征. 图 4 给出了泵浦功率为 152 mW 时的调  $Q$  光谱, 其中心波长为 1870.04 nm, 3 dB 光谱带宽为 6.57 nm. 光谱上大量的凹陷源于水的强烈吸收<sup>[22]</sup>. 脉冲输出功率和单脉冲能量随泵浦功率的变化如图 5(a) 所示, 脉冲宽度和重复频率随泵浦功率的变化如图 5(b) 所示. 当泵浦功率从 152 mW 增加到 311 mW 时, 输出功率从 0.135 mW 增加到 0.531 mW, 单脉冲能量从 6.33 nJ 增加到 9.94 nJ, 脉冲宽度从 6.92  $\mu$ s 减小到 3.01  $\mu$ s, 重复频率从 21.31 kHz 增加到 53.45 kHz. 与锁模操作不同, 调  $Q$  脉冲的重复频率取决于泵浦功率而不是腔长. 当泵浦功率增大时, 为 SA 提供了更高的增益, SA 的饱和速度更快, 这导致了重复频率的增加.

当泵浦功率为 311 mW, 水层厚度约为 0.1 mm 时, 仔细调节 PC 可以得到稳定的锁模脉冲输出,

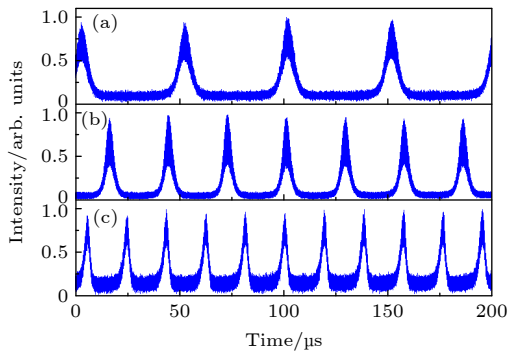


图 3 泵浦功率不同时的调  $Q$  脉冲序列 (a) 152 mW; (b) 238 mW; (c) 311 mW  
Fig. 3.  $Q$ -switched pulse trains under different pump powers: (a) 152 mW; (b) 238 mW; (c) 311 mW.

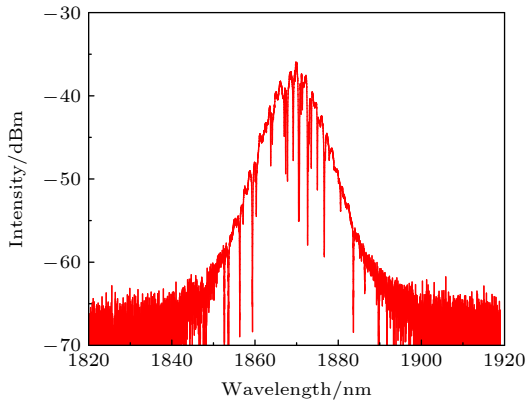


图 4 泵浦功率为 152 mW 时的调  $Q$  光谱  
Fig. 4.  $Q$ -switched optical spectrum under pump power of 152 mW.

此时的输出功率为 2.28 mW, 已经达到泵浦激光器最大功率, 无法继续提升泵浦功率. 示波器测得的脉冲序列如图 6(a) 所示, 脉冲间隔为 56.53 ns, 与激光器的腔长相吻合. 图 6(b) 展示了脉冲的自相关轨迹, 测得脉冲宽度为 1.42 ps. 如图 6(c) 所示, 此时测得输出激光的中心波长为 1884.68 nm, 3 dB 光谱宽度为 4.27 nm, 计算得到时间带宽积为 0.512, 略大于傅里叶变换极限双曲正割脉冲的理论值 0.315, 说明脉冲存在啁啾. 此外可以看到光谱有很明显的 Kelly 边带, 说明激光器输出为典型的孤子脉冲. 锁模光谱上大量的凹陷和调  $Q$  光谱类似, 也是源于水的强烈吸收<sup>[22]</sup>. 由图 1 的纯水吸收谱可知, 在 1850—1940 nm 波长内, 纯水 SA 对不同波长的损耗不同, 存在滤波效果. 当激光器处于锁模状态时, 水层的厚度比调  $Q$  状态下小, 此时纯水 SA 整体插损降低, 滤波效果下降, 因此谐振中心波长发生变化. 此外, 锁模状态下脉冲的峰值功率更高, 非线性效应会产生更多的频率成分, 这也会对激光器的输出中心波长产生影响. 图 6(d)

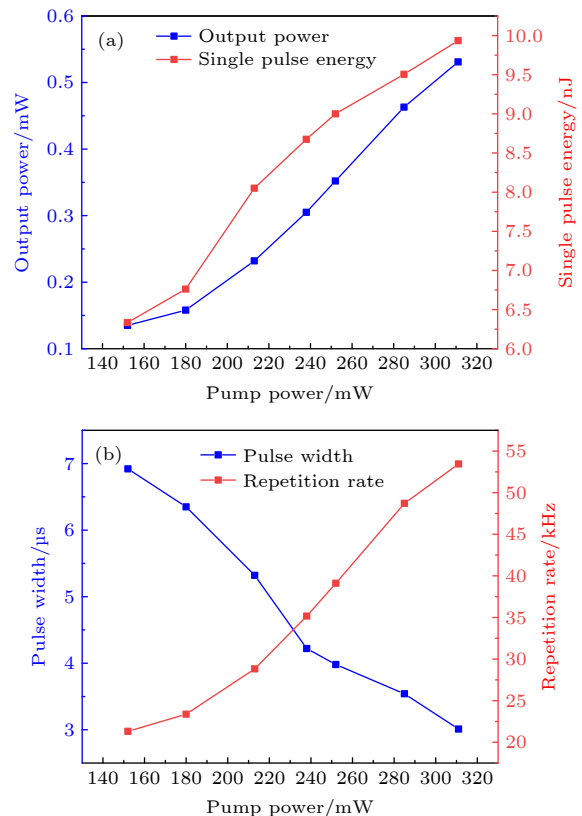


图 5 (a) 输出功率和单脉冲能量随泵浦功率的变化; (b) 脉冲宽度和重复频率随泵浦功率的变化  
Fig. 5. (a) Output power and single-pulse energy as a function of pump power; (b) pulse width and repetition rate as a function of pump power.

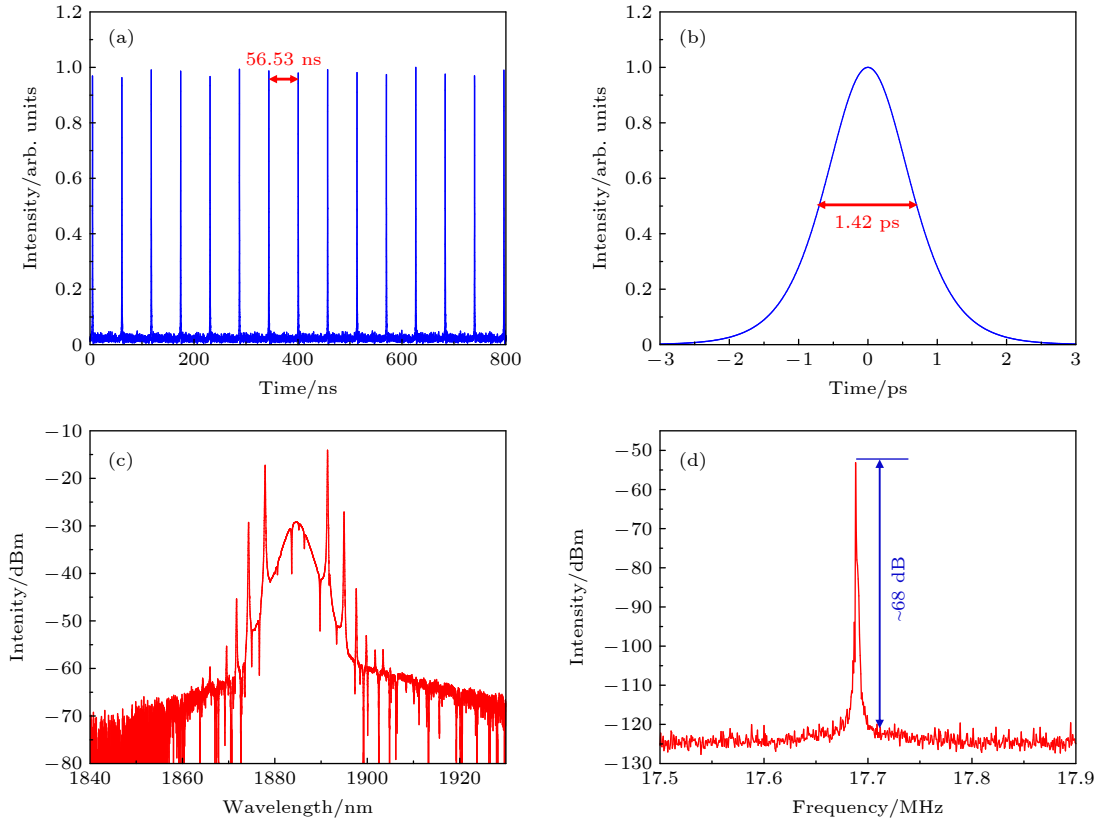


图 6 (a) 示波器测得的锁模脉冲序列; (b) 输出锁模脉冲的自相关轨迹; (c) 锁模状态的输出光谱; (d) 锁模状态的输出射频频谱  
Fig. 6. (a) Mode-locked pulse train measured by oscilloscope; (b) autocorrelation trace of the output mode-locked pulse; (c) output optical spectrum of the mode-locked state; (d) output radio frequency spectrum of the mode-locked state.

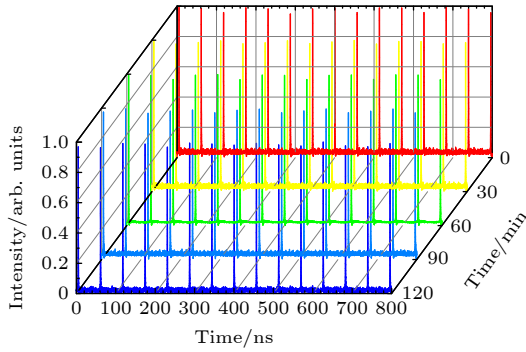


图 7 锁模脉冲的长时间稳定性

Fig. 7. The long-time stability of mode-locked pulses.

为输出激光的射频频谱, 重复频率为 17.69 MHz, 68 dB 的信噪比说明锁模状态非常稳定. 此外, 我们测量了锁模脉冲的长时间稳定性, 如图 7 所示. 在两个小时内, 输出锁模脉冲序列几乎保持不变, 锁模状态表现出较高的稳定性.

为了表征纯水 SA 的非线性响应, 我们用 1.9  $\mu\text{m}$  波段锁模光纤激光器作为探测光源进行测量, 探测光脉冲宽度为 2.9 ps, 重复频率为 33.07 MHz. 10% 的输出功率用于监测输入功率, 而 90% 的剩余激

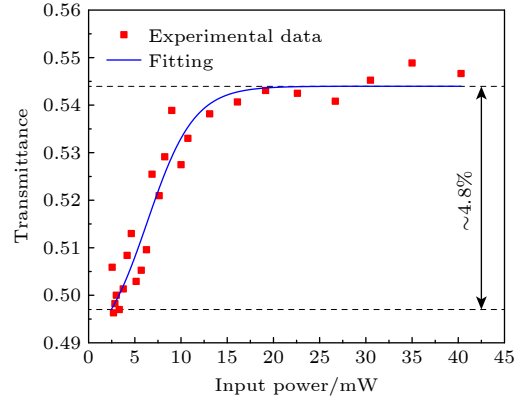


图 8 纯水 SA 在 1.9  $\mu\text{m}$  波长下的非线性响应

Fig. 8. Nonlinear response of the pure water SA at 1.9  $\mu\text{m}$  wavelength.

光则进入纯水 SA. 通过改变入射功率得到了纯水 SA 透过率的变化如图 8 所示典型的饱和吸收曲线, 可以用饱和模型方程来描述:

$$T(I) = 1 - \Delta T \exp\left(-\frac{I}{I_{\text{sat}}}\right) - T_{\text{ns}}, \quad (1)$$

其中  $T(I)$  为透过率,  $\Delta T$  为调制深度,  $I$  为输入脉冲峰值强度,  $I_{\text{sat}}$  为饱和强度,  $T_{\text{ns}}$  为非饱和损耗. 通

过计算得到, 纯水 SA 的调制深度约为 4.8%, 非饱和损耗约为 45.6%, 饱和强度约为  $0.12 \text{ GW/cm}^2$ .

实验中, 通过改变纯水 SA 的厚度分别得到了调  $Q$  和锁模脉冲, 虽然都是利用纯水 SA 的可饱和吸收效应实现的, 但是二者的原理不同. 当纯水 SA 的厚度较大且泵浦功率较低时, 腔内的损耗较高且增益较低, 反转粒子数更容易积累, 因此容易产生调  $Q$  脉冲. 当纯水 SA 的厚度较小并且泵浦功率较高时, 腔内容易激发出更多的纵模, 因此有利于锁模脉冲的产生.

## 4 结 论

本文搭建了基于纯水 SA 的掺铈全光纤脉冲激光器, 调节 SA 厚度分别实现了调  $Q$  和锁模操作. 稳定的调  $Q$  脉冲最大输出功率为  $0.531 \text{ mW}$ , 此时的重复频率为  $53.45 \text{ kHz}$ , 脉冲宽度为  $3.01 \mu\text{s}$ . 而锁模状态下输出功率提升至  $2.28 \text{ mW}$ , 这是由于水层厚度的降低减小了插损, 锁模脉冲的重复频率为  $17.69 \text{ MHz}$ , 脉冲宽度为  $1.42 \text{ ps}$ . 使用纯水作为 SA 的被动锁模光纤激光器, 考虑到其皮秒级的响应时间、低廉的价格和极高的损伤阈值, 基于纯水的 SA 可能在超快光纤激光器领域有着更广泛的运用.

## 参考文献

- [1] Barnes N P, Walsh B M, Reichle D J, Deyoung R J 2009 *Opt. Mater.* **31** 1061
- [2] Zipfel W R, Williams R M, Webb W W 2003 *Nat. Biotechnol.* **21** 1369
- [3] Steinlechner J, Martin I W, Bell A S, Hough J, Fletcher M, Murray P G, Robie R, Rowan S, Schnabel R 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 263602
- [4] Tan S, Yang L, Wei X, Li C, Chen N, Tsia K K, Wong K K 2017 *Opt. Lett.* **42** 1540
- [5] Zhang H, Kavanagh N, Li Z, et al. 2015 *Opt. Express* **23** 4946
- [6] Fried N M 2005 *Lasers Surg. Med.* **36** 52
- [7] Hu J, Menyuk C R, Shaw L B, Sanghera J S, Aggarwal I D 2010 *Opt. Lett.* **35** 2907
- [8] Fermann M E, Andrejco M J, Silberberg Y, Stock M L 1993 *Opt. Lett.* **18** 894
- [9] Yan Z Y, Li X H, Tang Y L, Shum P P, Yu X, Zhang Y, Wang Q J 2015 *Opt. Express* **23** 4369
- [10] Sun B, Luo J Q, Ng B P, Yu X 2016 *Opt. Lett.* **41** 4052
- [11] Lagatsky A A, Fusari F, Calvez S, Gupta J A, Kisel V E, Kuleshov N V, Brown C T A, Dawson D, Sibbett W 2009 *Opt. Lett.* **34** 2587
- [12] Peng Y, Wei X, Wang W 2012 *Laser Phys. Lett.* **9** 15
- [13] Liu J, Wang Y, Qu Z, Fan X 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 960
- [14] Wang Y, Alam S U, Obraztsova E D, Pozharov A S, Set S Y, Yamashita S 2016 *Opt. Lett.* **41** 3864
- [15] Kong L, Qin Z, Xie G, Guo Z, Zhang H, Yuan P, Qian L 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 045801
- [16] Jung M, Lee J, Park J, Koo J, Jhon Y M, Lee J H 2015 *Opt. Express* **23** 19996
- [17] Xian T, Zhan L, Gao L, Zhang W, Zhang W 2019 *Opt. Lett.* **44** 863
- [18] Curcio J A, Petty C C 1951 *J. Opt. Soc. Am.* **41** 302
- [19] Zou W, Xu X, Xu R, Fan X, Zhao Y, Li L, Tang D, Shen D 2017 *Photonics Res.* **5** 583
- [20] Deák J C, Rhea S T, Iwaki L K, Dlott D D 2000 *J. Phys. Chem. A* **104** 4866
- [21] Woutersen S, Bakker H J 1999 *Nature* **402** 507
- [22] Li G, Zhou Y, Li S, Yao P, Gao W, Gu C, Xu L 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 114203



# Passively $Q$ -switched and mode-locked 1.9 $\mu\text{m}$ Tm-doped fiber laser based on pure water as saturable absorber<sup>\*</sup>

Dai Chuan-Sheng<sup>1) #</sup> Dong Zhi-Peng<sup>2) #</sup> Lin Jia-Qiang<sup>1)</sup>  
Yao Pei-Jun<sup>1) †</sup> Xu Li-Xin<sup>1)</sup> Gu Chun<sup>1)</sup>

1) (*Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

( Received 18 November 2021; revised manuscript received 5 April 2022 )

## Abstract

All-fiber laser with short pulses possesses many advantages, such as superior stability, compact structure, and high single pulse energy. Recently, short pulse laser working in a 1.8–2.0  $\mu\text{m}$  spectral region has received considerable attention due to its wide applications in laser spectroscopy, biomedicine, optical communications and sensing. The passive  $Q$ -switched and mode-locked operations by saturable absorber (SA) have been considered to be convenient and low-cost ways to achieve short pulses. Recently, pure water has been reported as the ideal SA because of its advantages of high damage threshold, low prices, good thermal diffusivity and stability. In this work, Tm-doped all-fiber pulse laser based on pure water as the SA is demonstrated. The pure water is fixed between two FC/PC fiber patchcord by the ceramic cannula, so we can change the loss of SA easily. The  $Q$ -switched and mode-locked operations can be obtained by adjusting the water layer thickness. The maximum output power at  $Q$ -switched state is 0.531 mW, the repetition frequency is 53.45 kHz, and the pulse width is 3.01  $\mu\text{s}$ . The maximum output power at mode-locked state is 2.28 mW, the repetition rate is 17.69 MHz, and the pulse width is 1.42 ps. To our knowledge, this is the first passive mode-locked fiber laser using pure water as a saturable absorber, and provides a new scheme for thulium-doped all-fiber pulse lasers.

**Keywords:** Tm-doped fiber laser, saturable absorber,  $Q$ -switched, mode-locked

**PACS:** 42.55.Wd, 42.55.-f, 42.60.Fc, 42.60.Gd

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212125

<sup>\*</sup> Project supported by the Director Fund of Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, China (Grant No. 2019122502).

<sup>#</sup> These authors contributed equally.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [yap@ustc.edu.cn](mailto:yap@ustc.edu.cn)

## 基于纯水可饱和吸收体的1.9 $\mu\text{m}$ 波段被动调Q和锁模掺铥光纤激光器

戴川生 董志鹏 林加强 姚培军 许立新 顾春

## Passively Q-switched and mode-locked 1.9 $\mu\text{m}$ Tm-doped fiber laser based on pure water as saturable absorber

Dai Chuan-Sheng Dong Zhi-Peng Lin Jia-Qiang Yao Pei-Jun Xu Li-Xin Gu Chun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 174202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212125

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212125>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

MnPS<sub>3</sub>可饱和吸收体被动锁模掺铒光纤激光器双波长激光

Dual-wavelength self-starting mode-locking Er-doped fiber laser with MnPS<sub>3</sub> saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 184208 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200342>

高损伤阈值可饱和吸收体锁模脉冲光纤激光器的研究进展

Research progress of mode-locked pulsed fiber lasers with high damage threshold saturable absorber

物理学报. 2022, 71(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212442>

基于氧化石墨烯的瓦级调Q锁模Tm: LuAG激光器

Watt-level passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with graphene oxide saturable absorber

物理学报. 2019, 68(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182224>

基于单壁碳纳米管调Q锁模低阈值Tm: Ho: LiLuF<sub>4</sub>激光器

Passively Q-switched mode-locked low threshold Tm, Ho: LLF laser with an single walled carbon nanotubes saturable absorber

物理学报. 2018, 67(1): 014201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171748>

基于二维材料异质结可饱和吸收体的超快激光器

Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterial heterostructures as saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 188102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201235>

基于铋可饱和吸收体的超快激光产生

Generation of ultra-fast pulse based on bismuth saturable absorber

物理学报. 2020, 69(9): 094203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191995>