

基于 WS_2 可饱和吸收体的调 Q 锁模 Tm, Ho:LLF 激光器

令维军 夏涛 董忠 刘勃 路飞平 王勇刚

Passively Q -switched mode-locked Tm, Ho:LLF laser with a WS_2 saturable absorber

Ling Wei-Jun Xia Tao Dong Zhong Liu Qing Lu Fei-Ping Wang Yong-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 114207 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.114207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.114207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

交流作用下电润湿液体透镜动态过程的测试与分析

Test and analysis of the dynamic procedure for electrowetting-based liquid lens under alternating current voltage

物理学报.2016, 65(22): 224202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224202>

$NaYF_4:Tm^{3+}$ 纳米棒中激光脉宽调控的荧光选择输出特性

Luminescence selective output characteristics tuned by laser pulse width in Tm^{3+} doped $NaYF_4$ nanorods

物理学报.2016, 65(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204205>

Tm^{3+} 掺杂 Ge-Ga-S 玻璃微球-石英光纤锥耦合系统的荧光回廊模特性

Fluorescence whispering gallery modes in Tm^{3+} -doped Ge-Ga-S chalcogenide glasses microsphere-silica fiber taper coupling system

物理学报.2016, 65(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144205>

Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺 $NaYF_4/LiYF_4$ 微米晶体的上转换荧光特性

Upconversion fluorescence characteristics of Er^{3+}/Yb^{3+} codoped $NaYF_4$ and $LiYF_4$ microcrystals

物理学报.2016, 65(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084205>

纳米 $ZnO-SiO_2$ 自清洁增透薄膜的制备及其性能

Preparation and characterization of self-cleaning and anti-reflection $ZnO-SiO_2$ nanometric films

物理学报.2016, 65(6): 064206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064206>

基于 WS_2 可饱和吸收体的调 Q 锁模 $Tm, Ho:LLF$ 激光器*

令维军^{1)†} 夏涛¹⁾ 董忠^{1)‡} 刘勍¹⁾ 路飞平¹⁾ 王勇刚²⁾

1)(天水师范学院激光技术研究所, 天水 741001)

2)(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(2017年1月22日收到; 2017年3月30日收到修改稿)

采用聚乙烯醇塑料膜为基质的 WS_2 作为可饱和吸收体, 在 $Tm, Ho:LiLuF_4$ 全固态激光器中实现了被动调 Q 锁模运转. 以掺钛蓝宝石激光器作为抽运源, 当最大吸收抽运功率为2.6 W时, 激光输出功率为156 mW, 典型的调 Q 脉冲包络重复频率为25 kHz, 脉宽约为300 μs . 当吸收功率大于1.39 W时, 进入稳定调 Q 锁模运转, 对应锁模脉冲序列的重复频率为131.6 MHz, 调整深度接近100%. 结果表明: WS_2 可以作为2 μm 波段全固态激光器锁模的吸收体材料.

关键词: $Tm, Ho:LLF$ 激光器, 调 Q 锁模, 可饱和吸收体, WS_2

PACS: 42.55.Rz, 42.60.Fc, 42.60.Gd, 42.70.-a

DOI: 10.7498/aps.66.114207

1 引言

2 μm 左右的近红外激光处于水的吸收峰, 穿透能力强, 对人眼安全而且处于大气窗口波段, 在军事、医药、测距、激光雷达、大气环境监测等多方面受到人们越来越多的关注. 特别是该波段的超短脉冲激光光谱处于反应分子吸收特征的“指纹”区域^[1], 在精密时间分辨分子光谱学、3—5 μm 中红外波段产生、光通信、红外光学频率梳、中红外超连续产生以及THz波段的脉冲产生具有重要的应用价值^[2-4]. 近几年随着可饱和吸收体技术的日趋成熟和对2 μm 波段超短脉冲光源的需求增加, 利用可饱和吸收体作为锁模启动元件的红外掺铥和铥铱共掺的皮秒和飞秒全固态激光器成为主流研究方向之一.

基于半导体可饱和吸收体和量子阱结构的被动锁模已在多种掺铥介质中实现了锁模运转, 例

如: 半导体可饱和吸收镜^[5-7], $ZnCaAs$ ^[8]多量子阱、 PbS ^[9]量子掺杂玻璃等. 特别是最近几年石墨烯作为一种新型可饱和吸收体, 它的优异性能让人们人们对二维材料的关注度越来越高, 利用该材料实现的被动锁模报道主要集中在1.0—1.5 μm 波段附近, 对2 μm 波段近红外光锁模报道很少. 2016年山东师大刘杰组^[10]首次在 $Tm:YAP$ 全固态激光器中成功利用体块石墨烯实现稳定的锁模运转, 其中心波长为1988.5 nm. 作为类似石墨烯的二维材料, 过渡金属硫化物(transition metal dichalcogenides, TMDs)不仅具有类似石墨烯的结构和性质, 而且也被证明拥有许多新的物理现象. 研究者发现, 单层或者少层的过渡金属硫化物是一种和石墨烯同样优秀甚至在某些方面超越石墨烯的可饱和吸收体^[11,12]. 常见的有二硫化钨(WS_2)、二硫化钼(MoS_2)、二硒化钼($MoSe_2$)等. 2015年上海交大谢国强组^[13]在 $Tm:CLNGG$ 全固态激光器中成功利用 MoS_2 实现了调 Q 和调 Q 锁模运转, 其中心波长

* 国家自然科学基金(批准号: 61465012, 61564008, 61461046, 61665010)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wjlings@sina.com

‡ 通信作者. E-mail: dz0212@foxmail.com

为1918 nm. 同年邹晓等^[14]在Tm:LLF全固态激光器中成功利用MoS₂实现了调Q和调Q锁模运转, 其中心波长为1918 nm. 这些TMDs拥有典型的层状结构, 由X-M-X结构叠加组成, 其中M代表过渡金属(W, Mo等), 而X代表S, Se等, 层与层之间以较弱的范德瓦耳斯力相结合, 每层中X和M原子通过共价键结合^[15]. 单层和少层的WS₂作为典型的TMDs具有优良快速可饱和吸收特性^[16], 2015年Chen等^[17]在中心波长1550 nm的光纤激光器中利用WS₂实现了最短4.1 μs的调Q脉冲, 同年Li等^[18]利用掺氟云母作为WS₂基质在掺铋光纤激光器中实现了皮秒尺度的锁模运转, Khazaiezhad等^[19]利用WS₂纳米片实现了1560 nm附近的飞秒锁模运转. 在2 μm波段锁模方面, Jung等^[20]在中心波长1941 nm的光纤激光器中利用WS₂实现了1.3 ps的被动锁模脉冲. 综上所述, WS₂作为新型可饱和吸收体应用的波段范围是很宽的, 但均作为在光纤激光器的调Q和锁模元件, 并且集中在1.5 μm左右的通讯波段. 本论文将WS₂作为锁模启动元件应用于全固态激光器, 并在掺铋氟化物晶体中实现了调Q锁模运转.

采用提拉法坩埚硅酸钨籽晶制备的Tm, Ho:LLF(Tm, Ho:LiLuF₄, 简记为Tm, Ho:LLF)激光晶体, 其斜率效率高、调谐范围宽、抽运阈值低, 吸收带宽主要在356, 686, 792, 1208和1678 nm^[21]. LLF晶体是一个优良的基质材料, 相对于其他基质材料, 其有相对较低的声子能量系统和小的吸收系数. 同时具有低的激光阈值和上变频损耗, 这些对于提高激光效率是有益的, 另外没有热诱导双折射, 具有良好的抗光损伤并且能输出线性偏振激光. Peng等^[22]在2010年报道了实现该晶体中心波长为2.05 μm的连续光输出. 2013年, Zhang等^[23]实现了该晶体中心波长为2069 nm, 最窄脉冲1.2 μs的被动调Q脉冲光. 与掺铋无序晶体实现锁模运转不同, 铋钨共掺氟化物晶体光谱调制较大, 加之空气中水分子吸收导致的Q调制, 截至目前还没有对该晶体锁模的报道.

本文利用WS₂作为可饱和吸收体材料(SA), 在共掺激光介质Tm, Ho:LLF中实现了稳定的调Q锁模运转. 最大输出功率为156 mW, 锁模脉冲序列的重复频率为131.6 MHz, 对应的单脉冲能量为1.19 nJ, 中心波长为1895 nm, 实验现象已经非常

接近连续锁模.

2 WS₂可饱和吸收体材料的制备

WS₂可饱和吸收体材料以聚乙烯醇(PVA)作为基质, WS₂分子掺杂其中. PVA为有机化合物, 固体为白色片状或粉末状, 无味. 可溶解在80—90 °C水中, 水温越高则溶解度越大, 水溶液有很好的黏接性和成膜性. PVA材料易成膜, 其膜的机械性能优良, 耐高温, 对光有较好的透过作用^[24]. SA的制备过程如下. 首先将WS₂粉末溶于水, 先后经过超声及离心处理, 制备出2 mg/mL的WS₂水溶液, 如图1所示. 接着将PVA粉末溶于80—90 °C水中, 搅拌, 过滤制成PVA水溶液. 再接着将2 mg/mL的WS₂水溶液和PVA水溶液按照1:1等量倒入10 mm厚的比色皿中, 搅拌使其混合均匀, 放入烘箱里, 50 °C下放置3 d, 待溶液蒸发完, 将生成的膜片取出, 裁剪成合适的大小便制成WS₂掺杂为1 mg/mL的SA.

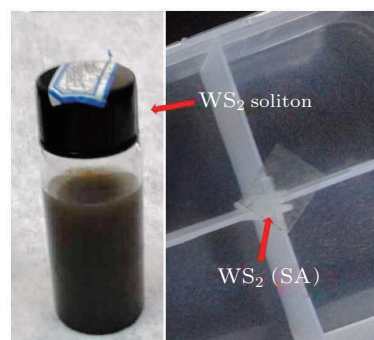


图1 (网刊彩色) WS₂可饱和吸收体材料

Fig. 1. (color online) WS₂ saturable absorber material.

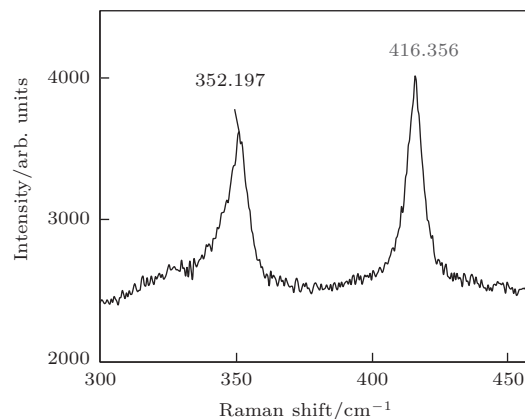


图2 WS₂的拉曼光谱图

Fig. 2. The Raman spectrum of WS₂.

图2为SA的拉曼光谱图,表明振动模式 E_{2g}^1 (平面上)和 A_{2g}^1 (平面外)各自位于 352.197 cm^{-1} 和 416.356 cm^{-1} 处,根据这两个特征峰值之比,可以估算出 WS_2 纳米片的层数^[25]. 实验中测得的数据大概为1,说明这两个峰的位置与报道的少层 WS_2 是一致的,从而说明沉积在石英片上的 WS_2 确实是被液相剥离出的少层结构.

3 实验装置

Tm, Ho:LLF 被动锁模激光实验装置如图3所示,这是一个典型的X型四镜腔结构,腔长为1.14 m,这种腔对应较小的振荡光斑,很大程度上降低启动锁模阈值功率,易于得到更加稳定的锁模脉冲序列. 抽运源为掺钛蓝宝石激光器,通过腔内双折射滤光片可将输出波长调谐到780.5 nm,正好对应激光晶体的一个吸收峰,其最高输出功率为3.4 W. 聚焦透镜(L)焦距 $f = 120\text{ mm}$,双面都镀780—790 nm高透介质膜,透过率大于95%. 激光晶体为 Tm, Ho:LLF ,以布儒斯特角进行切割,对两个通光端面进行抛光,铥离子(Tm^{3+})掺杂浓度为5%,铈(Ho^{3+})的掺杂浓度为0.5%,尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 8\text{ mm}$. 为冷却激光晶体,用铝箔包裹激光晶体后夹持在紫铜冷却片内,实验过程中采用恒温循环水冷系统对紫铜晶体夹进行冷却,水温维持在 $13\text{ }^\circ\text{C}$ 左右. 被动锁模激光实验装置中 M_1, M_2 为曲率半径100 mm的宽带抽运平凹镜,其对770—1050 nm波长抽运激光透过率大于95%,对1800—2075 nm波段的反射率大于99.9%. M_3 为平凹反射镜,凹面曲率半径为100 mm,对1800—2075 nm波长反射率大于99.9%, M_4 为对1800—2075 nm波段的反射率大于99.9%的平面反射镜. M_5 为1.5%的输出耦合镜. 利用激光腔

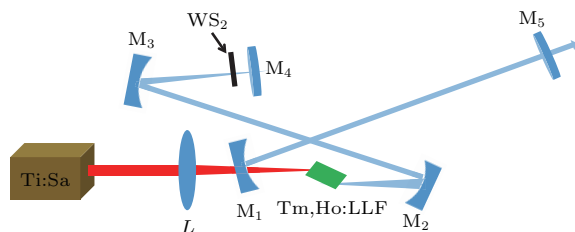


图3 (网刊彩色) Tm, Ho:LLF 被动锁模激光实验装置图
Fig. 3. (color online) The schematic diagram of experiment of Tm, Ho:LLF passively mode-locking laser.

模 ABCD 矩阵模拟振荡光斑,可以计算出晶体中最小光腰半径为 $45\text{ }\mu\text{m}$,抽运光在晶体中的聚焦光斑约为 $20\text{ }\mu\text{m}$,理论计算表明,当抽运光斑与振荡光斑大小比接近0.5时,激光连续运转对应的阈值最低^[26],因此这种光斑匹配下有利于激光低阈值运转. WS_2 位于 M_3 焦点附近,光腰半径约为 $130\text{ }\mu\text{m}$,该处的饱和能流密度为 $148.9\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

4 实验结果分析与讨论

采用上述光路设计. 没有在腔内插 WS_2 可饱和吸收体时,逐步增加抽运光功率,当吸收抽运光功率为143 mW时有连续激光输出;进一步提高输出功率,当吸收抽运光功率达到2.645 W时,对应的最大输出连续光功率为985 mW,通过线性拟合,可得晶体的斜率效率为39.8%. 当在腔内插入 WS_2 可饱和吸收体时,吸收抽运功率阈值提升到234 mW;逐步增加抽运光功率,首先观测到的是调Q脉冲序列;当吸收抽运功率为1.39 W时,出现稳定的调Q锁模脉冲;继续提高抽运功率,当吸收抽运功率为最大的2.6 W时,对应的最大输出光功率为156 mW,通过线性拟合,可得晶体的斜率效率为6.35%. 这种斜率效率的明显降低,主要是 WS_2 对振荡光的吸收损耗导致. 具体结果如图4(a)所示. 由于我们的抽运光功率有限,图中曲线并没有达到饱和,相信后期提高抽运功率将有望得到连续锁模的结果.

实验发现,在激光运转和非运转状态下,激光晶体对振荡光具有不同的吸收率. 图4(b)给出了在输出连续光、输出调Q锁模脉冲光和腔内无激光振荡时晶体对抽运780.5 nm光的吸收效率分别为77.61%, 76.52%和35.85%. 这说明谐振腔在振荡和不振荡时晶体对抽运光的吸收效率是不同的,表明谐振腔在振荡时会提高晶体对抽运光的吸收效率.

锁模脉冲的光谱通过光谱分析仪(AvaSpec-NIR256-2.5TEC)测量得到,如图5所示,输出调Q锁模光的中心波长为1895 nm,光谱的半高宽为20 nm. 按照傅里叶变换极限理论,双曲正割脉冲时间带宽积为0.315,在1895 nm处理论上支持189 fs的超短脉冲. 如果利用腔内色散管理技术,则可以获得近变换极限的脉冲^[27].

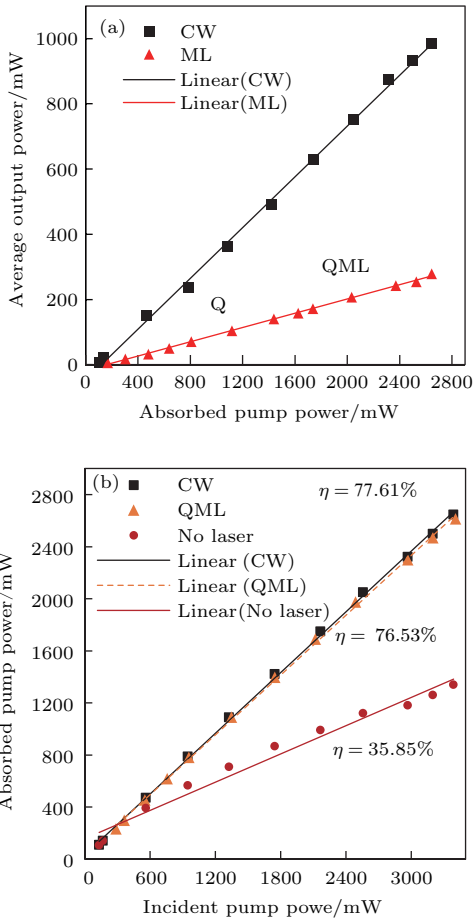


图4 (网刊彩色) (a) 连续光和锁模输出功率随吸收抽运功率的变化; (b) 晶体吸收效率
 Fig. 4. (color online) (a) Change of the average output power of continuous wave and mode locking with absorbed pump power; (b) change of crystal absorption efficiency.

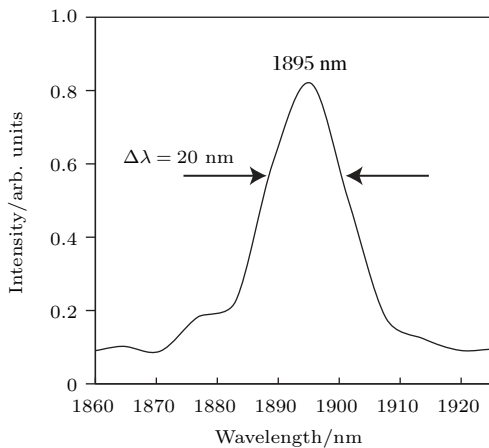


图5 吸收抽运功率为2.6 W的锁模光谱
 Fig. 5. Emission spectrum of the mode locking laser under the absorbed pump power of 2.6 W.

通过2 μm 快速光电二极管 (ET-5000) 连接 200 MHz 的数字示波器 (RIGOL, DS4024) 探测调 Q 锁模脉冲序列。图 6 分别为扫描时间为 1 ms,

20 μs 和 10 ns 所获得的调 Q 锁模脉冲序列。可以看出扫描时间在 1 ms 时为调 Q 包络, 20 μs 后包络平滑展开, 10 ns 为调 Q 包络内的锁模脉冲, 重复频率为 131.6 MHz。相对于调 Q 脉冲包络, 锁模脉冲的调制深度接近 100%, 已非常接近连续锁模运转。通过锁模重复频率理论公式 $f = C/(2L)$ (C 为光速, L 为振荡腔的长度), 可以算出实验中所用的腔长和所测的重复频率满足该公式, 最大的单脉冲能量为 1.19 nJ。调 Q 包络的重复频率在 3—50 kHz 之间变化, 并且随着抽运功率的提高, 这种调 Q 频率变化没有规律性, 这不同于抽运功率增加调 Q 脉冲重复频率随之增加 [28] 或者控制腔长进行锁模频率可控的超快光纤激光器 [29]。我们分析认为, 其主要原因是 WS₂ 自身热噪声导致的饱和吸收时间起伏不定, 以及实验室风机导致不规则流动的水汽中 OH 离子漂白效应导致的随机调 Q [30]。

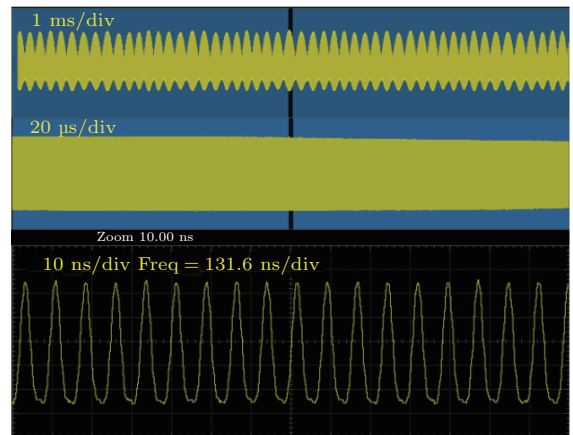


图6 扫描时间为 1 ms, 20 μs 和 10 ns 的锁模脉冲序列
 Fig. 6. Mode-locked pulse trains recorded in 1 ms, 20 μs , and 1 ns per division (div) time scales.

实验中采用商业自相关仪 (APE, pulse check 50) 测量脉冲宽度, 该自相关仪能测量的最大脉冲宽度为 12 ps, 由于实际的脉冲宽度比 12 ps 要宽, 所以没有测量到准确的脉冲自相关踪迹。利用公式 $t_m = \sqrt{t_r^2 + t_p^2 + t_o^2}$ (t_m 为被测锁模脉冲上升沿时间, t_r 为实际锁模脉冲上升沿时间, t_p 为光电探测器上升沿时间, t_o 为示波器上升沿时间) 可估算锁模脉冲的宽度 [28]。实验中被测锁模脉冲上升沿时间约 2.12 ns, 光电探测器上升沿时间为 35 ps。利用 $t_o \times BW = 0.35—0.40$ 可估算实验中 $t_o = 2000$ ps, 因此可计算实际锁模脉冲上升沿时间为 703 ps, 由于脉冲宽度约等于上升沿时间的 1.25 倍, 故实际锁模脉冲宽度约为 878 ps。通过提高抽运功率, 降低

WS₂ 材料的损耗, 有望实现连续锁模脉冲, 得到更加窄的脉冲宽度.

5 结 论

综上所述, 我们采用掺杂 WS₂ 的 PVA 塑料膜制成可饱和吸收体材料, 在 Tm, Ho:LLF 全固态激光器中实现了调 Q 锁模运转. 在 2.6 W 的抽运功率下, 中心波长为 1895 nm, 最高输出功率为 156 mW, 锁模重复频率为 131.6 MHz, 对应的单脉冲能量为 1.19 nJ. 本实验证明在 Tm, Ho:LLF 全固态激光器中利用 WS₂ 可饱和吸收体材料可以实现调 Q 锁模运转, 且 WS₂ 可饱和吸收体材料制备工艺简单、成本低廉、设计灵活、有望商业化推广. 后期我们将提高抽运光功率、优化 WS₂ 材料的质量、在腔内进行色散补偿, 可望实现稳定连续锁模运转, 获得飞秒量级的锁模超短脉冲输出.

参考文献

- [1] Sorokin E, Sorokina I T, Mandon J, Guelachvili G, Picque N 2007 *Opt. Express* **15** 16540
- [2] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, Fuhrberg P 2010 *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* **21** 471
- [3] Koopmann P, Lamrini S, Scholle K, Fuhrberg P, Petermann K, Huber G 2011 *Opt. Lett.* **36** 948
- [4] Feng T L 2015 *Ph. D. Dissertation* (Jinan: Shandong University) (in Chinese) [冯天利 2015 博士学位论文 (济南: 山东大学)]
- [5] Gluth A, Wang Y, Petrov V, Paaajaste J, Suomalainen S, Härkönen A 2015 *Opt. Express* **23** 1361
- [6] Yang K J, Bromberger H, Heinecke D, Kölbl C, Schäfer H, Dekorsy T 2012 *Opt. Express* **20** 18630
- [7] Ma J, Xie G Q, Gao W L, Yuan P, Qian L J, Yu H H 2012 *Opt. Express* **37** 1376
- [8] Yao B Q, Wang W, Tian Y, Li G, Wang Y Z 2011 *Laser Phys.* **21** 2020
- [9] Denisov I A, Skoptsov N A, Gaponenko M S, Malyarevich A M, Yumashev K V, Lipovskii A A 2009 *Opt. Express* **34** 3403
- [10] Wan H, Cai W, Wang F, Jiang S, Xu S, Liu J 2016 *Opt. Quantum Electron.* **48** 1
- [11] Wang K, Wang J, Fan J, Lotya M, O'Neill A, Fox D 2013 *Acs Nano.* **7** 9260
- [12] Wang S, Yu H, Zhang H, Wang A, Zhao M, Chen Y 2014 *Adv. Mater.* **26** 3538
- [13] Kong L C, Xie G Q, Yuan P, Qian L J, Wang S X, Yu H H 2015 *Photon. Res.* **3** A47
- [14] Zou X, Leng Y X, Li Y Y, Feng Y Y, Zhang P X, Hang Y, Wang J 2015 *Chin. Opt. Express* **13** 081405
- [15] Wang X, Wang Y, Duan L, Li L, Sun H 2016 *Opt. Commun.* **367** 234
- [16] Molinasánchez A, Wirtz L 2011 *Phys. Rev. B* **84** 15
- [17] Chen B, Zhang X, Wu K, Wang H, Wang J, Chen J 2015 *Opt. Express* **23** 26723
- [18] Li L, Jiang S, Wang Y, Wang X, Duan L, Mao D 2015 *Opt. Express* **23** 28698
- [19] Khazaiezhad R, Kassani S H, Jeong H, Park K J 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 1
- [20] Jung M, Lee J, Park J, Koo J, Jhon Y M, Ju H L 2015 *Opt. Express* **23** 19996
- [21] Qiao L, Yang F G, Wu Y H, Ke Y G, Xia Z C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 214205 (in Chinese) [乔亮, 羊富贵, 武永华, 柯友刚, 夏忠朝 2014 物理学报 **63** 214205]
- [22] Peng H, Zhang K, Zhang L, Hang Y, Xu J, Tang Y 2010 *Chin. Opt. Express* **8** 63
- [23] Zhang X, Yu L, Zhang S, Li L, Zhao J, Cui J 2013 *Opt. Express* **21** 12629
- [24] Zhang Y H, Li N, Xu J C, Xi L 2004 *China Journal of Chinese Materia Medica* **29** 101 (in Chinese) [张韵慧, 李宁, 许建辰, 肖莉 2004 中国中药杂志 **29** 101]
- [25] Zeng H, Liu G B, Dai J, Yan Y, Zhu B, He R, Xie L, Xu S, Chen X, Yao W, Cui X 2013 *Sci. Rep.* **3** 1608
- [26] Ling W J, Zheng J A, Jia Y L, Wei Z Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1619 (in Chinese) [令维军, 郑加安, 贾玉磊, 魏志义 2005 物理学报 **54** 1619]
- [27] Liu X M, Han D D, Sun Z P, Zeng C, Lu H, Mao D, Cui Y D, Wang F Q 2013 *Sci. Rep.* **3** 2718
- [28] Kong L C, Xie G Q, Yuan P, Qian L J, Wang S X, Yu H H, Zhang H J 2015 *Photon. Res.* **3** A47
- [29] Liu X M, Cui Y D, Han D D, Yao X K, Sun Z P 2015 *Sci. Rep.* **5** 9101
- [30] Lagatsky A A, Han X, Serrano M D, Cascales C, Zaldo C, Calvez S 2010 *Opt. Express* **35** 3027

Passively Q -switched mode-locked Tm, Ho:LLF laser with a WS₂ saturable absorber*

Ling Wei-Jun^{1)†} Xia Tao¹⁾ Dong Zhong^{1)‡} Liu Qing¹⁾ Lu Fei-Ping¹⁾ Wang Yong-Gang²⁾

1) (Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China)

2) (School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

(Received 22 January 2017; revised manuscript received 30 March 2017)

Abstract

Using few-layer tungsten disulfide (WS₂) doped polyvinyl alcohol as a saturable absorber for the initiation of the pulse generation, we experimentally demonstrate stable passively Q -switched mode-locked operations of Tm, Ho:LiLuF₄ laser at 1895 nm for the first time. The laser is designed with an X -type four-mirror cavity and pumped by a Ti:sapphire laser operated at 785 nm, and its continuous operation is initiated when the absorbed pump power is 143 mW. When the absorbed pump power reaches 2.645 W, we obtain a maximum output power of 985 mW and a crystal slope efficiency of 39.8% by linear fitting. When the saturable absorber WS₂ is inserted in the cavity, the threshold of the absorbed pump power is increased to 234 mW. With the increase of the pump power, Q -switch pulse sequence is first observed. When the absorbed pump power reaches 1.39 W, the stable operation of the Q -switched mode locked pulse is realized. A maximum average output power of 156 mW is achieved at an absorbed pump power of 2.6 W, which corresponds to a 25 kHz Q -switched repetition rate and a 300 μ s-long pulse envelope. In this case, the modulation depth in Q -switching envelopes is close to 100%. After the passively Q -switched mode-locked is obtained stably, the mode-locked pulses inside the Q -switched pulse envelope have a repetition rate of 131.6 MHz, corresponding to a mode locked pulse energy of 1.19 nJ and a cavity length of 1.14 m. According to the definition of the rise time and considering the symmetric shape of the mode locked pulse, we can assume that the duration of the pulse is approximately 1.25 times more than the rise time of the pulse. Then the width of the mode locked pulse is estimated to be about 878 ps. These experimental results show that WS₂ is a promising broadband saturable absorption material for generating a 2 μ m-wavelength mid-infrared solid-state laser pulse. By increasing the pump power and reducing the loss of WS₂ material, it is possible to realize a continuous mode locking operation which has a narrower pulse duration. The mode-locked mid-infrared pulses are very stable and have a lot of potential applications such as ultrafast molecule spectroscopy, mid-IR pulse generation, laser radar, atmospheric environment monitoring, etc.

Keywords: Tm, Ho:LLF laser, Q -switched mode-locking, saturable absorber, WS₂

PACS: 42.55.Rz, 42.60.Fc, 42.60.Gd, 42.70.-a

DOI: 10.7498/aps.66.114207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61465012, 61564008, 61461046, 61665010).

† Corresponding author. E-mail: wjlingts@sina.com

‡ Corresponding author. E-mail: dz0212@foxmail.com