

基于 WS_2 可饱和吸收体的被动调 Q $Tm, Ho:LLF$ 激光器

令维军¹, 夏 涛¹, 董 忠¹, 路飞平¹, 刘 勍¹, 赵小龙¹, 李 可¹, 王勇刚²

¹天水师范学院激光技术研究所, 甘肃 天水 741000;

²陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062

摘要 利用二维过渡金属材料 WS_2 作为 $2\ \mu\text{m}$ 波段可饱和吸收体, 采用典型的 X 型四镜腔结构, 实现了 $Tm, Ho:LuLiF_4$ 激光器低阈值被动调 Q 运转。实验结果表明, 吸收功率为 260 mW 时开始启动调 Q 运转, 吸收抽运功率大于 650 mW 时, 调 Q 激光脉冲进入稳定运转。抽运功率为 2000 mW 时, 在中心波长 1895 nm 波段输出功率为 88 mW, 典型脉冲宽度为 $4\ \mu\text{s}$, 重复频率为 16.89 kHz, 对应最大单脉冲能量为 $5.21\ \mu\text{J}$ 。结果表明, WS_2 材料可以作为 $2\ \mu\text{m}$ 固体激光器的可饱和吸收体。

关键词 激光技术; WS_2 可饱和吸收体; 被动调 Q 激光器; $Tm, Ho:LuLiF_4$ 激光器; 低阈值激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0703020

WS_2 Saturable Absorber for Passively Q -Switched $Tm, Ho:LLF$ Lasers

Ling Weijun¹, Xia Tao¹, Dong Zhong¹, Lu Feiping¹, Liu Qin¹,
Zhao Xiaolong¹, Li Ke¹, Wang Yonggang²

¹Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741000, China;

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

Abstract The WS_2 is used as a saturable absorber in $2\ \mu\text{m}$ band. A low-threshold passively Q -switched $Tm, Ho:LuLiF_4$ laser with a typical X-type four-cavity structure is demonstrated. The experimental results show that the Q -switched operation starts at the absorbed pump power of 260 mW and becomes stable when it is over 650 mW. When the absorbed pump power is 2000 mW, the output power is 88 mW, corresponding to the typical pulse duration of $4\ \mu\text{s}$, the repetition frequency of 16.89 kHz, and the maximum single pulse energy of $5.21\ \mu\text{J}$. The results show that the WS_2 material can be used as a saturable absorber for passively Q -switched lasers in $2\ \mu\text{m}$ band.

Key words laser technique; WS_2 saturable absorber; passively Q -switched lasers; $Tm, Ho:LuLiF_4$ lasers; low threshold lasers

OCIS codes 140.3540; 140.3380; 140.3580

1 引 言

$2\ \mu\text{m}$ 左右波段的近红外激光位于水的吸收峰, 水吸收强, 在激光医疗领域有着十分广泛而重要的应用。特别是该波段的超短脉冲激光处于反映分子吸收特征的指纹区域, 在精密时间分辨分子光谱学, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中红外波段产生, 红外光学频率梳, 光通信, 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^[1-4]。目前, $1\ \mu\text{m}$ 波段通过可饱和吸收体实现被动调 Q 运转已经被证实^[5-6], 实现 $2\ \mu\text{m}$ 波段微秒到纳秒量级脉宽的调 Q 运转激光输出也主要是通过掺铥(Tm^{3+})激光器中加入快速可饱和吸收体材料来获得。一般来说, 被动调 Q 激光脉冲运转取决于激光腔和可饱和吸收体性质, 理想的可饱和吸收体材料需具备超

收稿日期: 2017-01-06; 收到修改稿日期: 2017-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(61465012, 61564008, 61461046, 61665010, 61661046)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLSL201307)、天水师范学院重点学科项目(TSSY201505)

作者简介: 令维军(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事超快激光技术方面的研究。E-mail: wjlingts@sina.com

快的恢复时间、低饱和强度和较高的损伤阈值。从已报道的结果来看,目前应用于 $2\ \mu\text{m}$ 波段的可饱和吸收体主要包括三种:1)吸收晶体,如:Cr:ZnSe/Cr:ZnS、硒化铅(PbSe)玻璃和硫化铅(PbS)量子点玻璃、铽(Ho^{3+})掺杂晶体^[7-10];2)半导体材料,如:铟镓砷(InGaAs)/砷化镓(GaAs)以及半导体可饱和吸收镜(SESAM)器件^[11-12];3)新型一维、二维材料,如:碳纳米管(CNT)、石墨烯和二硫化钼(MoS_2)^[13-21]。然而,上述的材料也存在一些缺点:SESAM需要复杂的制造过程和昂贵的材料成本;CNT和石墨烯在水和有机溶剂中的溶解性都不好,在采用化学法制备吸收体时需要进行酸化等处理以增强其溶解度。

最近,二维过渡金属硫化物(TMDs),如硫化钼(MoS_2)、硒化钼(MoSe_2)、硒化钨(WSe_2)、硫化钨(WS_2)等的电学及光学特性得到了人们的关注。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。作为类似石墨烯的二维材料,TMDs不仅具有类似石墨烯的结构和性质,还被证明拥有许多新的物理现象。不像无间隙的石墨烯,TMDs能带隙随着层数的减少而增加,单层的TMDs拥有直接的带隙。这些特性决定了TMDs拥有许多新的不同于石墨烯的光学性质。

最近, WS_2 材料制备的宽带可饱和吸收体已经被证明拥有比石墨烯更强的非线性光学响应^[22]。 WS_2 是一种灰色的晶体,具有层状结构,易解离,具有耐高压、耐高温、抗辐射和抗腐蚀的优异性能,是工业界公认的高性能固体润滑材料,常被用于碳素工业、航空、航天、军事等领域。单层的 WS_2 结构,金属W原子被夹在上下两层S原子之间,W原子和S原子之间具有非常强的共价键^[23]。少数层 WS_2 的不同层之间由较弱的范德瓦耳斯力结合。单层 WS_2 是拥有直接带隙的半导体,带隙1.3 eV,而块状 WS_2 是间接带隙半导体,带隙增加至2.1 eV。少数层的 WS_2 的带隙随着层数的不同在1.32~1.4 eV之间^[24]。由于层状 WS_2 生长过程中的缺陷导致能带间隙减小以及半导体态和金属态的共存,使层状 WS_2 能够被应用在更宽的波段上。研究表明少数层的 WS_2 具有带隙可调的性质。已经在1060,1550,1940 nm的波段上观察到了层状 WS_2 的可饱和吸收现象,并且通过不同的制备方式得到基于层状 WS_2 的可饱和吸收体,获得了调Q和锁模的脉冲输出。

基于这些属性,近年来,在 $1\ \mu\text{m}$ 波段全固态激光器中 WS_2 的锁模和调Q已经被实现。但是在 $2\ \mu\text{m}$ 波段尚未出现 WS_2 用于固体激光器的报道。本文报道了中心波长为1895 nm,基于可饱和吸收体 WS_2 被动调Q的Tm,Ho:LuLiF₄(Tm,Ho:LLF)激光器。

2 WS_2 可饱和吸收体材料的制备

WS_2 可饱和吸收体材料采用垂直生长法制备,其过程如下:将10 mg WS_2 粉末置于10 mL水中,先后经过超声及离心处理,制备出 WS_2 水溶液。将溶液注入一个聚苯乙烯方盒中,将石英片沿对角线垂直放进盒中,静置两周,待溶液蒸发完后,取出石英片, WS_2 材料沉积在石英片的两侧,如图1所示。

图2为 WS_2 的拉曼光谱图,可见振动模式 E_{2g}^1 (平面上)和 E_{2g}^2 (平面外)各自位于 $351.2\ \text{cm}^{-1}$ 和 $415.9\ \text{cm}^{-1}$ 处,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。

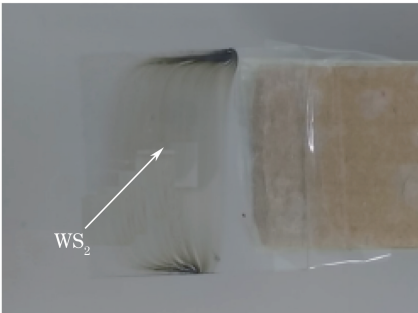


图1 WS_2 可饱和吸收体材料

Fig. 1 WS_2 saturable absorber material

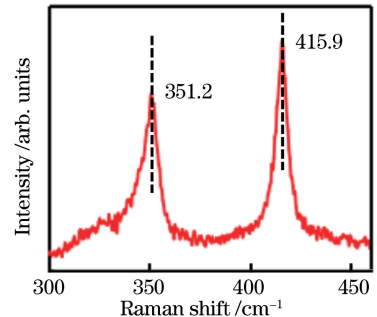


图2 WS_2 的拉曼光谱图

Fig. 2 Raman spectrum of WS_2

3 实验装置

Tm, Ho:LLF 被动调 Q 激光实验装置如图3所示,这是一个典型的 X 型四镜腔,这种腔型对应很小的激光振荡模斑,可以很大程度上降低调 Q 阈值功率,并且得到更加稳定的调 Q 脉冲序列。抽运源为掺钛蓝宝石激光器(Ti:S),其最大输出功率为 2.0 W,通过腔内双折射滤光片可将输出波长调谐到 780 nm,正好对应激光晶体的一个吸收峰。聚焦透镜 L 焦距 $f=120$ mm,双面镀有 780~790 nm 高透介质膜,透过率大于 95%,抽运光经过透镜后聚焦光斑直径约为 $23\ \mu\text{m}$ 。激光晶体为 Tm, Ho:LLF,在布儒斯特角方向进行切割,对两个通光端面进行抛光, Tm^{3+} 的掺杂原子数分数为 5%, Ho^{3+} 的掺杂原子数分数为 0.5%,尺寸 $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$ 。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,实验过程中采用循环水系统对紫铜晶体夹进行冷却,水温维持在 $14\ ^\circ\text{C}$ 左右^[25]。被动调 Q 激光实验装置中 M_1 、 M_2 分别为曲率半径 $R=100$ mm 的宽带双色凹面镜,其对 780 nm 波长抽运激光透过率大于 95%,对 1800~2100 nm 波段的反射率大于 99.9%。 M_3 为凹面曲率半径 $R=200$ mm、对 780 nm 波长反射率大于 99.9% 的平凹镜,用于对经过激光晶体没有吸收的剩余 780 nm 激光二次反射进入激光晶体,从而提高激光器输出效率。 M_4 为凹面曲率半径 $R=100$ mm、对 1800~2050 nm 波长反射率大于 99.9% 的平凹镜,其作用是减小平面高反镜 (M_5) 附近光斑直径, M_5 对 1800~2100 nm 波段的反射率大于 99.9%。OC 为部分输出镜,对 1800~2050 nm 波长的透过率 $T_{\text{OC}}=1.5\%$ 。利用激光腔模 ABCD 矩阵模拟振荡光斑,可以发现晶体中最小光斑为 $46\ \mu\text{m}$,正好与抽运光斑匹配,理论计算表明,当抽运光斑与振荡光斑大小比为 0.5 时,激光输出效率最高。

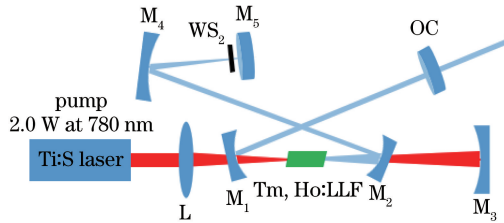


图 3 Tm, Ho:LLF 被动调 Q 激光实验装置图

Fig. 3 Schematic of passively Q-switched Tm, Ho:LLF laser

同时 X 型四镜腔可以提供最小的激光振荡模斑,有利于激光低阈值运转。为了使饱和吸收体 WS_2 达到饱和和启动调 Q 运转,在 WS_2 前加入了凹面反射镜 M_4 ,曲率半径 $R=100$ mm,在焦点附近的聚焦光斑约 $89\ \mu\text{m}$,将 WS_2 置于焦点附近,通过调节固定 WS_2 饱和吸收体的一维平移台,可改变通过饱和吸收体的光斑大小,从而启动调 Q 运转。为了获得高的腔内功率密度,采用输出镜透过率 $T_{\text{OC}}=1.5\%$,这样易于在低阈值下启动调 Q 运转。

4 实验结果分析与讨论

采用上述光路设计。如图 4(a)所示,逐步增加抽运光功率,当抽运光功率为 270 mW 时有连续波(CW)激光输出,进一步提高输出功率,当抽运功率达到 480 mW 时,对应晶体中吸收功率为 260 mW,开始出现调 Q 脉冲,此时 WS_2 饱和吸收体中抽运功率密度为 $23.58\ \text{mW}/\text{cm}^2$,但调 Q 运转不是太稳定,Q 脉冲比较杂乱,当抽运功率超过 1200 mW 时,对应晶体中吸收功率为 650 mW,激光进入稳定的被动调 Q 运转模式,此时 Tm, Ho:LLF 调 Q 激光的输出功率为 35 mW,相应的斜效率为 3.61%。

随着腔内功率密度的提高,达到饱和吸收的时间越来越短,对应的输出调 Q 脉冲宽度越来越窄,重复频率越来越高,激光脉冲重复频率和脉冲宽度随抽运功率的变化如图 4(b)所示,可以看出,当抽运功率从 1200 mW 增加到 2000 mW,脉冲重复频率从 11.29 kHz 增加到 16.89 kHz 时,相应地脉冲宽度从 $6.8\ \mu\text{s}$ 减小到 $4\ \mu\text{s}$ 。

根据平均输出功率和脉冲重复频率,可以计算得到 Tm, Ho:LLF 被动调 Q 激光单脉冲能量随抽运吸收功率的增加而变大。当抽运功率为 2000 mW 时,最大单脉冲能量为 $5.21\ \mu\text{J}$ 。图 4(c)是抽运功率为 2000 mW 时的脉冲序列和脉冲波形,对应单脉冲宽度为 $4\ \mu\text{s}$ 。Tm, Ho:LLF 被动调 Q 激光输出波长如图 4(d)所示,中心波长为 1895 nm,且不随着抽运功率的变化而发生变化,谱线半峰全宽为 20 nm。

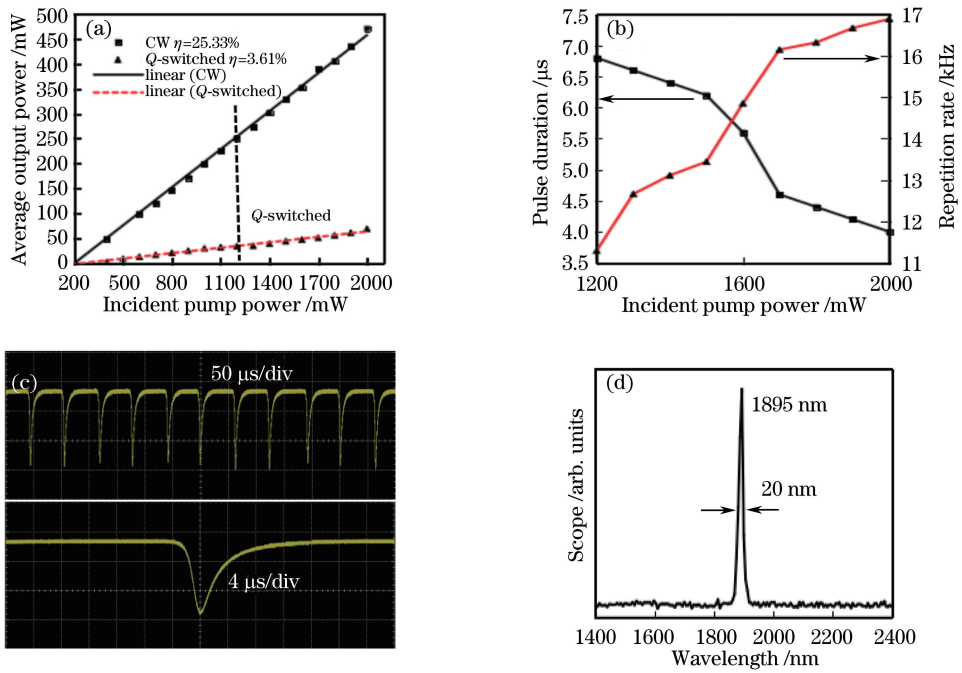


图 4 (a)连续光和调 Q 脉冲光输出功率随抽运功率变化图;(b)脉冲宽度和重复频率随抽运功率变化图;(c)调 Q 脉冲波形;(d)调 Q 中心波长光谱图

Fig. 4 (a)Variation of output power of CW and Q-switched pulse with incident pump power; (b) variation of pulse width and repetition frequency with incident pump power; (c) waveform of Q-switched pulse; (d) spectrum of Q-switched pulse at center wavelength

5 结 论

采用 WS₂ 可饱和吸收体实现了 T_m, Ho:LLF 激光晶体在 2 μm 波段附近被动调 Q 运转, 调 Q 运转的最低阈值为 260 mW。当抽运功率达到 1200 mW 时, 进入稳定的调 Q 脉冲运行状态。随着抽运功率的逐步提高, 腔内功率密度不断增大, 调 Q 脉冲宽度越来越窄, 重复频率越来越大, 当抽运功率达到 2000 mW 时, 对应的典型输出功率为 88 mW, 最短调 Q 脉冲宽度为 4 μs, 最大重复频率为 16.89 kHz, 最大单脉冲能量为 5.21 μJ。实验结果表明, WS₂ 可以作为中心波长为 1895 nm 固体激光器被动调 Q 的可饱和吸收体材料。

参 考 文 献

- [1] Fan T Y, Huber G, Byer R L, *et al.* Continuous-wave operation at 2.1 μm of a diode-laser-pumped, T_m-sensitized Ho:Y₃Al₅O₁₂ laser at 300 K[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(9): 678-680.
- [2] Bloom A L. CW pumped dye lasers[J]. *Optical Engineering*, 1972, 11(1): 1.
- [3] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, *et al.* 2 μm laser sources and their possible applications[M]. [S.l.]: *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, InTech, 2010, 472-492.
- [4] Feng Tianli. The study on characteristics of all solid-state mid-infrared two micrometer lasers[D]. Jinan: Shandong University, 2015: 1-3.
冯天利. 全固态中红外 2 μm 波段激光特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2015: 1-3.
- [5] Li Minglong, Meng Peibei, Yan Fanjiang, *et al.* Progress on passively Q-switched solid-state lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 090001.
李梦龙, 蒙裴裴, 颜凡江, 等. 高重频被动调 Q 固体激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 090001.
- [6] Li Bin, Ding Xin, Sun Bing, *et al.* Laser-diode-pumped coaxial double crystals Nd:YAG/Nd:YVO₄ Cr:YAG passively Q-switched laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0402003.

- 李 斌, 丁 欣, 孙 冰, 等. 激光二极管抽运 Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体 Cr:YAG 被动调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0402003.
- [7] Zhang X L, Yu L, Zhang S, *et al.* Passively Q-switched Tm, Ho:LuLiF₄ laser with near constant pulse energy and duration[J]. Applied Physics B, 2013, 111(2): 165-168.
- [8] Tsai T Y, Birnbaum M. Q-switched 2-micron lasers by use of a Cr²⁺:ZnSe saturable absorber[J]. Applied Optics, 2001, 40(36): 6633-6637.
- [9] Serres J M, Loiko P, Mateos X, *et al.* Passive Q-switching of a Tm, Ho:KLu(WO₄)₂ microchip laser by a Cr:ZnSe saturable absorber[J]. Applied Optics, 2016, 55(14): 3757-3763.
- [10] Cai Chunfeng, Wu Huizhen, Si Jianxiao, *et al.* Mid-infrared photoluminescence of PbSe/PbSrSe multiple quantum wells grown by molecular beam epitaxy[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(5): 3560-3564.
蔡春锋, 吴惠贞, 斯剑霄, 等. MBE 生长 PbSe/PbSrSe 量子阱结构的光致中红外发光的研究[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3560-3564.
- [11] Wang Y G, Ma X Y, Zhong B, *et al.* Passive Q-switching of diode-pumped Yb:YAG microchip laser with ion-implanted GaAs[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(1): 31-33.
- [12] Keller U, Weingarten K J, Kärtner F X, *et al.* Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3): 435-453.
- [13] Qin Z P, Liu J G, Xie G Q, *et al.* Spectroscopic characteristics and laser performance of Tm:CaYAlO₄ crystal[J]. Laser Physics, 2013, 23(10): 105806.
- [14] Qu Z S, Wang Y G, Liu J, *et al.* Passively mode-locked 2 μm Tm:YAP laser with a double-wall carbon nanotube absorber[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(6): 064211.
- [15] Feng T, Yang K, Zhao S, *et al.* Efficient CW dual-wavelength and passively Q-switched Tm:LuAG lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1): 7-10.
- [16] Wang Q, Teng H, Zou Y W, *et al.* Graphene on SiC as a Q-switcher for a 2 μm laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(3): 395-397.
- [17] Hou J, Zhang B T, He J, *et al.* Passively Q-switched 2 μm Tm:YAP laser based on graphene saturable absorber mirror[J]. Applied Optics, 2014, 53(22): 4968-4971.
- [18] Serres J M, Loiko P, Mateos X, *et al.* Tm:KLu(WO₄)₂ microchip laser Q-switched by a graphene-based saturable absorber[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14108-14113.
- [19] Zhang P, Zhang L, Li T, *et al.* Passively Q-switched Tm/Mg:LiTaO₃, laser using single-layer graphene as a saturable absorber[J]. Optics Communications, 2015, 349: 89-93.
- [20] Zou X, Leng Y X, Li Y Y, *et al.* Passively Q-switched mode-locked Tm:LLF laser with a MoS₂ saturable absorber [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(8): 081405.
- [21] Lin Hongyi, Huang Xiaohua, Xu Yingchao, *et al.* Research progress of graphene passively Q-switched Nd³⁺-doped lasers[J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 259-263.
林洪沂, 黄晓桦, 许英朝, 等. 石墨烯被动调 Q 掺 Nd³⁺ 激光器研究进展[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 259-263.
- [22] Li Changsheng, Yu Yun, Liu Yanqing, *et al.* Synthesis and tribological properties of WS₂ nanoparticles[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2008, 24(2): 275-279.
李长生, 于 云, 刘艳清, 等. WS₂ 纳米颗粒的合成及摩擦学性能研究[J]. 无机化学学报, 2008, 24(2): 275-279.
- [23] Molina-Sánchez A, Wirtz L. Phonons in single-layer and few-layer MoS₂, and WS₂ [J]. Physical Review B, 2011, 84(15): 155413.
- [24] Wang X, Wang Y, Duan L, *et al.* Passively Q-switched Nd:YAG laser via a WS₂ saturable absorber[J]. Optics Communications, 2016, 367: 234-238.
- [25] Zou Yuwan, Wang Qing, Zhang Yongdong, *et al.* Continuous wave operation of Tm₂O₃-doped germanate glass laser around 2 μm[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0402004.
邹育婉, 王 庆, 张永东, 等. Tm₂O₃ 掺杂锗酸盐玻璃 2 μm 波段连续激光输出[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402004.