

激光与光电子学进展

调 Q 锁模运转的 Tm:ZBLAN 薄片激光器

张明霞, 周珑, 令维军*, 袁振, 王文婷, 薛婧雯, 王翀, 杜晓娟, 董忠**

天水师范学院激光技术研究所, 甘肃 天水 741001

摘要 利用特殊的散热设计, 在 Tm:ZBLAN 玻璃激光器中实现连续和被动调 Q 锁模运转。分别采用透过率为 1.5%、3%、5% 的输出镜在激光连续运转时获得 254 mW、296 mW、230 mW 的最高输出功率。为了实现锁模运转, 选用透过率为 1.5% 的输出镜, 将透射式 GaAs-SESAM 作为锁模元件, 出光阈值仅为 131 mW, 当吸收泵浦功率大于 1.09 W 时, 实现了稳定的调 Q 锁模运转, 最大输出功率为 98 mW, 调 Q 包络脉冲宽度为 6 μ s, 重复频率为 19.23 kHz, 调 Q 包络下脉冲的重复频率为 102 MHz, 脉冲宽度约为 800 ps, 最大单脉冲能量为 0.96 nJ。

关键词 激光器; 薄片激光器; Tm:ZBLAN; SESAM; 调 Q 锁模

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114011

Q-Switched Mode-Locked Thin-Disk Tm:ZBLAN Laser

Zhang Mingxia, Zhou Long, Ling Weijun*, Yuan Zhen, Wang Wenting, Xue Jingwen,

Wang Chong, Du Xiaojuan, Dong Zhong**

Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741001, China

Abstract In this study, we have achieved novel continuous and passive Q-switched mode-locked operation in a Tm:ZBLAN laser using a special crystal design. When the laser is in continuous operation, the maximum output power of 254, 296, and 230 mW is obtained using 1.5%, 3%, and 5% output mirrors, respectively. We use a 1.5% output mirror and transmission-type GaAs-SESAM as a mode-locking element to achieve a mode-locking operation. The absorbed pump threshold is as low as 131 mW. When the absorption pump power is greater than 1.09 W, a stable Q-switched mode-locking operation is achieved. The maximum output power is 98 mW, the pulse width of the Q-switched envelope is 6 μ s, the repetition frequency is 19.23 kHz, the repetition frequency of the pulse under the Q-switched envelope is 102 MHz, and the pulse width is about 800 ps. The maximum single-pulse energy is 0.96 nJ.

Key words lasers; thin disk lasers; Tm:ZBLAN; SESAM; Q-switched mode-locking

1 引言

处于人眼安全区域和大气窗口波段的 2 μ m 激光在大气传输、激光雷达、激光医疗、高分辨光谱学等领域有着巨大的应用潜力^[1]。将 2 μ m 超短脉冲激光作为同步泵浦源, 通过参量振荡产生高重复频

率的中红外可调谐激光, 或者作为种子光脉冲进行参量放大, 是目前的研究热点之一^[2-3]。2 μ m 固体激光器的主要增益介质为单掺铥 (Tm³⁺)、钬 (Ho³⁺) 或铥、钬共掺的激光晶体。

自 2009 年 Cho 等^[4]首次利用单碳壁纳米管 (SWCNT) 在 Tm:KLu(WO₄)₂ 晶体中实现了 1.2 ps

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(11774257, 61564008)、国家重点研发计划(2017YFB0405204)、甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2020C-23)、甘肃省重点研发计划项目(21YFIGE300)、天水师范学院研究生创新引导项目(TYCX2035)

通信作者: *wjlingts@sina.com; **dz0212@foxmail.com

的锁模激光输出以来,人们已在许多类基质中实现了 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光被动锁模运转,使用氧化物基质 Tm:LuYO₃ 陶瓷晶体产生的锁模脉冲宽度分别达到了 $41\ \text{ps}$ ^[5] 和 $57\ \text{fs}$ ^[6],使用石榴石为基质的 Tm:LuAG^[7] 和 Tm:CaGdAlO₄^[8] 晶体产生的脉冲宽度分别为 $13.6\ \text{ps}$ 和 $650\ \text{fs}$,使用无序基质 Tm, Ho:CLNGG^[9] 晶体产生的脉冲宽度为 $67\ \text{fs}$,使用钨酸盐为基质的 Tm:MgWO₄^[10] 晶体产生的脉冲宽度为 $86\ \text{fs}$ 。本课题组已经利用自制硫化钼(MoS₂)和双壁碳纳米管(DWCNT)可饱和吸收体成功实现 Tm:LuAG 晶体调 Q 锁模运转^[11-12]。目前,利用商业化半导体可饱和吸收镜(SESAM)成功实现了 Tm, Ho:LLF 和 Tm:LLF 晶体最短脉冲宽度分别为 $4.7\ \text{ps}$ ^[13] 和 $14\ \text{ps}$ ^[14] 的锁模脉冲运转。

重金属氟锆酸盐玻璃(ZBLAN)的成分为 $53\text{ZrF}_4\text{-}20\text{BaF}_2\text{-}4\text{LaF}_3\text{-}3\text{AlF}_3\text{-}20\text{NaF}$ (数字表示物质的量分数,单位为%),在 $230\sim 8000\ \text{nm}$ 波长范围内具有优良的透光特性,稀土离子在该基质材料中的无辐射跃迁概率较小,并且在重金属 ZBLAN 基质中可以观测到一些在常见氧化物基质中无法观测到的跃迁,声子能量很低,远低于许多激光晶体的声子能量,而低声子能量有利于低阈值激光运转。Tm:ZBLAN 玻璃具有无序的原子排列,其光谱的非均匀展宽效应使得发射光谱线宽达到 $30\sim 40\ \text{nm}$,可支持百飞秒以下激光输出,但是 Tm:ZBLAN 玻璃通常比较脆,导热性相对其他材料较差,这就限制了 Tm:ZBLAN 激光介质在超快固体激光研究方面的应用。Tm:ZBLAN 的制作工艺简单,并且掺杂稀土氟化物不引入电荷补偿的优点使其可高浓度掺杂各种稀土离子,成为最具潜力的基质材料^[15-16]。同时, Tm:ZBLAN 的形成能力强,易于拉制低损耗光纤,因此 Tm:ZBLAN 介质首先被应用于光纤激光器中,目前已经实现了调 Q 和锁模运转,且最短脉冲宽度为 $45\ \text{fs}$ ^[17-19]。然而,由于 Tm:ZBLAN 介质的导热性差,且易于出现脆性断裂,因此 Tm:ZBLAN 一直没有在固体激光器中实现连续运转和锁模运转。目前对于 Tm:ZBLAN 在固态激光器中的应用研究仅仅处于对其特性的分析中,如 Xu 等^[20] 研究了 Tm:ZBLAN 的荧光弛豫特性,李晨霞等^[21] 报道了氟化物玻璃中 Tm³⁺ 离子的吸收特性。

本文利用特殊的散热设计,在全固态 Tm:ZBLAN 激光器中实现连续和被动调 Q 锁模运转。在未加入锁模元件时,激光连续运转状态下最

高的输出功率为 $296\ \text{mW}$ 。将 GaAs-SESAM 作为锁模启动元件,出光阈值仅为 $131\ \text{mW}$,当吸收泵浦功率大于 $1.09\ \text{W}$ 时,可实现稳定的调 Q 锁模运转,中心波长为 $2059\ \text{nm}$,最大输出功率为 $98\ \text{mW}$,调 Q 包络的脉冲宽度为 $6\ \mu\text{s}$,重复频率为 $19.23\ \text{kHz}$,调 Q 包络下脉冲的重复频率为 $102\ \text{MHz}$,脉冲宽度约为 $800\ \text{ps}$,最大单脉冲能量为 $0.96\ \text{nJ}$ 。

2 实验装置

Tm:ZBLAN 激光器连续运转和调 Q 锁模运转的实验装置如图 1 所示。泵浦源是本课题组设计搭建的可调谐掺钛蓝宝石固体激光器,该激光器具有高的光束质量和窄的光谱宽度,通过旋转双折射滤光片 M₇ 可实现 $740\sim 844\ \text{nm}$ 泵浦光中心波长连续可调,因此利用一台泵浦源可以对 $2\ \mu\text{m}$ 波段的单掺 Tm³⁺ 或 Tm³⁺、Ho³⁺ 共掺激光介质进行实验研究。Tm:ZBLAN 激光器谐振腔采用典型的 X 型五镜折叠腔,聚焦透镜 L₂ 的焦距为 $120\ \text{mm}$,折叠镜 M₁₁、M₁₂ 和 M₁₄ 的凹面曲率半径均为 $100\ \text{mm}$,对 $770\sim 1050\ \text{nm}$ 波长激光的透过率大于 95% ,对 $1800\sim 2075\ \text{nm}$ 波长激光的反射率大于 99.9% 。平面高反镜 M₁₅ 对 $1800\sim 2075\ \text{nm}$ 波长激光的反射率大于 99.9% ,输出耦合镜 M₁₃ 的透过率有三种: 1.5% 、 3% 和 5% 。Tm:ZBLAN 采用布氏角切割,两端面均被抛光,尺寸为 $5\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}\times 13\ \text{mm}$,Tm³⁺ 的掺杂浓度(原子数分数)为 3% 。实验中为了更好地给增益介质散热,将 Tm:ZBLAN 用铝箔纸包裹,夹在用紫铜加工的冷却块内,泵浦光尽可能地靠近冷却块底部,用 $8\ \text{C}$ 的恒温循环水进行冷却;为了保证低温下介质表面不会出现冷凝水珠,实验室湿度保持

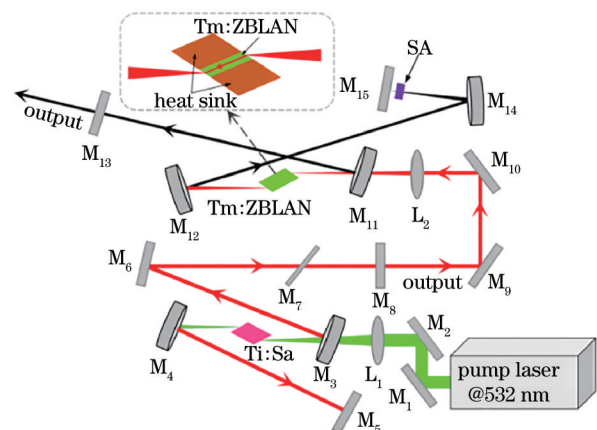


图 1 调 Q 锁模 Tm:ZBLAN 激光器的实验装置图
Fig. 1 Experimental setup of Q-switched mode-locked Tm:ZBLAN laser

在 30% 左右。这种薄片状介质加上快速紫铜冷却装置,有效降低了玻璃介质的热积累,避免了由玻璃介质热积累造成的脆裂。

饱和吸收体(SA)为德国BATOP公司生产的透射式GaAs-SESAM,其调制深度为0.6%,弛豫时间为10 ps。利用激光传输ABCD矩阵模拟振荡光斑,可以计算出激光增益介质的最小光腰半径为30 μm,SESAM位置处的光腰半径约为130 μm。实验前首先测试了Tm:ZBLAN对不同波长(740~844 nm)激光的吸收特性,结果如图2所示。从图2可以看出,Tm:ZBLAN介质在793 nm中心波长处的吸收最强,故选择793 nm钛宝石激光器作为抽运源,该中心波长光谱的半峰全宽为1.2 nm,最大功率为2 W。

3 分析与讨论

在不同的运转状态下,激光介质Tm:ZBLAN对泵浦光的吸收存在显著差异,泵浦吸收功率随泵浦注入功率的变化曲线如图3(a)所示。当激光器处于非运转状态时,Tm:ZBLAN的吸收效率为

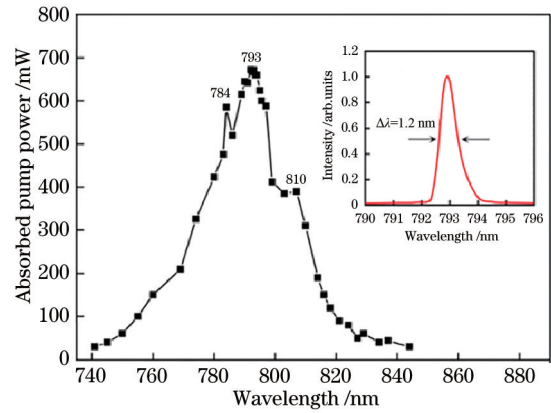


图2 Tm:ZBLAN的吸收光谱
Fig. 2 Absorption spectra of Tm:ZBLAN

57.0%;当激光器处于连续光运转状态时,分别选用透过率为1.5%、3%和5%的输出镜,Tm:ZBLAN的吸收效率相对于无激光运转时分别提升到60.6%、60.0%和59.8%,吸收效率相差不大。随后在腔内引入SESAM,Tm:ZBLAN在调Q锁模运转状态下的吸收效率略微下降到59.3%。

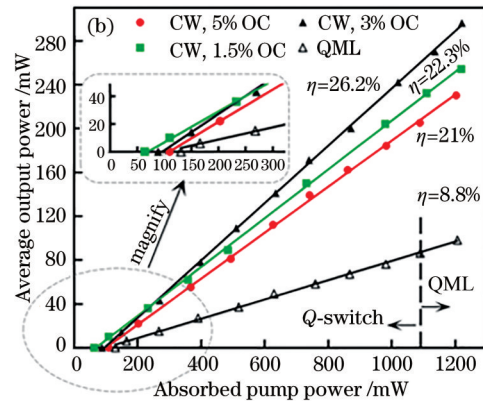
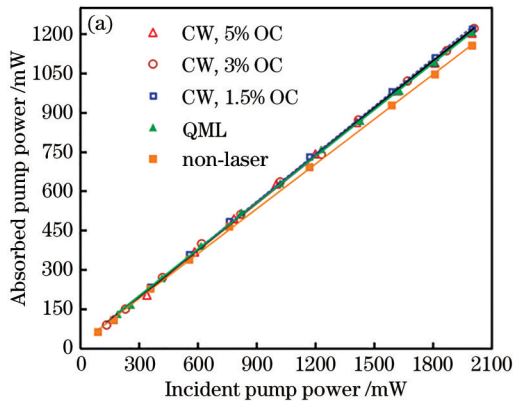


图3 激光器输出性能。(a)在连续、调Q锁模和非激光运转下Tm:ZBLAN的吸收效率;(b)连续和锁模运转下输出功率随吸收泵浦功率的变化曲线

Fig. 3 Laser output performance. (a) Absorption efficiencies of Tm:ZBLAN under continuous wave (CW), Q-switched mode-locked (QML), and non-laser operation; (b) curves of average output power changed with absorbed pump power under CW and QML operation

当输出透过率不同时,Tm:ZBLAN激光器在连续和锁模运转下的输出特性如图3(b)所示。当腔内连续光运转时:1.5%输出镜对应的出光阈值为64 mW,斜率效率为22.3%,最高输出功率为254 mW;3%输出镜对应的出光阈值为89 mW,斜率效率为26.2%,最高输出功率为296 mW;5%输出镜对应的出光阈值为110 mW,斜率效率为21.0%,最高输出功率为230 mW。计算得出,在1.2 W最大功率泵浦下,1.5%、3%和5%输出镜对

应的腔内最大功率分别为16.9 W、9.8 W和4.6 W,在相同腔型下SA位置处的光腰半径相同。显然,选用透过率为1.5%的输出镜可在SA表面得到最大的腔内功率密度,最有利于实现锁模运转。因此,锁模实验中首先选用1.5%输出镜,当腔内插入SA后,出光阈值增大到131 mW;当吸收泵浦功率大于1.09 W时,输出功率为86 mW,对应SESAM的功率密度约为105.9 μJ/cm²;激光进入稳定的调Q锁模运转后,最高输出功率为98 mW,

表 1 实验详细数据

Table 1 Detailed data in the experiment

Laser operating condition	Transmittance of output mirror / %	Crystal absorption efficiency / %	Light threshold / mW	Slope efficiency / %	Average power / mW
CW	1.5	60.6	64	22.3	254
CW	3	60.0	89	26.2	296
CW	5	59.8	110	21.0	230
QML	1.5	59.3	131	8.8	98
Non-laser	—	57.0	—	—	—

斜率效率为 8.8%。在连续和锁模运转下具体的实验数据见表 1。

由于玻璃基质的导热性差,机械强度低,在高功率泵浦过程中很容易碎裂,这主要是局部受热没有得到及时传递导致的。为了解决该问题,设计了特殊的板条薄片散热结构,使 Tm:ZBLAN 的厚度仅为 2 mm,通过上下表面冷却的紫铜快速散热,避免了由热积累造成的局部膨胀碎裂和由热透镜效应造成的光束质量变差。该板条薄片散热结构的。具体设计见图 1 的插图,该结构主要将 Tm:ZBLAN 设计为板条薄片结构,这样的设计可以加速内部的热传导,使激光介质横截面的热量分布均匀,避免了热量积聚。

利用光谱分析仪(AvaSpec-NIR256-2.5TEC)测量得到的调 Q 锁模运转状态下的典型激光光谱见图 4,光谱的中心波长为 2059 nm,半峰全宽(FWHM)为 15 nm,由于中心波长远离水分子吸收峰,避免了由空气中水分子扰动造成的锁模不稳定现象。实验中采用美国 EOT 公司生产的 ET-5000 快速光电二极管连接 RIGOL 公司生产的 500 MHz 的数字示波器(DS4054),测量得到调 Q 锁模脉冲序列。98 mW 最大输出功率时得到的锁模脉冲序列如图 5 所示,扫描时间分别为 1 ms/div、20 μ s/div、2 μ s/div 和 10 ns/div。

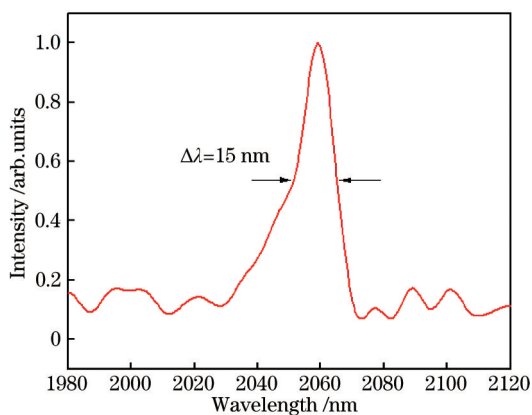


图 4 调 Q 锁模运转状态下激光器的发射光谱

Fig. 4 Emission spectrum of QWL

从锁模脉冲序列可以看到,调 Q 包络脉冲宽度为 6 μ s,重复频率为 19.23 kHz,调 Q 包络下脉冲的重复频率为 102 MHz,经计算包络中锁模脉冲宽度约为 800 ps^[11],最大单脉冲能量为 0.96 nJ。通过计算可以得到在误差允许范围内对应于本实验的谐振腔长为 1.46 m,所测得的重复频率与计算结果一致。

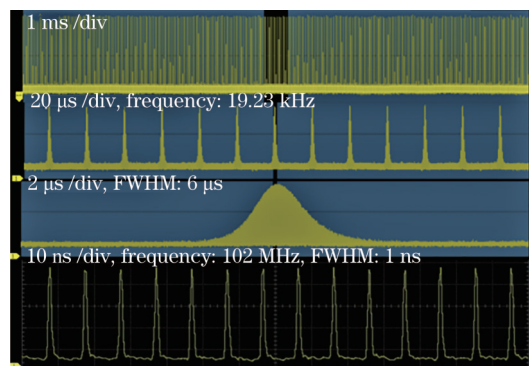


图 5 不同扫描时间下的锁模脉冲序列。

Fig. 5 Mode-locked pulse trains recorded in 1 ms, 20 μ s, 2 μ s, and 10 ns per division

4 结 论

选用典型的 X 型谐振腔,通过采用薄片设计的激光介质,实现了 Tm:ZBLAN 固体激光器的连续和被动调 Q 锁模运转。实验中首先将可调谐的掺钛蓝宝石激光器作为泵浦源,测试了 Tm:ZBLAN 对中心波长在 740~844 nm 范围内不同波长激光的吸收特性,最终选用 793 nm 钛宝石激光器作为 Tm:ZBLAN 的抽运源;其次,分析了 Tm:ZBLAN 在运转和非运转情况下的泵浦光吸收效率,非运转情况下 Tm:ZBLAN 的吸收效率为 57.0%,运转情况下 Tm:ZBLAN 的吸收效率在 59.3%~60.6%;最后,分别选用透过率为 1.5%、3% 和 5% 的输出镜,在实验上研究了 Tm:ZBLAN 激光连续输出下的激光阈值、斜率效率、腔内功率和最高输出功率,最终选用透过率为 1.5% 的输出镜,将透射式 GaAs-SESAM

作为锁模元件,当吸收泵浦功率大于 1.09 W 时,实现了稳定的调 Q 锁模运转,最大输出功率为 98 mW,调 Q 包络脉冲宽度为 6 μ s,重复频率为 19.23 kHz,调 Q 包络下脉冲的重复频率为 102 MHz,脉冲宽度约为 800 ps,最大单脉冲能量为 0.96 nJ。下一步将采用合适的色散补偿和更高的泵浦功率,期望实现 Tm:ZBLAN 固体激光器的连续锁模运转。

参 考 文 献

- [1] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho³⁺-doped fluoride fiber laser at 3 μ m and 2 μ m[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10770.
- [2] Li H N, Zhang D C, Zhu J F, et al. Nanosecond mid-infrared tunable parametric laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1114002.
李浩宁, 张大成, 朱江峰, 等. 纳秒中红外可调谐参量激光研究[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1114002.
- [3] Kieleck C, Berrou A, Donelan B, et al. 6.5 W ZnGeP₂ OPO directly pumped by a Q-switched Tm³⁺-doped single-oscillator fiber laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1101-1104.
- [4] Cho W B, Schmidt A, Yim J H, et al. Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μ m using a carbon nanotube saturable absorber[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 11007-11012.
- [5] Li D Z, Kong L C, Xu X D, et al. Spectroscopy and mode-locking laser operation of Tm:LuYO₃ mixed sesquioxide ceramic[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24416-24425.
- [6] Zhao Y G, Wang L, Pan Z B, et al. Sub-60-fs pulse generation from a SWCNT mode-locked Tm:LuYO₃ ceramic laser at 2045 nm[C]//Advanced Solid State Lasers 2019, September 29–October 3, 2019, Vienna, Austria. Washington, D.C.: OSA, 2019: ATu5A.2.
- [7] Luan C, Yang K, Zhao J, et al. Diode-pumped mode-locked Tm:LuAG laser at 2 μ m based on GaSb-SESAM[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 839-842.
- [8] Wang Y C, Xie G Q, Xu X D, et al. SESAM mode-locked Tm:CALGO laser at 2 μ m[J]. Optical Materials Express, 2015, 6(1): 131.
- [9] Zhao Y G, Wang Y C, Chen W D, et al. 67-fs pulse generation from a mode-locked Tm, Ho:CLNGG laser at 2083 nm[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 1922-1928.
- [10] Wang Y C, Chen W D, Mero M, et al. Sub-100 fs Tm: MgWO₄ laser at 2017 nm mode locked by a graphene saturable absorber[J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3076-3079.
- [11] Ling W J, Sun R, Chen C, et al. Passively Q-switched mode-locked Tm:LuAG laser with reflective MoS₂ saturable absorber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0808002.
令维军, 孙锐, 陈晨, 等. 基于反射式 MoS₂ 可饱和吸收体调 Q 锁模 Tm:LuAG 激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0808002.
- [12] Sun R, Chen C, 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.
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.
- [13] Ling W J, Xia T, Dong Z, et al. Passively mode-locked Tm, Ho:LLF laser at 1895 nm[J]. Journal of Optics, 2019, 48(2): 209-213.
- [14] Ling W J, Xia T, Dong Z, et al. 1.91 μ m passively continuous-wave mode-locked Tm:LiLuF₄ laser[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 364-367.
- [15] Walsh B M, Barnes N P. Comparison of Tm:ZBLAN and Tm:silica fiber lasers; spectroscopy and tunable pulsed laser operation around 1.9 μ m[J]. Applied Physics B, 2004, 78(3/4): 325-333.
- [16] Liu X, Yang K, Zhao S, et al. Growth and lasing performance of a Tm, Y:CaF₂ crystal[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2567-2570.
- [17] Tokurakawa M, Sagara H, Tünnermann H. All-normal-dispersion nonlinear polarization rotation mode-locked Tm:ZBLAN fiber laser[J]. Optics express, 2019, 27(14): 19530-19535.
- [18] Jiang X T, Gross S, Zhang H, et al. Bismuth telluride topological insulator nanosheet saturable absorbers for q-switched mode-locked Tm:ZBLAN waveguide lasers[J]. Annalen der Physik, 2016, 528(7/8): 543-550.
- [19] Nomura Y, Fuji T K. Sub-50-fs pulse generation from thulium-doped ZBLAN fiber laser oscillator[J]. Optics Express, 2014, 22(10): 12461-12466.
- [20] Xu H L, Jiang Z K. Optical properties of Tm³⁺-doped fluorozirconate glass[J]. Physics Letters A, 2002, 299(1): 85-88.
- [21] Li C X, Huang L L, Fang D W. Spectral characteristic parameters of Tm₃₊ ion in glass[J]. Journal of China Institute of Metrology, 2002, (1): 36-39.
李晨霞, 黄莉蕾, 方达伟. Tm₃₊ 离子在 ZBLAN 玻璃中的光谱特征[J]. 中国计量学院学报, 2002 (1): 36-39.