

2017 nm 和 2029 nm 双波长调 Q 锁模 Tm:LuAG 激光器

孙锐^{1,2}, 陈晨^{1,2}, 令维军^{1*}, 董忠^{1**}, 张明霞¹, 康翠萍², 张亚妮^{2,3}, 许强²

¹天水师范学院激光技术研究所, 甘肃 天水 741001;

²宝鸡文理学院物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016;

³陕西科技大学文理学院, 陕西 西安 710021

摘要 采用双壁碳纳米管可饱和吸收体为锁模启动元件, 在 Tm:LuAG 激光器中实现了输出波长分别为 2017 nm 和 2029 nm 的双波长被动调 Q 锁模运转。该实验装置以可调谐掺钛蓝宝石激光器为抽运源, 选用透过率为 3% 的输出耦合镜, 当吸收功率大于 2292 mW 时, 激光运转进入稳定调 Q 锁模状态。最大吸收抽运功率达到 6.7 W 时, 调 Q 锁模输出功率为 1.28 W, 斜效率为 22.39%, 锁模脉冲的重复频率为 102 MHz, 对应的单脉冲能量为 12.55 nJ。

关键词 激光器; Tm:LuAG 激光器; 可饱和吸收体; 被动调 Q 激光器; 双波长

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1214004

Dual-Wavelength Passively Q-Switched Mode-Locked Tm:LuAG Laser Operating at 2017 nm and 2029 nm

Sun Rui^{1,2}, Chen Chen^{1,2}, Ling Weijun^{1*}, Dong Zhong^{1**}, Zhang Mingxia¹,
Kang Cuiping², Zhang Yani^{2,3}, Xu Qiang²

¹Institute of Laser Technology, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741001, China;

²Institute of Physics and Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts and Sciences,
Baoji, Shaanxi 721016, China;

³School of Arts and Sciences, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract By employing double-walled carbon nanotubes as a saturable absorber to start mode locking, we experimentally demonstrate dual-wavelength operation of a passively Q-switched, mode-locked (QML) Tm:LuAG bulk laser at the wavelengths of 2017 nm and 2027 nm. Herein, the laser is pumped by a wavelength-tunable Ti:sapphire solid-state laser, and when the absorbed pump power is greater than 2292 mW, the laser enters a stable QML state of operation. By using an output coupler with transmittance of 3%, when the absorbed pump power reaches 6.7 W, the QML output power is 1.28 W, corresponding to a slope efficiency of 22.39%. The repetition rate is 102 MHz, which corresponds to a single-pulse energy of 12.55 nJ.

Key words lasers; Tm:LuAG lasers; saturable absorber; passively Q-switched lasers; dual-wavelength

OCIS codes 140.3295; 140.3380; 140.3540

1 引 言

双波长锁模激光器在差频产生相干太赫兹光方面具有广阔的应用前景, 在光通信、激光雷达、温度传感等方面也有潜在应用前景^[1-4]。相较于 1 μm 波段的激光器, 2 μm 激光的频率更接近太赫兹频

率, 所以波长较长的 2 μm 双波长激光器在产生相干太赫兹辐射方面具有更高的转换效率。2 μm 双波长连续光^[5]和调 Q 激光^[6]均已有广泛报道。

太赫兹相干光抽运源要想获得更短的脉冲和更高的峰值功率时, 选择 2 μm 双波长锁模激光器就是一个重要的获取途径。近年来, 产生 2 μm 波段

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-08-22; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(11774257, 61564008, 11647008, 11504416)、陕西省国际科技合作与交流项目(2018KW-016)、宝鸡市重大科技专项计划项目(2015CXNL-1-3)、天水市科技支撑计划自然科学基金(2018-FZJHK-2704)

* E-mail: wjlingts@sina.com; ** E-mail: dz0212@foxmail.com

超短脉冲的一个热门研究方向,通过在激光腔内引入可饱和吸收材料作为锁模启动元件获得超短脉冲输出。已有多种材料如半导体可饱和吸收镜(SESAM)、石墨烯(Graphene)、过渡金属二卤化物(TMD)、碳纳米管(CNT)等均被证实可以作为锁模启动元件实现激光器的被动锁模。SESAM的使用相对较广,但其制造工艺相对复杂,造价昂贵^[7-8]。目前,虽然多种二维材料可以实现 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 波段的激光器锁模运转^[9-14],但存在 $2\ \mu\text{m}$ 波段的吸收效率较低,对 $2\ \mu\text{m}$ 光的调制能力受限以及制作困难等问题,因此寻找新的可饱和吸收材料非常有必要。

近年来,具有独特性质的新型纳米材料作为激光锁模元件获得了许多喜人的成果,在这些材料中双壁碳纳米管(DWCNT)以其低成本、易制备、化学性能稳定和宽带吸收等优点,受到广泛关注。目前,已有一些基于单壁碳纳米管的 $2\ \mu\text{m}$ 超快固体激光研究^[15-17],如Liu等^[15]在 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激光器中实现了最大功率为762 mW的单壁碳纳米管调Q锁模输出。但DWCNT在 $2\ \mu\text{m}$ 固体激光器锁模的研究鲜有报道,其中2012年Qu等^[18]在 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激光器中通过DWCNT实现了调Q锁模运转,最大锁模输出功率为375 mW;2018年,本研究组在 $\text{Tm},\text{Ho}:\text{LLF}$ 激光器中将DWCNT作为锁模启动元件,获得了最大输出功率为234 mW的低阈值调Q锁模运转^[19]。

提拉法生长的晶体 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuAG)是一种具有优良化学辐射稳定性、抗冲击性以及良好热传递性能的激光增益介质基质材料。对于 Tm^{3+} 掺杂晶体,通常需要较高的掺杂浓度以确保相邻离子间有效的交叉弛豫过程,但高掺杂浓度势必导致晶体的热导率降低,由于 Tm^{3+} 和 Y^{3+} 离子之间存在显著的分子质量差异,因此热导率随掺杂浓度的增大而降低的现象在常见的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)晶体中尤为明显。利用 Lu^{3+} 取代YAG晶体中的 Y^{3+} 离子可获得一种石榴石晶体LuAG,由于 Tm^{3+} 和 Lu^{3+} 的离子半径和质量均相似,可在高掺杂浓度下有效抑制热导率降低,因此LuAG拥有较高的导热系数^[20],有利于 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 在较高功率下运转。自2009年 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 在室温下实现连续光运转以来^[21],围绕该晶体相继产生了一些成果:2012年,Chen等^[22]通过声光开关实现了 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 晶体50 Hz的调Q运转,脉冲宽度为293 ns;2015年,Feng等^[23]使用单壁碳纳米管实现了 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 晶体405 ns脉冲宽度的调Q运转,之后该研究组通过

SESAM实现了 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 晶体38 ps的连续锁模运转^[24]。综上所述,如何使用 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 晶体实现更稳定且高效易得的锁模激光仍有待进一步研究。

本文基于传统的X型腔,抽运源为787 nm输出波长的可调谐掺钛蓝宝石激光器,采用DWCNT作为锁模启动元件,在 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 晶体中实现了稳定的输出光波长分别为2017 nm和2029 nm的双波长被动调Q锁模运转,采用透过率为3%的输出耦合镜,获得了最大功率为1280 mW的锁模输出,锁模脉冲重复频率为102 MHz,单脉冲能量为12.55 nJ,调制深度 $>90\%$ 。

2 实验装置

图1所示为实验采用的 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 被动调Q锁模激光实验装置。其中抽运源为可调谐掺钛蓝宝石激光器,输出光波长调谐范围为760-800 nm,最高输出功率为7 W;激光晶体为 Tm^{3+} 离子掺杂浓度(原子数分数)为4%的 $\text{Tm}:\text{LuAG}$ 晶体,787 nm为该晶体的一个吸收峰,本实验使用的晶体尺寸为 $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$,采用布儒斯特角切割晶体端面,可有效降低损耗;为了控制晶体运转时的热透镜效应,对激光晶体进行恒温冷却,将晶体用铝箔包裹并夹在专门设计的紫铜水冷夹中,水冷夹由 $12\ ^\circ\text{C}$ 恒温循环水冷却,控温精度 $\leq 0.2\ ^\circ\text{C}$;M1、M2分别为曲率半径为100 mm和75 mm的抽运镜(2000 nm, Layertec, 德国),其镀膜对抽运光的透过率 $>99\%$,对2000 nm范围波段的振荡光反射率 $>99.9\%$;DWCNT可饱和吸收体的损伤阈值约为 $1200\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$,为保证吸收体稳定运行且高于其损伤阈值,选择曲率半径为100 mm的M3平凹反射镜,对振荡光反射率 $>99.9\%$,将DWCNT可饱和吸收体置于M3焦点附近,表面光斑的半径约为 $122\ \mu\text{m}$;M4为平面反射镜;OC为输出耦合镜;L为焦距 $f=150\ \text{mm}$ 的聚焦透镜,对抽运光透过率 $>95\%$ 。利用ABCD矩阵模拟计算腔内振荡光,得到晶体中振荡光斑半径为 $59\ \mu\text{m}$,为了保证晶体在高功率运转下不被损坏,选用焦距为150 mm的聚焦透镜,抽运光在晶体处的聚焦光斑半径约为 $31\ \mu\text{m}$,抽运光与振荡光在晶体中的光斑大小比值接近0.5,理论上,抽运光斑与振荡光斑匹配较好,可以获得更高的输出效率以及更低的出光阈值^[25]。

3 实验结果分析与讨论

采用图1所示的光路设计获得的晶体吸收效率

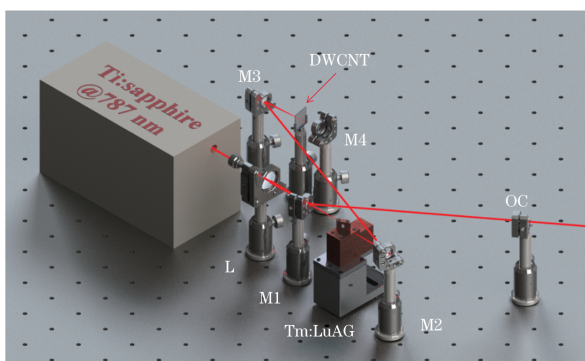


图 1 Tm:LuAG 双波长被动调 Q 锁模激光装置

Fig. 1 Schematic of dual-wavelength, passively Q-switched, mode-locked Tm:LuAG laser

如图2(a)所示。由实验结果可知,激光器处于连续光运转状态和非运转状态时,晶体对抽运光的吸收效率(η)分别为 89.82% 和 62.95%,激光晶体对抽运光的吸收效率存在明显差异;而当激光器进入调 Q 锁模运转状态时,晶体对抽运光的吸收效率下降至 83.69%,说明晶体的运转状态影响晶体对抽运光的吸收效率,谐振腔启动振荡时晶体的吸收效率增大。

从图 2(b)可以看出,激光器处于连续光运转状态,输出耦合镜的透过率为 1.5% 时,获得了最低

60 mW 的出光阈值,最大输出功率达到 1.56 W,斜效率(s)为 24.65%。从图 2(c)可以看出,在平面镜 M4 前插入 DWCNT 可饱和吸收体后,激光器出光阈值升高到 148 mW,当吸收抽运功率达到 1.85 W 时,实现了稳定的调 Q 锁模,此时输出功率为 0.2 W,DWCNT 可饱和吸收体表面光斑的半径约为 122 μm ,可饱和吸收体的表面功率密度约为 292.13 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,继续提高抽运功率,当抽运功率达到 7 W 时,获得的最大输出功率为 0.825 W,斜效率为 15.27%。当输出耦合镜的透过率为 3% 时,连续光出光阈值为 120 mW,最大输出功率为 2.25 W,斜效率为 34.02%,插入 DWCNT 可饱和吸收体后出光阈值升高到 174 mW,当吸收抽运功率达到 2.29 W 时,实现了稳定的调 Q 锁模运转,此时输出功率为 0.43 W,可饱和吸收体的表面功率密度约为 298.96 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$,输出的最高功率为 1.28 W,斜效率为 22.39%。当输出耦合镜的透过率为 5% 时,由于输出耦合镜引入较大腔内损耗,未获得稳定的调 Q 锁模运转。该实验结果表明,当输出耦合镜的透过率为 3% 时拥有更高的输出功率和斜效率,而当输出耦合镜的透过率为 1.5% 时拥有更低的腔内损耗和锁模启动阈值,因此在调 Q 锁模运转时可以根据

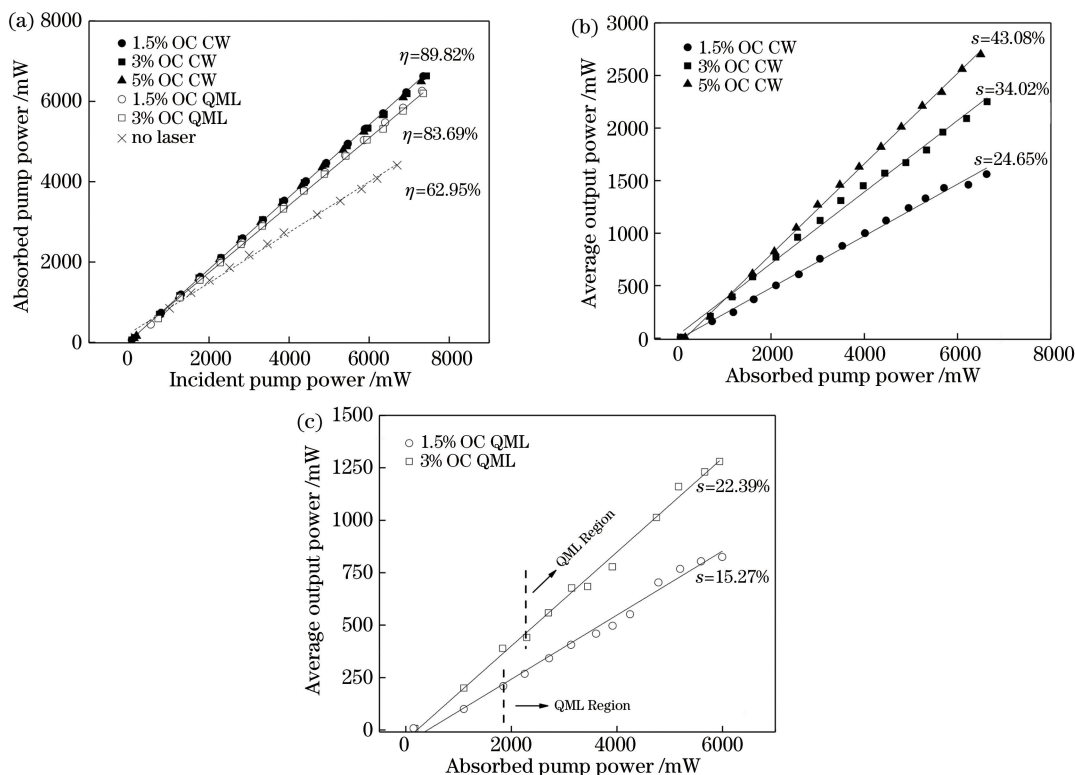


图 2 实验数据图。(a)晶体吸收效率;(b)连续光输出功率与吸收抽运功率的关系;(c)锁模输出功率与吸收抽运功率的关系
Fig. 2 Experimental data diagrams. (a) Absorptivity of crystal; (b) relationship between absorbed pump power and output power of continuous wave; (c) relationship between absorbed pump power and mode-locked output power

需要选择合适的输出耦合镜。当输出耦合镜的透过率为 1.5% 时,逐步提高抽运功率,调 Q 锁模输出波长没有明显改变,在两个输出波长中,2029 nm 的光强度相对较高,在逐步提高抽运功率的过程中,两个波长的相对强度比基本保持在 0.976 左右。

图 3 所示为使用 2 μm 光谱分析仪 (AvaSpecNIR256-2.5TEC, Avantes, 荷兰)采集获得的锁模脉冲信号的输出光谱,调 Q 锁模脉冲输出波长为 2017 nm 和 2029 nm。扫描时间分别为 1 ms、10 μs 和 20 ns 的调 Q 锁模脉冲序列如图 4 所示,探测器为 2 μm 快速光电二极管 (ET-5000, Electro-Optics Technology, Inc., 德国),测得的调 Q 包络宽度约为 22 μs ,调 Q 包络内的锁模脉冲频率为 102 MHz,与 1.5 m 腔长的锁模脉冲理论重复频率一致,且调制深度接近 100%。由于锁模信号较宽,自相关仪 (Pulse check 50, APE Angewandte Physik & Elektronik GmbH, 德国)无法测出完整的脉冲信号。利用示波器 (DS4024, RIGOL, 中国)测量锁模脉冲信号,参考文献[26]中公式 1 可以

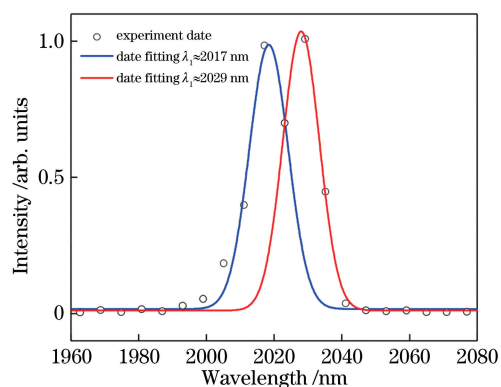


图 3 锁模脉冲信号的输出光谱

Fig. 3 Output spectra of Q-switched mode-locked laser

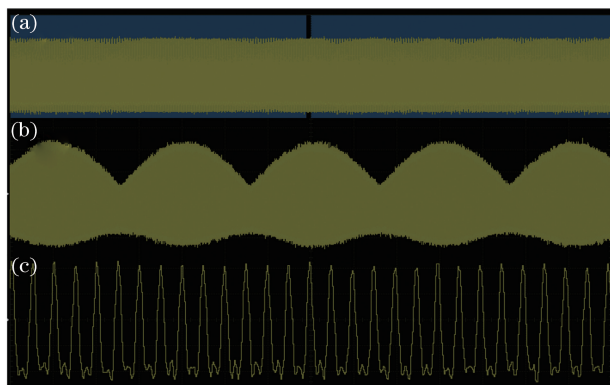


图 4 不同扫描时间下的锁模脉冲序列。(a) 1 ms;
(b) 10 μs ; (c) 20 ns

Fig. 4 Mode-locked pulse trains recorded at different scan time. (a) 1 ms; (b) 10 μs ; (c) 20 ns

计算出锁模脉冲的真实脉冲宽度约为 1.13 ns。

4 结 论

使用 DWCNT 可饱和吸收体作为锁模启动元件,实现了输出波长分别为 2017 nm 和 2029 nm 的 Tm:LuAG 激光晶体双波长调 Q 锁模运转,最大单脉冲能量为 12.55 nJ。当最大吸收抽运功率达到 6.7 W 时,对应的激光被动调 Q 锁模最大输出功率为 1.28 W,斜效率为 22.39%,锁模脉冲的重复频率为 102 MHz。实验结果表明,Tm:LuAG 晶体可以实现高功率双波长被动调 Q 锁模运转,DWCNT 在 2 μm 波段的高功率被动调 Q 锁模固体激光器方向具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Liu X M, Han D D, Sun Z P, *et al.* Versatile multi-wavelength ultrafast fiber laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2718.
- [2] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.* Passively Q-switched mode-locked low threshold Tm, Ho:LLF laser with a single walled carbon nanotubes saturable absorber [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(1): 014201.
令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于单壁碳纳米管调 Q 锁模低阈值 Tm, Ho:LiLuF₄ 激光器 [J]. 物理学报, 2018, 67(1): 014201.
- [3] Sorokin E, Sorokina I T, Mandon J, *et al.* Sensitive multiplex spectroscopy in the molecular fingerprint 2.4 μm region with a Cr²⁺:ZnSe femtosecond laser [J]. Optics Express, 2007, 15(25): 16540-16545.
- [4] Duan X M, Chen C, Ding Y, *et al.* Widely tunable middle infrared optical parametric oscillator pumped by the Q-switched Ho:GdVO₄ laser [J]. Chinese Physics Letters, 2018, 35(5): 054205.
- [5] Ling W, Xia T, Li K, *et al.* Dual-wavelength Tm, Ho:LLF laser operating at 1895 and 1950 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10964: 109642E.
- [6] Peng W J, Yan F P, Li Q, *et al.* 1.94 μm switchable dual-wavelength Tm³⁺ fiber laser employing high-birefringence fiber Bragg grating [J]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4601-4607.
- [7] Liu J J, Zhang C, Zhang Z, *et al.* 1886-nm mode-locked and wavelength tunable Tm-doped CaF₂ lasers [J]. Optics Letters, 2019, 44(1): 134-137.
- [8] Kong L C, Xie G Q, Yuan P, *et al.* Passive Q-switching and Q-switched mode-locking operations of 2 μm Tm:CLNGG laser with MoS₂ saturable absorber mirror [J]. Photonics Research, 2015, 3

- (2): A47-A50.
- [9] Loiko P A, Serres J M, Mateos X, *et al.* Passive Q-switching of Yb bulk lasers by a graphene saturable absorber[J]. Applied Physics B, 2016, 122: 105.
- [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] Wan H L, Cai W, Wang F, *et al.* High-quality monolayer graphene for bulk laser mode-locking near 2 μm [J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48: 11.
- [12] 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.
- [13] Wan H L, Cai W, Wang F, *et al.* High-quality monolayer graphene for bulk laser mode-locking near 2 μm [J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(1): 11.
- [14] 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.
- [15] Liu J, Wang Y G, Qu Z S, *et al.* 2 μm passive Q-switched mode-locked Tm³⁺:YAP laser with single-walled carbon nanotube absorber[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 960-962.
- [16] Martinez A, Fuse K, Xu B, *et al.* Optical deposition of graphene and carbon nanotubes in a fiber ferrule for passive mode-locked lasing [J]. Optics Express, 2010, 18(22): 23054-23061.
- [17] Cho W B, Schmidt A, Yim J H, *et al.* Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μm using a carbon nanotube saturable absorber [J]. Optics Express, 2009, 17(13): 11007-11012.
- [18] 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.
- [19] Ling W J, Xia T, Dong Z, *et al.* Low threshold 1895 nm mode-locked laser based on double wall carbon nanotubes [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0614001.
令维军, 夏涛, 董忠, 等. 基于双壁碳纳米管低阈值 1895 nm 锁模激光器 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0614001.
- [20] Wu C T, Ju Y L, Li Y F, *et al.* Diode-pumped Tm: LuAG laser at room temperature [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(6): 415-416.
- [21] Wu C T, Ju Y L, Wang Q, *et al.* Room temperature operation of single frequency Tm: LuAG laser end-pumped by laser-diode [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(10): 707-710.
- [22] Chen F, Wu C T, Ju Y L, *et al.* Diode-pumped Q-switched Tm: LuAG ring laser operation at room temperature [J]. Laser Physics, 2012, 22(2): 371-374.
- [23] Feng T L, Yang K J, Zhao S Z, *et al.* Efficient CW dual-wavelength and passively Q-switched Tm:LuAG lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1): 7-10.
- [24] Feng T, Yang K, Zhao J, *et al.* 1.21 W passively mode-locked Tm: LuAG laser [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 11819-11825.
- [25] Ling W J, Zheng J A, Jia Y L, *et al.* Theoretical study of the Ti: sapphire laser with low pump threshold [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(4): 1619-1623.
令维军, 郑加安, 贾玉磊, 等. 低阈值飞秒钛宝石激光器的理论研究 [J]. 物理学报, 2005, 54(4): 1619-1623.
- [26] Sun R, Chen C, Ling W J, *et al.* Watt-level passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with graphene oxide saturable absorber [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(10): 104207.
孙锐, 陈晨, 令维军, 等. 基于氧化石墨烯的瓦级调 Q 锁模 Tm:LuAG 激光器 [J]. 物理学报, 2019, 68(10): 104207.