

文章编号:1001-5078(2024)01-0010-07

· 综述与评论 ·

2 μm 大能量掺铥脉冲光纤激光器研究进展

郑博文, 杨超, 李永亮, 李鑫
(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 2 μm 波段掺铥脉冲光纤激光器目前可实现最高毫焦量级的能量输出, 对医疗、材料、通信等领域有重要意义。本文主要介绍近年来大能量掺铥光纤激光器系统研究的主要进展, 讨论大能量掺铥光纤激光器的技术类型和影响因素。在此基础上, 对大能量掺铥光纤激光器的研究前景进行展望。

关键词: 掺铥光纤激光器; 大能量; 调Q技术; 锁模技术; 增益开关技术

中图分类号: O436; TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.01.002

Research progress of 2 μm high energy thulium-doped pulsed fiber laser

ZHENG Bo-wen, YANG Chao, LI Yong-liang, LI Xin

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: At present, 2 μm thulium-doped pulsed fiber laser can achieve the highest energy output in the order of millijoule scale, which is of great significance for medical, materials, communications and other fields. In this paper, the main advances in the research of high energy thulium-doped fiber laser system in recent years are introduced, and the technical types and influencing factors of high energy thulium-doped fiber laser are discussed as well. On this basis, the research prospect of large energy thulium-doped fiber laser is prospected.

Keywords: thulium-doped fiber laser; high energy; Q-switch technology; mode-locking technology; gain switching technology

1 引言

光纤激光器具有转化效率高、体积小、结构紧凑、温度稳定性好等优点。铥离子发射光谱涵盖 1.7 ~ 2.1 μm , 是产生 2 μm 波段激光高效的工作物质。2 μm 波段激光对 CO_2 , H_2O , CH_4 等具有明显的吸收峰^[1-2], 在生物医疗、非金属材料加工、光通信等方面具有广泛的应用前景。在生物医疗领域, 水在 1.94 μm 处强烈吸收, 掺铥光纤激光器可作为激光手术刀使用, 可以快速凝固血液, 对组织损伤小, 止血效果好^[3-6]。2 μm 波段处在人眼安全波段, 用

2 μm 激光进行眼科手术时, 大大降低了手术风险。在非金属材料加工领域, 与近红外波段光纤激光器相比, 聚合物、透明玻璃等非金属材料对 2 μm 波段激光具有较强的吸收作用^[7], 因此 2 μm 波段掺铥光纤激光器有着近红外波段激光器无法取代的作用。在光通信领域, 2 μm 波段激光位于大气传输窗口, 2 μm 波段激光在大气中传输损耗较低, 2 μm 脉冲光纤激光器可以输出大能量激光, 能够在大气中进行远距离激光通信^[8-9]。2 μm 脉冲激光还可以作为中红外 3 ~ 5 μm 高效泵浦源^[10], 该波段可用于

基金项目: 吉林省自然科学基金项目 (No. 20220101359JC); 吉林省教育厅科学技术研究项目 (No. JJKH20210818KJ); 国家自然科学基金面上项目 (No. 62075018) 资助。

作者简介: 郑博文 (2000 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为光纤激光器设计。E-mail: zhengbw_2022@163.com

通讯作者: 杨超 (1982 -), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为高功率光纤激光器设计及应用。

E-mail: yc_super1@163.com

收稿日期: 2023-05-31; **修订日期:** 2023-07-20

光电对抗等国防领域。

相较于连续激光,脉冲激光的峰值功率高、热影响区小,因此具有更广阔的应用前景。目前 2 μm 掺铥光纤振荡器单脉冲能量能达到纳焦量级,想要继续提高单脉冲能量需要用到主控振荡器的功率放大器(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)结构。近些年,2 μm 脉冲光纤激光器获得的单脉冲能量不断增大。2011年,北京工业大学刘江课题组^[11]搭建了全光纤结构被动锁模的掺铥皮秒脉冲光纤激光器,使用环形腔结构设计,实验测出激光单脉冲能量为 8 nJ。2017年香港大学 Li Can^[12]课题组,设计了短波长基本锁模掺铥光纤激光器,随后使用光纤啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)技术。实现了激光单脉冲能量为 5.7 nJ 的激光脉冲。2019年,马来亚大学光子学研究中心 H. Ahmad^[13]课题组搭建出一种可饱和吸收体为 ZnO 的锁模掺铥光纤激光器。产生的单脉冲能量为 58.4 pJ。

综上所述可以看出目前在 2 μm 波段使用脉冲掺铥光纤振荡器来产生大能量脉冲是很困难的。我们可以使用调 Q、耗散孤子共振锁模、增益开关技术结合 MOPA 结构进行多级放大以达到毫焦量级的单脉冲能量输出。

2 DSR 锁模掺铥脉冲光纤激光器

锁模脉冲光纤激光器^[14-16]输出峰值功率高,但脉冲宽度窄,这就限制了锁模脉冲光纤激光器输出的单脉冲能量。但是利用耗散孤子共振^[17-19](Dissipative Soliton Resonance, DSR)这一理论设计出的 DSR 锁模脉冲光纤激光器可以输出大能量激光脉冲。耗散孤子与以往的高斯型脉冲不同,其脉冲形状与矩形相同,当泵浦功率不断增高,其脉冲幅值会保持稳定不变。这种孤子不易分裂,在理论上其脉冲能量可无限叠加。输出脉冲随着泵浦功率的增加而线性变宽,但是输出脉冲的峰值功率始终保持在一个水平,这会导致单脉冲能量一直增加,这是由于峰值功率箝位效应^[20](Peak Power Clamping, PPC)引起的。

2016年,深圳大学的赵俊清等^[21]在全异常色散的掺铥双包层光纤激光器中产生纳秒级耗散孤子共振(DSR),结构如图 1 所示,利用两级掺铥光纤(Thulium-doped Fiber, TDF)放大器将平均功率提高到 100.4 W。用非线性光纤环境(Nonlinear Opti-

cal Loop Mirror, NOLM)实现了 TDF 振荡器的 DSR 锁模。TDF 振荡器能提供持续时间 3.74 ~ 72.19 ns 的矩形脉冲,同时保持几乎相等的输出峰值功率(0.65 W)。两级放大器可以将脉冲扩展到相似的平均功率水平,但根据持续时间的不同,其峰值功率为 0.94 ~ 18.1 kW。TDF 主振荡器功率放大器系统可以提供 2 μm 波段全光纤激光源,脉冲持续时间和峰值功率可调。

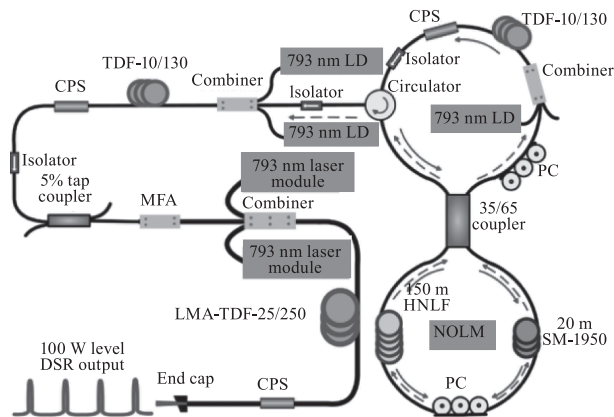


图 1 大功率 DSR 全光纤系统

Fig. 1 High-power DSR all-fiber system

2019年,深圳大学的郑志坚等^[22]搭建了在 DSR 下工作的全光纤 9 字腔锁模双包层掺铥光纤激光器。结构如图 2 和图 3 所示,用非线性放大环境技术(Nonlinear Amplification Loop Mirror, NALM)获得稳定的矩形脉冲。输出功率和脉冲能量通过三级 MOPA 系统进一步提高。在最大泵浦功率下,基于 MOPA 系统平均输出功率可达 104.3 W,脉冲能量为 0.33 J。

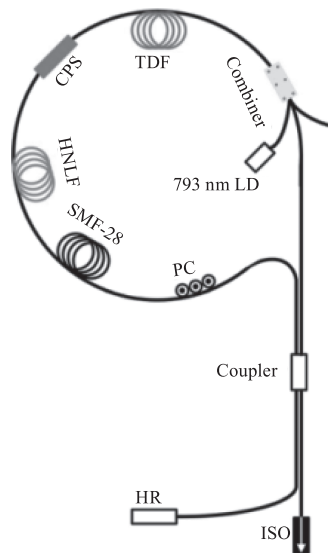


图 2 DSR 激光振荡器

Fig. 2 DSR laser oscillator

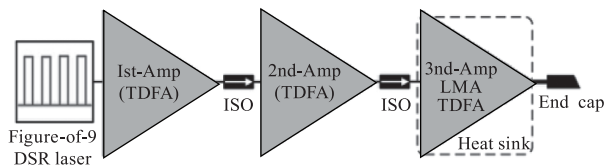


图 3 DSR 的 MOPA 原理图

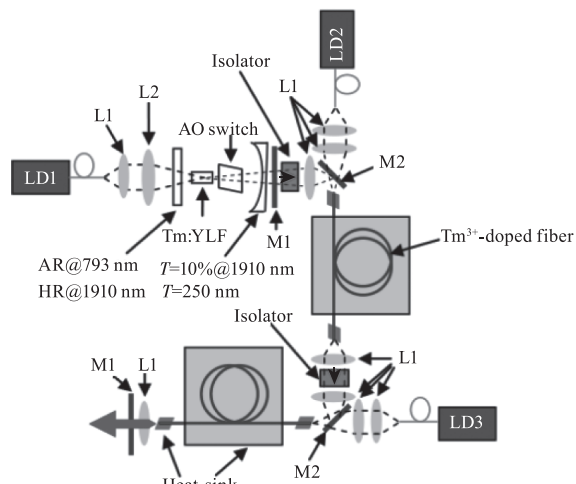
Fig. 3 MOPA schematic diagram of DSR

DSR 锁模属于被动锁模的一种,在锁模掺铈光纤激光器中,目前只有 DSR 锁模光纤激光器能输出毫焦量级的脉冲激光输出。其输出功率受到可用泵浦的影响,输出能量进一步提高需增大泵浦功率。

3 增益开关掺铈脉冲光纤激光器

增益开关^[23] (Gain-Switch) 技术通过对泵浦源电信号直接调制实现激光脉冲输出。增益开关掺铈脉冲光纤激光器后接放大结构可以输出大能量脉冲。

2010 年,上海光学精密机械研究所的唐玉龙等^[24] 基于增益开关技术,实验结构如图 4 所示。使用 Tm:YLF 晶体^[25] 激光器实现了两级掺 Tm³⁺ 光纤激光器脉冲激光输出。中心波长为 2020 nm、脉冲重复频率可从 500 Hz ~ 50 kHz 进行调谐,脉冲宽度可从 75 ns ~ 1 μs 进行调谐。最大脉冲峰值功率为 138 kW、最大脉冲能量超过 10 mJ。在一级放大系统中,峰值功率为 10 kW,最大脉冲能量为 4 mJ。在二级放大系统中,增加泵浦的功率直到端帽的端面被破坏。可以测得 2 μm 激光最大输出功率为 5.2 W,对应的脉冲能量为 10.4 mJ。

图 4 组合增益开关 Tm³⁺ 光纤激光器结构Fig. 4 Structure of combined gain-switched Tm³⁺-doped fiber laser

2013 年,国防科学技术大学的殷科等^[26-27] 基于增益开关技术搭建了全光纤结构掺铈二级 MOPA 激

光器,输出激光中心波长为 1958 nm、重复频率 10 kHz、脉冲宽度为 1.6 μs、单脉冲能量为 0.518 mJ。次年,基于增益开关技术结合两级掺铈光纤放大器对激光进行放大,输出激光中心波长为 1979.4 nm、重复频率 20 kHz、峰值功率高于 10 kW、脉冲宽度为 82 ns、单脉冲能量为 0.86 mJ。与上组实验进行对比脉宽减小的原因是其减小了增益光纤的长度、增大了二级放大中光纤纤芯面积、增大了泵浦源的总功率。

2015 年,国防科技大学的 Li Lei 等^[28] 采用大能量全光纤纳秒掺铈二级 MOPA 光纤激光器。实验结构如图 5 所示,种子振荡器是由 1550 nm 光纤激光器泵浦的线性偏振增益开关光纤激光器。在使用两级双包层光纤放大器以后,系统中心波长 2050 nm,为重复频率为 40 kHz 时,脉冲宽度为 100 ns、峰值功率为 10 kW、单脉冲能量为 1 mJ。

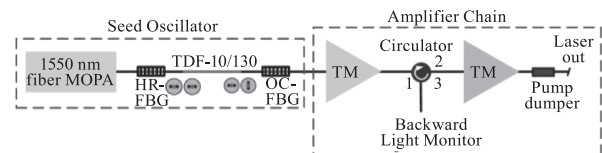


图 5 掺铈 MOPA 系统原理图

Fig. 5 The schematic diagram of Tm³⁺-doped MOPA system

2022 年,德国弗劳恩霍夫光电系统技术和图像开发研究所的 Dominik Lorenz 等^[29] 研制了 2047 nm 的脉冲保偏 (PM) 三级 MOPA 光纤激光器,实验如图 6 所示,在重复频率为 50 kHz 时,脉冲宽度为 50 ns、单脉冲能量为 396 μJ。

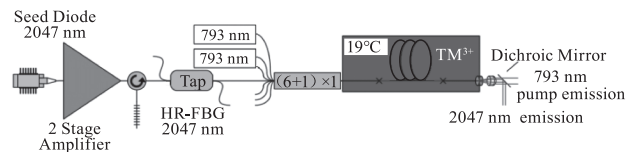


图 6 MOPA 结构图

Fig. 6 MOPA structure diagram

表 1 为增益开关掺铈脉冲光纤激光器近年来在 2 μm 波段的主要成就。增益开关脉冲掺铈光纤激光器结合 MOPA 结构可产生大能量激光脉冲。但是它还有些不足之处,增益开关光纤激光器的调制深度通常会受到限制、增益开关光纤激光器在切换状态时可能引入相位噪声会导致激光输出频率的不稳定性和相位漂移、增益开关光纤激光器通常需要较高的功率来实现快速切换和调制。这可能导致较高的功耗和热量产生,需要有效的热管理系统来保

持激光器的温度稳定、增益开关光纤激光器的设计和制造相对复杂,需要高度精确的组件和控制系统。这可能导致成本较高,不适用于某些应用场景、由于

增益开关光纤激光器的复杂性,其可靠性和使用寿命可能受到影响。特别是在高功率和快速切换的情况下,泵浦源的寿命可能会缩短。

表 1 大能量增益开关掺铥脉冲光纤激光器主要成果(大能量)

Tab. 1 Main achievements of high energy gain switch Tm³⁺ - doped pulsed fiber laser (high energy)

年份	工作方式	增益类型	光纤类型	重复频率/kHz	平均功率/W	波长/nm	单脉冲能量/mJ	脉冲宽度/μs	峰值功率/kW
2010 ^[24]	增益开关	非全光纤	非保偏	0.05 ~ 50	-	2020	> 10	75 ~ 1	138
2013 ^[26]	增益开关	全光纤	非保偏	10	5.18	1958	0.518	1.6	/
2014 ^[27]	增益开关	全光纤	非保偏	20	17.2	1979.4	0.86	82	/
2015 ^[28]	增益开关	全光纤	非保偏	40	40.5	2050	1	100	/
2022 ^[29]	增益开关	全光纤	保偏	50	19.8	2047	0.396	50	/

4 调 Q 脉冲掺铥光纤激光器

通常使用主动调 Q 技术^[30-32]和被动调 Q 技术^[33-35]来对调 Q 脉冲掺铥光纤激光器进行调制,主动调 Q 技术的周期与外加场的周期相同并且可以通过外加场进行调谐,其调谐范围通常来说比较大,激光脉冲的能量也比较大。被动调 Q 技术的周期与调 Q 晶体材料自身特性有关,通常不能调谐,脉冲能量比较小。

2003 年,英国曼彻斯特大学物理和天文学系激光光子学研究组 Ashraf F. El - Sherif 等^[36]首次报导掺铥光纤激光器中使用电光调 Q 技术获得脉冲激光。其重复频率为 70 Hz、最大峰值功率为 3.3 kW、脉冲宽度为 320 ns、单脉冲能量为 2.5 mJ。

2013 年,北京工业大学的刘江等^[37]报导了半导体可饱和吸收反射镜 (SESAM)^[38-40]被动调 Q 掺铥光纤激光器,使用两级全光纤结构掺铥光纤放大器。MOPA 系统中心波长为 1966 nm、脉冲宽度为 270 ns、单脉冲能量为 100 μJ。

2013 年,德国阿贝光子学中心的 Fabian Stutzki 等^[41]报导了一种高脉冲能量和高平均功率声光调 Q 掺 Tm³⁺ 光纤振荡器,实验装置如图 7 所示,振荡器产生重复频率为 13.9 kHz、脉宽为 15 ns、峰值功率超过 150 kW、单脉冲能量为 2.4 mJ。输出激光光谱在最高能量脉冲下会出现两个峰分别为 1850 nm 和 1900 nm。

2014 年,上海交通大学唐玉龙等^[42]报导了由声光调制器调制的窄带脉冲激光器泵浦的两级 2 μm 掺 Tm³⁺ 光纤放大器。激光中心波长为 1951 nm、重复频率为 50 kHz 时,峰值功率为 10 kW、单脉冲能量为 1 mJ。脉冲宽度可从几十 ns 调谐到几百 ns,光谱宽度

为 1.4 nm。

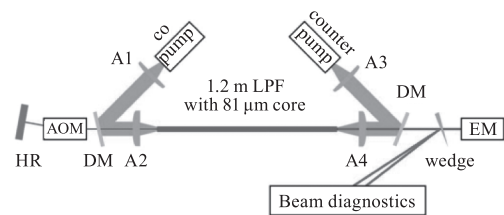


图 7 激光振荡器示意图

Fig. 7 Schematic diagram of laser oscillator

2018 年,美国中佛罗里达大学的 Ali Abdulfattah 等^[43]报导了一个 2 μm MOPA 光纤激光系统,实验装置如图 8 所示。振荡器是单模掺铥光纤,工作方式为声光调 Q。该系统脉冲宽度为 114 ns,中心波长为 1977 nm,产生了 700 μJ 的单脉冲能量。

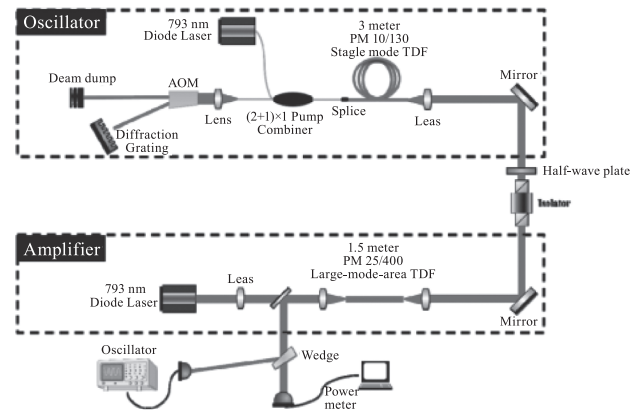


图 8 高能掺铥 MOPA 结构图

Fig. 8 High energy Tm³⁺ -doped MOPA structure diagram

2021 年,上海光学精密机械研究所的贺振兴等^[44]报导了一种基于声光 Q 技术的 2 μm 波段全光纤高功率脉冲全保偏掺铥光纤激光器。实验装置如图 9 所示,使用声光调制器来调制激光器,后接二级掺铥光纤放大器,获得了中心波长 2009.71 nm,

峰值功率为 2.1 kW、脉冲能量大于 204 μJ 。

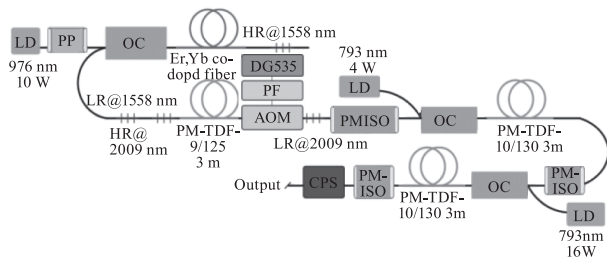


图 9 MOPA 结构示意图

Fig. 9 MOPA structure diagram

表 2 调 Q 掺铥脉冲光纤激光器主要成果

Tab. 2 Main achievements of Q-switched Tm^{3+} -doped pulsed fiber laser

年份	工作方式	增益类型	光纤类型	重复频率/kHz	平均功率/W	波长/nm	单脉冲能量/mJ	脉冲宽度/ns	峰值功率/kW
2003 ^[36]	电光调 Q	非全光纤	非保偏	0.07	/	2000	2.3	320	3.3
2013 ^[37]	被动调 Q	全光纤	非保偏	77 ~ 240	20	1966	0.1	270	/
2013 ^[41]	声光调 Q	非全光纤	非保偏	13.9	33	1850 ~ 1900	2.4	15	/
2014 ^[42]	声光调 Q	全光纤	非保偏	>50	/	1951	1	几十 ~ 几百	10
2018 ^[43]	声光调 Q	非全光纤	保偏	20	14	1977	0.7	114	/
2021 ^[44]	声光调 Q	全光纤	保偏	20	/	2009.71	0.24	97	2.1

5 总结与展望

在目前的研究中,由于锁模的机制,不易产生大能量的激光。DSR 锁模不同于其他的锁模技术,在理论上其脉冲能量可以达到无限叠加。在 DSR 锁模脉冲掺铥光纤激光系统中,多用 NOLM 和 NALM 作为可饱和吸收体,其损伤阈值高、环境稳定性高、易启动。

在增益开关光纤激光器系统中,尽管增益开关光纤激光器具有某些优势,但也存在一些技术限制和不足之处。这些限制需要在特定应用中进行考虑,并根据需求评估是否选择增益开关光纤激光器作为合适的实验方案。在调 Q 光纤激光器系统中,目前常用声光调 Q 技术获得大能量脉冲光,我们可以用声光调 Q 脉冲掺铥光纤激光器为种子源,后接功率放大系统继续对大能量脉冲光进行放大。近些年激光器光纤多选用 PM 光纤,与常规光纤相比,PM 光纤更易发生非线性效应,例如受激拉曼散射、受激布里渊散射,因此更难进行调制。可以通过增加光纤的线宽、减小增益光纤的长度、增加增益光纤的芯径、减少热负载等来减弱光纤非线性效应。

调 Q 脉冲掺铥光纤激光器能够产生毫焦量级的脉冲激光,但是在产生大能量激光的同时光纤内易产生非线性效应,实验时应多加注意。有些应用需要线偏振大能量光,所以光纤应选用保偏光纤。保偏光纤非线性效应阈值低于正常光纤更容易产生非线性效应。如何减小保偏光纤非线性效应带来的影响是目前研究的一个热点。表 2 为调 Q 脉冲掺铥光纤激光器近年来在 2 μm 波段的主要成就。

参考文献:

- [1] Willer U, Saraji M, Khorsandi A, et al. Near and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(7): 699 - 710.
- [2] Barria J B, Mammez D, Cadiou E, et al. Multispecies high-energy emitter for CO_2 , CH_4 , and H_2O monitoring in the 2 μm range [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6719 - 6722.
- [3] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al. 2 μm laser sources and their possible applications [M] // *Frontiers in guided wave optics and optoelectronics*. Intech Open, 2010: 472 - 500.
- [4] Fried N M, Murray K E. High-power thulium fiber laser ablation of urinary tissues at 1.94 μm [J]. *Journal of Endourology*, 2005, 19(1): 25 - 31.
- [5] Fried N M. Thulium fiber laser lithotripsy: an in vitro analysis of stone fragmentation using a modulated 110 watt thulium fiber laser at 1.94 μm [J]. *Lasers in Surgery and Medicine; the Official Journal of the American Society for Laser Medicine and Surgery*, 2005, 37(1): 53 - 58.
- [6] Hardy L A, Wilson C R, Irby P B, et al. Rapid thulium fiber laser lithotripsy at pulse rates up to 500 Hz using a

- stone basket [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 138 – 141.
- [7] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2095 – 2099.
- [8] Li Z, Heidt A M, Daniel J M O, et al. Thulium-doped fiber amplifier for optical communications at 2 μm [J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9289 – 9297.
- [9] Li Z, Heidt A M, Simakov N, et al. Diode-pumped wide-band thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800 – 2050 nm window [J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26450 – 26455.
- [10] Cheung E, Palese S, Injeyan H, et al. High power conversion to mid-IR using KTP and ZGP OPOs [C]//Advanced Solid State Lasers, 1999.
- [11] Liu Jiang, Cao Yi, Wang Pu. All-fiber passively mode-locked 2 μm thulium-doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 134. (in Chinese)
刘江, 曹懿, 王璞. 全光纤结构被动锁模 2 μm 掺铥光纤激光器 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 134.
- [12] Li C, Wei X, Kong C, et al. Fiber chirped pulse amplification of a short wavelength mode-locked thulium-doped fiber laser [J]. APL Photonics, 2017, 2(12): 121302.
- [13] Ahmad H, Samion M Z, Kamely A A, et al. Mode-locked thulium doped fiber laser with zinc oxide saturable absorber for 2 μm operation [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 142 – 148.
- [14] Ghosh A, Roy A S, Chowdhury S D, et al. All-fiber tunable ring laser source near 2 μm designed for CO₂ sensing [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 235: 547 – 553.
- [15] Latiff A A, Cheng X S, Rusdi M F M, et al. Molybdenum disulfide saturable absorber for eye-safe mode-locked fiber laser generation [J]. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2018, 27(1): 1850010.
- [16] Zhang Sheng. Orthogonal polarization and self-mode-locked output characteristics of 2 μm laser [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
张甦. 2 μm 激光器正交偏振及自锁模输出特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [17] Chang W, Ankiewicz A, Soto-Crespo J M, et al. Dissipative soliton resonances in laser models with parameter management [J]. JOSA B, 2008, 25(12): 1972 – 1977.
- [18] Chang W, Soto-Crespo J M, Ankiewicz A, et al. Dissipative soliton resonances in the anomalous dispersion regime [J]. Physical Review A, 2009, 79(3): 033840.
- [19] Grellu P, Chang W, Ankiewicz A, et al. Dissipative soliton resonance as a guideline for high-energy pulse laser oscillators [J]. JOSA B, 2010, 27(11): 2336 – 2341.
- [20] Yanqi G, Jiaolin L, Shumin Z, et al. Cavity-induced peak power clamping effect for gain-guided solitons in passively mode-locked fiber lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3533 – 3539.
- [21] Zhao J, Ouyang D, Zheng Z, et al. 100 W dissipative soliton resonances from a thulium-doped double-clad all-fiber-format MOPA system [J]. Optics Express, 2016, 24(11): 12072 – 12081.
- [22] Zheng Z, Ouyang D, Ren X, et al. 0.33 mJ, 104.3 W dissipative soliton resonance based on a figure-of-9 double-clad Tm-doped oscillator and an all-fiber MOPA system [J]. Photonics Research, 2019, 7(5): 513 – 517.
- [23] Tang Y, Li F, Xu J. High Peak-power gain-switched Tm³⁺-doped fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(13): 893 – 895.
- [24] Tang Y, Xu L, Yang Y, et al. High-power gain-switched Tm³⁺-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2010, 18(22): 22964 – 22972.
- [25] Schellhorn M. High-power diode-pumped Tm: YLF laser [J]. Applied Physics B, 2008, 91: 71 – 74.
- [26] Yin Ke, Yang Weiqiang, Zhang Bin, et al. High energy all-fiber based pulsed thulium-doped fiber laser at 2 μm [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1611 – 1612. (in Chinese)
殷科, 杨未强, 张斌, 等. 高能量全光纤 2 μm 掺铥脉冲光纤激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1611 – 1612.
- [27] Yin Ke, Yang Weiqiang, Zhang Bin, et al. 10 kW peak power high pulse energy all-fiber based thulium-doped fiber laser at 2 μm [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 7 – 8. (in Chinese)
殷科, 杨未强, 张斌, 等. 10 kW 峰值功率高脉冲能量全光纤结构 2 μm 掺铥光纤激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 7 – 8.
- [28] Li L, Zhang B, Yin K, et al. 1 mJ nanosecond all-fiber thulium-doped fiber laser at 2.05 μm [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18098 – 18105.
- [29] Lorenz D, Romano C, Panitzek D, et al. Three-stage MOPA 2 μm fiber laser for ZGP OPO pumping [C]//Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XXI. SPIE, 2022, 11985: 106 – 111.
- [30] Tang Y, Xu J. Effects of excited-state absorption on self-

- pulsing in Tm^{3+} -doped fiber lasers[J]. *JOSA B*, 2010, 27(2): 179 – 186.
- [31] Frith G, Lancaster D G, Jackson S D. 85 W Tm^{3+} -doped silica fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(12): 1.
- [32] Jackson S D. Cross relaxation and energy transfer upconversion processes relevant to the functioning of 2 μm Tm^{3+} -doped silica fibre lasers [J]. *Optics Communications*, 2004, 230(1–3): 197 – 203.
- [33] Liu Qiang, Gong Mali, Yan Ping, et al. Passively Q-switched eye-safe intracavity optical parametric oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(2): 113 – 116. (in Chinese)
柳强, 巩马理, 闫平, 等. 被动调 Q 人眼安全内腔光学参量振荡器 [J]. *中国激光*, 2003, 30(2): 113 – 116.
- [34] Duan Yusheng, Huo Yujing, He Shufang. Research on passively Q-switched laser with active control [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2008, 37(1): 5 – 10. (in Chinese)
段玉生, 霍玉晶, 何书芳. 可主动控制的被动调 Q 激光器的研究 [J]. *人工晶体学报*, 2008, 37(1): 5 – 10.
- [35] Zhu Changhong, Li Zhengjia, Chen Shushu, et al. Study on the pulse period of passively Q-switched laser [J]. *Laser Technology*, 2000, (2): 85 – 89. (in Chinese)
朱长虹, 李正佳, 陈殊殊, 等. 被动调 Q 激光脉冲周期的研究 [J]. *激光技术*, 2000, (2): 85 – 89.
- [36] El-Sherif A F, King T A. High-energy, high-brightness Q-switched Tm^{3+} -doped fiber laser using an electro-optic modulator [J]. *Optics Communications*, 2003, 218(4–6): 337 – 344.
- [37] Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively Q-switched nanosecond-pulsed thulium-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 31 – 35. (in Chinese)
刘江, 王璞. 高功率被动调 Q 纳秒脉冲掺铥光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 31 – 35.
- [38] Kivisto S, Hakulinen T, Guina M, et al. Tunable Raman soliton source using mode-locked Tm-Ho fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(12): 934 – 936.
- [39] Wang Q, Geng J, Jiang Z, et al. Mode-locked Tm-Ho-co-doped fiber laser at 2.06 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 682 – 684.
- [40] Kivistö S, Koskinen R, Pajaste J, et al. Passively Q-switched Tm^{3+} , Ho^{3+} -doped silica fiber laser using a highly nonlinear saturable absorber and dynamic gain pulse compression [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 22058 – 22063.
- [41] Stutzki F, Jansen F, Jauregui C, et al. 2.4 mJ, 33 W Q-switched Tm-doped fiber laser with near diffraction-limited beam quality [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 97 – 99.
- [42] Tang Y, Li X, Yan Z, et al. 50-W 2- μm nanosecond all-fiber-based thulium-doped fiber amplifier [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 537 – 543.
- [43] Abdulfattah A, Sincore A, Bradford J, et al. 700 μJ , 100 ns, 20 kHz pulses from a 1.5 m Thulium-doped fiber amplifier [C]// *Laser Technology for Defense and Security XIV*. SPIE, 2018, 10637: 81 – 86.
- [44] He Z, Yu T, Meng J, et al. 2 μm band pulsed all-PM thulium-doped fiber laser based on the acousto-optic Q-switching [C]// *Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications*. SPIE, 2021, 11763: 1208 – 1213.