

激光与光电子学进展

2 μm 波段纳秒掺铥光纤激光器研究进展任俊杰^{1,2,3}, 贺振兴^{1,3}, 余婷^{1,2,3}, 叶锡生^{1,2,3*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率光纤激光技术实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;³中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

摘要 调 Q 技术是掺铥光纤激光器获得纳秒脉冲激光输出的主要方式。本文首先介绍主动调 Q、被动调 Q 和增益调制这三种调 Q 技术在掺铥光纤振荡器中的应用现状, 对比和分析三种技术的优点与不足。其次, 介绍窄脉宽、高平均功率、大脉冲能量纳秒掺铥光纤放大器的现有典型研究结果和面临的技术瓶颈, 并从热管理、非线性效应抑制、放大自发辐射抑制三个方面进行了优化措施分析。最后, 对纳秒掺铥光纤振荡器和放大器的技术发展趋势进行展望。

关键词 激光器; 纳秒掺铥光纤激光器; 主动调 Q; 被动调 Q; 增益调制

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220665

Research Progress of 2 μm Band Nanosecond Thulium-Doped Fiber LaserRen Junjie^{1,2,3}, He Zhenxing^{1,3}, Yu Ting^{1,2,3}, Ye Xisheng^{1,2,3*}¹Laboratory of High Power Fiber Laser Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Q-switching is the main way for thulium-doped fiber lasers to generate nanosecond pulses. First, the application status of active Q-switching, passive Q-switching, and gain switching in thulium-doped fiber oscillators is introduced, and the advantages and disadvantages of the three technologies are compared and analyzed. Second, the typical research results and technical bottlenecks of nanosecond thulium-doped fiber amplifiers with narrow pulse width, high average power, and high pulse energy are introduced, and the optimization measures are analyzed from three aspects: thermal management, nonlinear effect suppression, and amplified spontaneous emission suppression. Finally, the technology development trend of nanosecond thulium-doped fiber oscillator and amplifier is prospected.

Key words lasers; nanosecond thulium-doped fiber laser; active Q-switching; passive Q-switching; gain switching

1 引言

相比于传统的脉冲固体激光器, 脉冲光纤激光器结构简单紧凑、稳定性好、散热效率高。掺铥光纤具有较宽的增益谱, 可实现 1.7~2.1 μm 波段激光输出。1988 年, Hanna 等^[1]首次使用 797 nm 染料激光器泵浦掺铥光纤, 获得了波长 1.88~1.96 μm 的连续激光输出, 并于 1990 年先后实现了波长 1780~2056 nm 的可调谐激光输出^[2]和 1 W 量级的激光功率指标^[3]。之后,

在连续掺铥光纤激光器功率快速增长的同时, 研究人员也开始对脉冲掺铥光纤激光器进行研究。1993 年, Myslinski 等^[4]采用钛宝石激光器作为泵浦源, 基于声光调 Q 技术首次获得了波长 1.92 μm 的纳秒脉冲掺铥光纤激光输出。1995 年, Nelson 等^[5]采用非线性偏振旋转(NPR)锁模首次实现了波长 1.8~1.9 μm 的飞秒脉冲掺铥光纤激光输出。

2 μm 波段纳秒脉冲激光在实际应用中有着诸多优点: 在 3~5 μm 波段超连续谱产生方面, 采用 2 μm

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-03-28; 录用日期: 2022-04-14; 网络首发日期: 2022-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(62105268, 62005300)

通信作者: *xsye@siom.ac.cn

波段脉冲激光泵浦氟化物(ZBLAN)光纤是目前最常用的方案,与飞秒和皮秒脉冲泵浦源相比,纳秒脉冲泵浦源容易实现较高的占空比,更有利于超连续谱平均功率的提升^[6];在大气探测方面,采用 2 μm 单频脉冲激光作为光源的激光雷达可以对大气中水蒸气含量进行精确测量,纳秒脉冲在满足脉宽要求的前提下拥有比飞秒和皮秒脉冲更高的脉冲能量,能够实现更远的探测距离^[7];在中红外激光非线性频率转换方面,2 μm 脉冲光纤激光泵浦的光参量振荡器(OPO)能实现 3~5 μm 范围内高效率的中红外激光输出,纳秒激光泵浦源在满足峰值功率要求的同时具有大脉冲能量,目前发展得最为成熟^[8-9]。近年来,随着 2 μm 波段光纤器件和掺铥光纤拉制工艺的进步及相关应用需求的增长,高平均功率、大脉冲能量纳秒掺铥光纤激光技术日益受到研究人员的重视,将进入蓬勃发展阶段。

本文首先介绍主动调 Q、被动调 Q、增益调制这三种纳秒激光产生技术在掺铥光纤振荡器(TDFO)中的应用现状,对目前获得 2 μm 纳秒脉冲的三种方式进行总结,对比分析三种技术的优点和不足。然后介绍目前窄脉宽、高功率、大脉冲能量掺铥光纤放大器的发展现状和技术瓶颈。最后,从振荡器和放大器两方面对纳秒掺铥光纤激光器的技术发展趋势进行展望。

2 纳秒掺铥光纤振荡器研究进展

调 Q 技术是光纤激光振荡器产生纳秒脉冲的最常见方法。调 Q 技术的关键是在尽可能短的时间内将谐振腔从高损耗状态切换到低损耗状态,并周期性地重

复这一过程。根据调制方式的不同,光纤调 Q 技术可分为主动调 Q、被动调 Q 和增益调制三种。调 Q 激光器腔内光子寿命 τ_c 的表达式^[10]为

$$\tau_c = -\frac{2nL}{c(\ln R_1 R_2 - 2\alpha L)}, \quad (1)$$

式中: L 为谐振腔长度; n 为光纤纤芯折射率; R_1 和 R_2 分别为谐振腔的前向和后向反射率; α 为激光在光纤传输时的固有损耗。调 Q 激光器的输出脉冲宽度 t_p 与腔内光子寿命 τ_c 的关系^[10]为

$$t_p = \frac{N_i - N_f}{N_i - N_{th}(1 + \ln N_f/N_{th})} \tau_c, \quad (2)$$

式中: N_i 为脉冲激光发射前的上能级反转粒子数密度; N_f 为脉冲激光发射后的上能级反转粒子数密度; N_{th} 为阈值反转粒子数密度。

2.1 主动调 Q

主动调 Q 是利用主动调制器件对腔内损耗进行周期性调制以实现脉冲激光输出。常见的主动调 Q 器件包括声光调制器(AOM)和电光调制器(EOM)。

2.1.1 声光调 Q 和电光调 Q

声光晶体在与一定频率的超声波相互作用时晶体密度会呈现出疏密相间的交替性变化,此时声光晶体具有“体光栅”的效果。控制声波信号可周期性地改变入射光束的传播方向,从而改变 Q 值。电光晶体在外加电场的作用下会发生折射率变化,通过改变电场即可实现对于入射光场相位、强度、偏振等特性的控制,进而改变谐振腔 Q 值。表 1 列出了基于 AOM 和 EOM 主动调 Q 的掺铥光纤振荡器典型研究结果。

表 1 空间结构主动调 Q 掺铥光纤振荡器典型研究结果

Table 1 Typical results of actively Q-switched TDFOs with free space structure

Year & Ref.	Fiber core diameter / μm	λ_p / nm	λ_s / nm	Repetition rate / kHz	Pulse width / ns	Peak power / kW	Energy / mJ
1993 ^[4]	5	792	1920	4	130	4×10^{-3}	5.2×10^{-4}
2003 ^[11]	17	1319	2000	0.1	150	4.1	0.6
2003 ^[12]	17	1319	2000	0.07	696*	3.3	2.3
2007 ^[13]	20	793	1980	125	41	6.58*	0.27
2010 ^[14]	25	793	2052	20	200	1.1*	0.225
2012 ^[15]	50	793	2000	10	49	8.9	0.435
2013 ^[16]	81	793	1850 & 1900	13.9	15	150	2.4
2021 ^[17]	20	793	2044	26	42	13.9	0.63

Note: “*” indicates that the parameter is calculated by other parameters; λ_p is pump wavelength; λ_s is signal wavelength.

1993 年, Myslinski 等^[4]利用 AOM 调制技术首次实现掺铥光纤振荡器的纳秒脉冲激光输出,但受限于纤芯尺寸(5 μm)和泵浦功率,输出激光的峰值功率仅有 4 W。而同时期的掺铟、掺钕、掺镱主动调 Q 光纤振荡器已实现千瓦量级高功率输出^[18-20]。2003 年, El-Sherif 等^[11]报道了高功率的声光调 Q 掺铥光纤振荡器,其结构如图 1 所示,采用波长 1.319 μm 的 Nd:YAG 激光器泵浦芯径 17 μm 的掺铥石英光纤,将

AOM 置于掺铥光纤与高反腔镜之间,在重复频率 100 Hz 时实现了脉宽 150 ns、峰值功率 4.1 kW、单脉冲能量 0.6 mJ 的 2 μm 波段激光输出,光束质量 M^2 约为 1.5。保持光路结构不变,通过将 AOM 替换为 EOM,该研究团队在同一年还实现了重复频率 70 Hz、脉宽 320 ns、峰值功率 3.3 kW、单脉冲能量 2.3 mJ 的 2 μm 波段电光调 Q 激光输出^[12]。

采用纤芯泵浦方式时,光纤激光器输出功率受限于

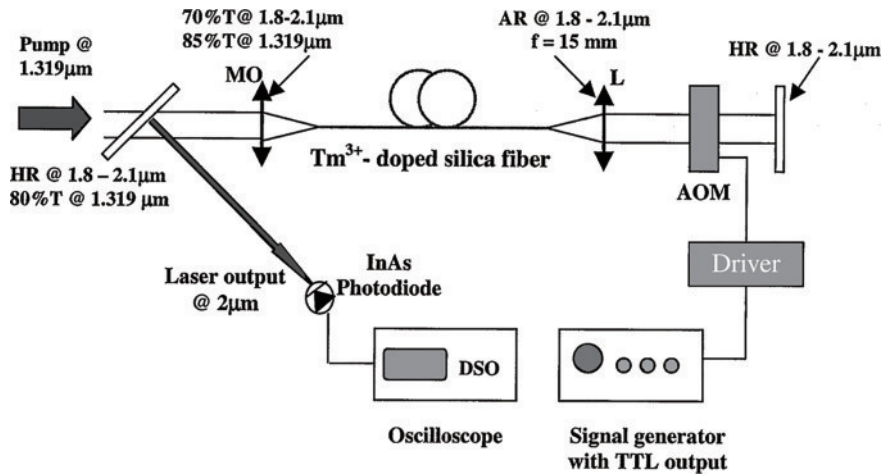


图 1 高 峰 值 功 率 声 光 调 Q 掺 铥 光 纤 振 荡 器 实 验 装 置 示 意 图^[11]

Fig. 1 Experimental setup diagram for high peak power acousto-optic Q-switched thulium-doped fiber oscillator^[11]

能够耦合进纤芯的泵浦功率。双包层掺铥光纤和多模大功率半导体激光器的出现解决了这一难题,包层泵浦技术使得掺铥光纤激光器输出功率快速提升^[3,21-22]。2007年,Eichhorn等^[13]报道了基于792 nm半导体激光器双端泵浦的声光调Q掺铥光纤振荡器。实现了重复频率125 kHz、脉宽41 ns、平均功率30 W、单脉冲能量0.27 mJ的2 μm波段激光输出。实验中功率的进一步提升主要受放大自发辐射(ASE)限制。若将左侧高反镜更换为衍射光栅,还可实现1930~2050 nm波长范围的调谐输出。2021年,Schneider等^[17]采用芯径20 μm的石英掺铥光纤,基于类似空间结构实现了脉宽42 ns、单脉冲能量630 μJ、峰值功率13.9 kW的2044 nm线偏光输出,光束质量 $M^2 < 1.05$ 。

2012年,Kadwani等^[15]首次采用芯径35 μm的掺

铥光子晶体光纤(TD-PCF)作为增益介质搭建了声光调Q掺铥光纤振荡器,结构如图2所示。泵浦光通过一个二向色镜耦合进光纤内,增益纤两端分别放置了消光差的三重透镜组,光纤输出端切4°斜角防止菲涅耳反射。在重复频率10 kHz时,实现了脉宽49 ns、峰值功率8.9 kW、单脉冲能量0.435 mJ的2 μm波段单模线偏光输出。2013年,Stutzki等^[16]使用芯径81 μm的大间距光纤(LPF)作为增益介质,基于双端泵浦结构在重复频率13.9 kHz时实现了脉宽15 ns、峰值功率150 kW、平均功率33 W、单脉冲能量2.4 mJ、中心波长2013 nm的激光输出,光束质量 $M^2 < 1.3$,功率进一步提升受到涂覆层热损伤的限制。这也是目前单模运转的掺铥光纤振荡器输出的最大脉冲能量。

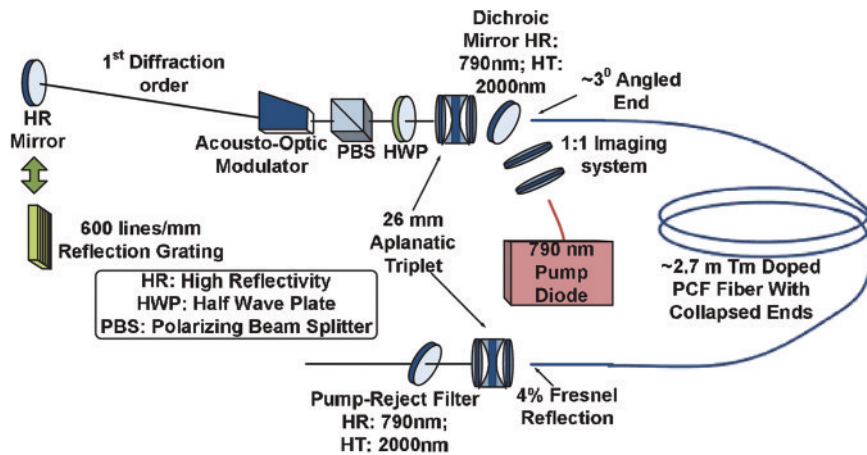


图 2 基 于 掺 铥 光 子 晶 体 光 纤 的 声 光 调 Q 掺 铥 光 纤 振 荡 器 实 验 装 置 示 意 图^[15]

Fig. 2 Experimental setup diagram for acousto-optic Q-switched thulium-doped fiber oscillator based on TD-PCF^[15]

需要指出的是,以上报道的主动调Q掺铥光纤振荡器均采用相似空间光路实现,其基本结构如图3所示。采用高功率793 nm半导体激光器进行单端或双端泵浦,利用镀膜反射镜或体布拉格光栅构成谐振腔,大芯径掺铥光纤作为增益介质,将AOM或EOM置于

增益光纤和高反腔镜之间进行脉冲调制,在光路中加入偏振片以输出线偏振激光。这种空间结构的优点在于脉冲激光经过透镜准直后光斑面积增大、能量密度不会超过AOM器件的损伤阈值,从而可以实现大脉冲能量激光输出。相比同波段的主动调Q固体激光

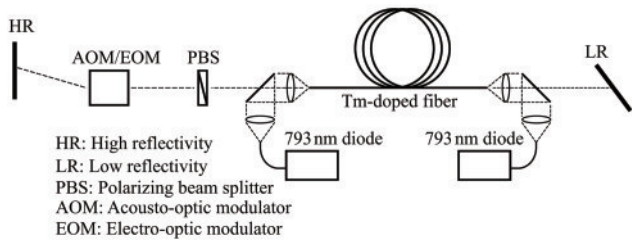


图3 高功率空间结构主动调Q掺铥光纤振荡器实验装置示意图
Fig. 3 Experimental setup diagram for high power actively Q-switched thulium-doped fiber oscillator with free space structure

器,采用光纤作为增益介质可以获得更优的光束质量。由于光纤耦合调Q器件的损伤阈值限制,全光纤结构声光调Q掺铥光纤振荡器的输出平均功率和脉冲能量均远低于空间结构。

2.1.2 应力偏振控制调Q

应力偏振控制调Q是一种新型调Q技术。在光纤上施加合适的应力会改变光纤内传输激光的偏振态,再搭配保偏光纤布拉格光栅(FBG)构成的谐振腔即可实现全光纤主动调Q。2009年,Geng等^[23]首次用这种方法实现了全光纤结构的2 μm波段单频纳秒激光输出,其实验装置结构如图4所示。谐振腔采用非保偏FBG作为高反腔镜、保偏FBG耦合输出,通过一个压电传感器控制施加在掺铥光纤上的应力,在重复频率大于100 kHz时实现了脉宽100~200 ns、线宽15 MHz的1950 nm单频激光输出。2011年,Shi等^[24]采用同样的技术搭建了单频脉冲光纤种子源,放大后实现重复频率20 kHz、单脉冲能量0.22 mJ、峰值功率2.75 kW、线宽<5.8 MHz的1920 nm单频激光输出。这种新型调Q技术无需在腔内插入额外元件,适合对短腔结构的单频光纤振荡器进行调制。

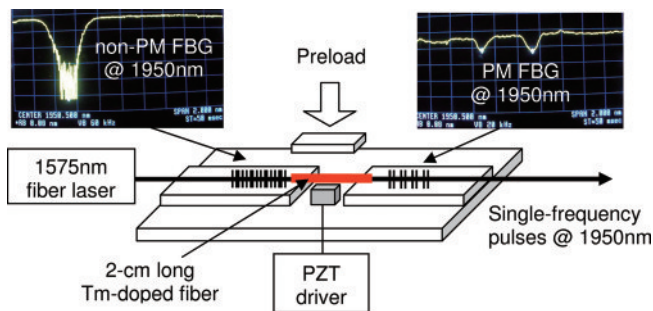


图4 应力偏振控制调Q单频掺铥光纤振荡器实验装置示意图^[23]
Fig. 4 Experimental setup diagram for stress-induced polarization control Q-switched single-frequency thulium-doped fiber oscillator^[23]

目前,主动调Q技术发展较为成熟,应用广泛,可以对输出激光的重复频率进行自由调控,但系统结构复杂且成本较高。由式(2)可见,调Q激光的输出脉宽正比于腔内光子寿命,同时受上能级反转粒子数和阈值反转粒子数比值的影响。因此,在主动调Q中,选择

合适长度的光纤以及与之匹配的泵浦功率,采用低插入损耗、高响应速率、高衍射效率的Q开关能够有效减小输出脉宽。由于光纤耦合调Q器件损伤阈值的限制,在未来一段时间内,图3所示的空间光路仍将是主动调Q掺铥光纤振荡器获得高功率、大脉冲能量激光输出的主要选择。

2.2 被动调Q

利用可饱和吸收体可实现光纤被动调Q。2004年,Sahu等^[25]采用Cr²⁺:ZnSe晶体作为可饱和吸收体首次报道了被动调Q掺铥光纤振荡器的工作,实现了脉宽16 ns、重复频率18.5 kHz、峰值功率750 W、单脉冲能量12 μJ、中心波长1822 nm的激光输出。2021年,Fang等^[26]采用分布式布拉格反射(DBR)短腔法结合半导体可饱和吸收镜(SESAM)首次报道了单频被动调Q掺铥光纤振荡器,结构如图5(a)所示。采用1.6 cm长的掺铥锗酸盐光纤作为增益介质,SESAM放置在光纤的一侧与窄线宽FBG一起组成谐振腔,793 nm泵浦光由一个793/1950 nm的波分复用器(WDM)耦合进腔内,信号光通过WDM的1950 nm臂反向输出。通过优化SESAM的调制深度,最终实现了脉宽64 ns、重复频率520 kHz、单脉冲能量42.8 nJ的1949.17 nm单频激光输出。脉宽64 ns时的输出光谱如图5(b)所示,系统的信噪比超过61 dB,测得线宽为12.3 MHz(0.00015 nm)。

被动调Q掺铥光纤振荡器结构简单,不需要复杂的驱动电路和昂贵的调制器件,系统成本更低。被动调Q的输出脉宽与腔内光子寿命成正比,与可饱和吸收体的调制深度成反比。当谐振腔长度和泵浦功率一定时,可饱和吸收体的调制深度越大,输出脉宽越窄^[26]。对于同一种可饱和吸收体,被动调Q的输出重复频率会随着泵浦功率的增加而上升,输出脉宽会随着泵浦功率的增加逐渐减小。近年来,碳纳米管^[27-28]、石墨烯^[29-31]、黑磷^[32-33]、拓扑绝缘体^[34]、掺杂光纤^[35-36]等新型可饱和吸收体的应用为被动调Q掺铥光纤振荡器的发展注入了新活力。这些新材料在物理性质和响应带宽等方面各有优点,但作为可饱和吸收体进行被动调Q时输出脉宽普遍较宽,鲜有脉宽在百纳秒以内的报道,其可饱和吸收特性有待进一步提高。

2.3 增益调制技术

增益调制又称增益开关,本质上可以算作主动调Q的一种,但实现方法有所不同。增益调制过程可简单描述如下:在泵浦持续一定时间后,谐振腔内增益高于激光阈值形成弛豫振荡,如果在弛豫振荡第一个脉冲输出后、第二个脉冲建立前停止泵浦,使腔内增益降至激光阈值以下,则在一个泵浦周期内振荡器只输出一个弛豫振荡脉冲。目前应用于掺铥光纤振荡器的增益调制技术可分为脉冲激光单泵浦增益调制和混合泵浦增益调制。表2列出了近年来基于增益调制技术的掺铥光纤振荡器的典型研究结果。

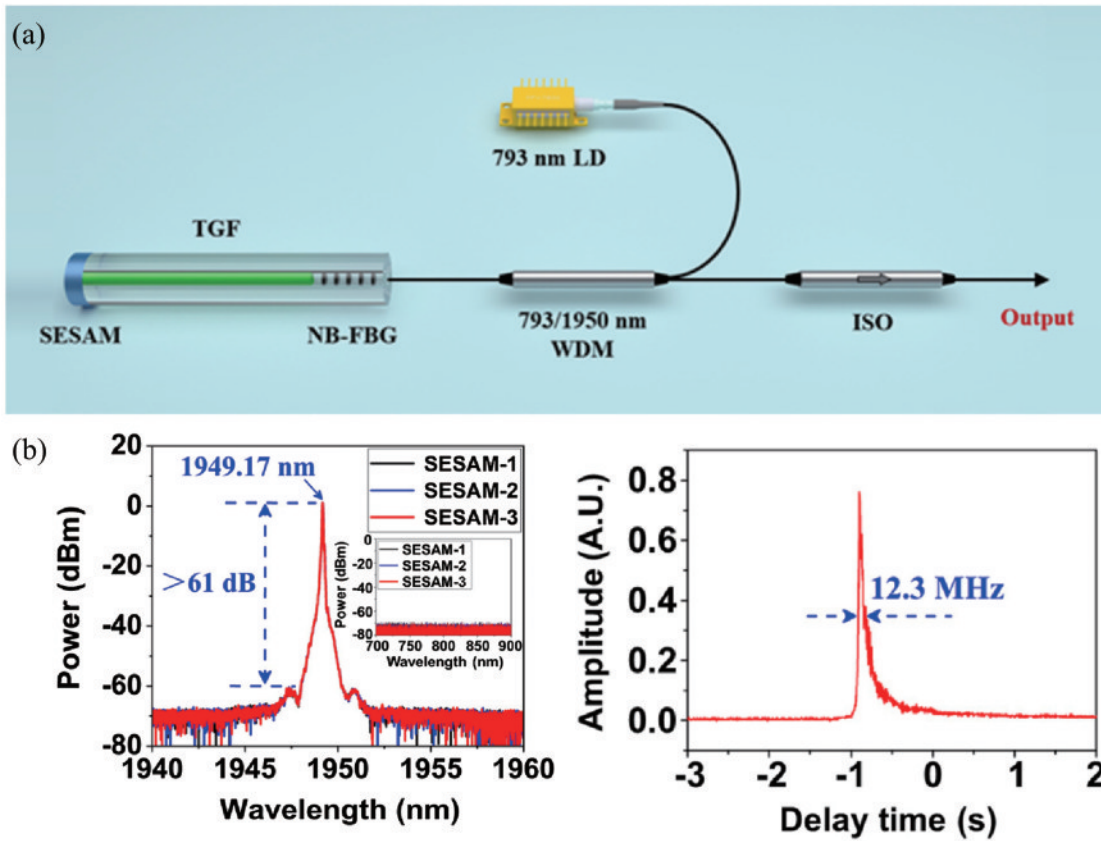


图 5 SESAM 被动调 Q 单频掺铥光纤振荡器。(a) 实验装置示意图; (b) 光谱图^[26]

Fig. 5 Single frequency passively Q-switched thulium-doped fiber oscillator based on SESAM. (a) Experimental setup diagram; (b) spectral intensity^[26]

表 2 增益调制掺铥光纤振荡器典型研究结果

Table 2 Typical results of gain-switched TDFOs

Year & Ref.	$\lambda_p / \mu\text{m}$	λ_s / nm	Repetition rate / kHz	Pulse width / ns	Peak power / kW	Energy / mJ	Configuration
2007 ^[37]	1.55	2000	—	10	1.2*	0.012	All fiber
2009 ^[38]	1.5	2000	20	1.5	8	0.012	All fiber
2011 ^[39]	1.914	~1940	2	61	21.3	1.3	Not all fiber
2011 ^[40]	1.55	2044	300	25	0.92	0.023	All fiber
				35	1	0.035	
2012 ^[41]	1.053 & 0.79	2018	1	~500	4	2	All fiber
2013 ^[42]	1.053 & 0.79	2018	5	16.2	123	2	All fiber
2017 ^[43]	1.55	1958	0.1	100	0.02	0.002	All fiber
2018 ^[44]	1.56 & 0.79	2000	344	300	0.0539	0.017	All fiber
2021 ^[45]	1.6	1940	631.5	14.7	0.263*	0.00387	All fiber
2021 ^[46]	0.793	2017	15	—	—	0.362	All fiber

Note: ‘*’ indicates that the parameter is calculated by other parameters.

2.3.1 脉冲激光单泵浦增益调制技术

基于增益调制技术的纳秒掺铥光纤振荡器早在 1998 年就由 Jackson 等^[47]报道,但输出激光为一系列脉宽达数百纳秒的弛豫振荡尖峰,其幅值和周期并不稳定。2007 年, Jiang 等^[37]提出一种快速增益调制技术,采用 1550 nm 脉冲激光进行同带泵浦可以实现上能级粒子数的快速积累,从而消除不规则的尖峰脉冲。

他们基于快速增益调制技术所搭建的掺铥光纤振荡器最终实现了脉宽 10 ns、单脉冲能量 12 μJ 的稳定脉冲输出。此后,脉冲激光单泵浦增益调制技术逐渐成熟, 1.5 μm 波段成为增益调制掺铥光纤振荡器的首选泵浦波段。

2011 年, Simakov 等^[40]首次报道了线偏光输出的增益调制掺铥光纤振荡器。实验中,采用 1550 nm 脉

冲光纤激光器作为泵浦源,在保偏掺铥光纤与保偏无源光纤熔接时采用正交对准的方式来保证单一波长起振,最终实现了重复频率 300 kHz、平均功率达 8 W、脉宽 25 ns、中心波长 2044 nm 的线偏光输出。2021 年, Zhang 等^[46]报道了一种由脉冲半导体激光直接泵浦的增益调制掺铥光纤振荡器,其结构如图 6 所示。泵浦波长为 793 nm,设置泵浦重复频率 20 kHz、泵浦脉宽 15~45 μs。结果表明,793 nm 脉冲激光泵浦时,每一个泵浦脉冲会激发出由多个子脉冲组成的脉冲簇,这种现象的原因在于³H₄能级到³F₄能级的弛豫时间过长,导致³F₄能级的反转粒子数积累较慢,可见,793 nm 脉冲激光并不适合作为增益调制掺铥光纤振荡器的泵浦源。

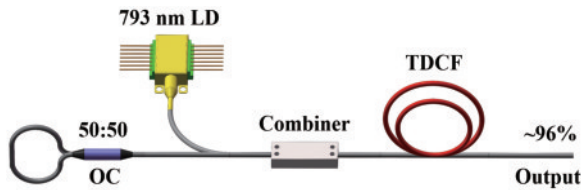


图 6 793 nm 脉冲激光泵浦的增益调制掺铥光纤振荡器实验装置示意图^[46]

Fig. 6 Experimental setup diagram for gain-switched thulium-doped fiber oscillator pumped by 793 nm pulsed laser^[46]

在增益调制技术中,当泵浦功率增加到一定程度时会出现自锁模脉冲,具体表现为一个增益调制脉冲包络中会出现高重复频率的子脉冲序列。2013 年, Swiderski 等^[48]首次报道了这一现象,之后得到更多增益调制实验的验证^[49-50]。自锁模脉冲在放大过程中产生的高功率尖峰容易损伤光纤器件,因此不适合

进行高功率放大。自锁模现象的物理机制目前尚不清晰,有待进一步研究。

增益调制技术没有引入额外的插入损耗,不用考虑器件的损伤阈值,易实现全光纤结构,输出重复频率可自由调控,兼具主动调 Q 和被动调 Q 的优点。但是,增益调制中的自锁模脉冲限制了自身的放大潜力。

2.3.2 混合泵浦增益调制技术

对于增益调制掺铥光纤振荡器而言,泵浦光功率是限制其输出功率提升的主要因素。针对这一问题,上海交通大学 Tang 等^[41]提出了一种混合泵浦的增益调制方案,他们采用波长 793 nm 或 1.1 μm 波段连续激光将振荡器泵浦到阈值附近,再用 1.1 μm 或 1.5 μm 波段的脉冲激光触发脉冲,剩余的连续激光还可作为泵浦光来放大信号脉冲。他们采用这种方法实现了重复频率 1 kHz、脉宽 500 ns、单脉冲能量 2 mJ、峰值功率 4 kW、中心波长 2018.25 nm 的大脉冲能量激光输出。2014 年,王雄等^[51]利用波长 1570 nm 的连续激光和 1565 nm 的脉冲激光混合泵浦铥钬共掺光纤,并与 1565 nm 脉冲激光单泵浦方式进行对比。实验结果表明,混合泵浦方案可以有效提升输出脉冲激光的稳定性。2019 年, Kharitonov 等^[52]报道了波长覆盖 1825~2064 nm 的可调谐混合泵浦增益调制掺铥光纤振荡器,其结构如图 7(a)所示,转动布拉格光栅可以实现波长调谐。图 7(b)为不同输出波长处 1550 nm 脉冲激光单泵浦和混合泵浦下所对应的脉宽和单脉冲能量,输出波长为 1900 nm 时,混合泵浦输出脉冲能量可达 12 μJ,是单泵浦时的三倍。该实验结果再次证明了混合泵浦技术的优势。

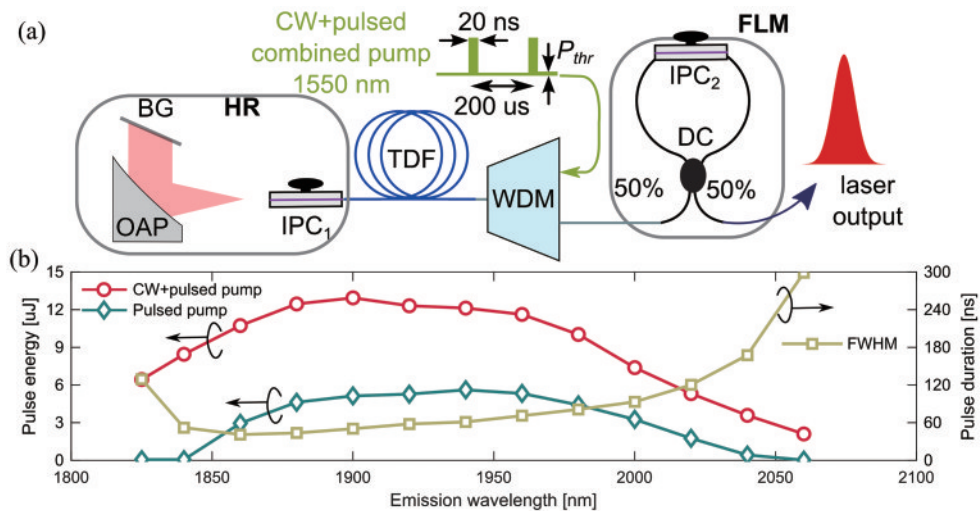


图 7 可调谐混合泵浦增益调制掺铥光纤振荡器。(a) 实验装置示意图;(b) 不同波长处的脉冲能量和脉宽^[52]

Fig. 7 Tunable hybrid pump gain-switched thulium-doped fiber oscillator. (a) Experimental setup diagram; (b) pulse energy and duration at different wavelengths^[52]

增益调制掺铥光纤振荡器的输出脉宽同样受谐振腔长度和上能级反转粒子数与阈值反转粒子数比值的影响。在增益调制技术中,采用高功率、窄脉宽的

脉冲激光泵浦一段长度较短的高掺光纤能够有效减小输出脉宽。这一点也得到了实验证明, Ding 等^[38]采用峰值功率 4.5 kW、脉宽 10 ns 的 1.5 μm 脉冲激光泵浦

一段 0.5 m 长的掺铥光纤,实现了脉宽 1.5 ns 的 2 μm 激光输出。

综合上述情况,表 3 给出了主动调 Q 和被动调 Q、增益调制三种调 Q 技术的优缺点。

表 3 三种调 Q 技术的优缺点对比

Table 3 Comparison of advantages and disadvantages of three Q-switching techniques

Method	Active Q-switching	Passive Q-switching	Gain switching
Key device	AOM and EOM	Saturable absorber	Pulse pump source
Advantage	Technology is well developed, freely adjustable repetition frequency and pulse width, and high output power and pulse energy under space structure	Simple and compact system; better economic performance; Q-switching self-starting can be realized	Easy to implement all-fiber structure, only the damage threshold of the fiber itself needs to be considered
Disadvantage	More complex systems, higher cost, limited output power, and energy in an all-fiber structure	Repetition frequency and pulse width are not freely adjustable, poor stability, insufficient research on the saturable absorption properties of new materials	High power in-band pulsed pump source is more costly, pulse envelope with self-mode locking phenomenon

3 脉冲掺铥光纤放大器

3.1 MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器研究进展

纳秒掺铥光纤振荡器结构紧凑,但输出的功率和能量有限,无法用于激光加工、非线性转换等对于功率有更高要求的特定场景。采用主振荡功率放大

(MOPA)结构可解决振荡器输出平均功率和脉冲能量不足的问题。除上文提到的基于主动调 Q、被动调 Q、增益调制等技术的掺铥光纤振荡器外,2 μm 波段直接调制半导体激光器也可作为 MOPA 系统的种子光^[53]。表 4 列出了近年来 MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器的典型研究结果。

表 4 高功率纳秒脉冲掺铥光纤放大器典型研究结果

Table 4 Typical results of high power nanosecond TDFAs

Year & Ref.	Method	λ_s /nm	$\Delta\lambda$ /nm	Average power /W	Repetition rate /kHz	Pulse width /ns	Peak power /kW	Pulse energy /mJ	Amplifier stages
2013 ^[54]	AOM	1965	1.01	7.3	1	6.5	920	6.4	2
2014 ^[55]	AOM	1951	1.4	52	50	822	1.27	1.04	2
2014 ^[56]	GS	1994.4	1.2	7.28*	26	25	10.5	0.28	1
2015 ^[50]	GS	2050	—	40.5	40	100	10	1	2
2015 ^[57]	GS	2040	1.3	70	10	114	53.8	7	2
2015 ^[58]	AOM	1950.2	0.8	110	2000	51.1	1.07*	0.055	3
2015 ^[59]	AOM	1971	0.0039*	105	1000	66	1.42	0.105	3
2015 ^[60]	AOM	1971	0.019*	192 209	3000 5000	51 46	1.11 0.86	0.062 0.042	3
2016 ^[61]	AOM	1971	0.15 0.10	238 150	500 200	63.3 58.2	7.06 12.1	0.477 0.749	3
2017 ^[62]	GS	1950	—	115 60	100 100	1800 860	0.63 0.69	1.15 0.6	3
2018 ^[63]	GS	2000	—	16.1	25	17	35.6	0.64	1
2021 ^[64]	AOM	2009	0.09	2.04	20	97	2.1	0.1	2

Note: “*” indicates that the parameter is calculated by other parameters, $\Delta\lambda$ is linewidth.

根据线宽不同,MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器又可分为单频及窄线宽激光放大器和宽谱激光放大器。一般将线宽在百兆赫量级的激光称为单频激光,将线宽小于 0.1 nm 的激光称为窄线宽激光。2012 年,Fang 等^[65]在主放大级采用芯径 30 μm 的保偏掺铥铈酸盐光纤作为增益介质,实现了线宽 277 MHz、重复频率 100 kHz、峰值功率 78 kW 的 1.92 μm 单频纳秒激光

输出,光束质量 $M^2=1.3$ 。2015 年,Wang 等^[59]报道了一种高功率准单频纳秒掺铥光纤放大器,采用三级 MOPA 结构放大单频种子源,在不超受激布里渊散射(SBS)阈值的情况下实现了线宽 307 MHz (0.0039 nm)、脉宽 66 ns、重复频率 1 MHz、平均功率 105 W 的 1971 nm 准单频激光输出。同年,该研究团队^[60]利用相同实验装置,在线宽展宽到 1.5 GHz

(0.019 nm)时实现了重复频率 5 MHz、脉宽 49 ns、平均功率 209 W、单脉冲能量 42 μ J 的窄线宽 1971 nm 激光输出,这是目前窄线宽纳秒掺铥光纤放大器输出的最高平均功率,功率的进一步提升受 SBS 的限制。

对于线宽大于 0.1 nm 的宽谱激光, SBS 效应不再是限制功率提升的主要因素。2013 年, Gaida 等^[54]报道了一种高功率纳秒掺铥光纤放大器, 结构如图 8(a)所示。通过 AOM 主动调 Q 产生脉宽百 ns 量级的种子光, 经过基于 EOM 的脉冲选择器后种子光脉

宽被压窄到 6.5 ns, 主放大级采用芯径 80 μ m 的棒状掺铥光子晶体光纤作为增益介质, 最终实现了重复频率 1 kHz、脉宽 6.5 ns、单脉冲能量 6.4 mJ、峰值功率 0.92 MW、线宽 1.01 nm 的 1965 nm 激光输出, 这是目前 2 μ m 纳秒脉冲激光输出的最高峰值功率。输出脉冲能量 6.4 mJ 时的光谱如图 8(b)所示, 系统的信噪比约为 30 dB, 在 1800~2000 nm 范围内没有观察到明显的 ASE 和其他非线性现象, 脉冲波形也没有畸变, 说明该系统的输出功率可以进一步提升。

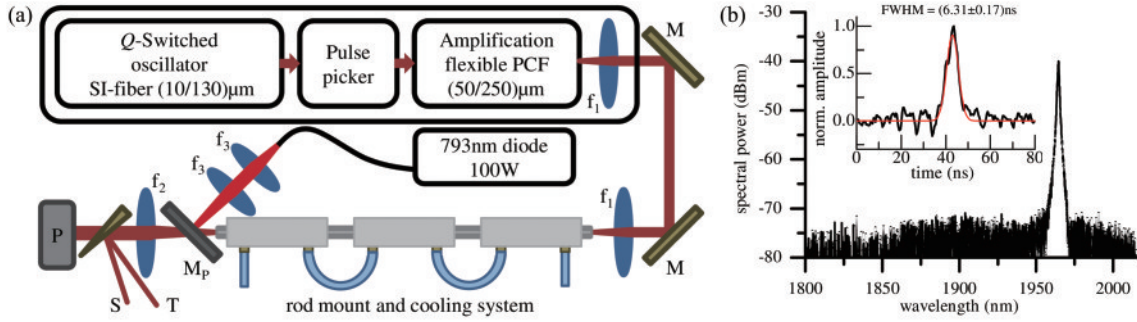


图 8 0.92 MW 峰值功率掺铥光纤放大器。(a) 实验装置示意图; (b) 光谱图^[54]

Fig. 8 0.92 MW peak power thulium-doped fiber amplifier. (a) Experimental setup diagram; (b) spectral intensity^[54]

2015 年, Yang 等^[57]报道了一种线偏光输出的纳秒掺铥光纤放大器, 结构如图 9(a)所示。采用增益调制技术产生脉宽 201 ns 的种子光, 在预放大级和主放大级之前加入了偏振控制器以保证输出激光的偏振度, 脉冲经过两级放大后有所收窄, 最终实现了脉宽 114 ns、平均功率 70 W、单脉冲能量 7 mJ、线宽 1.3 nm 的

2040 nm 线偏光输出, 光束质量 $M^2=1.3$ 。这是目前线偏光纳秒掺铥光纤放大器输出的最大单脉冲能量。输出功率 70 W 时的光谱如图 9(b)所示, 系统在 2040 nm 处的信噪比约为 24 dB, 同时在 1970 nm 波段出现了明显的 ASE, 经计算 ASE 功率约占输出总功率的 7%, 可见较强的 ASE 限制了输出功率的进一步提高。

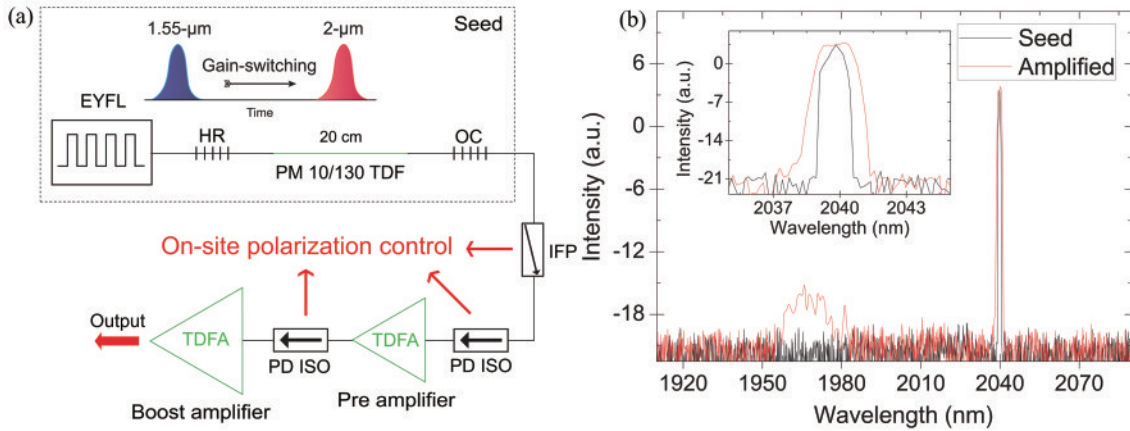


图 9 7 mJ 脉冲能量掺铥光纤放大器。(a) 实验装置示意图; (b) 光谱图^[57]

Fig. 9 7 mJ pulse energy thulium-doped fiber amplifier. (a) Experimental setup diagram; (b) spectral intensity^[57]

2016 年, Wang 等^[61]报道了全光纤结构宽谱纳秒掺铥光纤放大器, 结构如图 10(a)所示, 采用 AOM 腔外调制产生的纳秒激光作为种子源, 经过两级预放和一级主放后实现了脉宽 63.3 ns、重复频率 500 kHz、平均功率 238 W 的 1971 nm 激光输出, 这是目前全光纤结构纳秒掺铥光纤放大器输出的最高平均功率。重复频率 500 kHz、功率 238 W 时的输出光谱如图 10(b)所

示, 系统的信噪比超过 27 dB, 测得线宽为 0.15 nm, 在 1900~2200 nm 范围内可观察到非常明显的 ASE, ASE 的峰值波长与信号波长接近。重复频率 200 kHz 时最高输出平均功率为 150 W, 此时输出光谱如图 10(c)所示, 200 kHz 时系统的信噪比为 25 dB, 同重复频率 500 kHz 时相比有所下降, 测得线宽为 0.10 nm, 在 1950~2050 nm 范围内可以观察到明显的 ASE。

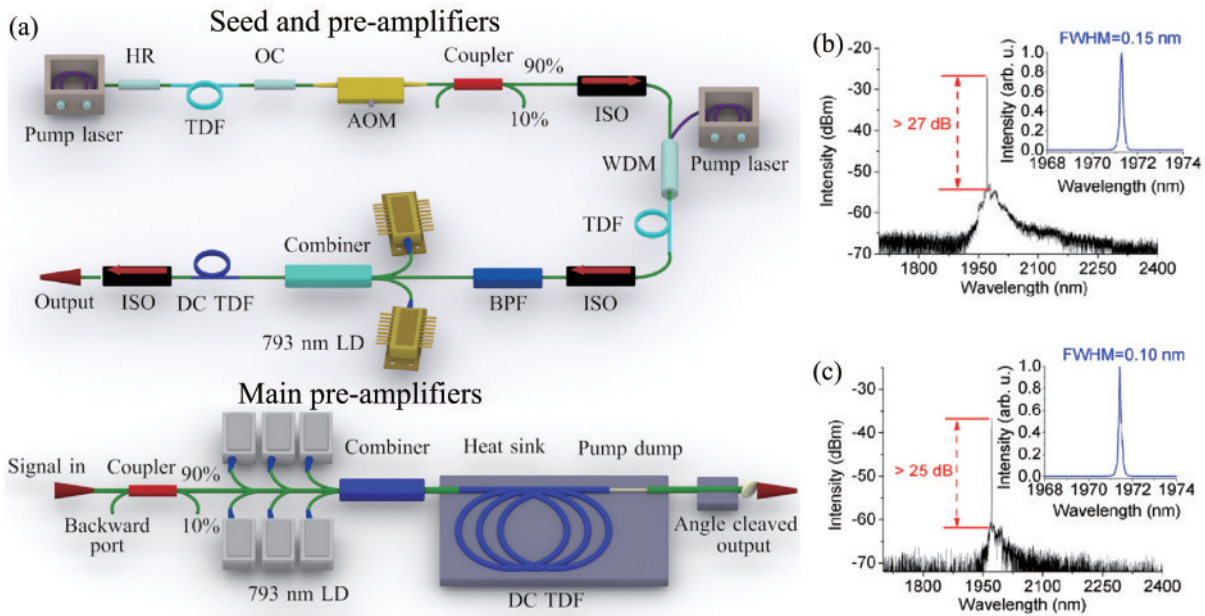


图 10 238 W 平均功率纳秒掺铥光纤放大器。(a) 实验装置示意图;(b) 500 kHz 重复频率、238 W 平均功率下的光谱图;(c) 200 kHz 重复频率、150 W 平均功率下的光谱图^[61]

Fig. 10 238 W average power nanosecond thulium-doped fiber laser. (a) Experimental setup diagram; (b) spectrum at a repetition rate of 500 kHz and output power of 238 W; (c) spectrum at a repetition rate of 200 kHz and output power of 150 W^[61]

综上所述,全光纤 MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器多采用声光调 Q 或增益调制技术产生种子光,目前已实现 2 μm 波段 238 W 的平均功率输出^[61]。但是,近 5 年来未见有更高功率的研究报道。相较于 1 μm 波段纳秒掺铥光纤放大器千瓦量级平均功率^[66]、几十毫焦量级^[67]单脉冲能量输出结果,纳秒掺铥光纤放大器还有着较大差距。

3.2 MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器功率提升限制因素

在同等脉宽下提高输出平均功率和脉冲能量或在同等功率水平下压窄脉宽是 MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器长期以来的追求目标。MOPA 结构输出激光的脉宽和线宽等特性主要由种子光决定,平均功率和脉冲能量则依赖于放大级。废热积累、高功率下的非线性效应、多级放大的 ASE、光纤损伤等是限制 MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器功率提升的主要因素。

3.2.1 废热积累

目前,MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器的主放大级几乎全部采用 793 nm 半导体激光器作为泵浦源,实际泵浦效率仅有 50% 左右。这意味着在相同的输出功率下,脉冲掺铥光纤激光器积累的废热是掺铥光纤激光器的 3~4 倍。造成这种低效率的原因在于 793 nm 激光泵浦时的较大量子亏损。

光纤中废热积累引起的最严重问题是涂覆层的热损伤。目前光纤涂覆层多用丙烯酸树脂,这种材料导热系数小,长期稳定工作需要保持温度在 80 $^{\circ}\text{C}$ 以

下^[68]。提高散热效率是改善热管理的有效手段,在光纤结构改进方面,研究人员已经提出减小涂覆层厚度、优化纤芯和基座尺寸比^[69]以及增加内包层厚度^[70]等方案。

减少热量产生是改善热管理的另一种思路。同带泵浦具有泵浦亮度高、量子亏损小等优点,能有效提高泵浦效率,减少废热产生。在实验研究方面,1.9 μm 波段激光同带泵浦的优势在连续掺铥光纤激光器^[71]和超短脉冲掺铥光纤激光器^[72]中已经得到证明。在理论研究方面,陶蒙蒙等^[73]的数值模拟结果表明,采用 1.9 μm 波段激光同带泵浦的千瓦级连续掺铥光纤激光器的斜效率可达 90% 以上,废热得到了显著抑制,光纤的整体温度可保持在 50 $^{\circ}\text{C}$ 以内。

3.2.2 高功率下的非线性效应

SBS 产生的后向散射光会对激光器造成严重危害,从而限制功率提升。SBS 阈值与光纤长度成反比,与光纤模场面积和激光线宽成正比。因此,单频和窄线宽纳秒掺铥光纤激光器功率提升的关键在于 SBS 抑制技术。增大模场面积,减小光纤长度^[24,65,74]是提高非线性阈值的最简单办法。大模场面积不仅能提高非线性阈值,还能减小光纤内能量密度,降低光纤损伤风险;但是,大模场也意味着光纤能容纳模式数的增多,导致光束质量的恶化。减小脉宽^[60]可以减少信号脉冲激光与斯托克斯光的相互作用长度,也能提高系统的 SBS 阈值。在 1 μm 和 1.5 μm 波段的单频纳秒光纤激光器中,施加温度或应力梯度展宽布里渊增益谱^[75-76]已被证明是提高 SBS 阈值的有效途径,但这种方法目

前尚未应用在 $2\ \mu\text{m}$ 波段单频纳秒掺铥光纤激光器中。此外,受激拉曼散射(SRS)、自相位调制(SPM)和模式不稳定(TMI)等因素也会影响高功率脉冲激光在光纤中的传输,由于当前高功率纳秒掺铥光纤放大器的报道较少,这些非线性现象在纳秒掺铥光纤放大器中的作用机理还需要进一步研究。

3.2.3 ASE 功率

采用 MOPA 结构时,每一级放大所能提供的增益有限。在多级放大过程中,原本微弱的 ASE 也会被逐级放大到很高的水平。ASE 会降低信噪比和放大效率、影响最终输出功率,严重时还会引起寄生振荡。3.1 节中 Wang 等^[61]和 Yang 等^[57]的实验结果表明,对于宽谱纳秒掺铥光纤放大器,ASE 是限制功率提升的主要因素,尤其是输出激光重复频率较低的情况。

常见 ASE 滤除方法是在光路中加入滤波器件,如带通滤波器^[61]、声光调制器^[65,74]等,其原理是阻止信号光之外的 ASE 波段光通过。这种方法简单有效,但滤波器件一般难以承受高功率,所以多用在预放大级。除滤波外,优化种子源特性也能够降低 ASE,比如提高重复频率^[61]、优化光纤长度和泵浦功率^[77]、增大模场面积以降低功率密度^[15-16]等。在高功率纳秒光纤激光器 ASE 抑制方面,人们对掺铥光纤激光器已经进行了充分的研究,可以为掺铥光纤激光器提供参考。

在实际实验中,对于具体哪一种限制因素占主导地位的问题,要根据输出脉宽、光谱参数和激光器结构等具体情况判断,从而采取不同的抑制措施。

4 结束语

得益于激光雷达、中红外 OPO 等应用对 $2\ \mu\text{m}$ 波段脉冲激光的强劲需求,纳秒掺铥光纤激光器研究近年来已取得持续进步。本文从掺铥光纤振荡器纳秒脉冲产生技术出发,介绍了主动调 Q、被动调 Q 和增益调制等三种主要技术的原理,梳理了发展脉络,综述了典型的研究结果,对比分析了优点和不足;在此基础上,介绍了窄脉宽、高功率、大脉冲能量 MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器的代表性研究进展和当前的技术瓶颈。

对于振荡器来说,主动调 Q 技术以声光调 Q 和电光调 Q 为代表,技术较为成熟,可以自由调控输出脉冲重复频率和脉宽,在空间结构下已实现脉冲能量 $2.4\ \text{mJ}$ 的 $2\ \mu\text{m}$ 波段单模激光输出,但全光纤结构尚难以实现高功率输出。改善光纤耦合主动调 Q 器件的损伤阈值可以有效提高全光纤主动调 Q 掺铥光纤振荡器的输出功率和脉冲能量。被动调 Q 技术结构简单,系统经济性好,可以实现调 Q 自启动,但当前的输出脉宽普遍较大。对黑磷、拓扑绝缘体等新材料在 $2\ \mu\text{m}$ 波段的可饱和吸收特性进行更充分研究并压缩输出脉宽、提高脉冲稳定性是未来被动调 Q 掺铥光纤振荡器的重点发展方向。增益调制技术不用考虑腔内器件的损伤

阈值,易实现全光纤结构,但其输出信号脉冲的峰值功率和脉冲能量受限于泵浦脉冲能量,在高泵浦功率下还会出现自锁模现象。揭示自锁模现象机理并寻找抑制方法是未来增益调制掺铥光纤振荡器的研究重点,而输出功率和脉冲能量的提高将依赖于高功率同带脉冲泵浦源的发展和混合泵浦增益调制技术的进步。

对于放大器来说,MOPA 结构能够在保持振荡器时域和光谱特性的同时提高输出功率,纳秒掺铥光纤放大器目前已分别实现峰值功率 $0.92\ \text{MW}$ ^[54]、单脉冲能量 $7\ \text{mJ}$ ^[57]、平均功率 $238\ \text{W}$ ^[61] 的 $2\ \mu\text{m}$ 波段纳秒激光输出。在全光纤结构下实现窄脉宽、高功率、大脉冲能量激光输出是 MOPA 结构纳秒掺铥光纤放大器未来的主要发展方向。非线性效应和 ASE 的抑制是现阶段纳秒掺铥光纤放大器功率进一步提升的关键。长期来看,随着 $793\ \text{nm}$ 半导体激光亮度的提升、 $1.9\ \mu\text{m}$ 波段同带泵浦技术的成熟和光纤结构的改进,困扰纳秒掺铥光纤放大器的废热积累问题将得到缓解,纳秒掺铥光纤放大器也将应用在更多领域。

参 考 文 献

- [1] Hanna D C, Jauncey I M, Percival R M, et al. Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 1988, 24(19): 1222-1223.
- [2] Hanna D C, Percival R M, Smart R G, et al. Efficient and tunable operation of a Tm-doped fibre laser[J]. Optics Communications, 1990, 75(3/4): 283-286.
- [3] Hanna D C, Perry I R, Lincoln J R, et al. A 1-Watt thulium-doped cw fibre laser operating at $2\ \mu\text{m}$ [J]. Optics Communications, 1990, 80(1): 52-56.
- [4] Myslinski P, Pan X, Barnard C W, et al. Q-switched thulium-doped fiber laser[J]. Optical Engineering, 1993, 32(9): 2025-2030.
- [5] Nelson L E, Ippen E P, Haus H A. Broadly tunable sub-500 fs pulses from an additive-pulse mode-locked thulium-doped fiber ring laser[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(1): 19-21.
- [6] 杨林永, 张斌, 侯静. 高功率 $3\sim 5$ 微米波段超连续谱光纤激光研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101001. Yang L Y, Zhang B, Hou J. Progress on high-power supercontinuum laser sources at $3\sim 5\ \mu\text{m}$ [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101001.
- [7] de Young R J, Barnes N P. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system[J]. Applied Optics, 2010, 49(4): 562-567.
- [8] Schneider J, Forster P, Romano C, et al. High pulse energy ZnGeP₂ OPO directly pumped by a Q-switched Tm³⁺-doped single-oscillator fiber laser[J]. Optics Letters, 2021, 46(9): 2139-2142.
- [9] Gebhardt M, Gaida C, Kadwani P, et al. Nanosecond Tm: fiber MOPA system for high peak power mid-IR generation in a ZGP OPO[C]//Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27-November 1, 2013, Paris,

- France. Washington, D.C.: OSA, 2013: MW3B.2.
- [10] Eichhorn M. Pulsed 2 μm fiber lasers for direct and pumping applications in defence and security[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7836: 78360B.
- [11] El-Sherif A F, King T A. High-peak-power operation of a Q-switched Tm^{3+} -doped silica fiber laser operating near 2 μm [J]. Optics Letters, 2003, 28(1): 22-24.
- [12] 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(4/5/6): 337-344.
- [13] Eichhorn M, Jackson S D. High-pulse-energy actively Q-switched Tm^{3+} -doped silica 2 μm fiber laser pumped at 792 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(19): 2780-2782.
- [14] Willis C C C, Shah L, Baudelet M, et al. High-energy Q-switched Tm^{3+} -doped polarization maintaining silica fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7580: 758003.
- [15] Kadwani P, Modsching N, Sims R A, et al. Q-switched thulium-doped photonic crystal fiber laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(10): 1664-1666.
- [16] 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.
- [17] Schneider J, Forster P, Romano C, et al. Investigation of the pulse energy limits of actively Q-switched polarization-maintaining Tm^{3+} -doped fiber lasers[J]. OSA Continuum, 2021, 4(5): 1577-1586.
- [18] Chen Z J, Grudinin A B, Porta J, et al. Enhanced Q switching in double-clad fiber lasers[J]. Optics Letters, 1998, 23(6): 454-456.
- [19] Renaud C C, Selvas-Aguilar R J, Nilsson J, et al. Compact high-energy Q-switched cladding-pumped fiber laser with a tuning range over 40 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(8): 976-978.
- [20] Lees G P, Taverner D, Richardson D J, et al. Q-switched erbium doped fibre laser utilising a novel large mode area fibre[J]. Electronics Letters, 1997, 33(5): 393-394.
- [21] Jackson S D, King T A. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. Optics Letters, 1998, 23(18): 1462-1464.
- [22] Jackson S D, Mossman S. Efficiency dependence on the Tm^{3+} and Al^{3+} concentrations for Tm^{3+} -doped silica double-clad fiber lasers[J]. Applied Optics, 2003, 42(15): 2702-2707.
- [23] Geng J H, Wang Q, Smith J, et al. All-fiber Q-switched single-frequency Tm-doped laser near 2 μm [J]. Optics Letters, 2009, 34(23): 3713-3715.
- [24] Shi W, Petersen E B, Nguyen D T, et al. 220 μJ monolithic single-frequency Q-switched fiber laser at 2 μm by using highly Tm-doped germanate fibers[J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3575-3577.
- [25] Sahu J K, Philippov V, Kim J, et al. Passively Q-switched thulium-doped silica fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004. (CLEO), May 16-21, 2004, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004.
- [26] Fang S Y, Zhou B L, Guan Z, et al. Compact passively Q-switched single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser at 2.0 μm [J]. Applied Optics, 2021, 60(34): 10684-10688.
- [27] Jung M, Koo J, Chang Y M, et al. An all fiberized, 1.89- μm Q-switched laser employing carbon nanotube evanescent field interaction[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(9): 669-673.
- [28] Ma H F, Wang Y G, Zhou W, et al. A passively Q-switched thulium-doped fiber laser with single-walled carbon nanotubes[J]. Laser Physics, 2013, 23(3): 035109.
- [29] Liu J, Xu J, Wang P. Graphene-based passively Q-switched 2 μm thulium-doped fiber laser[J]. Optics Communications, 2012, 285(24): 5319-5322.
- [30] Wang F, Torrisi F, Jiang Z, et al. Graphene passively Q-switched two-micron fiber lasers[C]//2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2012, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012.
- [31] Tang Y L, Yu X C, Li X H, et al. High-power thulium fiber laser Q switched with single-layer graphene[J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 614-617.
- [32] Yu H, Zheng X, Yin K, et al. Nanosecond passively Q-switched thulium/holmium-doped fiber laser based on black phosphorus nanoplatelets[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(2): 603-609.
- [33] Ren Y, Qin Z P, Xie G Q, et al. Black phosphorus Q-switched large-mode-area Tm-doped fiber laser[J]. International Journal of Optics, 2018, 2018: 8060415.
- [34] Luo Z Q, Liu C, Huang Y Z, et al. Topological-insulator passively Q-switched double-clad fiber laser at 2 μm wavelength[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0902708.
- [35] Tsai T Y, Tsao H X, Huang C L, et al. 1590-nm-pumped passively Q-switched thulium all-fiber laser at 1900 nm[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 11205-11210.
- [36] Jackson S D. Passively Q-switched Tm^{3+} -doped silica fiber lasers[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3311-3317.
- [37] Jiang M, Tayebati P. Stable 10 ns, kilowatt peak-power pulse generation from a gain-switched Tm-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(13): 1797-1799.
- [38] Ding J W, Sampson B, Carter A, et al. A monolithic thulium doped single mode fiber laser with 1.5ns pulsewidth and 8 kW peak power[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7914: 79140X.
- [39] Tang Y L, Li F, Xu J Q. High peak-power gain-switched Tm^{3+} -doped fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(13): 893-895.
- [40] Simakov N, Hemming A, Bennetts S, et al. Efficient, polarised, gain-switched operation of a Tm-doped fibre laser[J]. Optics Express, 2011, 19(16): 14949-14954.
- [41] Tang Y L, Xu J Q. Hybrid-pumped gain-switched narrow-band thulium fiber laser[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(7): 072702.
- [42] Tang Y L, Li F, Xu J Q. Narrow-pulse-width gain-switched thulium fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(3): 035101.
- [43] Zhong M F, Sun H Y, Liu T L, et al. Ultra-low

- repetition rate gain-switched thulium-doped fibre laser at 2 μm [J]. *Quantum Electronics*, 2017, 47(10): 877-881.
- [44] Pal D, Paul A, Chowdhury S D, et al. Hybrid pumped gain-switched thulium fiber laser at a high repetition rate [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3546-3550.
- [45] Liu S L, Dou Z Y, Zhang B, et al. High repetition rate gain-switched thulium-doped fiber laser pumped by 1.6 μm noise-like pulses[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106856.
- [46] Zhang H R, Lin W, Wu D D, et al. Direct generation of 7 W, 360 μJ multi-pulse laser from an ultra-compact all-fiber gain switched Tm^{3+} -doped double-clad fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(22): 1258-1261.
- [47] Jackson S D, King T A. Efficient gain-switched operation of a Tm-doped silica fiber laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(5): 779-789.
- [48] Swiderski J, Michalska M. Generation of self-mode-locked resembling pulses in a fast gain-switched thulium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10): 1624-1626.
- [49] Tao M M, Zhao J W, Yan Y, et al. Experimental investigation of gain-switched Tm-Ho Co-doped single clad fiber lasers[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(10): 105101.
- [50] 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.
- [51] 王雄, 周朴, 王小林, 等. 混合抽运和增益开关铥/钬共掺脉冲光纤激光器对比研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0302010.
Wang X, Zhou P, Wang X L, et al. Contrastive research on hybrid-pump pulse and gain-switch pulse Tm-Ho Co-doped fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0302010.
- [52] Kharitonov S, Brès C S. Microjoule-level widely tunable gain-switched thuliumdoped fiber laser[C]//*Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, September 29-October 3, 2019, Vienna, Austria. Washington, D.C.: OSA, 2019: JW2A.32.
- [53] Shi H X, Liu J, Liu K, et al. 160 W average power single-polarization, nanosecond pulses generation from diode-seeded thulium-doped all fiber MOPA system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9344: 93441O.
- [54] Gaida C, Gebhardt M, Kadwani P, et al. Amplification of nanosecond pulses to megawatt peak power levels in Tm^{3+} -doped photonic crystal fiber rod[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 691-693.
- [55] Tang Y L, Li X H, Yan Z Y, 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.
- [56] Swiderski J, Michalska M, Pichola W, et al. Generation of 25-ns pulses with a peak power of over 10 kW from a gain-switched, 2- μm Tm-doped fibre laser and amplifier system[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(4): 294-297.
- [57] Yang J L, Wang Y, Zhang G, et al. High-power highly linear-polarized nanosecond all-fiber MOPA at 2040 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(9): 986-989.
- [58] Ouyang D Q, Zhao J Q, Zheng Z J, et al. 110 W all fiber actively Q-switched thulium-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1500407.
- [59] Wang X, Jin X X, Zhou P, et al. 105 W ultra-narrowband nanosecond pulsed laser at 2 μm based on monolithic Tm-doped fiber MOPA[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4233-4241.
- [60] Wang X, Jin X X, Zhou P, et al. All-fiber-integrated narrowband nanosecond pulsed Tm-doped fiber MOPA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(14): 1473-1476.
- [61] Wang X, Jin X X, Zhou P, et al. All-fiber high-average power nanosecond-pulsed master-oscillator power amplifier at 2 μm with mJ-level pulse energy[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(8): 1941-1945.
- [62] Ouyang D Q, Zhao J Q, Zheng Z J, et al. Repetition-rate-switchable and self-mode-locked pulses generation from a gain-switched thulium-doped fiber laser and their amplification properties[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1503710.
- [63] Grzes P, Swiderski J. Gain-switched 2- μm fiber laser system providing kilowatt peak-power mode-locked resembling pulses and its application to supercontinuum generation in fluoride fibers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1500408.
- [64] He Z X, Yu T, Meng J, et al. 2 μm band pulsed all-PM thulium-doped fiber laser based on the acousto-optic Q-switching[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11763: 117634F.
- [65] Fang Q, Shi W, Kieu K, et al. High power and high energy monolithic single frequency 2 μm nanosecond pulsed fiber laser by using large core Tm-doped germanate fibers: experiment and modeling[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16410-16420.
- [66] 王世杰, 蔡一鸣, 张志伦, 等. 自研 100 μm /400 μm 光纤实现 1000 W 纳秒脉冲激光输出[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0115001.
Wang S J, Cai Y M, Zhang Z L, et al. 1000 W nanosecond pulsed laser output based on homemade 100 μm /400 μm fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0115001.
- [67] Stutzki F, Jansen F, Liem A, et al. 26 mJ, 130 W Q-switched fiber-laser system with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1073-1075.
- [68] Lapointe M A, Chatigny S, Piché M, et al. Thermal effects in high-power CW fiber lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7195: 71951U.
- [69] Jollivet C, Farley K, Conroy M, et al. Design optimization of Tm-doped large-mode area fibers for power scaling of 2 μm lasers and amplifiers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10083: 100830I.
- [70] Sincore A, Bradford J D, Cook J, et al. High average power thulium-doped silica fiber lasers: review of systems and concepts[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0901808.
- [71] Creeden D, Johnson B R, Rines G A, et al. High power

- resonant pumping of Tm-doped fiber amplifiers in core- and cladding-pumped configurations[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29067-29080.
- [72] Jin X X, Lee E, Luo J Q, et al. High-efficiency ultrafast Tm-doped fiber amplifier based on resonant pumping[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1431-1434.
- [73] 陶蒙蒙, 叶锡生, 叶景峰, 等. 同带泵浦千瓦级掺铥光纤激光器输出特性理论模拟[J]. *中国激光*, 2022, 49(1): 0101019.
- Tao M M, Ye X S, Ye J F, et al. Modeling in-band pumped kW level high-power Tm-doped fiber lasers via simulations[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(1): 0101019.
- [74] Fang Q, Shi W, Petersen E, et al. Half-mJ all-fiber-based single-frequency nanosecond pulsed fiber laser at 2- μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(5): 353-355.
- [75] Zhu R, Wang J T, Zhou J, et al. Single-frequency high-energy Yb-doped pulsed all-fiber laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(9): 091402.
- [76] Zhang X, Diao W F, Liu Y, et al. Eye-safe single-frequency single-mode polarized all-fiber pulsed laser with peak power of 361 W[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11): 2465-2469.
- [77] Yu M, Jin G Y, Wang J, et al. Optimization of ASE suppression in high efficiency Tm³⁺-doped pulsed all-fibered MOPA operating at 1908.12 nm[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103173.