

· 特邀综述 ·

中红外波段超快光纤激光器研究进展

胡明列*, 蔡宇

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 超快激光研究室 & 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 近年来中红外超快锁模激光器发展极为迅速, 有效地推动了中红外超快激光在中红外频率梳和分子光谱学、材料加工和激光手术、分子生物和化学等领域的应用。从近年来中红外超快光纤激光器的进展开始, 介绍了该波段各类光纤激光的进展, 并分析了如何从动力学调控上实现更窄脉宽、更远波长的技术方案; 系统介绍了中红外光纤放大器中啁啾脉冲放大和非线性放大技术。综合来看, 中红外超快光纤激光器正处在高速发展阶段, 未来具有极高的应用价值。

关键词 激光器; 锁模光纤激光器; 中红外波段; 放大器; 啁啾脉冲放大; 非线性放大

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500009

Research Progress on Mid-Infrared Ultrafast Fiber Laser

Hu Minglie*, Cai Yu

Ultrafast Laser Laboratory & Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China

Abstract In the past decade, mid-infrared ultrafast mode-locked lasers have made significant progress, effectively promoting their applications in many fields, including mid-infrared frequency combs, molecular spectroscopy, material processing, laser surgery, molecular organism, and chemistry. Herein, starting with the progress of mid-infrared ultrafast fiber lasers in recent years, we introduced the development of various optical fiber lasers in this band and discussed femtosecond fiber laser solutions achieving shorter pulse widths and farther wavelengths. Further, we introduced chirped pulse amplification and nonlinear amplification. Thus, mid-infrared ultrafast fiber lasers are in the high-speed development stage and will have abundant applications in the future.

Key words lasers; mode-locked fiber laser; mid-infrared band; amplification; chirped pulse amplification; nonlinear amplification

OCIS codes 320.7090; 140.3280; 140.3510

1 引 言

光纤激光技术的快速发展极大地推动了超快激光技术的应用。目前应用推广最成功的应该是在近红外波段的掺镱光纤激光和掺铒光纤激光。目前, 中红外激光光源因在分子光谱、材料加工、生物医药等领域具有广阔的应用前景而发展极为迅速, 尤其是基于光纤结构的超短脉冲激光的发展尤为引人注目。与紫外-近红外波段相比, 中红外波段激光有着特点鲜明的重要应用价值: 1) 中红外波段包含了许多重要分子的特征谱线——“分子指纹谱”。与目前

吸收光谱仪所用的非相干热光源相比, 中红外波段激光可以在宽光谱范围内提供极高的光谱亮度、窄谱线线宽和一致的谱线结构, 从而被用于高速、高分辨率、高光谱灵敏度、高信噪比的中红外光谱测量^[1], 并可以精确地标定分子的振动能级。因此, 中红外激光是超高精度分子光谱学、分子痕迹探测等的理想光源, 在污染监测、燃烧场诊断、分子光谱学等领域有着重要的应用。2) 中红外波段激光包含了大气中几个重要的光学透明窗口, 使得该波段在大气通信、红外测距、超高分辨率天文光谱仪的波长定标等领域有着重要应用^[2]。值得一提的是, 将中红

收稿日期: 2020-03-06; 修回日期: 2020-03-25; 录用日期: 2020-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61535009, 61377041)、天津市杰出青年基金(17JCJQC43500)

* E-mail: huminglie@tju.edu.cn

外光频梳用于天文光谱仪的波长定标可以大大提高视向速度的测量精度,从而为搜寻类地行星、确定宇宙膨胀速度和测量基本物理常数等重大前沿科学问题提供有力的工具。3)中红外波段覆盖“水与氨基化合物的吸收峰”,可被所有含羟基或氨基的物质强烈吸收,从而使得该波段的频率梳可用于病毒检测和生物医疗等领域。

在固体激光技术方面,人们主要通过近红外固体激光泵浦光学参量振荡技术,利用近红外固体激光进行非线性频率转换实现中红外超短脉冲激光输出^[3-4],而且通常都是利用半导体激光器泵浦 Nd:YAG 固体激光器产生的 1 μm 激光泵浦周期性极化铌酸钾(PPLN)等非线性光学晶体产生中红外激光;或者用半导体激光器泵浦 Nd:YAG 固体激光器产生的 1 μm 激光去泵浦 KTP 晶体先产生 2 μm 的激光,再利用其泵浦磷化镉(ZGP)等晶体,通过光学参量振荡产生中红外激光。尽管这样的方法可以使激光的工作波长方便调谐,但激光系统较复杂、稳定性较差、体积庞大,影响了此类中红外激光光源的应用。

得益于材料研究方面的快速发展,具有优异光学性能的中红外激光增益材料被用来产生中红外超短脉冲,中红外超快光纤激光光源也获得了很大进展。目前,在 1.9 μm 和 2.4 μm 波段内,锁模激光器已经可以产生少于 10 个光学周期甚至只有 3 个光学周期的超短脉冲,并且在更远的 3.5 μm 波长处也实现了锁模脉冲的产生。本文阐述了近年来中红外超快光纤激光器的进展,总结讨论了实现更窄脉宽、更远波长的超快光纤激光器方案,分析了三阶色散对被动锁模光纤激光器输出的影响;此外还介绍了中红外超快光纤放大器,分析总结了啁啾脉冲放大、非线性放大等技术。

2 中红外超快光纤激光振荡器

超快光纤激光器一般采用被动或主动锁模器件启动,对激光腔内色散和非线性过程进行优化,能够产生飞秒量级的脉冲。全光纤锁模激光器具有光束质量好、效率高、易集成、结构灵活以及散热性好等优点。近年来,中红外光纤激光器也被广泛关注和研究,尤其是这个波段的材料色散极其平坦,这对于脉冲的非线性传输动力学来说有很大优势,目前可输出从纳秒到飞秒的脉宽。在 2 μm 波段,光纤激光器常用 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 以及 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺的增益光纤。而基于氟化物的增益光纤则能支持到

3 μm 波段附近。下面分别介绍这几种波段的超快光纤激光器。

2.1 2 μm 波段超快光纤激光器

三阶稀土离子 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 是能为在 2 μm 波段工作的高功率连续和脉冲激光器提供受激辐射的增益离子。Nelson 等^[5]在 1995 年首次报道了基于非线性偏振旋转(NPR)的掺铥锁模光纤激光器,该激光器可以获得脉宽在 350~500 fs 可调、中心波长在 1798~1902 nm 可调的脉冲。随后,Sharp 等^[6]学者将基于 InGaAs 的半导体可饱和吸收镜(SESAM)和掺铥光纤结合,实现了波长为 1997 nm、脉宽为 190 fs 的脉冲输出。因为普通石英光纤和掺铥光纤在 2 μm 波段呈负色散,所以该激光器工作在孤子域,而其脉宽之所以能达到 190 fs,则是群速度色散延迟和自相位调制平衡的结果。但在此后一段时间,由于 2 μm 波段光纤的缺乏,这方面的报道很少。2007 年,Kivisto 等^[7]在铥钛共掺光纤激光器中获得了变换极限脉宽为 750 fs 的孤子脉冲,自此之后,2 μm 波段基于 SESAM 的锁模光纤激光器被大量报道。表 1 简单列举了近年来基于 SESAM 的 2 μm 被动锁模光纤激光器^[7-14]。2011 年 Wang 等^[10]采用铥钛共掺的硅酸盐光纤(具有高的掺杂浓度和良好的机械强度),首次获得了波长超过 2 μm 的皮秒脉冲。2016 年,Tolstik 等^[14]实现了掺铥锁模光纤激光器,该激光器工作在耗散孤子域,输出的未压缩的脉宽为 2.23 ps,脉冲能量可达 4 nJ。但该脉冲能量依然很小,故 Wang 等^[15]在 2018 年以多模掺铥光纤作为增益介质,搭建了如图 1 所示的多模光纤锁模激光器。多模掺铥光纤在 2 μm 处的归一化频率为 5.88,可以支持很多模式。为了能够有效实现多个横模的锁定,需要在基模和高阶模之间进行有效的非线性耦合,其中空间重叠是非线性耦合的首要条件。另外,这些横模在时间上也需要充分重叠才能形成稳定脉冲。基于大模场面积的多模掺铥光纤激光器可输出平均功率超过 10 W、脉冲能量为 551 nJ、峰值功率为 10 kW 的脉冲,为获得高能量脉冲提供了一种新思路。

中红外波段 SESAM 较复杂的制造工艺和较高的成本,以及低维纳米材料的蓬勃发展,推动了将低维纳米材料作为可饱和吸收体的研究工作^[16]。在 2 μm 波段,研究人员已采用各种低维纳米材料产生了各种孤子,如传统孤子、色散管理孤子、耗散孤子等。图 2 是近几年一些基于低维纳米材料锁模光纤激光器输出脉宽的典型报道^[17-27]。

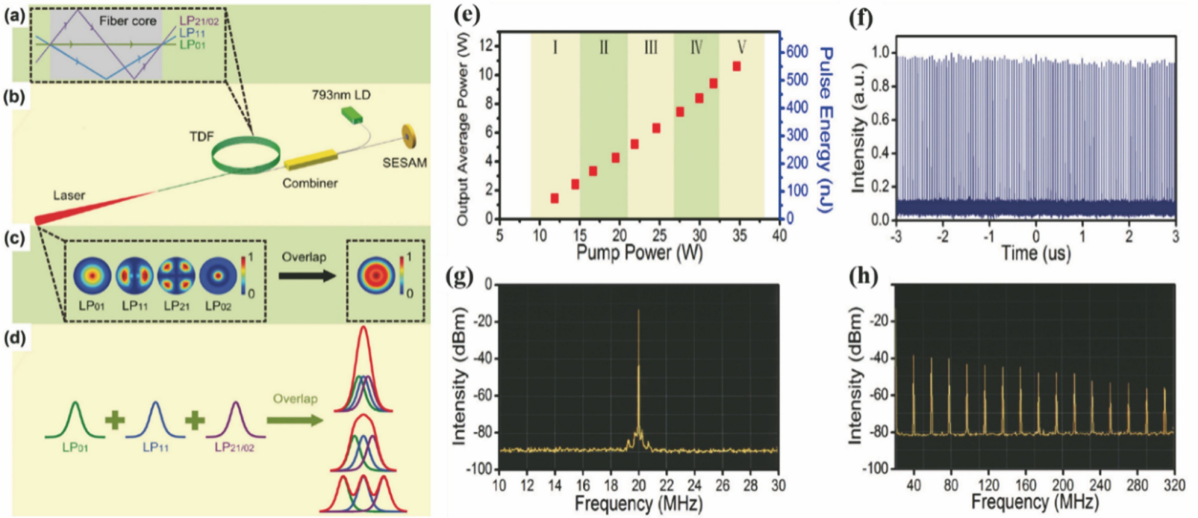


图 1 高功率锁模多模光纤激光器^[15]。(a)多模光纤纤芯中的基模和高阶模耦合示意图；(b)高功率多模光纤锁模激光器装置示意图；(c)多模光纤激光器中不同空间模式的模拟强度分布和最终重叠的模式示意图；(d)不同模式的时间轮廓及叠加轮廓(红线)；(e)输出功率和脉冲能量；(f)输出脉冲串；(g)频率为 30 MHz 的射频谱；(h)频率宽度为 320 MHz 的射频谱

Fig. 1 High power mode-locked multi-mode fiber laser^[15]. (a) Schematically shows the coupling between the fundamental mode and higher order modes in the fiber core; (b) the experimental setup schematic of the high power mode-locked Tm^{3+} -doped fiber laser; (c) schematically shows the simulated intensity profile of several spatial modes and the final overlapped one in this multi-mode fiber laser; (d) schematically indicates the temporal pulse profile of individual modes and the overlapped multiple modes (red lines); (e) output power and pulse energy; (f) pulse train; (g) radio-frequency spectrum in 30 MHz spans; (h) radio-frequency spectra in 300 MHz spans

表 1 近年来基于 SESAM 的 2 μm 被动锁模光纤激光器^[7-14]

Table 1 Two micrometer passive mode-locked fiber laser based on SESAM in recent years^[7-14]

Laser gain material	Wavelength / nm	Out power / mW	Pulse width / fs	Reference
Tm^{3+} / Ho^{3+}	1972	20	750	[7]
	1980	15	600	[9]
	2060	10	1100	[10]
	1968	22	315	[13]
Tm^{3+}	1980	10	1500	[8]
	1980	10	350	[11]
	1918	158	579	[12]
Ho^{3+}	2094	28	2230	[14]

2015 年, Sotor 等^[17]首次报道了他们在 2 μm 波段将黑磷(BP)镀到光纤端面制作成可饱和吸收体的工作,如图 3(a)所示,他们在 1910 nm 处获得了脉宽为 739 fs 的脉冲,该工作证明了 BP 是一种通用的宽带可饱和吸收体。2016 年, Wang 等^[18]在基于碳纳米管(CNT)的掺铥锁模光纤激光器中引入正色散的硅酸锗光纤进行色散管理后,激光器的腔内净色散为 0.055 ps²,得到了脉宽为 152 fs、光谱

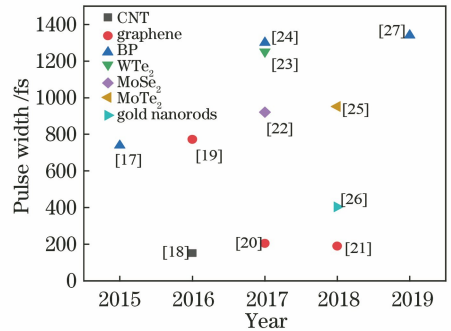


图 2 近几年一些基于低维纳米材料锁模光纤激光器输出脉宽的典型报道^[17-27]

Fig. 2 Some typical reports on the output pulses width of mode-locked fiber lasers based on low-dimensional nanomaterials in recent years^[17-27]

带宽为 52.8 nm、脉冲能量为 0.19 nJ 的脉冲。这是到目前为止直接从 2 μm 碳纳米管被动锁模光纤激光器中输出的最短脉冲。在 1 μm 和 1.5 μm 波段,石墨烯是优秀的可饱和吸收体^[19-21]。2017 年, Sotor 等^[20]报道了第一台基于石墨烯的拉伸孤子锁模保偏掺铥光纤激光器,进行色散管理后,该激光器腔内的净色散为 -0.024 ps²,调节泵浦到 580 mW,能够输出脉宽为 205 fs 的拉伸孤子。2018 年,

Pawliszewska 等^[21]报道了第一台基于石墨烯的拉伸孤子锁模掺钕光纤激光器,在腔内进行色散管理后,实现了中心波长位于 2080 nm 处的脉宽为

190 fs 的拉伸孤子。图 4 是基于石墨烯的拉伸孤子锁模掺钕光纤激光器的结构示意图和腔内不同净色散对应的输出光谱。

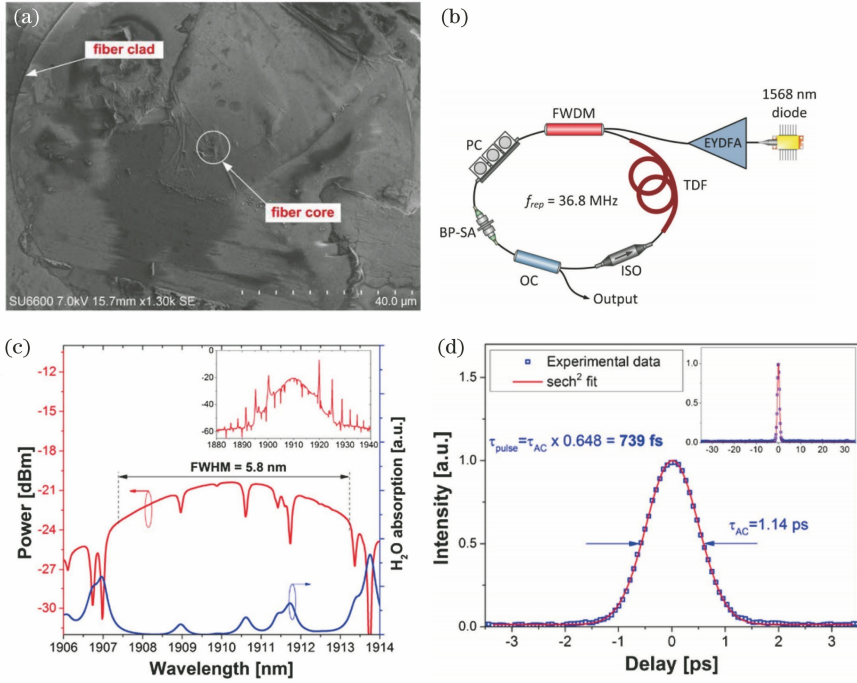


图 3 黑磷被动锁模光纤激光器^[17]。(a)多层黑磷覆盖的光纤端面的电子显微镜照片;(b)黑磷被动锁模光纤激光器装置示意图;(c)输出光谱(红线)以及从 HITRAN 数据库中获得的水吸收光谱(蓝线),插图是在 60 nm 宽跨度中测得的光谱;(d)自相关迹

Fig. 3 Passive mode-locked fiber laser based on BP^[17]. (a) SEM image of fiber connector with visible BP layer covering the core and clad; (b) experimental setup schematic of passive mode-locked fiber laser based on BP; (c) optical spectra of the laser (red line) together with the water absorption lines taken from the HITRAN database (blue line) and the inset is the spectrum measured in wide 60 nm span; (d) autocorrelation trace of the 739 fs pulse generated from the Tm-doped fiber laser

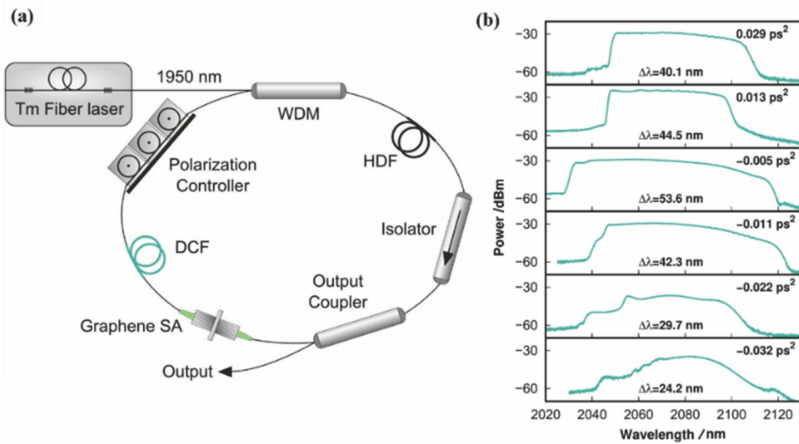


图 4 石墨烯被动锁模掺钕光纤激光器^[21]。(a)石墨烯被动锁模掺钕光纤激光器装置示意图;(b)腔内不同净色散对应的输出光谱

Fig. 4 Passive mode-locked Ho-doped fiber laser based on graphene^[21]. (a) Experiment setup schematic of passive mode-locked Ho-doped fiber laser based on graphene; (b) output optical spectra evolution as a function of the net cavity dispersion

2017年, Lee等^[22]首次报道了他们在2 μm波段以MoSe₂作为可饱和吸收体成功获得920 fs锁模脉冲的工作,证明了过渡性金属双硫属化合物(TMDCs)在2 μm波段工作的可能性。自此之后,在2 μm波段以MoTe₂、WTe₂等过渡性金属双硫属化合物作为饱和吸收体的工作也被报道^[23-25]。除了这些二维材料之外,2018年, Kang等^[26]制作了基于拉锥光纤的金纳米可饱和吸收体,在2 μm波段获得了404 fs脉冲。

2 μm波段普通光纤均为负色散,故一般激光器都工作在孤子域。脉冲能量会受到孤子面积的限制,因此孤子所能承受的最大能量为

$$U = \frac{2|\beta_2|}{\gamma T_0}, \quad (1)$$

式中: β_2 为腔内净色散; γ 为光纤的非线性系数; T_0 为脉宽。

尽管基于低维纳米材料的锁模光纤激光器通过色散管理可使其孤子工作在非孤子领域,但由于材料的损伤阈值较小且恢复时间较长,所以对于更高能量、更短脉冲的产生不是最佳选择。对于超快光纤激光器,另一个重要的锁模技术就是基于非线性相移的等效可饱和吸收体技术,包括NPR、非线性光学环境、非线性光学放大环境等技术。相对于真实的可饱和吸收体而言,基于非线性相移的锁模技术有着更快的响应时间和波长不敏感的特性。NPR已被成功应用在2 μm波段。

图5是近年来2 μm波段NPR锁模光纤激光器腔内净色散对应的脉宽和能量图^[5,28-31,32-33]。1995年, Nelson等^[5]首次采用光谱滤波的方法,在无色散管理的NPR锁模光纤激光器中获得了360 fs的脉冲,其中心波长在1.8 μm到1.9 μm范围内可调,但脉冲能量依旧被孤子面积所限制,低于20 pJ。在此之后,为了获得更高能量的脉冲,2008年, Engelbrecht等^[28]在激光腔内引入一对正色散的光栅对进行色散管理,使孤子处于耗散孤子域或自相似子域,从而获得了能量为4.3 nJ的脉冲,输出带有啁啾的脉冲通过腔内压缩实现了294 fs的脉宽。除了通过光栅引入正色散之外,2015年, Tang等^[29]通过在腔内引入正色散的超高数值孔径光纤,将腔内色散调控到了0.37 ps²,再通过加入滤波器,使孤子演化成自相似子,产生了脉宽为130 fs、能量为7.6 nJ的单脉冲。当然,除了用色散管理和光谱滤波来提升脉冲能量之外,还有别的方法,如:2017年, Gao等^[30]在2 μm NPR锁模光纤激光器中获得

了脉宽为350 fs、能量为7.8 nJ的脉冲。之所以能够获得如此高的能量,是因为在腔内形成了高阶孤子,并且基于普通单模光纤的低双折射产生的滤波抑制了kelly边带的形成,有效地提高了主脉冲能量。

传统掺铋光纤的色散均是负色散,但2018年 Voropaev等^[31]采用2 μm波段的正色散掺铋光纤和高非线性光纤进行实验,通过调控使腔内的净色散为0.04 ps²,从而获得了脉宽为142.8 fs、能量为31 nJ的脉冲。这也是目前为止2 μm NPR锁模掺铋光纤激光器中获得的最高能量。在2 μm波段中,振荡级输出的最短脉冲是2014年 Nomura等^[34]报道的45 fs,该工作使用了具有较大数值孔径和较小纤芯的掺铋氟化物光纤,该光纤在2 μm波段呈现正色散,通过腔内马丁内斯展宽器调节腔内色散,使激光器工作在色散管理孤子域,然后腔外压缩到45 fs。

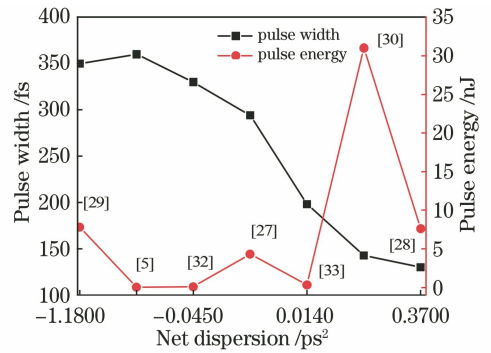


图5 2 μm波段NPR锁模光纤激光器典型报道中腔内净色散对应的脉宽和能量图^[5,28-31,32-33]

Fig. 5 Some typical reports of mode-locked fiber laser based on NPR about pulse width and energy relationship for intra-cavity net dispersion^[5,28-31,32-33]

基于非线性相移的人工可饱和吸收体除了NPR之外,经常使用的还有非线性光学环境。2019年,本课题组的Liao等^[35]为了改进激光器在高重复频率运转时的自启动锁模特性,在九字腔锁模激光器的光纤环中加入了利用法拉第旋光器与波片构成的相位偏置器,搭建了如图6(a)所示的激光器。通过调控腔内光纤的三阶色散,获得如图6(b)中蓝线所示的腔内总的群延迟色散线,其在零色散点左右符号相反。微调相位偏置器中的波片角度,腔内的等效可饱和吸收效应和滤波效应就会反馈作用于腔内脉冲,使脉冲工作波长在激光器增益谱内实现波长调谐。由于群延迟色散在零色散点左右具有奇对称特性,腔内净色散会影响脉冲在腔内的演化过

程,故而可以在不改变腔结构的情况下,使激光器的直接输出状态在如图 7 所示的类孤子态、呼吸孤子态和耗散孤子态之间转换。该工作在激光腔结构固

定的情况下,成功地对腔内脉冲动力学进行了精密调控,实现了脉冲质量的优化以及脉冲序列噪声的抑制。

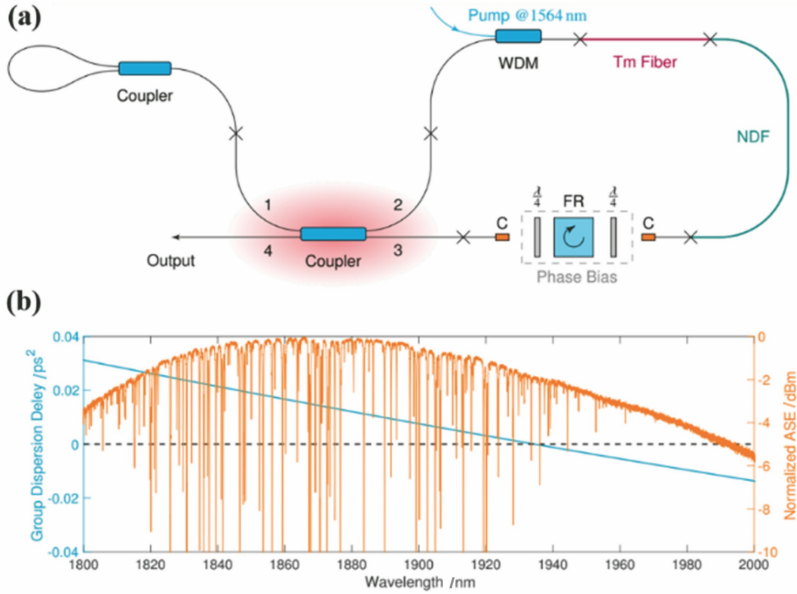


图 6 非线性放大环形镜锁模掺铥光纤激光器示意图和腔内群速度色散延迟线,以及腔内自发辐射谱^[35]。

(a) 激光器示意图; (b) 群速度色散延迟线和自发辐射谱

Fig. 6 Schematic of NALM mode-locked Tm-fiber laser and the corresponding group dispersion delay in cavity as well as the normalized ASE spectrum^[35]. (a) Schematic of the laser; (b) group dispersion delay in cavity as well as the normalized ASE spectrum

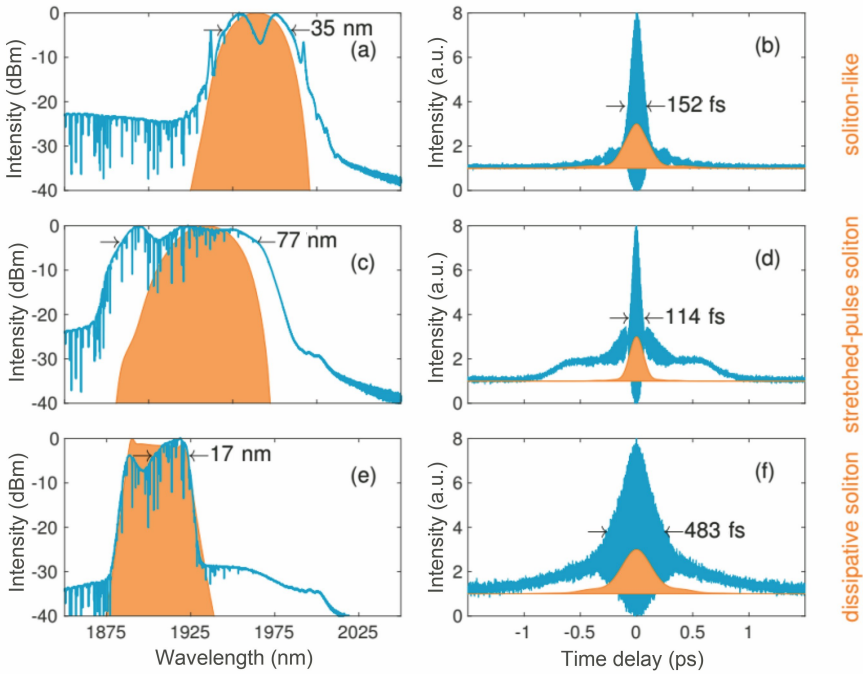


图 7 不同锁模区域中振荡器的典型光谱和振荡器对应的自相关迹^[35]。(a)(c)(e)典型光谱,橙色区域是模拟光谱;

(b)(d)(f)自相关迹,橙色区域对应于变换限制脉冲的自相关迹

Fig. 7 Typical spectra and the corresponding interference autocorrelation trace of the oscillator in different mode-locking regions. (a)(c)(e) Typical spectra, the orange regions are the spectra from simulation; (b)(d)(f) autocorrelation trace, the orange regions correspond to the calculated intensity autocorrelation trace of the transform-limited pulse

2.2 2.8~3 μm 超快光纤激光器

近年来,掺杂稀土离子的氟化物光纤的发展,迅速推动了 2.8~3 μm 波段超快光纤激光器的发展。这个波段的激光通常是基于 Er³⁺、Ho³⁺/Pr³⁺ 和 Dy³⁺ 跃迁激发的。因为大气中的水对 2.8 μm 波段光的吸收很强,所以该波段的固体激光器有很大的腔损,使得锁模形成比较困难。光纤激光器是这个波段实现锁模的理想平台,不仅可以有效避免水的吸收,还具有良好的光束质量等诸多优点。

2.2.1 掺 Er³⁺ 氟化物超快光纤激光器

1996 年,Frerichs 等^[36]在掺 Er³⁺ 的氟化物光纤激光器中,通过 flying-mirror 技术和 InAs 可饱和吸收体获得了 2.8 μm 波段的第一台调 Q 锁模激光器。但 flying-mirror 技术并不能产生连续的锁模脉冲,该技术将振动反射镜的振动信号通过线形腔的腔镜耦合到腔内,再通过多普勒效应使激光信号产生频移,频移后的信号被反馈回谐振腔中放大,

这些相位锁定的新频率成分会叠加在一起,但由于 InAs 可饱和吸收体具有很大的非饱和损耗,所以只能产生调 Q 锁模脉冲。直到 2012 年,Wei 等^[37]报道了第一台基于 Fe:ZnSe 的 2.8 μm 锁模掺 Er³⁺ 氟化物光纤激光器,他们利用 Fe:ZnSe 的可饱和吸收作用,获得了脉宽为 19 ps、平均功率为 54.1 mW 的连续波锁模脉冲。同样基于 SESAM 的 2.8 μm 锁模掺 Er³⁺ 氟化物光纤激光器的很多工作都被报道了,目前报道的最高平均功率是 1.05 W^[38],但脉宽均在皮秒量级。直到 2015 年,Hu 等^[39]搭建了如图 8 所示的基于 NPR 的掺 Er³⁺ 氟化物锁模光纤激光器,在 2.8 μm 处获得了脉宽为 497 fs 的脉冲;同期,Duval 等也在 NPR 锁模掺 Er³⁺ 氟化物光纤激光器中获得 207 fs 的脉冲^[40],并首次基于孤子光谱的 kelly 边带位置估算了掺 Er³⁺ 氟化物光纤在 2.8 μm 的二阶色散,估算得到的二阶色散为 -0.094 ps²/km。

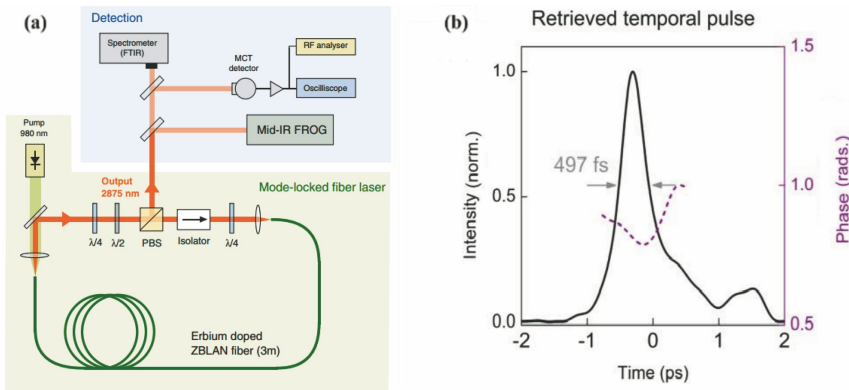


图 8 基于 NPR 的锁模掺 Er³⁺ 氟化物光纤激光器装置示意图以及自相关迹和相位^[39]。

(a) 装置示意图;(b) 自相关迹及相位

Fig. 8 Experiment setup schematic of mode-locked Er³⁺-doped fluoride fiber laser based on NPR and autocorrelation trace and phase^[39]. (a) Experiment setup schematic; (b) autocorrelation trace and phase

二维材料在 1, 1.5, 2 μm 波段的发展都很成熟,但由于 SESAM^[41-43]在 2.8 μm 处的饱和恢复时间较长,很难实现飞秒脉冲,更加促进了二维材料在 2.8 μm 的应用。由于工作在 2.8 μm 的氟化物光纤激光器等要求可饱和吸收体有更大的调制深度,以实现和稳定锁模脉冲,故需要增加二维材料的调制深度。近年来,多层石墨烯、BP 等已被成功地应用在 2.8 μm 充当可饱和吸收体^[44-46],并获得皮秒脉冲,下一步有望获得飞秒脉冲。表 2 列举了近年来锁模掺 Er³⁺ 氟化物光纤激光器的典型报道^[37, 39-47]。

2.2.2 掺 Ho³⁺/Pr³⁺ 氟化物超快光纤激光器

掺 Er³⁺ 氟化物光纤的工作波长通常在 2.8 μm,但水对该波段有着很强烈的吸收,这些强烈的吸收

会限制输出脉宽和脉冲的稳定性。所以掺 Ho³⁺/Pr³⁺ 氟化物光纤近年来也被逐渐应用在激光器中,它可将激光器的工作波长向远波长方向平移,有效地避开水的强吸收峰。2012 年,Li 等^[48]报道了基于新型 SESAM 的掺 Ho³⁺/Pr³⁺ 氟化物超快光纤激光器,其可在 2.87 μm 处获得脉宽为 24 ps、平均功率为 132 mW、能量为 4.9 nJ 的脉冲,但由于 SESAM 的恢复时间较长,故而输出脉宽较宽。为了获得更短的脉宽,Bi₂Te₃、Cd₃As₂、BP 等二维材料也被成功地应用在 3 μm 超快光纤激光器中,并获得了皮秒级别的脉冲输出^[49-51]。2016 年,Antipov 等^[52]在 3 μm 掺 Ho³⁺/Pr³⁺ 氟化物超快光纤激光器中,在无色散管理的情况下,获得了 180 fs 的锁模脉

表 2 近年来锁模掺 Er³⁺ 氟化物光纤激光器的典型报道^[37,39-47]

Table 2 Typical report of mode-locked Er³⁺-doped fluoride fiber laser in recent years^[37,39-47]

Year	Mode locking technique	Wavelength /nm	Pulse width /ps	Average power /mW	Peak power /kW	Reference
2012	Fe:ZnSe	2788.6	19	54.1		[37]
2014	SESAM	2797	60	440	0.14	[41]
2015	SESAM	2780	25	1050	1.86	[38]
2015	NPE	2800	0.207	44	3.9	[40]
2015	NPE	2793	0.497	206	6.4	[39]
2016	Graphene	2785	42	18		[44]
2016	BP		42	613	0.61	[45]
2017	SESAM	2710-2820	6.4	200	1.1	[43]
2018	BP	2771		6.2		[46]
2018	NLM	2800		88		[47]

冲。掺 Ho³⁺/Pr³⁺ 氟化物的增益带宽约为 120 nm, 所以理论上在该波段处可获得 70 fs 的脉冲, 但目前的激光器输出水平均在百飞秒量级, 故以后的研究工作将会重点在寻找合适的色散管理光纤和合适的可饱和吸收体上。

2.2.3 掺 Dy³⁺ 氟化物超快光纤激光器

掺 Er³⁺、Ho³⁺/Pr³⁺ 氟化物光纤的工作波长通常低于 2.9 μm, 仅仅覆盖了分子指纹谱的一部分。目前很多研究和应用还需要更远波长的超快激光, 获得更远波长超快激光的一种方法是通过双波长(970 nm 和 1973 nm)泵浦掺铒氟化物光纤。图 9 是 Er³⁺ 在双波长泵浦下的简化能级图, 该图显示了 3.5 μm 激光受激跃迁的过程。2016 年, Henderson-Sapir 等^[53] 采用这样的办法获得了一个可在 3.4~3.8 μm 范围内可调的连续光激光器。2018 年, Qin 等^[54] 将 BP 生长在金镜上, 利用 BP 优异的能带和光电特性, 搭建了第一台工作在 3.5 μm 波段的皮秒掺 Er³⁺ 氟化物光纤激光器。

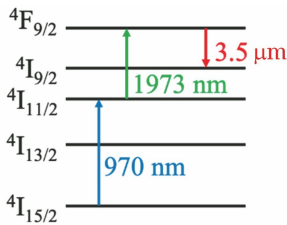


图 9 Er³⁺ 在双波长泵浦下的简化能级图

Fig. 9 Simplified energy level diagram of erbium ions under a dual wavelength pump

除了用双波长泵浦之外, 获得 3.5 μm 波段超快激光的另一种方法就是使用掺 Dy³⁺ 氟化物光纤激光器, 它可以工作在 2.8~3.4 μm 波段。2018 年, Woodward 等^[55] 报道了第一台掺 Dy³⁺ 氟化物光纤的锁模光纤激光器, 如图 10 所示, 该激光器通过使

用频移反馈技术实现被动锁模运转, 获得了脉宽为 33 ps、能量为 2.7 nJ 的锁模脉冲; 在该激光器腔内插入声光可调谐滤波器, 中心波长可以在 2.97~3.3 μm 范围内可调, 这是目前波长调谐范围最宽的皮秒脉冲光纤激光器。2019 年, Wang 等^[56] 报道了第一台基于 NPR 的掺 Dy³⁺ 氟化物光纤的锁模光纤激光器, 他们将 2.82 μm 波长的掺 Er³⁺ 光纤激光器作为泵浦源, 首次实现了波长大于 3 μm、脉宽为 828 fs、平均功率为 204 mW、峰值功率为 4.2 kW、能量为 4.8 nJ 的锁模脉冲; 该激光器是该波段第一台光纤飞秒激光器。目前, 3.5 μm 波段的可饱和吸收体还不成熟, 色散管理也不成熟, 导致该波段的超快光纤激光器发展较慢, 脉宽还在皮秒量级, 并不能达到使用要求, 因此下一步的研究重点是在该波段产生百飞秒级别甚至更短的脉冲。

3 中红外波段超快光纤放大器

目前, 很多应用均需要高能量或者高功率的锁模激光器, 但一般振荡级的脉冲平均功率、脉冲能量、峰值功率均较小, 特别是 2 μm 波段的大多数锁模光纤激光器工作在孤子域, 所以在振荡器后面加上放大器是必要的。但飞秒激光在微米级别的光纤纤芯中传输时, 会表现出很强烈的非线性, 导致脉冲畸变, 从而影响了光纤放大器的输出功率和脉冲能量, 故应避免光纤中引发脉冲失真的非线性。严重的脉冲失真一般发生在自相位调制 (SPM) 大于 2π 的情况下, 放大器输出的最大峰值功率被限制为

$$P_{pk,max} = \frac{2\pi}{\gamma L_{eff}}, \quad (2)$$

其中,

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-gL)}{g}, \gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}, \quad (3)$$

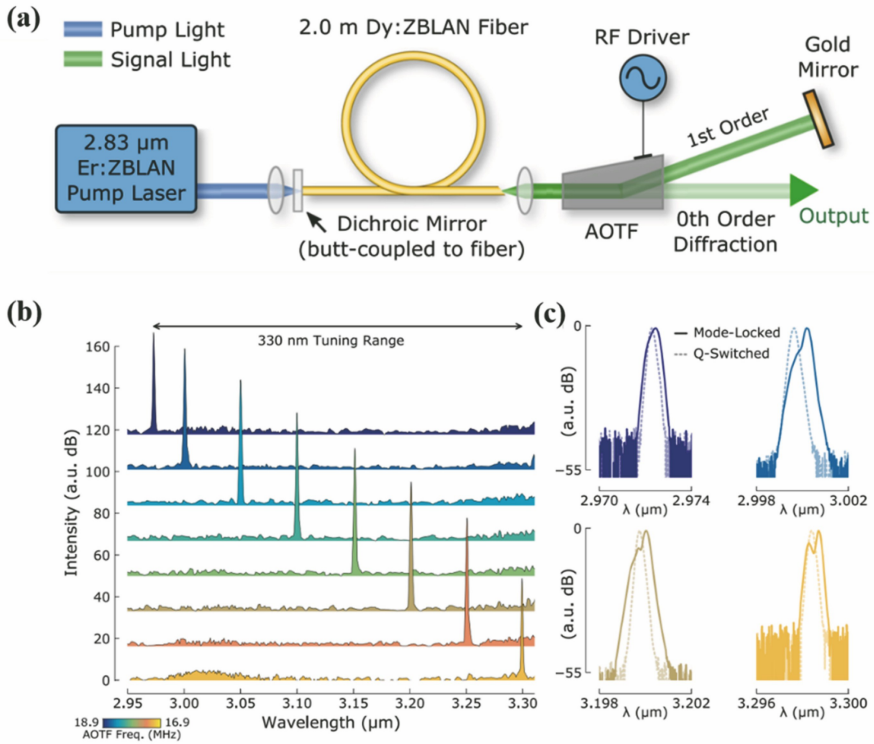


图 10 掺 Dy^{3+} 氟化物光纤的可调谐皮秒锁模激光器^[55]。(a)掺 Dy^{3+} 氟化物光纤的锁模光纤激光器装置示意图;(b)330 nm 锁模光谱调谐范围的特征光谱;(c)调 Q 和锁模光谱的精细光谱

Fig. 10 Tunable picosecond mode-locked Dy^{3+} ZBLAN fiber laser^[55]. (a) Experiment setup schematic of mode-locked Dy^{3+} -doped ZBLAN fiber laser; (b) characteristic spectra within the mode-locked FSF laser's 330 nm tuning range (arbitrarily shifted in intensity for visual clarity); (c) spectral shapes between Q-switched and mode-locked operation

式中: g 为放大器的有效增益; L 为放大器的光纤长度; L_{eff} 为放大器的有效长度; n_2 为非线性折射率系数; A_{eff} 为有效模场面积; λ 为波长。

为了有效降低非线性带来的影响, 一种办法是使用大模场光纤(LMA fiber), 增加模场面积, 降低光纤的非线性, 但同时也需要弯曲光纤来调节基模和高阶模的损耗, 只允许系统内的基模在运转。但这样的弯曲会导致光纤发生不同程度的应变, 使弯曲区域的折射率发生变化, 从而在一定

程度上影响了光纤的有效面积。另外一种方法则是通过脉冲的时域啁啾管理, 实现放大过程中峰值功率的降低。如图 11 所示的啁啾脉冲放大技术(CPA), 就是将振荡级输出的脉冲进行色散展宽, 降低峰值功率, 从而使得脉冲能够从放大器中提取更多的能量, 脉冲放大之后, 再通过压缩器进行压缩, 就能获得高能量、高峰值功率的超短脉冲。当然 CPA 也可以通过增加放大光纤的模场面积来减小非线性。

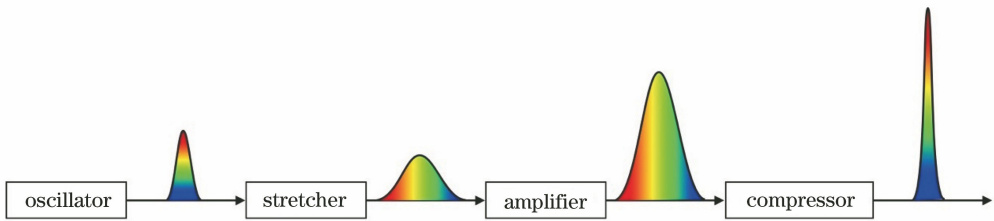


图 11 啁啾脉冲放大原理图

Fig. 11 Schematic of chirped pulse amplification

3.1 啁啾脉冲放大技术

图 12 是近年来一些典型报道中的 CPA 系统的重复频率、脉冲能量及对应实现的脉宽之间的关系

示意图^[57-74]。实现 $2 \mu m$ CPA 的最简单方法就是将普通单模光纤作为展宽器, 并通过放大器中自相位调制产生的线性正啁啾来平衡单模光纤的负色散,

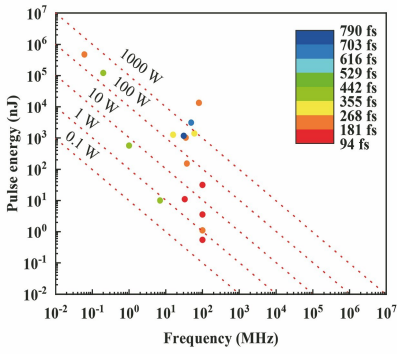


图 12 近年来一些典型报道中的 CPA 系统的重复频率、脉冲能量及对应实现的脉宽之间的关系图^[57-74]

Fig. 12 Schematic of the relationship among the repetition frequency, pulse energy, and corresponding pulse width of CPA systems reported in recent years^[57-74]

从而实现脉冲的压缩。

2013 年, Rudy 等^[57]报道了第一台 8 字腔掺铥锁模光纤激光器, 并在该激光器的基础上搭建了

CPA 系统, 将振荡级输出 63 pJ 的脉冲放大到 50 nJ, 脉宽压缩到 370 fs, 但输出的平均功率仅为 710 mW。所以, 为了实现更高功率、更高脉冲能量的 CPA 系统, 放大器和压缩器必须分离。目前 2 μm 波段 CPA 系统的最高平均功率是 2018 年 Gaida 等^[58]报道的 1060 W, 如图 13 所示。他们通过两个啁啾布拉格光纤光栅将种子的脉宽展开到 1 ns, 然后利用双层掺铥光纤和掺铥光子晶体光纤(PCF)构成的三级 CPA 系统, 将平均功率放大到 1150 W (光子晶体光纤由于周期性的空气孔而具有无截止单模的传输特点, 有效地保证了单模传输的特点), 然后在 Treacy 压缩器中压缩获得了平均功率为 1060 W、脉宽为 261 fs、重复频率为 80 MHz 的脉冲, 并且测量了相对强度噪声, 验证了横向模式的稳定性。尽管可以通过增加 PCF 模场面积的措施来进一步提高输出功率, 但 PCF 不能弯曲, 故整个系统比较庞大、复杂。

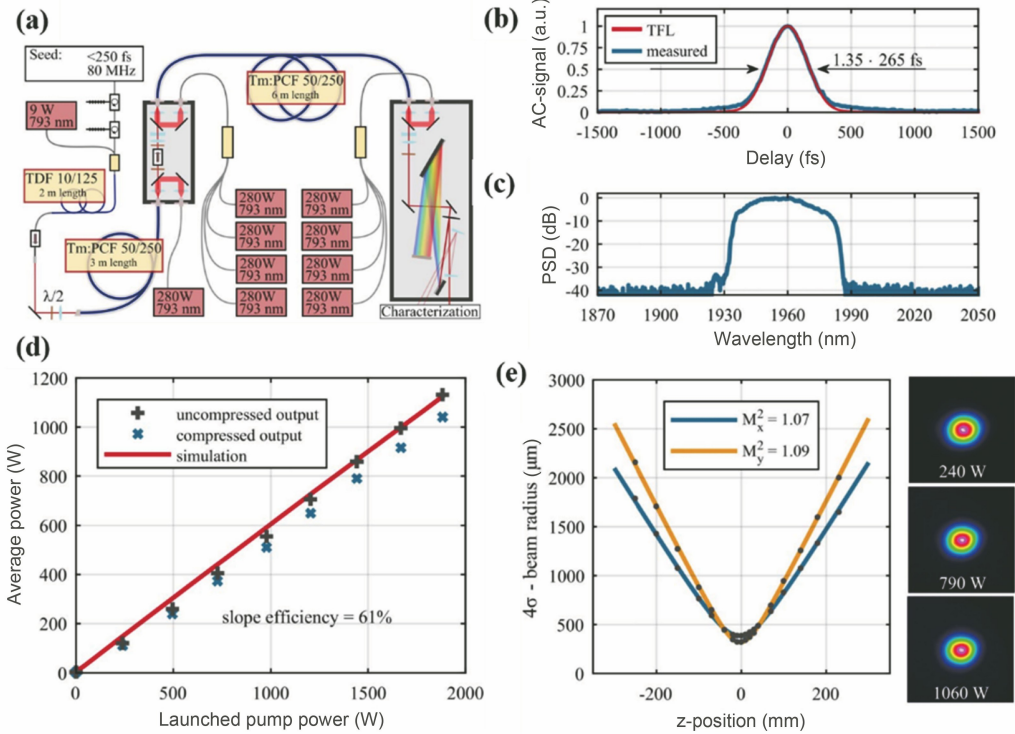


图 13 高功率掺铥啁啾脉冲放大系统^[58]。(a)高功率掺铥啁啾脉冲放大系统实验结构图;(b)(c)压缩后, 在 1060 W 平均输出功率下测得的强度自相关信号和频谱;(d)在 1960 nm 中心波长处测得在 Treacy 压缩器前后的平均输出功率与 793 nm 处泵浦功率的关系;(e)脉冲压缩后以最高平均输出功率进行的 M^2 测量, 右侧是各种功率水平下压缩后的输出光束轮廓

Fig. 13 High-power thulium-doped fiber chirped pulse amplification system^[58]. (a) Experimental setup schematic of the high-power thulium-doped fiber chirped pulse amplification system; (b) (c) measured intensity autocorrelation signal and frequency spectrum at 1060 W average output power after compression; (d) measured average output power at a 1960 nm center wavelength before and after Treacy compressor versus launched pump power at 793 nm; (e) M^2 measurement at the highest average output power after pulse compression, and the output beam profiles at various power levels after the compressor are shown on the right

2015年, Stutzki等^[59]利用PCF和大模场棒状掺铋光纤构成了三级CPA系统,这种棒状光纤省去了热损伤阈值较低的外涂覆层,增加石英玻璃包层,模场直径也达到了65 μm ,并且光纤不能弯曲,从而有效地降低了传输损耗,成功实现了平均功率为24 W、脉冲能量为120 μJ 、峰值功率为200 MW的脉冲。2016年, Gaida等^[60]在类似的系统结构上,通过脉冲整形有效地避免了激光工作波长与水吸收峰的重叠,并将整个系统封装在一个恒温、恒湿的空间中(降低大气湿度的影响),从而获得了平均功率为28.7 W、峰值功率为2 GW、脉宽为200 fs的脉冲,该脉宽近似变换极限脉宽,比之前工作的峰值功率提高了10倍。尽管这些工作能获得很高的平均功率或者峰值功率,但未对三阶色散进行合适的管理,因此输出脉冲的自相关迹有着明显的侧峰。2019年, Ren等^[61]采用两种高非线性光纤构成了混合展宽器,因为UNHA7和UNHA4这两种光纤的三阶色散符号正好相反,所以可以有效控制三阶色散;他们在实验中发现,前向泵浦有利于增加输出脉冲的能量,后向泵浦有利于改善压缩脉冲的质量。

从图12中也可以看出目前大多数CPA的平均功率还停留在百瓦、百飞秒级别,千瓦级别以上的系统很少,且脉宽均在几百飞秒,这是因为色散、放大器的光谱窄化、系统残余的高阶色散等因素使得CPA的输出脉冲很难达到200 fs以下。

3.2 非线性放大

由于2 μm 波段的高功率放大器系统并不能直接输出少周期脉冲,因此非线性压缩对于少周期脉冲的产生是有必要的。2015年, Gaida等^[75]报道了采用一段长为14 cm、纤芯直径为108 μm 的无源实芯石英棒状光纤构成的非线性压缩系统,并在2 μm 波段获得了24 fs的脉冲。该光纤的负色散可以使非线性扩谱和脉冲压缩同时进行,可以省去额外的压缩器,这是首次在熔融石英光纤中获得峰值功率为24 MW的少周期脉冲。实现少周期、高峰值功率脉冲的常用方法还有基于气体填充空心波导的非线性扩谱技术,这种技术在短波段范围内已经很成熟。2016年, Mitrofanov等^[76]考虑到由分子吸收导致的窄峰带来的时间传播效应,因此认为气体吸收峰是中红外少周期脉冲的最大挑战。2017年, Gebhardt等^[77]将中心波长为1950 nm的掺铋非线性CPA系统作为光源(以有效减少激光工作波长与1945 nm之前的水吸收峰重叠),同时将整个系统放在湿度为20 mg/m^3 的气室中(确保输出光束具有良

好的时间脉冲形状和近高斯空间光束轮廓),实现了平均功率为15.4 W、脉冲能量为252 μJ 、脉宽为66 fs、重复频率为61 kHz的脉冲,这有助于未来实现百瓦级别的少周期脉冲。同年,该课题组通过使用充气反谐振空心光纤进行非线性自压缩,在2 μm 波段获得了2.1个光学周期的脉冲^[78]。

在2 μm 波段,非线性自压缩也可以在放大的同时一起实现。2017年, Nomura等^[79]利用掺铋氟化物光纤构成非线性放大装置,获得了平均功率为2.5 W、脉冲能量为37 nJ、脉宽为45 fs、重复频率为67.5 MHz的脉冲,将非线性压缩和放大器结合在一起,简化了实验装置。2018年, Heuermann等^[80]利用一段长1.18 m的掺铋棒状光纤搭建了非线性放大器,调控入射脉冲的啁啾量和脉宽为1.73 ps,实现了平均功率为20 W、能量为205 nJ、脉宽为50 fs、重复频率为80 MHz的脉冲。

4 结束语

中红外波段超快光纤激光器在激光医疗、军事、大气监测、生物等很多方面有着很重要的应用,已成为近年来激光技术领域的重点研究方向。中红外波段激光增益材料和锁模技术的快速发展,也推动了该波段超快光纤激光器的研发进程^[81-84]。2 μm 波段超快光纤激光CPA系统的最高平均输出功率已达到千瓦,并且激光的工作波长也已扩展到3.5 μm 。本文总结了中红外超快光纤激光器和放大器近年来的研究进展,介绍了各波段的主要锁模技术,以及实现更窄脉宽、更远波长的飞秒光纤激光技术。但目前对于中红外超快光纤激光器仍有不少挑战。首先,中红外波段一直缺少高效率的增益离子,特别是在长波长波段。其次,近年来中红外锁模器件和锁模技术取得了显著进展,这是影响锁模激光性能的关键因素。然而,与近红外区域成熟的可饱和吸收体相比,在恢复时间、非饱和损耗、损伤阈值等方面,现有的中红外可饱和吸收体仍有很大的改进和优化空间。开发新型饱和吸收材料和超短中红外脉冲锁模技术仍需要大量的工作,精确制定可饱和吸收体具体参数的方法仍是未来研究的重要课题。相信在不远的未来,高平均功率、高脉冲能量、长波长的中红外超快光纤激光器能够很快地走向实用,成为极具竞争力的一种激光技术。

参 考 文 献

- [1] Ren X Y, Dai H, Li D T, et al. Mid-infrared electro-

- optic dual-comb spectroscopy with feedforward frequency stepping[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 776-779.
- [2] Hao Q, Zhu G S, Yang S, et al. Mid-infrared transmitter and receiver modules for free-space optical communication[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(8): 2260-2264.
- [3] Huang K, Gan J W, Zeng J, et al. Observation of spectral mode splitting in a pump-enhanced ring cavity for mid-infrared generation [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11766-11775.
- [4] Huang K, Gu X R, Zhou Q, et al. Efficient generation of mid-infrared photons at 3.16 μm by coincidence frequency downconversion [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(4): 045401.
- [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] Sharp R C, Spock D E, Pan N, et al. 190-fs passively mode-locked thulium fiber laser with a low threshold[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(12): 881-883.
- [7] 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.
- [8] Wang Q, Geng J, Luo T, et al. Mode-locked 2 μm laser with highly thulium-doped silicate fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3616-3618.
- [9] Kivisto S, Okhotnikov O G. 600-fs mode-locked Tm-Ho-doped fiber laser synchronized to optical clock with optically driven semiconductor saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(8): 477-479.
- [10] Wang Q, Geng J H, Jiang Z, et al. Mode-locked Tm-Ho-codoped fiber laser at 2.06 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 682-684.
- [11] Rudy C W, Dignonnet M J F, Byer R L, et al. Thulium-doped germanosilicate mode-locked fiber lasers[C] // *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices*, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2012: FTH4A.4.
- [12] Huang C Y, Wang C, Shang W, et al. Developing high energy dissipative soliton fiber lasers at 2 micron [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13680.
- [13] Akosman A E, Sander M Y. Low noise, mode-locked 253 MHz Tm/Ho fiber laser with core pumping at 790 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(17): 1878-1881.
- [14] Tolstik N, Sorokin E, Bugar I, et al. Compact Diode-pumped dispersion-managed SESAM-mode-locked Ho: fiber Laser[C] // *High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions*, Long Beach, California. Washington, D. C.: OSA, 2016: MM6C. 4.
- [15] Wang Y, Tang Y L, Yan S, et al. High-power mode-locked 2 μm multimode fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(8): 085101.
- [16] Wei C, Shi H X, Luo H Y, et al. Research progress of pulsed mid-infrared fiber lasers using two-dimensional materials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703009.
韦晨, 史红霞, 罗鸿禹, 等. 基于二维材料调制的中红外脉冲光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703009.
- [17] Sotor J, Sobon G, Kowalczyk M, et al. Ultrafast thulium-doped fiber laser mode locked with black phosphorus[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3885-3888.
- [18] Wang J Z, Liang X Y, Hu G H, et al. 152 fs nanotube-mode-locked thulium-doped all-fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28885.
- [19] Jeong H, Choi S Y, Kim M H, et al. All-fiber Tm-doped soliton laser oscillator with 6 nJ pulse energy based on evanescent field interaction with monolayer graphene saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14152-14158.
- [20] Sotor J, Bogusławski J, Martynkien T, et al. All-polarization-maintaining, stretched-pulse Tm-doped fiber laser, mode-locked by a graphene saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1592-1595.
- [21] Pawliszewska M, Martynkien T, Przewłoka A, et al. Dispersion-managed Ho-doped fiber laser mode-locked with a graphene saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 38-41.
- [22] Lee J, Koo J, Lee J, et al. All-fiberized, femtosecond laser at 1912 nm using a bulk-like MoSe₂ saturable absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(8): 2968-2979.
- [23] Wang J T, Jiang Z K, Chen H, et al. Magnetron-sputtering deposited WTe₂ for an ultrafast thulium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 5010-5013.
- [24] Pawliszewska M, Ge Y Q, Li Z J, et al. Fundamental and harmonic mode-locking at 21 μm with black phosphorus saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 16916-16921.
- [25] Wang J T, Jiang Z K, Chen H, et al. High energy soliton pulse generation by a magnetron-sputtering-

- deposition-grown MoTe₂ saturable absorber [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(6): 535-541.
- [26] Kang Z, Liu M Y, Tang C Y, et al. Microfiber coated with gold nanorods as saturable absorbers for 2 μm femtosecond fiber lasers[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(12): 3841-3850.
- [27] Wang T, Jin X X, Yang J, et al. Oxidation-resistant black phosphorus enable highly ambient-stable ultrafast pulse generation at a 2 μm Tm/Ho-doped fiber laser[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(40): 36854-36862.
- [28] Engelbrecht M, Haxsen F, Ruehl A, et al. Ultrafast thulium-doped fiber-oscillator with pulse energy of 43 nJ[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(7): 690-692.
- [29] Tang Y X, Chong A, Wise F W. Generation of 8 nJ pulses from a normal-dispersion thulium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2361-2364.
- [30] Gao C X, Wang Z Q, Luo H, et al. High energy all-fiber Tm-doped femtosecond soliton laser mode-locked by nonlinear polarization rotation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(14): 2988-2993.
- [31] Voropaev V S, Donodin A I, Voronets A I, et al. High-power passively mode-locked thulium-doped all-fiber ring laser with nonlinearity and dispersion management [C] // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO), June 4-8, 2018. St. Petersburg: IEEE, 2018: 18-18.
- [32] Sun B, Luo J Q, Ng B P, et al. Dispersion-compensation-free femtosecond Tm-doped all-fiber laser with a 248 MHz repetition rate [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4052-4055.
- [33] Sobon G, Sotor J, Martynkien T, et al. Ultra-broadband dissipative soliton and noise-like pulse generation from a normal dispersion mode-locked Tm-doped all-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6156-6161.
- [34] 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.
- [35] Liao R Y, Song Y J, Chai L, et al. Pulse dynamics manipulation by the phase bias in a nonlinear fiber amplifying loop mirror[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14705-14715.
- [36] Frerichs C, Unrau U B. Passive Q-switching and mode-locking of erbium-doped fluoride fiber lasers at 2.7 μm[J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, 2(4): 358-366.
- [37] Wei C, Zhu X S, Norwood R A, et al. Passively continuous-wave mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 28 μm [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3849-3851.
- [38] Tang P H, Qin Z P, Liu J, et al. Watt-level passively mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4855-4858.
- [39] Hu T, Jackson S D, Hudson D D. Ultrafast pulses from a mid-infrared fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4226-4228.
- [40] Duval S, Bernier M, Fortin V, et al. Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared [J]. *Optica*, 2015, 2(7): 623-626.
- [41] Haboucha A, Fortin V, Bernier M, et al. Fiber Bragg grating stabilization of a passively mode-locked 28 μm Er³⁺: fluoride glass fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3294-3297.
- [42] Luo H Y, Li J, Xie J T, et al. High average power and energy microsecond pulse generation from an erbium-doped fluoride fiber MOPA system [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 29022-29032.
- [43] Shen Y L, Wang Y S, Chen H W, et al. Wavelength-tunable passively mode-locked mid-infrared Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14913.
- [44] Zhu G W, Zhu X S, Wang F Q, et al. Graphene mode-locked fiber laser at 2.8 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(1): 7-10.
- [45] Qin Z P, Xie G Q, Zhao C J, et al. Mid-infrared mode-locked pulse generation with multilayer black phosphorus as saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 56-59.
- [46] Qin Z P, Xie G Q, Ma J G, et al. 2.8 μm all-fiber Q-switched and mode-locked lasers with black phosphorus [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(11): 1074-1078.
- [47] Zhao L N, Wang J R, Huang S W. Nonlinear-mirror mode-locked Er³⁺: ZBLAN fiber laser [C] // Laser Congress 2018 (ASSL), Boston, Massachusetts. Washington, D.C.: OSA, 2018: ATu2A.27.
- [48] Li J F, Hudson D D, Liu Y, et al. Efficient 2.87 μm fiber laser passively switched using a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3747-3749.
- [49] Yin K, Jiang T, Zheng X, et al. Mid-infrared ultra-short mode-locked fiber laser utilizing topological insulator Bi₂Te₃ nano-sheets as the saturable absorber [J/OL]. [2020-03-05]. <https://arxiv.org/abs/1505.06322>.
- [50] Li J F, Luo H Y, Zhai B, et al. Black phosphorus: a two-dimension saturable absorption material for mid-infrared Q-switched and mode-locked fiber lasers [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30361.

- [51] Zhu C H, Wang F Q, Meng Y F, et al. A robust and tuneable mid-infrared optical switch enabled by bulk Dirac fermions[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14111.
- [52] Antipov S, Hudson D D, Fuerbach A, et al. High-power mid-infrared femtosecond fiber laser in the water vapor transmission window[J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1373-1376.
- [53] Henderson-Sapir O, Jackson S D, Ottaway D J. Versatile and widely tunable mid-infrared erbium doped ZBLAN fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1676-1679.
- [54] Qin Z P, Hai T, Xie G Q, et al. Black phosphorus Q-switched and mode-locked mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser at 3.5 μm wavelength [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8224-8231.
- [55] Woodward R I, Majewski M R, Jackson S D. Mode-locked dysprosium fiber laser: picosecond pulse generation from 2.97 to 3.30 μm [J]. *APL Photonics*, 2018, 3(11): 116106.
- [56] Wang Y C, Jobin F, Duval S, et al. Ultrafast Dy³⁺: fluoride fiber laser beyond 3 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 395-398.
- [57] Rudy C W, Urbanek K E, Dignonnet M J F, et al. Amplified 2- μm thulium-doped all-fiber mode-locked figure-eight laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(11): 1809-1812.
- [58] Gaida C, Gebhardt M, Heuermann T, et al. Ultrafast thulium fiber laser system emitting more than 1 kW of average power [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5853-5856.
- [59] Stutzki F, Gaida C, Gebhardt M, et al. Tm-based fiber-laser system with more than 200 MW peak power[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 9-12.
- [60] Gaida C, Gebhardt M, Stutzki F, et al. Thulium-doped fiber chirped-pulse amplification system with 2 GW of peak power[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4130-4133.
- [61] Ren Z Q, Fu Q, Xu L, et al. Compact, high repetition rate, 4.2 MW peak power, 1925 nm, thulium-doped fiber chirped-pulse amplification system with dissipative soliton seed laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36741-36749.
- [62] Tan F Z, Shi H X, Sun R Y, et al. 1 μJ , sub-300 fs pulse generation from a compact thulium-doped chirped pulse amplifier seeded by Raman shifted erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22461-22468.
- [63] Sims R A, Kadwani P, Shah A S L, et al. 1 μJ , sub-500 fs chirped pulse amplification in a Tm-doped fiber system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 121-123.
- [64] Stutzki F, Gaida C, Gebhardt M, et al. 152 W average power Tm-doped fiber CPA system [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4671-4674.
- [65] Imeshev G, Fermann M E. 230-kW peak power femtosecond pulses from a high power tunable source based on amplification in Tm-doped fiber[J]. *Optics Express*, 2005, 13(19): 7424-7431.
- [66] Sobon G, Sotor J, Pasternak I, et al. 260 fs and 1 nJ pulse generation from a compact, mode-locked Tm-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31446-3145.
- [67] Hoogland H, Thai A, Sánchez D, et al. All-PM coherent 2.05 μm thulium/holmium fiber frequency comb source at 100 MHz with up to 0.5 W average power and pulse duration down to 135 fs[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31390-31394.
- [68] Hoogland H, Holzwarth R. Compact polarization-maintaining 2.05- μm fiber laser at 1-MHz and 1-MW peak power[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3520-3523.
- [69] Hoogland H, Wittek S, Hänsel W, et al. Fiber chirped pulse amplifier at 2.08 μm emitting 383-fs pulses at 10 nJ and 7 MHz[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6735-6738.
- [70] Wan P, Yang L M, Liu J. High power 2 μm femtosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21374-21379.
- [71] Luo J Q, Sun B, Liu J Y, et al. Mid-IR supercontinuum pumped by femtosecond pulses from thulium doped all-fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 13939-13945.
- [72] Haxsen F, Wandt D, Morgner U, et al. Pulse energy of 151 nJ from ultrafast thulium-doped chirped-pulse fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2991-2993.
- [73] Wang P, Shi H X, Tan F Z, et al. Tunable femtosecond pulse source from 1.6 to 2.3 μm with 100 kW peak power in an all-fiber system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(9): 091405.
- [74] Rampur A, Stepanenko Y, Stępniewski G, et al. Ultra low-noise coherent supercontinuum amplification and compression below 100 fs in an all-fiber polarization-maintaining thulium fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35041-35051.
- [75] Gaida C, Gebhardt M, Stutzki F, et al. Self-compression in a solid fiber to 24 MW peak power with few-cycle pulses at 2 μm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5160-5163.
- [76] Mitrofanov A V, Voronin A A, Sidorov-Biryukov D A, et al. Subterawatt few-cycle mid-infrared pulses from a single filament[J]. *Optica*, 2016, 3(3): 299-

- 302.
- [77] Gebhardt M, Gaida C, Stutzki F, et al. High average power nonlinear compression to 4 GW, sub-50 fs pulses at 2 μm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 747.
- [78] Gebhardt M, Gaida C, Heuermann T, et al. Nonlinear pulse compression to 43 W GW-class few-cycle pulses at 2 μm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4179-4182.
- [79] Nomura Y, Fuji T K. Generation of watt-class, sub-50 fs pulses through nonlinear spectral broadening within a thulium-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13691-13696.
- [80] Heuermann T, Gaida C, Gebhardt M, et al. Thulium-doped nonlinear fiber amplifier delivering 50 fs pulses at 20 W of average power[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4441-4444.
- [81] Shen Y L, Wang Y S, Chen H W, et al. High average power continuous-wave mode-locked mid-infrared fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0615001.
沈炎龙, 王屹山, 湛鸿伟, 等. 高平均功率连续锁模中红外光纤激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0615001.
- [82] Li W W, Zhang X J, Wang H, et al. Research progress of mid-infrared rare earth ion-doped fiber lasers at 3 μm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170605.
李维伟, 张小金, 王航, 等. 3 μm 中红外稀土掺杂光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170605.
- [83] Liu J, Tan F Z, Liu C, et al. Progress on high-power ultrashort-pulsed thulium-doped fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201003.
刘江, 谭方舟, 刘晨, 等. 高功率超短脉冲掺铥光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201003.
- [84] Liu Y Z, Xing Y B, Xu Z W, et al. Research progress in high power Tm^{3+} -doped silica fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050004.
刘茵紫, 邢颖滨, 徐中巍, 等. 高功率掺铥石英光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050004.