

1.7 μm 超快光纤激光器研究进展 (特邀)

战泽宇, 陈吉祥, 刘 萌, 罗爱平, 徐文成, 罗智超*

(华南师范大学 信息光电子科技学院, 广东 广州 510631)

摘要: 超快光纤激光器具有紧凑性高、光束质量佳、散热性好等优点, 是一种极具发展潜力的激光光源。工作波长作为超快光纤激光器的重要参数, 在一定程度上决定了激光器的应用领域。近年来, 得益于 1.7 μm 波段的独特光谱特性, 1.7 μm 波段超快光纤激光器在生物医学、聚合物加工、光学成像等领域具有重要的应用价值。因此, 研制高性能的 1.7 μm 波段超快光纤激光器成为激光领域的研究热点之一。文中综述了近期 1.7 μm 波段超快光纤激光器的研究进展, 对目前获得 1.7 μm 波段超短脉冲的不同方式进行总结, 分析其技术特点; 同时, 介绍了笔者所在课题组报道的 1.7 μm 波段耗散孤子超快光纤激光器及其放大系统的研究成果, 概述了其工作原理、技术难点; 最后, 对 1.7 μm 波段超快光纤激光的应用前景及发展趋势进行了展望。

关键词: 1.7 μm 激光光源; 超短脉冲; 被动锁模; 超快光纤激光器; 啁啾脉冲放大

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210850

Recent progress of 1.7 μm ultrafast fiber lasers (*Invited*)

Zhan Zeyu, Chen Jixiang, Liu Meng, Luo Aiping, Xu Wencheng, Luo Zhichao*

(School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: With the advantages of inherent compactness, high beam quality and excellent heat dissipation, ultrafast fiber lasers have already shown their huge potential in various scientific and industrial applications. In fact, the operating wavelength of the ultrafast fiber laser is critical for specific applications. In recent years, thanks to the unique spectral characteristics, 1.7 μm ultrafast fiber lasers have unparalleled applications in biomedicine, polymer processing, optical imaging and other fields. Therefore, developing high performance ultrafast fiber lasers in the 1.7 μm band has become a research hotspot in the laser community. In this paper, the progress of 1.7 μm ultrafast fiber lasers was reviewed and a comprehensive overview of the different methods enabling ultrafast generation at 1.7 μm waveband was given. The latest advances in 1.7 μm dissipative soliton fiber laser and chirped pulse amplification system reported by our group were introduced. The principles and technical challenges were also outlined. Finally, the application prospect and development tendency of 1.7 μm ultrafast fiber laser were prospected.

Key words: 1.7 μm laser source; ultrashort pulse; passive mode-locking; ultrafast fiber laser; chirped pulse amplification

收稿日期: 2021-11-16; 修订日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金 (11874018, 11974006, 61805084, 61875058); 广东省自然科学基金 (2019 A1515010879, 2021 A1515012315)

作者简介: 战泽宇, 女, 博士生, 主要从事超快光纤激光器和孤子动力学方面的研究。

通讯作者: 罗智超, 男, 研究员, 博士, 主要从事光纤激光技术及应用、有源/无源光通信器件、非线性光纤光学等方面的研究。

0 引言

随着光纤制造和激光技术的快速发展,超快光纤激光器的性能得到极大的提升,甚至在某些参数上已经可以与固体激光器相媲美^[1]。作为产生超短脉冲的优质平台之一,超快光纤激光器已被广泛应用于激光微加工^[2]、生物医学^[3]、光通信^[4]等领域。事实上,不同应用领域对超快光纤激光器的性能参数具有不同的需求。因此,自从激光诞生以来,研究人员一直致力于开发不同种类、不同指标的超快光纤激光光源以满足应用需求。其中,超快光纤激光器的工作波长是面向应用领域的一个重要参数^[5]。近年来,1.7 μm 波段的超短脉冲激光光源因其特殊的光谱性质成为了国内外的研究热点之一。由于 1.7 μm 波段处于水分子吸收峰之间的低谷,并且在生物组织中具有较低的瑞利散射,因此对含有大量水分子的生物组织而言,使用该波段的激光光源具有较低的人射能量损耗^[6-8],所以 1.7 μm 波段的超快光纤激光光源可以用于多光子荧光显微成像^[9-11];同时,该波段处于脂肪和胶原的高吸收峰窗口,因此在光学相干层析成像^[12-13]等方面也有着较好的应用前景^[14-15]。另一方面,C-H 共价键的吸收峰也处于 1.7 μm 波段^[16],因此它还适用于皮脂腺的激光手术^[17]和某些高密度聚合物的焊接处理与检测^[18-19]。可以看出,研制高性能 1.7 μm 波段超快光纤激光系统无疑具有非常重要的应用价值和科学意义。

一般而言,获得 1.7 μm 波段的超短脉冲主要有三种方法。首先是利用孤子自频移等非线性效应获得 1.7 μm 波段的超短脉冲^[20-21],这种方法通常需要高能飞秒脉冲作为泵浦源。此外,1.7 μm 的增益可以在特殊掺杂的增益光纤中直接产生。如利用掺铋光纤、铈共掺光纤、铥共掺光纤等,可以得到 1.7 μm 波段的增益并实现相应波段的激光输出^[22-24]。除了特殊掺杂的增益光纤,掺铥光纤由于在³F₄-³H₆能级具有 1600~2100 nm 的宽发射谱^[25-26],已经被证明是获得 1.7 μm 波段激光的理想介质^[27-28]。通常来说,1.7 μm 波段激光脉冲的应用(如多光子荧光显微成像)需要脉冲的峰值功率为数十 kW 甚至 MW 量级、能量为数十 nJ 甚至 μJ 量级^[29]。因此,近年来研究人员一直致力于实现 1.7 μm 波段超快光纤激光器高效

率的激光输出,突破其在相关领域的应用限制。

文中对近年来国内外 1.7 μm 波段超快光纤激光器领域的研究进展进行了总结,简要阐述了基于三种方式的 1.7 μm 波段超快光纤激光系统,同时介绍了笔者课题组在 1.7 μm 波段超快光纤激光及其放大系统的最新研究成果,并对其发展前景进行展望。

1 基于非线性方法的 1.7 μm 超快光纤激光器

目前,研究人员在 1.7 μm 波段超短脉冲的领域进行了丰富的探索。利用光纤非线性效应,例如拉曼孤子自频移,可以对 1.55 μm 波段进行非线性波长转换,获得 1.7 μm 波段的超短脉冲。2011 年,美国康奈尔大学的 Wang 等人报道了在大模场(LMA)光纤中,基于孤子自频移效应(SSFS),获得了波长在 1580~2130 nm 范围内连续可调谐的高能量孤子^[20]。波长调谐是通过改变输入功率来实现的,如图 1 所示。由于不同级数孤子之间的光谱重叠可以忽略,利用长通滤波器(LPF)将目标波段的孤子从其它孤子中分离出来,从而获得 1.7 μm 波段的脉冲。

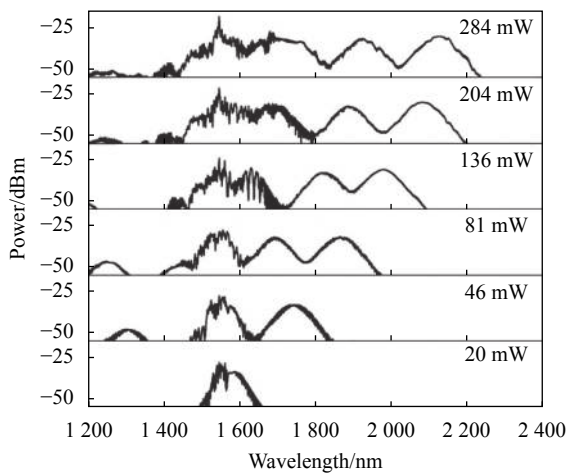


图 1 基于孤子自频移效应获得的输出光谱^[20]

Fig.1 The output spectra obtained based on the soliton self-frequency shift effect^[20]

此外,G. Q. Chang 课题组报道了利用自相位调制(SPM)主导的非线性效应展宽光谱,再经过滤波器获得 1.3~1.7 μm 范围内的高能飞秒脉冲^[30]。该实验搭建了基于高功率掺铥光纤激光系统的波长可调谐的飞秒光源,装置示意图如图 2 所示。其中掺铥光纤激光系统由振荡器和啁啾脉冲放大(CPA)系统组成,

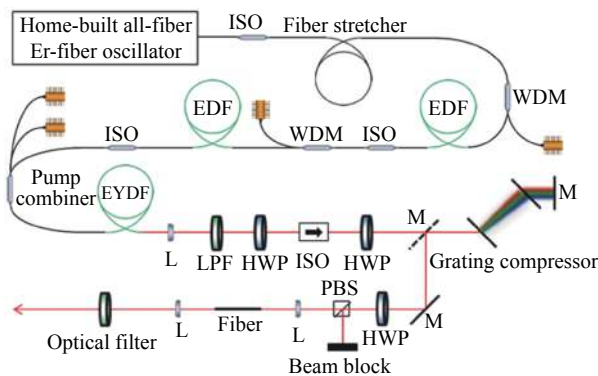


图 2 基于高功率掺铒光纤激光系统的波长可调谐的飞秒光源实验装置图^[30]

Fig.2 Experimental setup of wavelength tunable femtosecond light source based on high power erbium-doped fiber laser system^[30]

掺铒光纤振荡器产生中心波长为 1550 nm、能量约 100 pJ 的脉冲^[31]。放大后脉冲输出的能量为 200 nJ,

经过光栅对压缩后脉冲宽度为 290 fs。将压缩后的脉冲耦合到 2 cm 的非线性光纤 (HNLf) 中, 并使用半波片和偏振分束器对耦合到光纤中的脉冲能量进行调节, 最后获得的展宽后的光谱最左边波峰位于 1.3 μm, 最右边波峰位于 1.7 μm。随后通过一组光学滤波器过滤出目标波段的光谱, 最后在 1.7 μm 处获得了能量为 7.1 nJ, 脉宽为 180 fs 的超短脉冲, 如图 3 所示。除此之外, 该课题组也使用了模场直径 (MFD) 较大的色散补偿光纤 (DCF38) 来获得展宽的光谱, 在对输出的光谱滤波之后得到了能量为 10.6 nJ, 脉宽为 85 fs 的 1.7 μm 脉冲。

然而, 利用非线性方法获得 1.7 μm 的超短脉冲, 脉冲的频移量与泵浦脉冲的峰值功率相关, 这导致获得的目标波段脉冲能量与目标波长之间的矛盾, 在一定程度上限制了输出脉冲的能量。

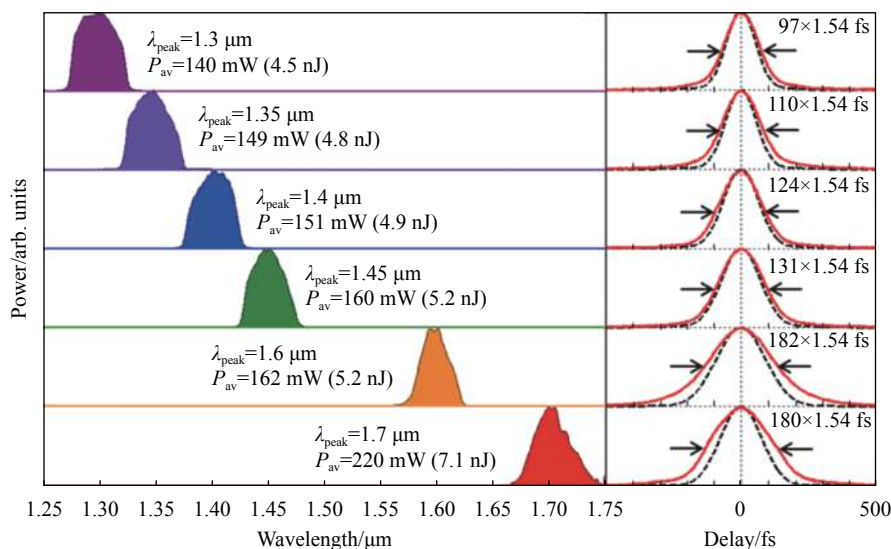


图 3 基于 2 cm HNLf 展宽并经过滤波后的输出光谱; 对应脉冲测量的自相关轨迹 (红色实线) 和计算的变换极限自相关曲线 (黑色虚线)^[30]

Fig.3 Filtered optical spectra from 2-cm HNLf. Measured autocorrelation traces (red solid line) and autocorrelation traces calculated from the transform-limited pulses (black dashed line)^[30]

2 基于特殊离子掺杂光纤的 1.7 μm 超快光纤激光器

除了上述的非线性波长转换方法, 一些特殊离子掺杂光纤如: 掺铋光纤^[32]、铥钬共掺光纤^[24]可以直接获得 1.7 μm 波段的增益。2016 年, T. Noronen 等人使用自制的掺铋光纤, 搭建了 1.7 μm 波段的掺铋锁模光纤激光器^[33]。图 4 展示了工作在反常色散区的掺铋锁模光纤激光器的原理图, 该激光器利用自制的碳纳

米管 (CNT) 作为可饱和吸收体实现锁模。腔内包含了 5 m 的掺铋光纤和一段 19 m 的标准单模光纤 (SMF-28), 通过计算光纤色散可知激光器工作在反常色散区域。实验中使用的泵浦源为 1565 nm 的掺铒光纤激光器。当泵浦功率达到 300 mW 时, 该掺铋光纤激光器能够工作在稳定的锁模状态, 此时输出脉冲的中心波长为 1730 nm, 脉宽约为 1.65 ps。

T. Noronen 等人还将腔内具有反常色散的单模光纤长度从 19 m 减小到 10 m, 使激光腔内色散变为正

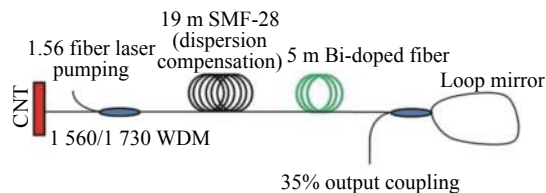


图 4 1.7 μm 掺铋锁模光纤激光器结构示意图^[33]

Fig.4 Schematic of the 1.7 μm mode-locked bismuth-doped fiber laser^[33]

常色散, 同样获得了 1.7 μm 波段的脉冲。图 5 是此时激光器输出的脉冲的光谱, 以及输出脉冲压缩前后的自相关曲线, 压缩后的脉冲宽度为 1.2 ps。

2018 年, 俄罗斯科学院的 Aleksandr 等人报道了基于非线性放大环形镜 (NALM) 锁模的 1.7 μm 掺铋超快光纤激光器^[34]。实验装置如图 6 所示, 该激光腔包含约 16 m 的 SMF-28 光纤, 15 m 的自制掺铋光纤,

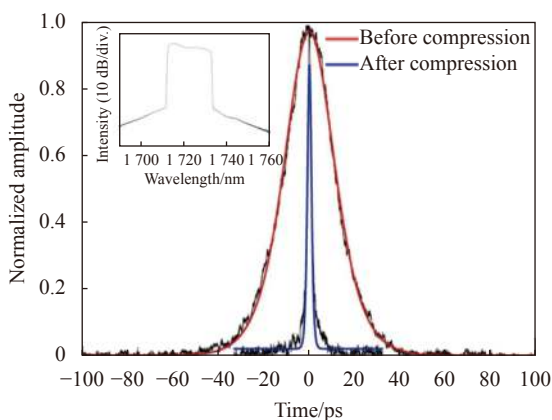
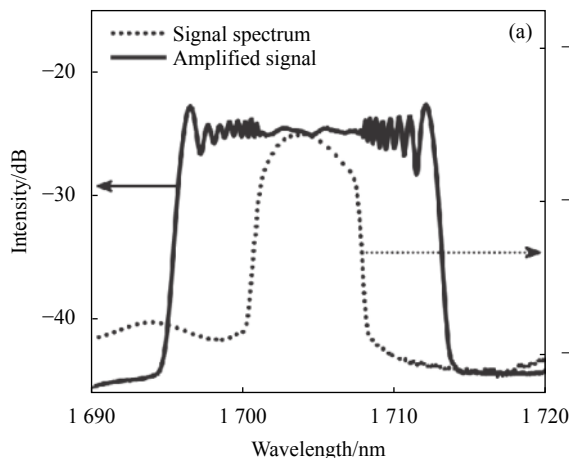


图 5 输出脉冲压缩前 (红色) 和压缩后 (蓝色) 的自相关曲线; 插图: 脉冲光谱图^[33]

Fig.5 The autocorrelation traces of the pulse before the compression (red) and after the external pulse compression (blue). Inset: the output optical spectrum^[33]



以及 25 m 的非线性光纤, 腔内总色散值约为 3.2 ps²。由于 NALM 的锁模机制是基于两束传输光束之间的强度相关的相移, 因此实验中在激光腔中加入了非线性光纤来增加脉冲的相移。振荡器使用的泵浦是一个 150 mW 商用 1.55 μm 单模激光二极管, 放大级使用的泵浦是一个最大功率为 2 W 的 1.57 μm 钕镱共掺 (Er-Yb) 激光器。

振荡器输出的脉冲宽度为 17.7 ps, 能量为 84 pJ, 振荡器输出的脉冲序列如图 7(c) 所示, 其重复频率为 3.57 MHz。为了获得更高能量的脉冲, 该实验使用了 100 m 的掺铋光纤对振荡器输出的脉冲进行放大, 经过放大后, 脉冲宽度增加到约 28.1 ps, 如图 7(b) 所示。放大后的脉冲在 150 m 的 SMF-28 光纤中被压缩, 最终获得的脉冲能量为 5.7 nJ, 脉宽为 630 fs, 图 7(d) 是压缩后的脉冲自相关曲线。振荡器及放大器工作在单脉冲状态时的输出光谱如图 7(a) 所示, 该系统在 1.69~1.71 μm 范围内实现稳定锁模。由于较长的掺铋光纤和脉冲的高峰值功率, 放大后的脉冲经历了较强的自相位调制 (SPM), 这导致了放大脉冲的光谱明显展宽, 并且出现 SPM 特征峰。使用掺铋光

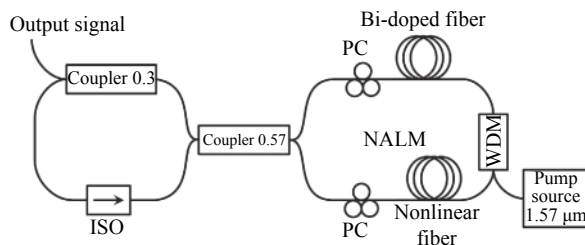
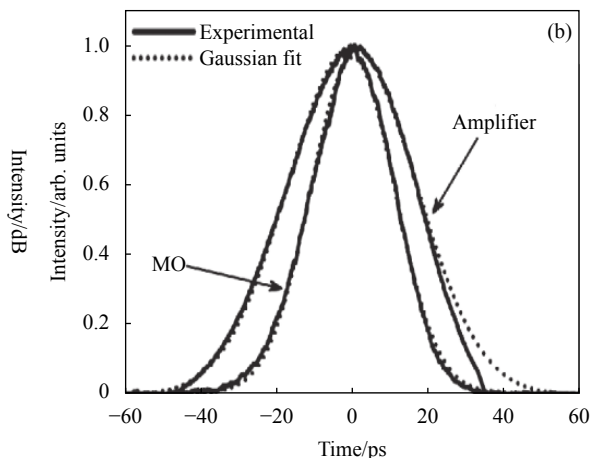


图 6 基于 NALM 的 1.7 μm 掺铋锁模光纤激光器的装置图^[34]

Fig.6 Schematic of the NALM-based mode-locked bismuth-doped fiber laser at 1.7 μm^[34]



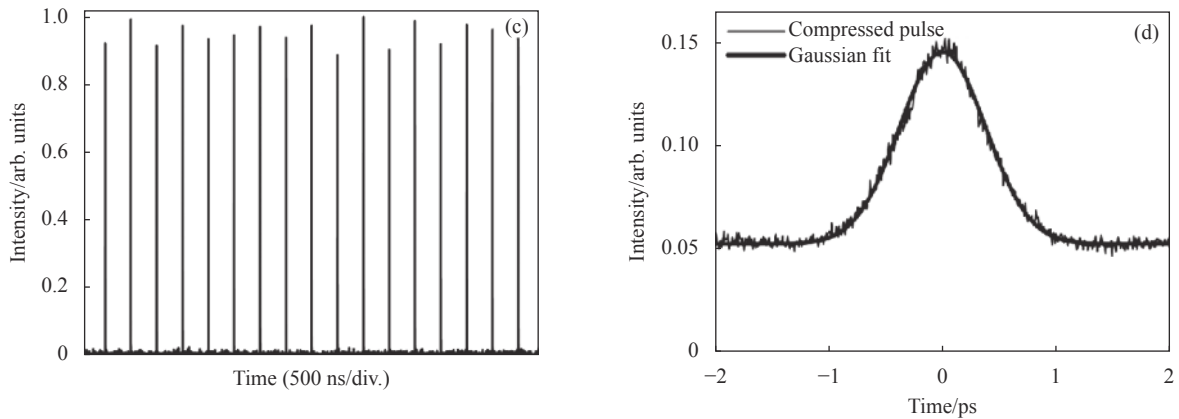


图 7 振荡器和放大器的 (a) 光谱和 (b) 自相关; (c) 振荡器脉冲序列; (d) 压缩脉冲的自相关^[34]

Fig.7 (a) Spectra and (b) autocorrelations of the oscillator and amplifier; (c) Pulse train of the oscillator pulses; (d) Autocorrelation trace of compressed pulse^[34]

纤的优势在于可以直接实现 1.7 μm 波段激光的输出,但目前报道的掺铥光纤在 1.7 μm 波段增益系数较低,并且暂时没有实现商业化。

此外,研究人员利用铥钬共掺光纤作为增益介质搭建了 1.7 μm 超快光纤激光器。2016 年, T. Noronen 等人演示了一种波长为 1 705~1 805 nm 的铥钬共掺锁模光纤激光器^[24]。该激光器通过频移反馈 (FSF) 和非线性偏振旋转 (NPR) 实现了自启动的混合锁模,获得了高稳定的脉冲输出。此外利用腔内的声光可调谐滤波器 (AOTF) 实现了脉冲中心波长 100 nm 的调谐范围。实验中使用 50 cm 的商用铥钬共掺光纤 (CorActive TH 530) 作为增益介质,泵浦源为一个 1 556 nm 的单模掺铒光纤激光器,激光腔的装置如图 8 所示。通过调节激光器的锁模状态,最终获得了中心波长为 1 735 nm 脉宽为 630 fs,能量约 21 pJ 的脉冲输出,其光谱及自相关曲线如图 9 所示。

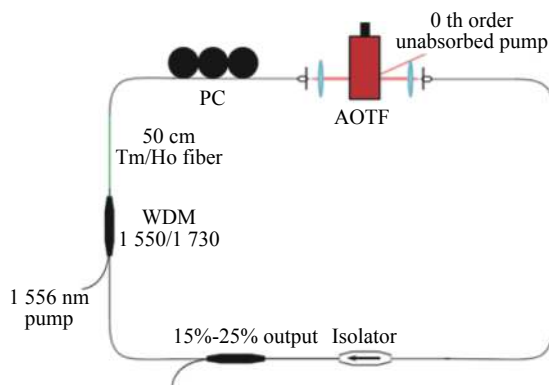


图 8 1.7 μm 铥钬锁模光纤激光器原理图^[24]

Fig.8 Schematic of the 1.7 μm Tm-Ho mode-locked fiber laser^[24]

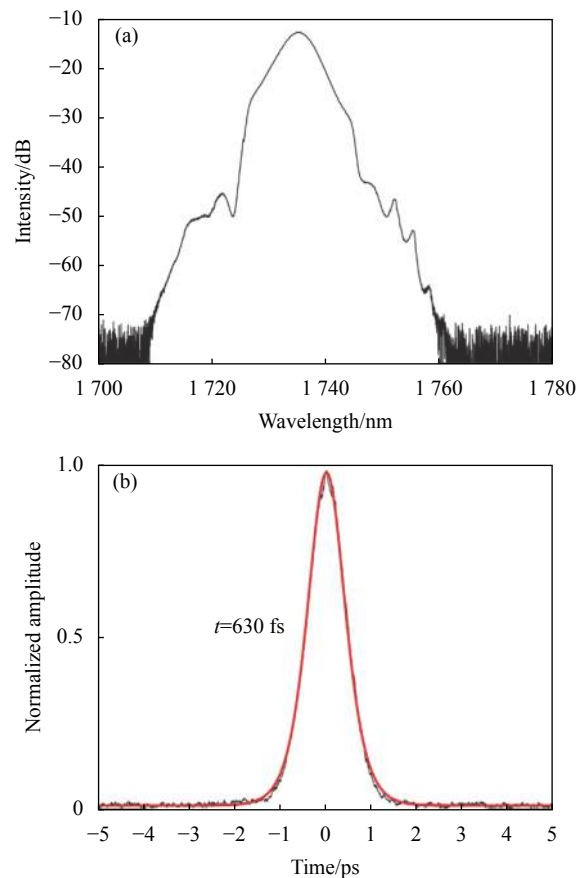


图 9 中心波长为 1 735 nm 的脉冲 (a) 光谱和 (b) 自相关^[24]

Fig.9 (a) Spectrum and (b) the autocorrelation of the pulse obtained at 1 735 nm^[24]

3 基于掺铥光纤的 1.7 μm 超快光纤激光器

近年来,掺铥光纤 (TDF) 已经被证明可以在 1.7 μm 处产生足够的增益^[35-37]。然而,由于掺铥光纤的发射

峰处于 1.9 μm 附近, 激光器无法直接工作在 1.7 μm 波段。因此, 通常需要在掺铥光纤激光器内加入波长选择装置, 如 1.7 μm 波段的带通滤波器、弯曲特殊光纤 (DCF、PCF) 引起的长波损耗^[38], 来限制激光在长波激光, 以确保激光工作在 1.7 μm 波段。除此之外, 掺铥光纤在短波具有准三能级系统, 这导致掺铥光纤在短波具有很强的重吸收效应。所以要获得 1.7 μm 处的增益, 需要在掺铥光纤中实现高的粒子数反转密度 (inversion density)。因此, 实验中采用了纤芯泵浦的方式。同时, 优化掺铥光纤的长度以减少其在短波的重吸收效应^[39]。另一方面, 由于掺铥光纤和单模光纤 (SMF) 在 1.7 μm 处具有较大的反常色散, 目前 1.7 μm 的锁模掺铥光纤激光器的输出大多数都是工作在反常色散区域的传统孤子^[28,40-41]。传统孤子的脉冲分裂效应不仅限制了激光器输出的脉冲能量^[42], 同时也不利于后续的脉冲放大。因此研制高性能的 1.7 μm 掺铥光纤激光系统成为目前国内外光纤激光技术领域亟待解决的问题。

2017 年, 香港大学 C. Li 等人报道了工作在 1785 nm 波长的掺铥光纤啁啾脉冲放大系统^[41]。图 10 是该放大系统的装置图, 其种子源是一个基于 NPR 锁模的掺铥光纤激光器 (TDFL), 工作在反常色散区。

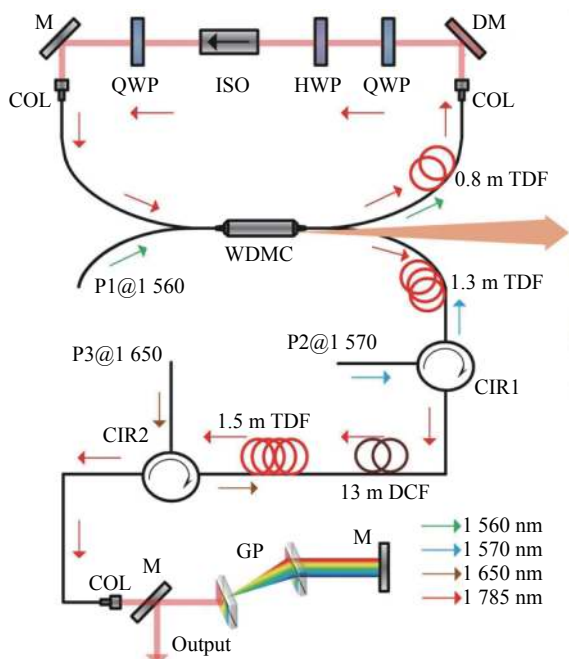


图 10 1.7 μm 锁模掺铥光纤激光器和光纤 CPA 系统装置示意图^[41]
Fig.10 Schematic of the 1.7 μm mode-locked TDFL associated with the CPA system^[41]

实验中使用了 1560 nm 的掺铥光纤激光器纤芯泵浦一段 0.8 m 的商用掺铥光纤来提供增益, 同时在谐振腔中加入二向色镜作为短通滤波器来滤除长波的放大自发辐射 (ASE), 使激光器工作在 1.7 μm 波段。种子源的输出特性如图 11 所示, 锁模脉冲的光谱中心波长为 1785 nm, 平均功率 3.5 mW, 重复频率为 46.375 MHz。如图 11(a) 所示, 种子源输出脉冲的光谱具有传统孤子典型的凯利边带^[43](Kelly Sideband), 其 3 dB 带宽为 6.8 nm。图 11(b) 和 (c) 分别是种子源输出脉冲的射频频谱和脉冲序列。

在放大级, 种子源脉冲先经过 1.3 m 的掺铥光纤进行预放大, 然后经过 13 m 的正色散光纤对脉冲进行展宽, 同时通过弯曲正色散光纤来抑制预放大后脉

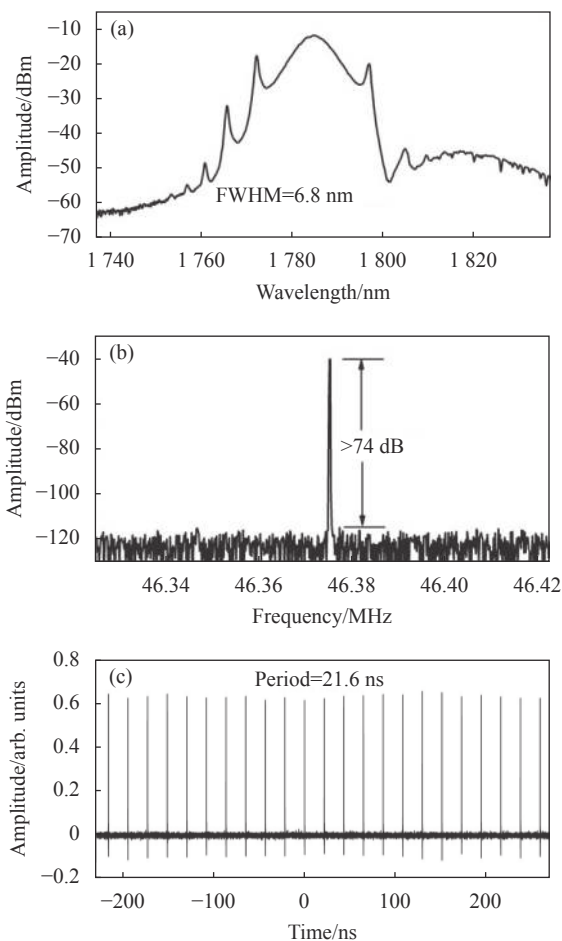


图 11 1.7 μm 掺铥锁模激光器的输出特性。(a) 输出光谱; (b) 脉冲射频频谱; (c) 脉冲序列^[41]
Fig.11 Characterization of the 1.7 μm Tm-doped mode-locked fiber laser. (a) Optical spectrum; (b) RF spectrum; (c) Oscilloscope trace of the pulse train^[41]

冲光谱上长波的 ASE。在主放大中,使用 1650 nm 激光器泵浦 1.5 m 的掺铥光纤对脉冲进行放大。随后,放大的脉冲通过光栅对压缩,最终获得了能量为 5.7 nJ,脉宽为 445 fs 的脉冲。图 12(a) 是输出脉冲的光谱和放大系统的效率斜线,斜率为 27.7%。图 12(b) 是压缩后脉冲的自相关,插图是放大脉冲的射频频谱图,信噪比大于 62 dB。可以看到,由于系统的种子源是带有凯利边带的传统孤子脉冲,放大后的光谱出现了明显的展宽和变形,这可能会限制进一步放大对脉

冲能量的提升。

2020 年,新加坡南洋理工大学 Chen 等人报道了一种折射率剖面分布呈 W 型的正色散掺铥光纤 (NDTDF)^[44]。不同于商用的掺铥光纤,该光纤在 1600~2100 nm 波长范围具有正常色散。因此,NDTDF 作为激光器增益介质的同时,还可以对激光腔的色散进行补偿。此外,这种 W 型折射率剖面还表现出分布式的短通滤波效应,在激光器内使用该掺铥光纤作为增益光纤时,无需加入额外的滤波装置,

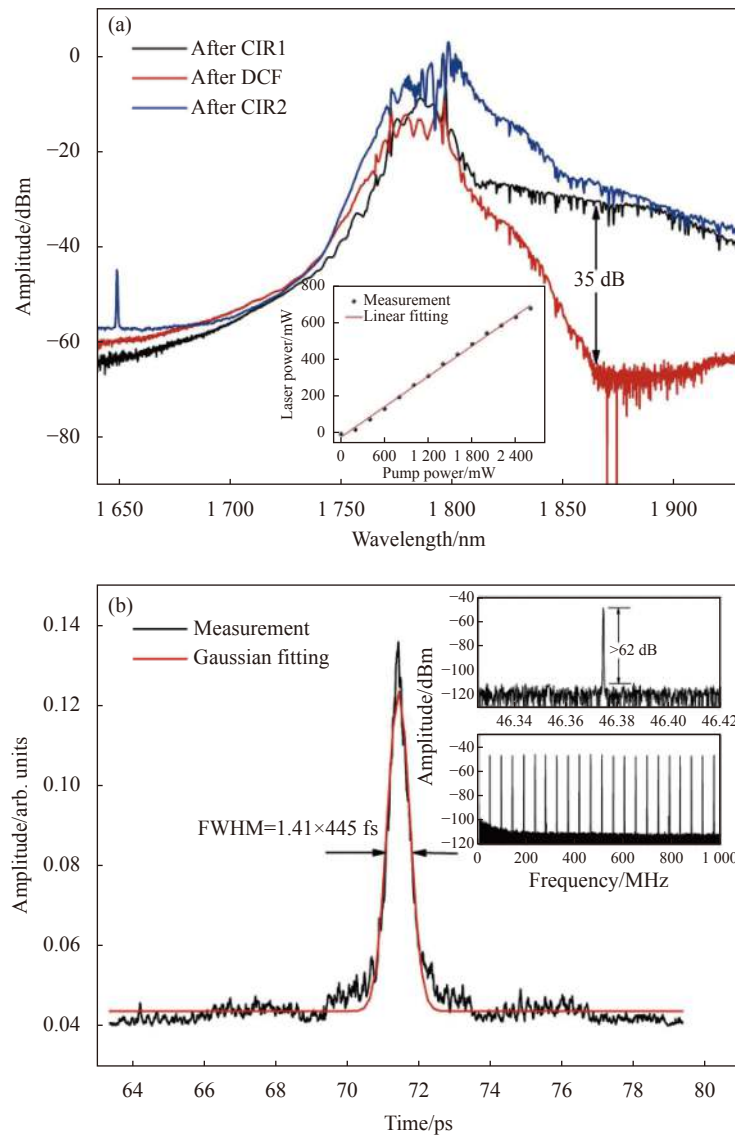


图 12 (a) 经过环形器 CIR1、DCF 和环形器 CIR2 后的脉冲光谱;插图: 输出功率与输入泵浦功率的关系和对应的拟合曲线; (b) 压缩后脉冲的自相关曲线(黑色)和高斯拟合曲线(红色);插图: 放大系统输出的脉冲射频频谱^[41]

Fig.12 (a) The optical spectra of the laser signal after CIR1, DCF, and CIR2. Inset: the measured power of the amplified laser versus the launched pump power and the corresponding linear fitting curve; (b) AC trace of the compressed pulse: measurement(black) and Gaussian fitting(red). Inset: RF spectrum of the amplified pulse^[41]

通过弯曲光纤产生的短通滤波效应可以使掺铥光纤激光器直接工作在 1.7 μm 波段。利用这种特制的掺铥光纤,该课题组搭建了基于半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模技术的超短脉冲激光器,其激光振荡器及放大器的装置如图 13 所示。

通过改变掺铥光纤的弯曲半径以及调节泵浦功率实现了 1740~1892 nm 范围内中心波长可调谐的脉冲输出。此外,利用中心波长 1755 nm 的传统孤子脉冲作为种子源,经过 5 m 的 W 型 NDTDF 放大,最终获得了能量 32.7 nJ,脉宽为 2.76 ps 的脉冲输出。图 14(a) 是不同泵浦功率下的脉冲放大光谱。可以看到,随着泵浦功率的增加,脉冲的光谱宽度逐渐增加。图 14(b) 绘制了 WDM₃ 后放大脉冲的输出功率与泵浦功率的关系,输出功率随泵功率线性增加,斜率为 14.3%。图 14(c) 是泵浦功率为 33 dBm 时, WDM₃ 后测量的脉冲自相关曲线,输出的脉宽为 2.76 ps。通过计算能够得出放大后的脉冲能量为 32.7 nJ,对应的峰值功率为

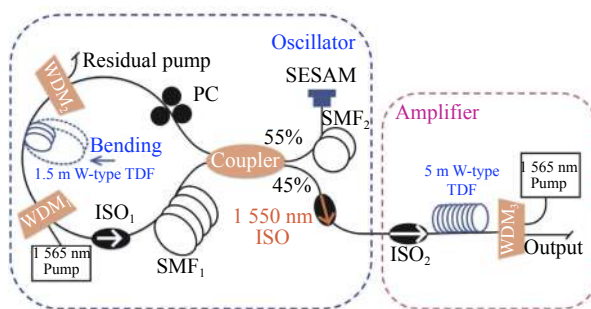


图 13 基于 W 型 NDTDF 的放大系统装置示意图^[44]

Fig.13 Schematic of the W-type NDTDF based master oscillator power fiber amplifier^[44]

12.1 kW。在这个系统中,虽然在谐振腔中使用了正色散的 NDTDF 光纤,但是由于单模光纤具有较大的反常色散,激光器仍然工作在净负色散区域。可以看到,放大系统输出的脉冲宽度较大,同时放大光谱也出现了展宽和变形。

2021 年,新加坡南洋理工大学 Chen 等人报道了基于 NDTDF 的 1.7 μm 全光纤脉冲放大系统^[45]。实

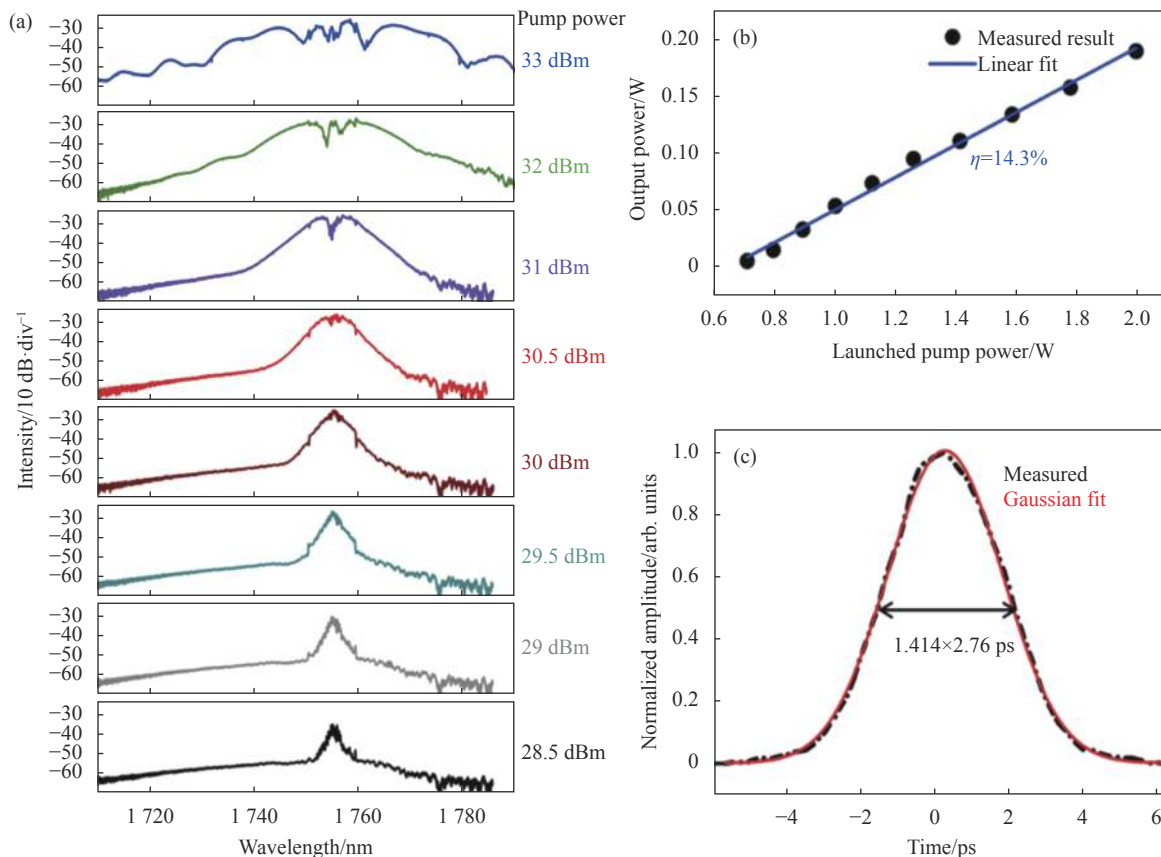


图 14 (a) 不同泵浦功率下放大脉冲对应的光谱; (b) 输出功率与泵浦功率的关系; (c) 最大功率时测量的脉冲自相关^[44]

Fig.14 (a) Spectra of amplified pulses with respect to pump power; (b) Output power versus pump power; (c) Measured autocorrelator trace at the full power^[44]

验装置图如图 15 所示,该放大系统的种子源是一个基于 NALM 锁模的光纤激光器,该激光器的增益介

质为 1.6 m 的 NDTDF。将增益光纤弯曲为 8 cm 直径的圆环作为滤波器,从而使激光器工作在 1.7 μm 波段。

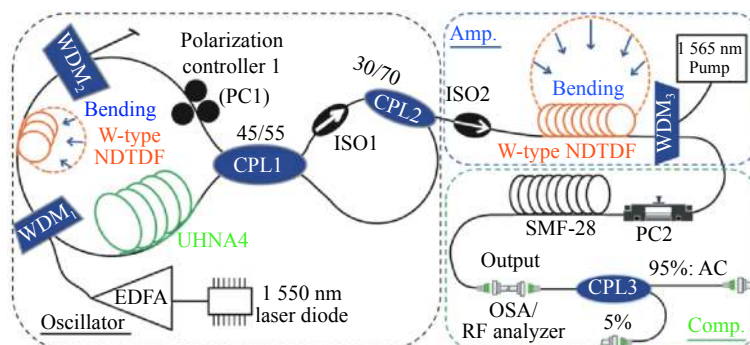


图 15 基于 NDTDF 的全光纤超快 CPA 系统装置图^[45]

Fig.15 Schematic of the all-fiber ultrafast CPA based on NDTDF^[45]

在实验中,加入 10 m 的色散补偿光纤(UHNA7)同时补偿 SMF-28 的二阶和三阶色散^[46],将谐振腔色散降低到 -0.25 ps^2 ,以产生脉宽更短的色散管理孤子脉冲^[47]。通过调整偏振控制器(PC),激光器稳定锁模的泵浦阈值为 27.3 dBm。图 16(a)为振荡器的输出光谱,其中心波长为 1785 nm,半高全宽为 7 nm。图 16(b)显示了输出的脉冲序列,脉冲间距为 128 ns,对应图 16(c)中 7.82 MHz 的基本重复频率。随后种子源脉冲被注入到 5 m 的增益光纤中进行放大,放大过程中在长波产生的 ASE 同样通过弯曲增益光纤的方法来抑制。在压缩部分,实验中使用 8 m SMF-28 对放大脉冲进行非线性压缩^[48]。图 16(d)是压缩后的输出光谱,当泵浦功率在 1.98 W 以上时,可以看到脉冲的光谱明显的变宽。图 16(e)对应的放大级效率,其斜率效率为 25.3%。在 4.4 W 的最大泵浦功率下脉冲被放大到 1.016 W,放大级直接输出的脉冲宽度为 2.82 ps。经过压缩,最终获得的脉冲能量为 128 nJ,脉冲宽度为 174 fs,压缩后的脉冲自相关曲线如图 16(f)所示。

2021 年,笔者课题组报道了基于 NPR 锁模的 1.7 μm 耗散孤子掺铈光纤激光器^[49],其装置图如图 17 所示,激光器的增益介质为 3.3 m 长的商用掺铈光纤。为了获得 1.7 μm 处的增益,笔者课题组在激光腔中放置了一个带通滤波器(中心波长:1740 nm,3 dB 带宽:25 nm)来抑制长波的 ASE,使激光工作在 1.7 μm 波段。同时,在激光腔中加入具有正色散的 UHNA4 光纤来补偿单模光纤和掺铈光纤的反常色

散,使激光器工作在净正色散区域。图 18 展示了激光器工作在单脉冲状态下的输出特性。其中,图 18(a)为锁模脉冲的光谱,中心波长为 1746 nm,10-dB 光谱宽度为 17 nm。图 18(b)为输出的脉冲序列,激光器的重复频率 17.84 MHz,对应的射频谱如图 18(d)所示。图 18(c)是种子源脉冲的自相关曲线,直接输出时脉宽为 3.9 ps,经过 25 m SMF 压缩后脉宽为 370 fs。此外,通过改变 UHNA4 的长度来调控激光器的净正色散值,获得了不同光谱宽度的耗散孤子锁模脉冲,最终得到 10-dB 带宽最宽为 50 nm、压缩后脉宽为 230 fs 的耗散孤子脉冲。

相比于传统孤子,耗散孤子具有许多特点^[50-52]:首先,不同于光谱上具有凯利边带的传统孤子,耗散孤子具有矩形的典型光谱,并且它的光谱宽度可以通过改变激光器内的净色散进行调控。其次,耗散孤子激光器输出的脉冲带有线性啁啾,可以作为啁啾脉冲放大系统的理想种子源,进一步提高脉冲的能量。

为了进一步获得高能量的 1.7 μm 脉冲,笔者课题组在耗散孤子种子源的基础上搭建了一个啁啾脉冲放大(CPA)系统^[53]。该放大系统由种子源、光纤展宽器、两级放大器和压缩器组成,实验装置如图 19 所示。其中,种子源是一个基于 NPR 锁模技术的耗散孤子激光器,输出脉冲的光谱中心波长为 1734 nm,10-dB 光谱宽度为 23 nm,激光器的重复频率 24.11 MHz,直接输出的脉冲宽度为 5.4 ps。

种子脉冲首先经过 50 m 的正色散光纤进行展

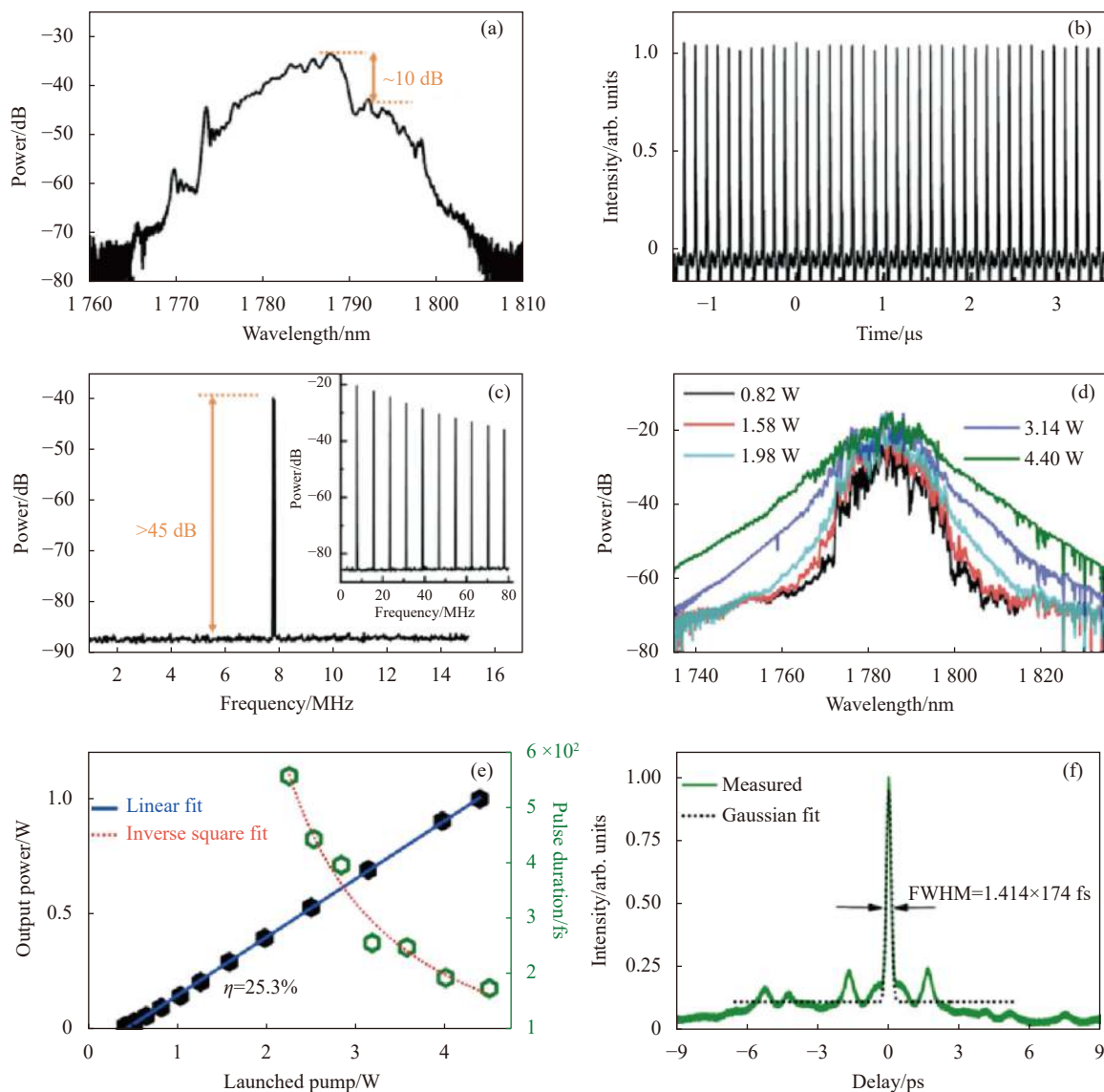


图 16 振荡器的 (a) 输出光谱; (b) 脉冲序列; (c) 射频谱; 压缩脉冲的 (d) 输出光谱; (e) 输出功率、脉冲宽度与泵浦功率的关系; (f) 自相关曲线^[45]
 Fig.16 Oscillator: (a) Output optical spectrum; (b) Trace of pulse trains; (c) RF spectrum; compressed pulses: (d) Output optical spectra; (e) Output power and pulse width versus launched pump power; (f) AC trace^[45]

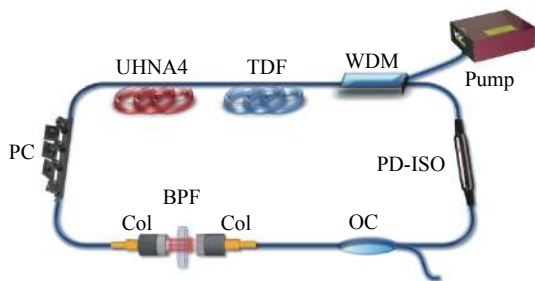


图 17 耗散孤子掺铥光纤激光器的原理图^[49]

Fig.17 Schematic of the dissipative soliton Tm-doped fiber laser^[49]

宽,然后在一级放大中进行放大。一级放大由 1560 nm 泵浦激光器和 1.1 m 的掺铥光纤组成。随后放大脉

冲经过了一个带通滤波器(中心波长: 1734 nm, 3-dB 带宽: 25 nm)来滤除放大脉冲光谱上的放大自发辐射光(ASE)。放大级之间使用了一个偏振无关隔离器避免返回光干扰上一级放大。主放大由 3.2 m 的低掺杂掺铥光纤和最大功率为 10 W 的 1570 nm 泵浦激光组成。实验中采用纤芯泵浦的方式,可以提高 TDF 的粒子数反转水平,从而在 1.7 μm 处获得足够的增益。

最终在 5 W 的泵浦功率下,系统输出脉冲的平均功率为 1.95 W,对应脉冲能量为 80.9 nJ。图 20 是放大级中不同位置输出的光谱,其中的红色曲线是主放

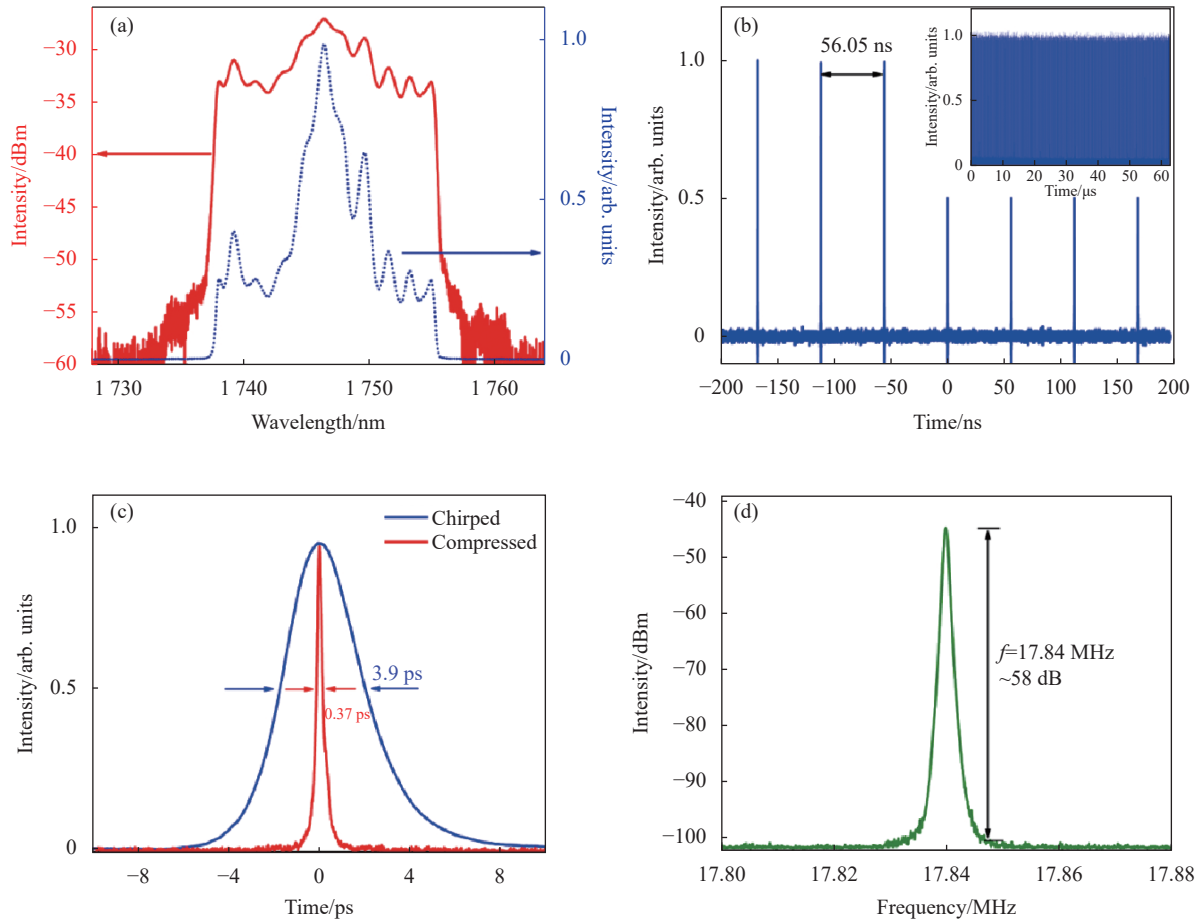


图 18 单脉冲状态。(a) 锁模光谱; (b) 脉冲序列; 插图: 60 μs 时间范围的脉冲序列; (c) 未压缩的输出脉冲 (蓝色) 和压缩脉冲 (红色) 的自相关迹线; (d) 射频谱^[49]

Fig.18 Single-pulse operation. (a) Mode-locked spectrum; (b) Pulse train, inset: pulse train over 60 μs ; (c) The measured autocorrelation trace of the uncompressed output pulse (blue) and the compressed pulse (red); (d) RF spectrum^[49]

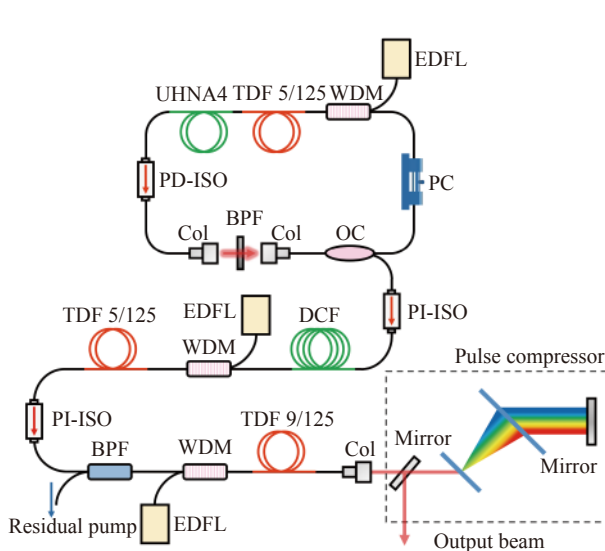


图 19 1.7 μm 掺钪 CPA 系统示意图^[53]

Fig.19 Schematic of the 1.7 μm Tm-doped CPA system^[53]

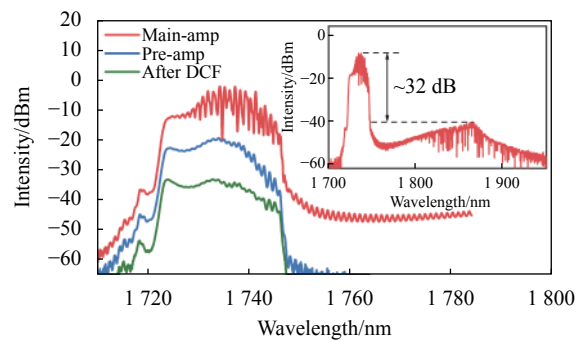


图 20 经过 DCF(绿色)、泵浦功率为 1.5 W 时的前置放大器 (蓝色) 和泵浦功率为 5 W 时的主放大器 (红色) 后的激光信号光谱; 插图: 主放大器的光谱^[53]

Fig.20 Optical spectra of the laser signal after the DCF (green), the pre-amplifier (blue) at the pump power of 1.5 W and the main-amplifier (red) at the pump power of 5 W. Inset: spectrum of main-amplifier^[53]

大器之后的光谱, 插图为 250 nm 波长范围内的光谱。需要注意的是长波的 ASE 是由 TDF 在长波的高发射截面引起的。此外, 笔者课题组还计算了 ASE 的功率 (从 1750~1950 nm) 与总输出功率 (从 1700~1950 nm) 的比率大约为 0.46%。放大过程中没有观察到明显的光谱变宽, 这表明非线性效应在放大过程中得到了很好的控制。如图 21(a) 所示, 在主放大器中, 输出功率随泵浦功率线性增加, 斜率为 40.3%, 可以看出, 此时 TDF 的增益尚未达到饱和点, 这意味着随着泵浦功率的增加, 输出功率可以进一步提高。由于目前笔者课题组使用的 WDM 最大承受功率为 5 W, 若使用更高承受功率的器件, 放大的输出功率还可以进一步提高。在压缩器中通过适当调节光栅对距离对脉冲进行压缩, 最终获得放大系统的输出脉冲平均

功率为 1.3 W, 脉冲能量为 54 nJ, 脉宽为 348 fs。图 21(b) 绘制了压缩后的脉冲光谱, 其中放大输出中残余的泵浦光和长波的 ASE 都在压缩级的衍射光栅中被过滤。图 21(c) 为压缩后的脉冲自相关曲线。图 21(d) 是重复频率在 24.114 MHz 的射频谱和 500 MHz 频率范围 (插图) 内压缩脉冲的射频谱, 其信噪比约为 57 dB, 表明该系统工作在稳定状态。

此外, 为了测试 CPA 系统的稳定性, 笔者课题组在实验室中记录了两小时内的放大脉冲的功率。在平均输出功率为 1.3 W 时, 功率波动的均方根为 0.44%, 输出的脉冲光斑没有明显的畸变。此外, 笔者课题组以 3 min 的间隔记录了 1 h 内的压缩后脉冲的光谱, 输出光谱中没有明显的强度波动或波长漂移。这些结果均表明搭建的 CPA 系统运行稳定。

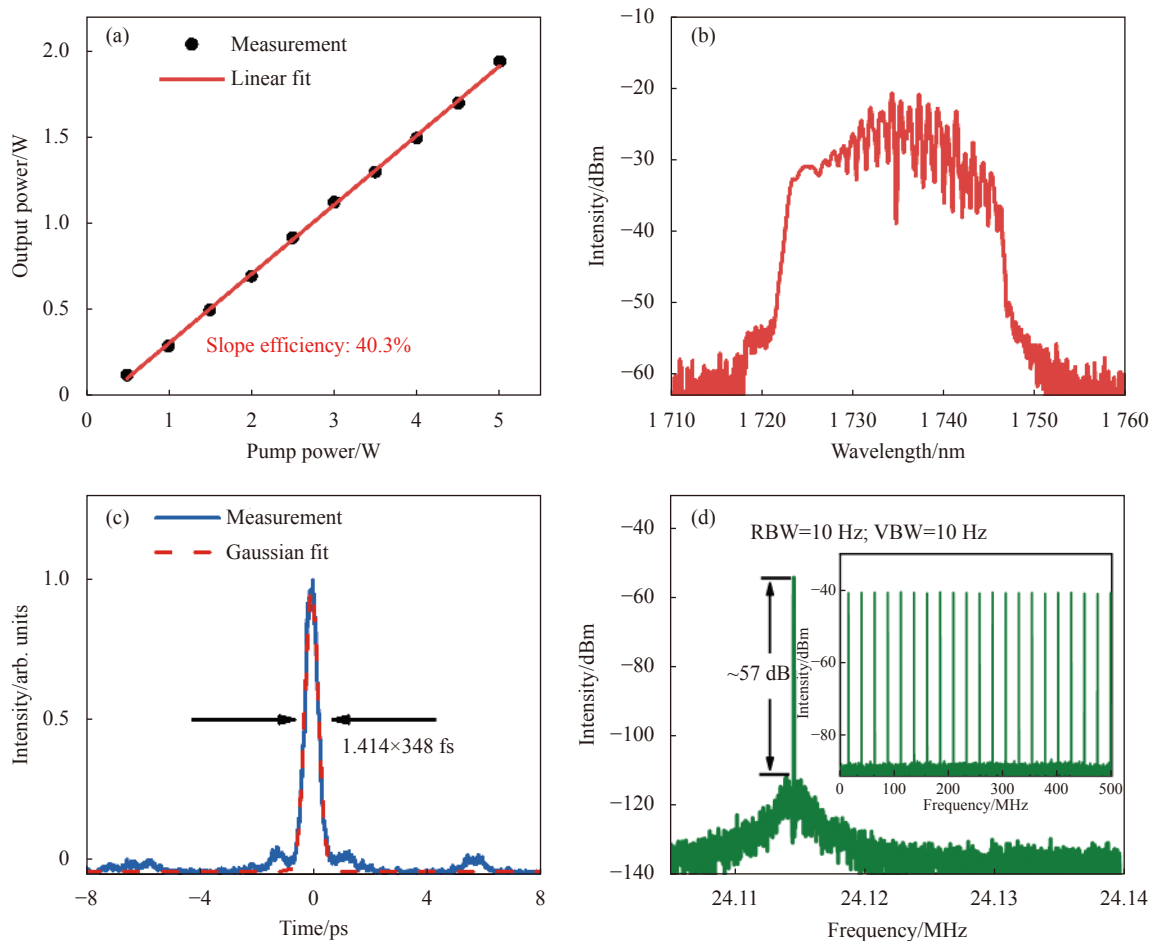


图 21 (a) 放大脉冲输出功率与泵浦功率的比值; (b) 测量的平均功率为 1.3 W 的压缩脉冲光谱; (c) 自相关曲线; (d) 射频频谱; 插图: 超过 500 MHz 频率范围的射频频谱^[53]

Fig.21 (a) Output power of amplified pulse versus launched pump power; (b) Measured compressed pulse spectrum at average power of 1.3 W; (c) Autocorrelation trace; (d) RF spectrum; Inset: RF spectrum over 500 MHz frequency range^[53]

4 结束语

近年来,随着 1.7 μm 波段超快激光技术的发展和不断增长的应用需求,获得高性能的 1.7 μm 波段的超快光纤激光器逐渐成为激光技术领域的重点研究方向,吸引了众多研究者的目光。文中聚焦了最近 1.7 μm 超快光纤激光器及放大器的研究进展,总结了基于三种方式实现 1.7 μm 波段超快激光的原理和技术特点,重点介绍了 1.7 μm 掺铥锁模光纤激光器和放大系统的最新研究进展。然而,由于缺乏成熟的 1.7 μm 光纤器件和高效的增益介质,在追求高功率、窄脉宽的目标时,1.7 μm 超快光纤激光器及放大系统在激光技术方面仍面临不少挑战。目前,1.7 μm 的超快光纤激光器研究仍处于起步阶段。在未来随着研究的深入,更多成熟的锁模技术可以被应用于 1.7 μm 波段的光纤激光器,如 NALM、Mamyshev 等技术,从而获得稳定性更好、能量更高的脉冲输出。笔者相信在激光技术和光纤制造飞速发展的今天,1.7 μm 波段超快光纤激光器的性能可以不断实现突破,在生物医学、加工制造、光学测量等领域发挥更重要的价值。

参考文献:

- [1] Wise F W, Chong A, Renninger W H. High - energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(1-2): 58-73.
- [2] Kerse C, Kalaycıoğlu H, Elahi P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses [J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [3] Horton N G, Wang K, Kobat D, et al. In vivo three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 205-209.
- [4] Agrell E, Karlsson M, Chraplyvy A R, et al. Roadmap of optical communications [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6): 063002.
- [5] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [6] Bashkatov A N, Genina E A, Kochubey V I, et al. Optical properties of the subcutaneous adipose tissue in the spectral range 400-2500 nm [J]. *Optics and Spectroscopy*, 2005, 99(5): 836-842.
- [7] Sordillo L A, Pu Y, Pratavieira S, et al. Deep optical imaging of tissue using the second and third near-infrared spectral windows [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(5): 056004.
- [8] Shi L, Sordillo L A, Rodríguez - Contreras A, et al. Transmission in near - infrared optical windows for deep brain imaging [J]. *Journal of Biophotonics*, 2016, 9(1-2): 38-43.
- [9] Zipfel W R, Williams R M, Webb W W. Nonlinear magic: Multiphoton microscopy in the biosciences [J]. *Nature Biotechnology*, 2003, 21(11): 1369-1377.
- [10] Cadroas P, Abdeladim L, Kotov L, et al. All-fiber femtosecond laser providing 9 nJ, 50 MHz pulses at 1650 nm for three-photon microscopy [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(6): 065506.
- [11] Nomura Y, Murakoshi H, Fuji T. Short-wavelength, ultrafast thulium-doped fiber laser system for three-photon microscopy [J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(6): 1428-1435.
- [12] Sharma U, Chang E W, Yun S H. Long-wavelength optical coherence tomography at 1.7 μm for enhanced imaging depth [J]. *Optics Express*, 2008, 16(24): 19712-19723.
- [13] Chong S P, Merkle C W, Cooke D F, et al. Noninvasive, in vivo imaging of subcortical mouse brain regions with 1.7 μm optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4911-4914.
- [14] Yamanaka M, Teranishi T, Kawagoe H, et al. Optical coherence microscopy in 1700 nm spectral band for high-resolution label-free deep-tissue imaging [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31715.
- [15] Kawagoe H, Ishida S, Aramaki M, et al. Development of a high power supercontinuum source in the 1.7 μm wavelength region for highly penetrative ultrahigh-resolution optical coherence tomography [J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(3): 932-943.
- [16] Wu M, Jansen K, Steen A F W, et al. Specific imaging of atherosclerotic plaque lipids with two-wavelength intravascular photoacoustics [J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(9): 3276-3286.
- [17] Alexander V V, Ke K, Xu Z, et al. Photothermolysis of sebaceous glands in human skin ex vivo with a 1708 nm Raman fiber laser and contact cooling [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2011, 43(6): 470-480.
- [18] 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.
- [19] Daniel J M O, Simakov N, Tokurakawa M, et al. Ultra-short wavelength operation of a thulium fibre laser in the 1660-1750 nm wavelength band [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18269-18276.
- [20] Wang K, Xu C. Tunable high-energy soliton pulse generation from a large-mode-area fiber and its application to third

- harmonic generation microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(7): 071112.
- [21] Nguyen T N, Kieu K, Churin D, et al. High power soliton self-frequency shift with improved flatness ranging from 1.6 to 1.78 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(19): 1893-1896.
- [22] Firstov S V, Alyshev S V, Riumkin K E, et al. Watt-level, continuous-wave bismuth-doped all-fiber laser operating at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4360-4363.
- [23] Yamada M, Senda K, Tanaka T, et al. Tm³⁺-Tb³⁺-doped tunable fibre ring laser for 1700 nm wavelength region [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(20): 1287-1288.
- [24] Noronen T, Okhotnikov O, Gumenyuk R. Electronically tunable thulium-holmium mode-locked fiber laser for the 1700-1800 nm wavelength band [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14703-14708.
- [25] Agger S D, Povlsen J H. Emission and absorption cross section of thulium doped silica fibers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 50-57.
- [26] Jackson S D. The spectroscopic and energy transfer characteristics of the rare earth ions used for silicate glass fibre lasers operating in the shortwave infrared [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009, 3(5): 466-482.
- [27] Li Z, Jung Y, Daniel J M O, et al. Exploiting the short wavelength gain of silica-based thulium-doped fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2197-2200.
- [28] Li C, Kong C, Wong K K Y. High energy noise-like pulse generation from a mode-locked thulium-doped fiber laser at 1.7 μm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1-6.
- [29] Wang K, Horton N G, Charan K, et al. Advanced fiber soliton sources for nonlinear deep tissue imaging in biophotonics [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 20(2): 50-60.
- [30] Chung H Y, Liu W, Cao Q, et al. Er-fiber laser enabled, energy scalable femtosecond source tunable from 1.3 to 1.7 μm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15760-15771.
- [31] Fehrenbacher D, Sulzer P, Liehl A, et al. Free-running performance and full control of a passively phase-stable Er: fiber frequency comb [J]. *Optica*, 2015, 2(10): 917-923.
- [32] Firstov S, Alyshev S, Melkumov M, et al. Bismuth-doped optical fibers and fiber lasers for a spectral region of 1600-1800 nm [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6927-6930.
- [33] Noronen T, Firstov S, Dianov E, et al. 1700 nm dispersion managed mode-locked bismuth fiber laser [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24876.
- [34] Khagai A, Melkumov M, Riumkin K, et al. NALM-based bismuth-doped fiber laser at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1127-1130.
- [35] Xiao X, Guo H, Yan Z, et al. 3 W narrow-linewidth ultra-short wavelength operation near 1707 nm in thulium-doped silica fiber laser with bidirectional pumping [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(4): 135.
- [36] Burns M D, Shardlow P C, Barua P, et al. 47 W continuous-wave 1726 nm thulium fiber laser core-pumped by an erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5230-5233.
- [37] Wienke A, Wandt D, Lecourt J B, et al. High energy, femtosecond fiber laser source at 1750 nm for 3-photon microscopy (Conference Presentation)[C]//Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications, 2018, 10683: 106831T.
- [38] Emami S D, Dashtabi M M, Lee H J, et al. 1700 nm and 1800 nm band tunable thulium doped mode-locked fiber lasers [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 12747.
- [39] Zhang L, Zhang J, Sheng Q, et al. Efficient multi-Watt 1720 nm ring-cavity Tm-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37910-37918.
- [40] Puncken O, Kirsch D C, Wienke A, et al. Ultrafast thulium fiber laser operating at 1750 nm [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, 2017: 1.
- [41] 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.
- [42] Anderson D, Desaix M, Lisak M, et al. Wave breaking in nonlinear-optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1992, 9(8): 1358-1361.
- [43] Kelly S M J. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(8): 806-807.
- [44] Chen S, Chen Y, Liu K, et al. All-fiber short-wavelength tunable mode-locked fiber laser using normal dispersion thulium-doped fiber [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17570-17580.
- [45] Chen S, Chen Y, Liu K, et al. W-type normal dispersion thulium-doped fiber-based high-energy all-fiber femtosecond laser at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3637-3640.
- [46] Ciągła P, Rampur A, Heidt A, et al. Dispersion measurement of ultra-high numerical aperture fibers covering thulium, holmium, and erbium emission wavelengths [J]. *Journal of the Optical*

- Society of America B*, 2018, 35(6): 1301-1307.
- [47] Nomura Y, Fuji T. Sub-50-fs pulse generation from thulium-doped ZBLAN fiber laser oscillator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12461-12466.
- [48] Nomura Y, Fuji T. 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.
- [49] Chen J X, Li X Y, Li T J, et al. 1.7- μm dissipative soliton Tm-doped fiber laser [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 873-878.
- [50] Chong A, Buckley J, Renninger W, et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [51] Zhao L M, Tang D Y, Wu J. Gain-guided soliton in a positive group-dispersion fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1788-1790.
- [52] Grellu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [53] Chen J X, Zhan Z Y, Li C, et al. 1.7 μm Tm-fiber chirped pulse amplification system with dissipative soliton seed laser [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(23): 5922-5925.