

2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望

王 璞 刘 江

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

摘要 2.0 μm 掺铥脉冲光纤激光器在人眼安全雷达、激光医疗、光电对抗以及特殊材料加工等领域具有重要应用,近年来成为新型光纤激光光源研究的热点。对国内外 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器的研究进展进行了归纳与总结,内容包括:实现掺铥超短激光脉冲振荡输出的技术手段;新型被动锁模可饱和吸收材料,被动锁模掺铥光纤激光输出的性能及优劣;高功率掺铥超短脉冲光纤放大器的最新研究进展等。技术手段涉及主动锁模、非线性偏振演化锁模、可饱和吸收体锁模和非线性放大环镜锁模。新型可饱和吸收材料主要包括半导体、碳纳米管、石墨烯以及氧化石墨烯等。本课题组最新研究结果表明高功率掺铥超短脉冲光纤放大器的平均输出功率可达 80 W,激光脉冲宽度为 20 ps,激光中心波长为 1963 nm。对此类超短脉冲光纤激光器的进一步发展及应用给予了展望。

关键词 激光器;超快激光器;光纤放大器;掺铥光纤;被动锁模;中红外激光

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0601002

Progress and Prospect on Ultrafast Tm-Doped Fiber Lasers at 2 μm Wavelength

Wang Pu Liu Jiang

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Thulium-doped pulsed fiber lasers have attracted considerable interests as novel laser source, due to their wide applications in eye-safe lidar, laser medical system, optoelectronic countermeasure and special material processing. The research and development on ultrafast thulium-doped fiber laser at 2 μm wavelength are classified, which include the technical approach of the ultrafast thulium doped pulse output, the novel saturable absorbers of passive mode-locking, the characteristics of thulium-doped passively mode-locked fiber laser output, and the development of high power thulium-doped ultrafast pulse amplifier. Up to now, several main mode-locked techniques, such as actively mode-locking, nonlinear polarization evolution, saturable absorber, and nonlinear amplifier loop mirror have been used to achieve ultrashort laser pulses in thulium-doped fiber lasers. The saturable absorber material mainly include semiconductor, carbon nanotubes, graphene and graphene oxide. The most recent work shows that 80 W average power at 1963 nm has been obtained in a three-stage fiber amplifier with pulse width of 20 ps. The prospect of further development and application of such ultrafast laser sources is discussed in the last part of the article.

Key words lasers; ultrafast laser; fiber amplifier; thulium-doped fiber; passively mode-locked; mid-infrared lasers

OCIS codes 140.3510; 140.3280; 140.3070; 140.3540

1 引 言

与传统固体激光器相比,光纤激光器具有光光转换效率高、输出光束质量好、波长可调谐范围大、结构简单紧凑以及系统维护成本低等优点,近年来

成为国内外新型激光光源领域的研究热点。相对于传统掺铥光纤激光器以及掺铒光纤激光器,2.0 μm 波段掺铥光纤激光器的受激布里渊散射(SBS)效应和受激拉曼散射(SRS)效应的产生阈值相对更高,

收稿日期: 2013-04-09; **收到修改稿日期**: 2013-05-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235010)、国家自然科学基金面上项目(61177048)和北京市自然科学基金 B 类重点项目(KZ2011100050011)资助课题。

作者简介: 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

在输出窄线宽或高脉冲能量方面掺铥光纤(TDF)激光器相对具有更大的优势。与掺铥连续光纤激光器相比,掺铥脉冲光纤激光器在保持光纤激光器高光束质量、高环境稳定性以及高光光转换效率的同时,具有更高的激光峰值功率,更利于掺铥光纤激光器在人眼安全雷达、激光医疗、以及材料加工等领域的广泛应用。另外,2.0 μm 波段掺铥脉冲光纤激光器还可作为中红外光参量振荡器(OPO)的抽运源,从而实现中红外波段的激光输出^[1~4]。此外,2.0 μm 波段掺铥脉冲光纤激光器也可以抽运硫化物、碲化物等中红外非线性光纤,产生 2.0~5.0 μm 波段宽带超连续谱激光输出。2.0~5.0 μm 波段范围内的激光在有毒气体探测、激光雷达、光电对抗等应用领域极具重要地位,也是近年来国内外新型激光源研究的热点之一。

2 掺铥超短脉冲光纤振荡器研究进展

过去几年间,2.0 μm 波段掺铥连续光纤激光器的研究和应用实现了突破性进展^[5~12],基于主振荡功率放大(MOPA)结构的高功率掺铥连续光纤激光器的输出功率已达近千瓦量级^[10],多级 MOPA 结构的单频掺铥光纤激光器的输出功率也达到 608 W^[12],2.0 μm 波段掺铥超短脉冲(飞秒、皮秒)光纤激光器的研究也取得了令人瞩目的研究进展^[13~52]。目前,国外从事 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器研究与开发的研究机构主要有:德国汉诺威激光中心,芬兰坦佩雷理工大学、俄罗斯科学院、美国中佛罗里达大学、美国 AdValue Photonics 公司和美国 PolarOnyx 公司等。实现 2.0 μm 波段掺铥超短激光脉冲输出主要采用的锁模方式有:主动锁模、非线性偏振演化(NPE)锁模、可饱和吸收体(SA)锁模、非线性放大环镜(NALM)锁模。而目前可用于 2.0 μm 波段掺铥光纤激光器被动锁模的可饱和吸收材料主要包括:半导体、碳纳米管(CNT)、石墨烯以及氧化石墨烯等。

2.1 主动锁模技术

主动锁模技术是在激光谐振腔内加入振幅或者相位调制元器件,利用外界控制信号来对激光谐振腔内的损耗进行周期性调制,最终实现超短激光脉冲输出。2011年,法国 Hübner 等^[13]报道了主动锁模的 2.0 μm 掺铥光纤激光器,实现了重复频率为 37.88 MHz 的皮秒激光脉冲输出。该主动锁模掺铥光纤激光器采用了长为 2.4 m、纤芯直径为 20 μm 的双包层掺铥光纤作为激光增益介质,中心波长为

792 nm 的高功率多模半导体激光器作为抽运源,空间结构的声光调制器(AOM)作为锁模器,图 1 所示为实验装置原理图。由于实验使用了较短的大芯径掺铥光纤作为激光增益介质,降低了光纤导致的非线性效应;另外,由于声光调制器的损伤阈值较高,实验得到了 11.8 W 的最大平均输出功率,相应的最高单脉冲能量为 314 nJ,激光脉冲宽度为 38 ps。该实验结果也为目前 2.0 μm 波段掺铥超短脉冲光纤振荡器所产生的最高平均输出功率。

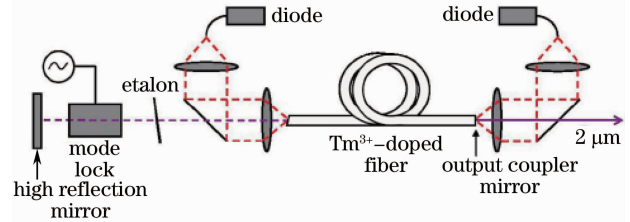


图 1 主动锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of the actively mode-locked thulium-doped fiber laser

该主动锁模掺铥光纤激光器采用了空间结构的元器件以及空间抽运耦合方式、系统结构复杂、环境稳定性相对较差。此外,由于主动锁模技术受到锁模器带宽的限制,锁模激光脉冲宽度一般为亚纳秒量级,实现飞秒激光脉冲输出比较困难,因此在超短脉冲掺铥光纤激光器中主动锁模技术使用的相对较少。

2.2 非线性偏振演化锁模

非线性偏振演化技术除应用于掺铥、掺铒光纤激光器锁模外,1995年,美国麻省理工学院(MIT) Nelson 等^[14]报道了 2.0 μm 波段掺铥超短脉冲光纤激光器,非线性偏振演化作为被动锁模方式,实验装置原理如图 2 所示,其中 SMF 为单模无源光纤。实验采用了 783 nm 的钛宝石激光器作为抽运源,单包层掺铥光纤作为激光增益介质。当抽运功率为 325 mW 时,调节半波片(HWP)、1/4 波片(QWP)以及双折射滤波器,得到了稳定的重复频率为 17.5 MHz 的锁模激光脉冲输出,采用自相关仪测得激光脉冲宽度为 360 fs,由于非线性偏振演化技术可认为属于快速可饱和吸收体,因此该激光器在没有进行色散管理的前提下就得到了较短的激光脉冲输出。然而,由于最大抽运功率的限制,最大平均输出功率仅为 0.24 mW。

最近几年,基于 NPE 被动锁模技术,德国汉诺威激光中心 Dietmar Kracht 教授研究组在 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器方面做了一系列研究工作,并取得了较好的研究成果^[16~21],其相关工作主

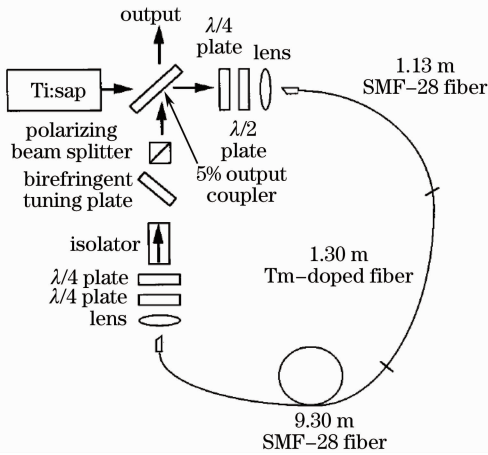


图 2 空间结构 NPE 锁模掺铥光纤激光器实验装置图
Fig. 2 Schematic setup of the free-space NPE mode-locked thulium-doped fiber laser

要包括采用光栅对来进行激光腔内的色散管理以实现高脉冲能量、窄脉冲宽度的激光输出。2008 年,该课题组报道了单脉冲能量为 4.3 nJ 的掺铥光纤振荡器^[16],相应的激光重复频率为 41.4 MHz,脉冲宽度为 294 fs。该激光振荡器采用了大芯径掺铥光纤作为增益介质,因此在腔内色散管理后实现了高脉冲能量输出。2010 年,该课题组在掺铥超短脉冲光纤激光器色散管理方面也进行了相关理论研究^[18],分析了脉冲输出特性与激光谐振腔的色散以及激光抽运功率的关系。2012 年,该研究组又将小芯径,高数值孔径的无源正色散光纤(NDF)作为激光腔内的色散补偿元件,得到了脉冲宽度为 119 fs 的激光脉冲输出^[21],该脉宽也为目前 2.0 μm 波段掺铥超短脉冲光纤激光器所报道的最窄激光脉冲宽度。图 3 所示为实验装置原理图,其中掺铥光纤(TDF)的长度为 0.64 m,模场直径为 5.9 μm ,WDM 为波分复用器,而在激光腔内提供正色散的小芯径光纤的直径仅为 2.7 μm ,相应的数值孔径为 0.28,较小的纤芯直径导致该光纤在 2.0 μm 波段具有非常大的波导色散,其在 2.0 μm 波段处的色散为 +0.0474 ps^2/m 。激光谐振腔内的总色散为 -0.0024 ps^2 ,接近于零色散。当然,由于掺铥光纤以及普通的 SMF-28 光纤与小芯径色散补偿光纤的模场直径相差较大,在熔接时需要考虑它们之间的熔接损耗。此外,色散管理用的正色散光纤纤芯直径较小,也导致了激光输出单脉冲能量较低,偏振输出镜(POC)最大脉冲能量仅为 0.17 nJ。

前面所列举的 NPE 锁模掺铥超短脉冲光纤激光器都使用了空间结构的光学元器件,激光器结构复杂、环境稳定性相对较差。2011 年,美国匹兹堡

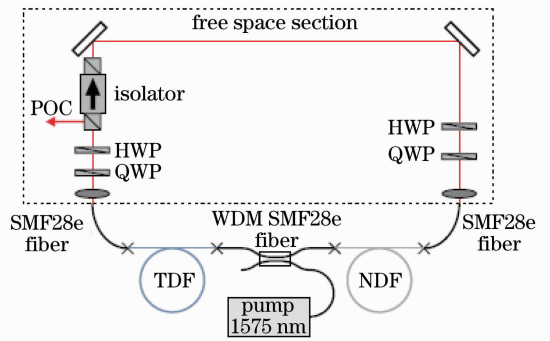


图 3 色散管理的 NPE 锁模掺铥光纤激光器实验装置图
Fig. 3 Schematic setup of NPE mode-locked thulium-doped fiber laser with dispersion management

大学 Wang 等^[22]报道了全光纤结构、非线性偏振演化锁模的飞秒脉冲掺铥光纤激光器,其实验装置如图 4 所示。激光抽运源为放大的宽带掺铥超荧光(ASE)光源,3 m 长的单包层掺铥光纤作为增益介质,偏振控制器(PC)与偏振相关隔离器组成了被动锁模器。当激光抽运功率为 240 mW 时,产生了稳定的重复频率为 9.78 MHz 的飞秒激光脉冲输出,此时激光器工作在全负色散孤子锁模状态下,其最大平均输出功率为 1.5 mW,激光脉冲宽度为 770 fs,中心波长为 1982 nm,3 dB 光谱带宽为 5.2 nm,光谱形状具有典型的 Kelly 边带。而当抽运功率超过 400 mW 后,该光纤激光器却产生了稳定的噪声脉冲,此时自相关仪测得激光脉冲宽度为 260 fs,小于前面所实现的孤子脉宽 770 fs,然而自相关信号却出现了较为明显的平台,输出光谱也变得平滑,3 dB 光谱带宽也增加到了 15 nm,输出功率达到了 30 mW。高平均输出功率、平滑的宽带光谱以及带有平台的自相关迹,这些现象都是噪声锁模光纤激光器典型的特征。该实验首次在 2.0 μm 掺铥光纤激光器中观察到噪声锁模脉冲。

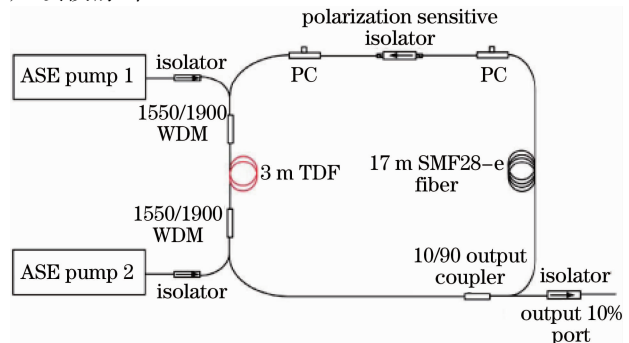


图 4 全光纤结构 NPE 锁模掺铥光纤激光器实验装置图
Fig. 4 Schematic setup of the all-fiber NPE mode-locked thulium-doped fiber laser

2.3 可饱和吸收体锁模

2.3.1 半导体材料锁模

相对于 NPE 锁模技术来说,基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)技术的掺铥超短脉冲光纤激光器更易实现全光纤化结构,该技术能够实现自启动锁模,环境稳定性相对更高。2009 年,美国 AdValue Photonics 公司 Wang 等^[23]利用 SESAM 作为可饱和吸收体,实现了 1.98 μm 皮秒激光脉冲输出,平均输出功率为 10 mW,相应的单脉冲能量为 0.76 nJ,脉冲宽度为 1.5 ps。图 5 所示为实验装置原理图,该激光器采用了线形腔结构设计,其中增益介质为 0.3 m 长的高掺杂双包层(DC)掺铥光纤,光纤环境作为激光脉冲的输出镜(OC)从而实现了全光纤化结构,提高了激光器的工作稳定性。

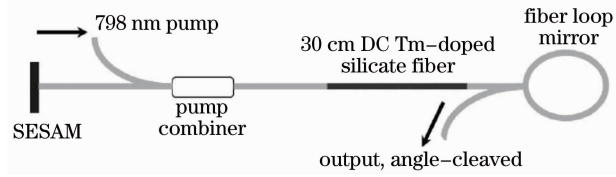


图 5 线形腔结构 SESAM 锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 5 Schematic setup of the linear cavity SESAM mode-locked thulium-doped fiber laser

目前商用的 2.0 μm 波段的 SESAM 相对较少,而芬兰坦佩雷理工大学 Okhotnikov 教授研究组^[25~28]在 2.0 μm 波段 SESAM 制备方面具有明显优势,在 SESAM 锁模掺铥以及铥钬共掺超短脉冲光纤激光器方面率先取得了较好的研究成果。2007 年该课题组就报道了波长可调谐的飞秒脉冲铥钬共掺光纤激光器^[25],激光波长可调谐范围为 1912~1972 nm,激光脉冲宽度为 750 fs,平均输出功率能达到 50 mW。

2011 年,该课题组又报道了全光纤结构、色散管理的铥钬共掺超短脉冲光纤激光器^[27],图 6 所示为该色散管理掺铥光纤激光器的实验装置原理图。

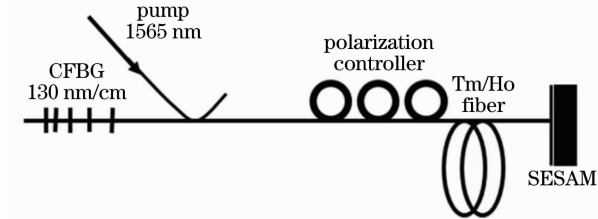


图 6 全光纤结构 SESAM 锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 6 Schematic setup of the all-fiber SESAM mode-locked thulium-doped fiber laser

激光器采用了 1.2 m 长的铥钬共掺光纤作为增益介质,SESAM 作为锁模器,而啁啾布拉格光栅(CFBG)提供的正色散用来补偿激光腔内的负色散。该啁啾布拉格光栅的中心波长为 1986 nm,反射率约为 30%,光谱带宽为 82 nm,该啁啾光栅提供了 1.07 ps^2 的正色散。实验中通过改变腔内无源光纤的长度来实现激光腔内总色散的调节,总的色散 β_2 可在 $-0.32 \sim 0.47 \text{ ps}^2$ 之间变化。图 7 所示为该激光器在不同腔内色散值时,锁模激光脉冲的输出光谱,随着激光腔总色散的改变,光谱形状从陡沿变成了具有边带的光谱。然而,由于啁啾布拉格光栅所提供的正色散固定,只能通过调节腔内负色散光纤的长度来改变激光腔的总色散,因此激光腔的色散可调范围相对较小。

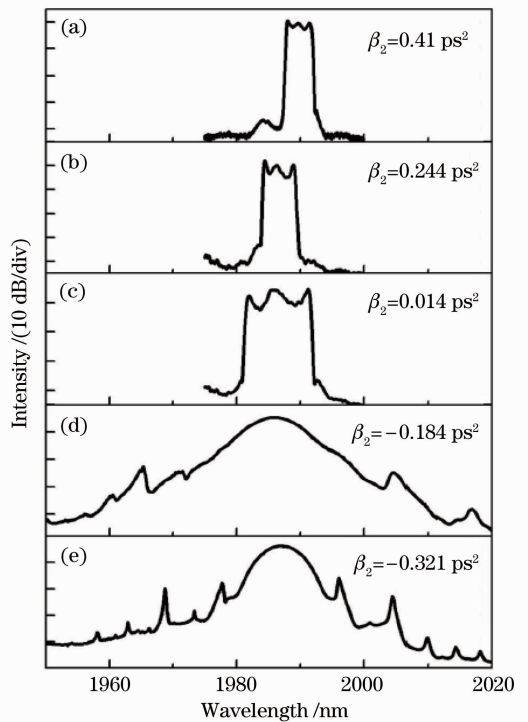


图 7 不同腔内色散时光纤激光输出的光谱

Fig. 7 Optical spectra of the fiber laser at different cavity dispersions

与国外的研究工作相比,国内在 2.0 μm 波段掺铥超短脉冲光纤激光器方面的研究起步相对较晚。2011 年,北京工业大学高功率光纤激光课题组^[29]率先在国内报道了包层抽运的 SESAM 锁模皮秒脉冲掺铥光纤激光器,整个激光器采用了环形腔结构设计,由于腔内较大的负色散,输出激光脉冲宽度约为 20 ps。2012 年,本课题组实现了高脉冲能量、全光纤结构飞秒脉冲掺铥光纤激光器,图 8 所示为实验装置原理图,激光器结构与以前报道的相

似^[30]。激光谐振腔的总长度为 0.93 m 左右,0.6 m 长的掺铥光纤作为增益介质,该掺铥光纤的纤芯直径为 9.0 μm ,在 2.0 μm 波段处其色散值大约为 $-0.064 \text{ ps}^2/\text{m}$,最后激光器的总色散约为 -0.07 ps^2 。自制的中心波长为 1550 nm 的连续掺铥光纤激光器作为激光抽运源,最大平均输出功率为 900 mW。

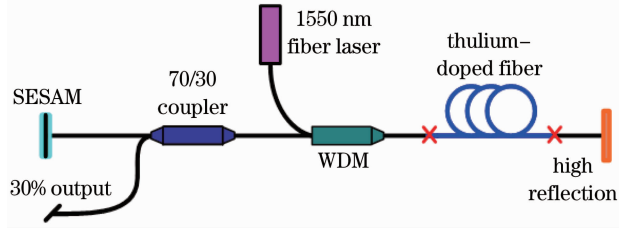


图 8 无色散管理的飞秒脉冲掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 8 Schematic setup of the femtosecond thulium-doped fiber laser without intracavity dispersion compensation

SESAM 来自 BATOP 公司,其调制深度为 20%,工作的中心波长为 2000 nm,恢复时间为 500 fs。

当 1550 nm 连续掺铥光纤激光器的输出功率为 225 mW 时,适当的调节 SESAM 与光纤端面之间的耦合,掺铥光纤激光器开始产生稳定的重复频率为 108 MHz 的锁模激光脉冲,其重复频率与激光腔的总长度相吻合。当抽运功率为 580 mW 时,最大平均输出功率为 70 mW,相应的最高单脉冲能量为 0.65 nJ,进一步增加抽运功率将发生脉冲分裂现象。

图 9 所示为飞秒脉冲掺铥光纤激光器的输出光谱,中心波长为 1945 nm,3 dB 光谱带宽 $\omega_{1/2}=6.1 \text{ nm}$ 。由于整个光纤激光器工作在负色散状态,因此锁模激光的光谱形状出现了明显的 Kelly 边带。自相关仪测得锁模激光的脉冲宽度 $\tau_{\text{pulse}}=712 \text{ fs}$,脉冲时间带宽积为 0.34,略大于傅里叶变换极限,此时激光脉冲的峰值功率为 910 W。

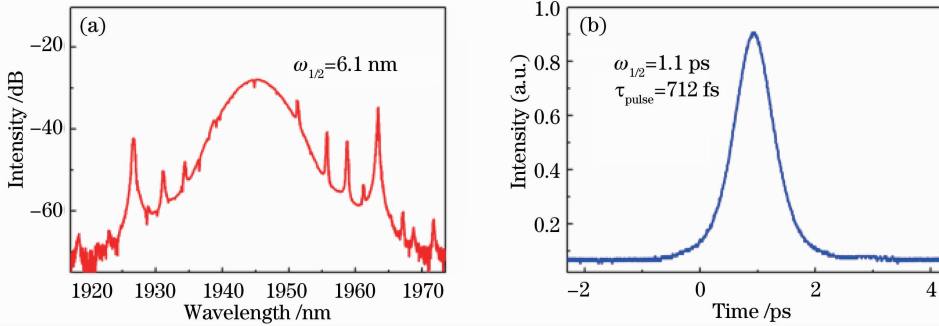


图 9 (a) 飞秒掺铥光纤激光器输出的光谱;(b) 飞秒掺铥光纤激光器的脉冲宽度

Fig. 9 (a) Optical spectra of the femtosecond thulium-doped fiber laser; (b) autocorrelation trace of the femtosecond thulium-doped fiber laser

在实现飞秒超短激光脉冲输出的同时,采用 1.0 μm 波段相类似的超短线形腔结构^[53,54],本课题组也实现了重复频率高达 430 MHz 的全光纤结构、皮秒脉冲掺铥光纤激光器。如图 10 所示为高重复频率被动锁模掺铥光纤激光器输出的脉冲串和光谱,激

光脉冲宽度为 22 ps,激光的中心波长为 1963 nm,3 dB 光谱带宽 $\omega_{1/2}$ 为 0.24 nm,平均输出功率为 22 mW,此类高重复频率皮秒脉冲光纤激光器由于具有较低的峰值功率,因此采用该激光器作为种子源,经过多级光纤功率放大器之后可以实现百瓦级

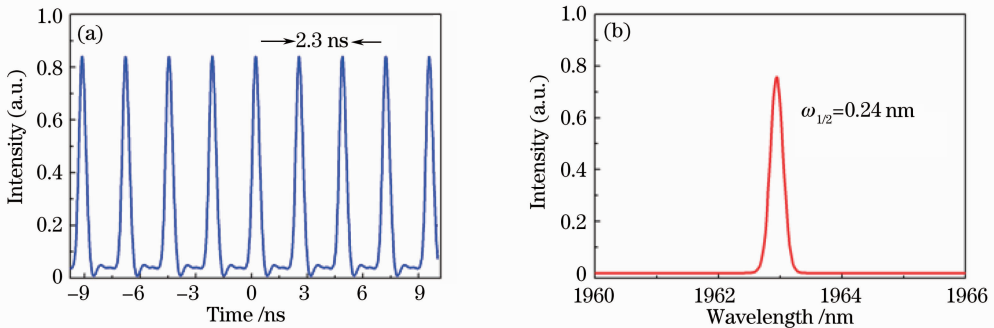


图 10 (a) 稳定的高重复频率被动锁模激光脉冲串;(b) 高重复频率被动锁模掺铥光纤激光器的输出光谱
Fig. 10 (a) Stable pulse train of the high repetition-rate passively mode-locked thulium-doped fiber laser; (b) optical spectra of the high repetition-rate passively mode-locked thulium-doped fiber laser

平均功率输出,避免了采用结构复杂的啁啾脉冲放大技术。

2.3.2 碳纳米管材料锁模

由于碳纳米管作为可饱和吸收体具有制备简单、成本低廉以及恢复时间快等优点,目前碳纳米管已广泛应用于超短激光脉冲的产生。2008年,俄罗斯科学院 Solodyankin 等^[35]利用碳纳米管作为可饱和吸收体首次实现了 $2.0\ \mu\text{m}$ 波段掺铥光纤激光器被动锁模。如图 11 所示,该掺铥光纤激光器采用了环形腔结构设计,处于光纤接头(FC)之间的透射式结构的碳纳米管(CNT)作为可饱和吸收体。碳纳米管锁模掺铥光纤激光器平均输出功率为 $3.4\ \text{mW}$,重复频率为 $37\ \text{MHz}$,脉冲宽度为 $1.32\ \text{ps}$ 。

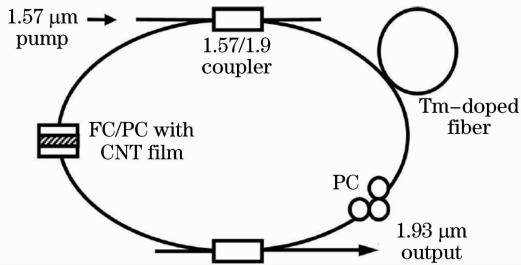


图 11 环形腔结构碳纳米管锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 11 Schematic setup of the ring cavity CNT mode-locked thulium-doped fiber laser

2009年,美国康奈尔大学 Kieu 等^[36]利用碳纳米管作为可饱和吸收体也实现了掺铥光纤激光器被动

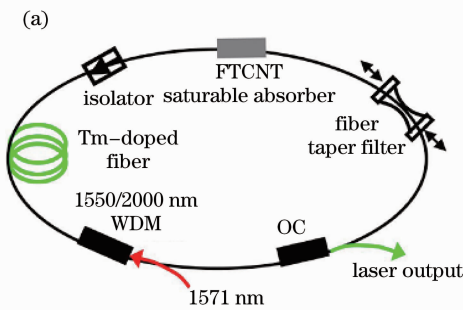


图 13 (a)波长可调谐碳纳米管锁模掺铥光纤激光器实验装置图;(b)碳纳米管被动锁模掺铥光纤激光器的输出光谱

Fig. 13 (a) Schematic setup of the CNT mode-locked tunable thulium-doped fiber laser; (b) optical spectra of the CNT mode-locked tunable thulium-doped fiber laser

2.3.3 石墨烯以及氧化石墨烯材料锁模

石墨烯是由单层碳原子紧密堆积成二维蜂窝状晶格结构的一种碳质新材料,是构建其他维度碳质材料的基本单元。2009年,Bao 等^[55~58]率先证实了石墨烯材料可作为饱和吸收体用于 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段掺铥光纤激光器被动锁模。从此大多数的研究一直专注于石墨烯材料在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段掺铥光纤激光器被动锁

锁模,由于 $2.0\ \mu\text{m}$ 波段光学元件的限制,他们采用了线形腔结构设计,输出激光脉冲宽度为 $750\ \text{fs}$,最大平均输出功率为 $25\ \text{mW}$,相应的单脉冲能量为 $0.5\ \text{nJ}$ 。图 12 所示为实验装置原理图。同年,芬兰坦佩雷理工大学 Okhotnikov 教授课题组的 Kivistö 等^[37]也实现了 $2.0\ \mu\text{m}$ 波段碳纳米管被动锁模掺铥光纤激光器,激光平均输出功率为 $15\ \text{mW}$,重复频率为 $41\ \text{MHz}$,相应的激光脉冲宽度为 $1\ \text{ps}$ 。

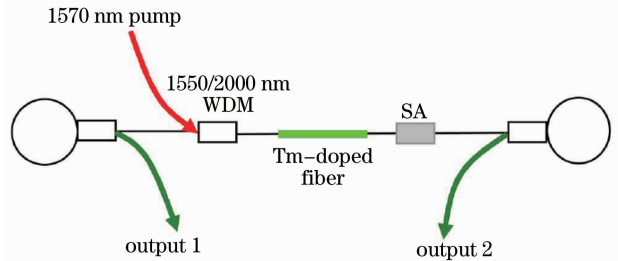
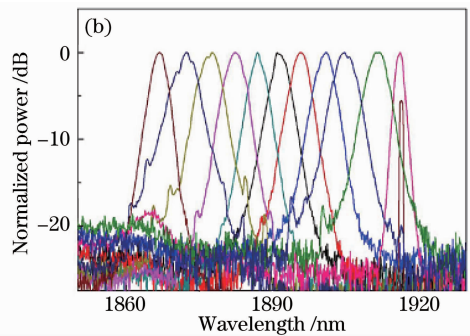


图 12 线形腔结构碳纳米管锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 12 Schematic setup of the linear cavity CNT mode-locked thulium-doped fiber laser

2010年,美国亚利桑那大学 Peyghambarian 教授研究组的 Fang 等^[38]报道了波长可调谐的基于锥形光纤的碳纳米管(FTCNT)锁模掺铥光纤激光器。如图 13 所示,通过拉伸光纤结构的锥形滤波器来实现激光输出波长在 $1866.3\sim 1916.4\ \text{nm}$ 之间可调,相应波长可调范围大于 $50\ \text{nm}$,最窄激光脉冲宽度约为 $1\ \text{ps}$ 。



模、被动调 Q 性能的优化。2011年1月,本课题组采用石墨烯材料作为可饱和吸收体率先实现了 $1.0\ \mu\text{m}$ 波段掺铥光纤激光器被动锁模、被动调 Q^[59],相继得到了脉冲能量高达 $163\ \text{nJ}$ 的被动锁模亚纳秒激光脉冲,以及脉冲宽度为 $70\ \text{ns}$ 的被动调 Q 激光脉冲。与 SESAM 相比,石墨烯可饱和吸收体的工作波段较宽,覆盖了从可见光到中红外的波长范围,但

是石墨烯作为可饱和吸收体在 2.0 μm 波段被动锁模、被动调 Q 的相关报道很少。2011 年 7 月,本课题组^[60,61]首次报道了包层抽运、环形腔结构的石墨烯被动调 Q 掺铥光纤激光器,其最大平均输出功率为 4.5 mW,最高脉冲能量为 85 nJ。由于整个激光谐振腔的长度达到了 25 m,得到的最窄激光脉冲宽度为 1.4 μs 。而在石墨烯被动锁模掺铥光纤激光器方面,2012 年 7 月,英国帝国理工学院 Zhang 等^[39]采用石墨烯材料与聚乙烯醇(PVA)的混合物作为可饱和吸收体,实现了重复频率为 6.46 MHz 的皮秒激光脉冲输出,最大平均输出功率为 2 mW,相应的最高

单脉冲能量小于 0.4 nJ,脉冲宽度为 3.6 ps,中心波长为 1.94 μm ,3 dB 光谱带宽仅为 2.1 nm。在文中作者分析了该掺铥光纤激光器工作在全负色散状态,而锁模激光的输出光谱没有发现 Kelly 边带的原因。图 14 为石墨烯可饱和吸收体(GSA)的透射光谱以及石墨烯锁模掺铥光纤激光器的实验装置图,其中 TDFA 为掺铥放大器,BPF 为带通滤波器。2012 年 12 月,马来西亚国防大学 Zen 等^[40]也报道了石墨烯被动锁模铥铋共掺的光纤激光器,其重复频率为 16.7 MHz,锁模激光的中心波长为 1901.6 nm。

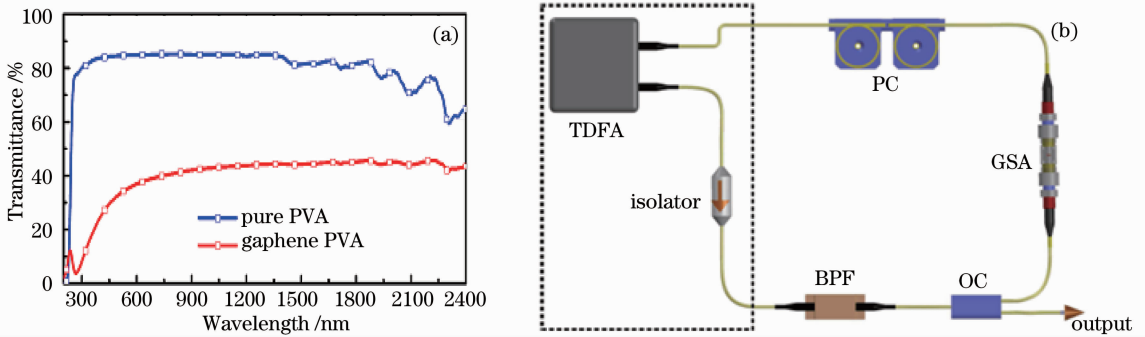


图 14 (a) 石墨烯材料与 PVA 混合物的透射谱;(b) 石墨烯锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 14 (a) Transmittance of PVA and graphene-composite;(b) schematic setup of the graphene mode-locked thulium-doped fiber laser

氧化石墨烯作为石墨烯的派生物,由于其表面带有大量亲水性酸性官能团,具有良好的润湿性能和表面活性,从而使其能够在稀碱水和纯水中分散而形成稳定的胶状悬浮液。因此,在应用方面氧化石墨烯材料比石墨烯材料更具竞争优势。2011 年 12 月,本课题组采用氧化石墨烯材料作为可饱和吸收体实现了 2.0 μm 波段掺铥光纤激光器被动锁模^[41,42]。如图 15 所示,整个掺铥光纤激光器采用了全光纤、环形腔结构设计,而使用 Hummers 法制得的氧化石墨烯作为锁模器件。如图 15 所示,当抽

运功率为 700 mW 时,开始得到稳定的重复频率为 3.17 MHz 的锁模激光脉冲。随着抽运功率的增加,最大平均输出功率为 1.8 mW,相应最大单脉冲能量为 0.56 nJ。锁模掺铥光纤激光的中心波长为 2007 nm,3 dB 光谱带宽为 0.3 nm,激光脉冲宽度约为 30 ps。该实验结果充分证明氧化石墨烯材料可作为可饱和吸收体用于 2.0 μm 波段激光脉冲的产生。2012 年 9 月,韩国首尔市立大学 Jung 等^[43]将氧化石墨烯溶液沉积在抛光的 D 型光纤侧面上,也实现了掺铥光纤激光器被动锁模皮秒激光脉冲输

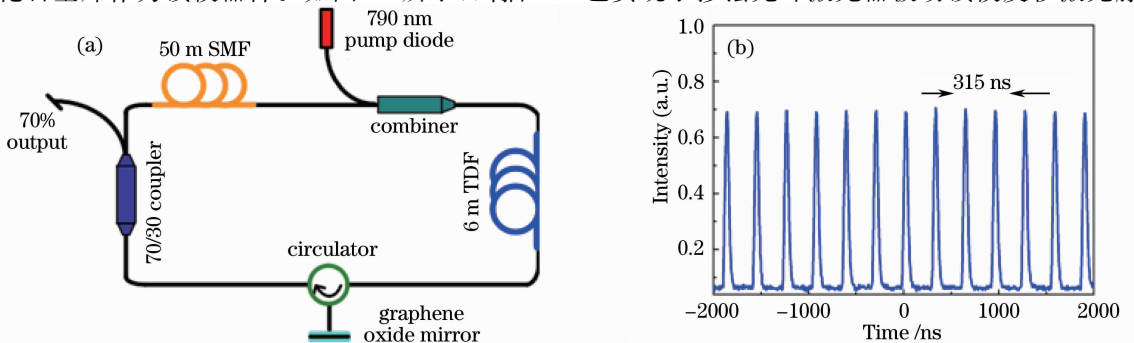


图 15 (a) 氧化石墨烯锁模掺铥光纤激光器实验装置图;(b) 被动锁模掺铥光纤激光输出脉冲串

Fig. 15 (a) Schematic setup of the graphene oxide mode-locked thulium-doped fiber laser;(b) pulse train of the passively mode-locked thulium-doped fiber laser

出,激光重复频率为 15.9 MHz,输出的中心波长为 1.91 μm ,3 dB 光谱带宽为 3.09 nm。由于锁模掺铥光纤激光器的平均输出功率只有 0.5 mW 左右,相对较低的峰值功率密度使得自相关仪没法测量激光脉冲宽度,而采用带宽为 10 GHz 的高速光电探头测得脉冲宽度小于 60 ps。

2.4 非线性放大环镜锁模

除前面提到的几种锁模技术外,非线性放大环镜也可作为快速可饱和吸收体用于 2.0 μm 波段掺铥超短激光脉冲的产生。2012 年,俄罗斯科学院 Chernysheva 等^[44]报道了基于 NALM 和 SESAM 锁模的掺铥超短脉冲光纤激光器,实验结构原理如图 16 所示。非线性放大环镜由 20:80 的激光分束器组成,同时它也充当一个附加的快速可饱和吸收体,一段锗硅光纤作为色散补偿元件用来管理激光腔内的色散,另外 SESAM 作为主要锁模器用于超短脉冲的形成。当激光腔的总色散为 -0.31 ps^2 时,产生的锁模激光脉冲宽度为 230 fs,此时激光重复频率为 52.6 MHz,3 dB 光谱带宽为 23.36 nm。随着抽运功率的增加,平均输出功率也相应增加,当抽运功率增加到 1 W 时,平均输出功率达到了 106 mW,相应的单脉冲能量为 2 nJ,激光脉冲宽度为 300 fs,峰值功率高达 3.7 kW。此外,该研究组又报道了基于 NALM 和 CNT 混合锁模的掺铥光纤激光器^[45],产生了 450 fs 的激光脉冲输出,平均输出功率为 18 mW。

同年,美国斯坦福大学 Rudy 等^[46]报道了高脉冲能量基于非线性放大环镜锁模的 8 字腔掺铥光纤激光器,实验装置如图 17 所示。激光器采用了 786 nm 的多模半导体激光器作为抽运源,10/130 μm 的双包层掺铥光纤作为增益介质,当抽运功率为 6 W

时,平均输出功率为 41 mW,相应的单脉冲能量达到了 8.75 nJ,激光脉冲宽度为 682 fs。该结果也为目前 2.0 μm 波段被动锁模掺铥光纤振荡器最高输出脉冲能量。

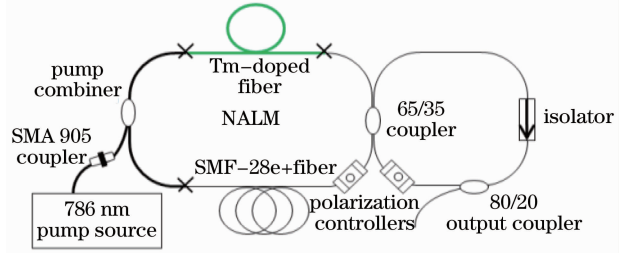


图 17 NALM 锁模锁铥光纤激光器实验装置图
Fig. 17 Schematic setup of the NALM mode-locked thulium-doped fiber laser

3 高功率掺铥超短脉冲光纤放大器研究进展

高功率超短脉冲光纤激光器,通常采用主振荡功率放大技术。低功率种子源决定了激光输出的波长、脉宽、重复频率等关键性能,而功率放大器决定了激光输出的峰值功率、平均功率和脉冲能量等。2010 年,德国汉诺威激光中心 Haxsen 等^[19]利用啁啾脉冲放大技术得到了平均输出功率为 5.7 W 的飞秒脉冲光纤激光器。图 18 所示为该放大系统的实验装置原理图,其中 793 nm 的多模半导体激光器作为抽运源,2.8 m 长的大模场面积双包层掺铥光纤作为放大器的增益介质,该掺杂光纤的纤芯直径为 25 μm ,数值孔径为 0.1。种子激光经过放大后单脉冲能量达到了 151 nJ,激光脉冲在腔外压缩到了 258 fs。

2012 年,本课题组报道了高平均功率全光纤结

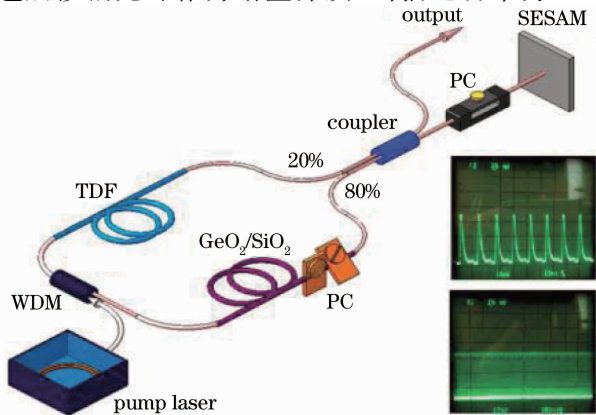


图 16 环形腔结构 NALM 锁模掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 16 Schematic setup of the ring cavity NALM mode-locked thulium-doped fiber laser

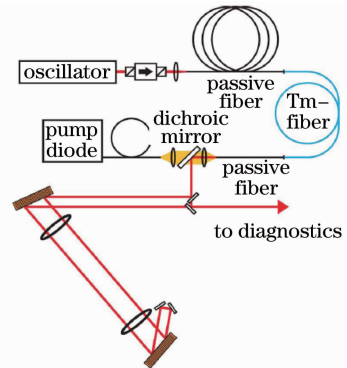


图 18 高能量空间结构飞秒脉冲掺铥光纤放大器实验装置图

Fig. 18 Schematic setup of the high energy femtosecond thulium-doped fiber amplifier

构的皮秒脉冲掺铥光纤 MOPA 系统^[34,47], 实验装置原理图如图 19 所示。被动锁模掺铥光纤振荡器主要包括连续掺铥光纤激光器、光纤布拉格光栅 (FBG)、单包层掺铥光纤、半导体可饱和吸收镜等。为了提高锁模激光的重复频率, 谐振腔的总长度大约为 0.97 m, 其中包括大约长为 0.7 m 的单包层掺铥光纤和长为 0.27 m 的单模无源光纤 (SMF-28)。WDM 的信号端熔接有高反射率的光纤布拉格光栅, 其中心波长为 1963 nm, 反射率为 80%, 3 dB 光谱带宽约为 2 nm。

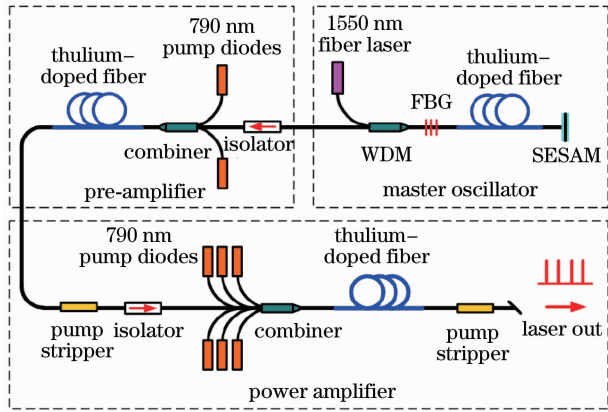


图 19 高平均功率皮秒脉冲掺铥光纤放大系统实验装置图

Fig. 19 Schematic setup of the high average power picosecond thulium-doped fiber MOPA system

掺铥光纤放大器主要包括光纤预放大器以及功率放大器, 其中掺铥光纤预放大器主要包括总输出功率为 10 W 的多模半导体激光器、 $(2+1)\times 1$ 的抽运合束器、6 m 长的双包层单模掺铥光纤, 该掺铥增益光纤的纤芯直径为 10.0 μm , 内包层直径为 130 μm , 该增益光纤在 790 nm 处包层抽运吸收率大约为 3 dB/m。掺铥光纤功率放大器主要包括总输出功率为 69 W 的 6 个 790 nm 半导体激光器、 $(6+1)\times 1$ 的抽运合束器、4.7 m 长的大模场面积双包层掺铥光纤, 该掺铥增益光纤的纤芯直径为 20.0 μm , 内包层直径为 400 μm , 该增益光纤在 790 nm 处包层抽运吸收率大约为 4.5 dB/m。

被动锁模光纤振荡器通过一级掺铥光纤预放大之后平均输出功率达到了 400 mW。掺铥光纤功率放大器的平均输出功率与抽运功率几乎呈线性增加, 在抽运功率增加到 69 W 时, 最大平均输出功率为 20.7 W, 激光斜率效率为 42%。如图 20 所示, 此时测得激光脉冲宽度 $\tau_{\text{pulse}} = 18$ ps, 中心波长为 1962.7 nm, 3 dB 光谱带宽 $\omega_{1/2} \approx 0.5$ nm。

最近, 本课题组利用重复频率为 480 MHz 的皮

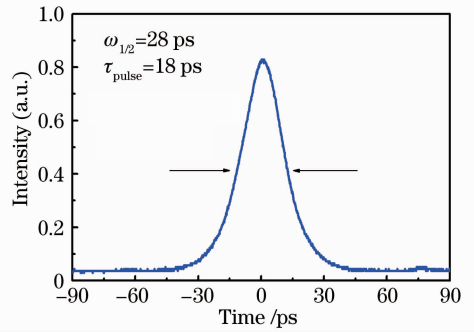


图 20 掺铥光纤功率放大器输出的激光脉冲的自相关信号
Fig. 20 Autocorrelation trace of the fiber power amplifier at the maximum average output power

秒脉冲掺铥光纤激光器作为种子源, 经过三级全光纤结构双包层掺铥光纤放大器之后, 平均输出功率达到了 80 W, 相应的激光脉冲宽度为 20 ps, 激光中心波长为 1963 nm。如图 21 所示, 为掺铥光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率变化的关系图, 当注入抽运功率为 140 W 时, 激光最大输出平均功率为 80 W, 相应的激光斜率效率为 58%。据我们所知, 该掺铥光纤激光放大器的平均输出功率为目前国内 2.0 μm 波段超短脉冲激光所报道的最高结果。

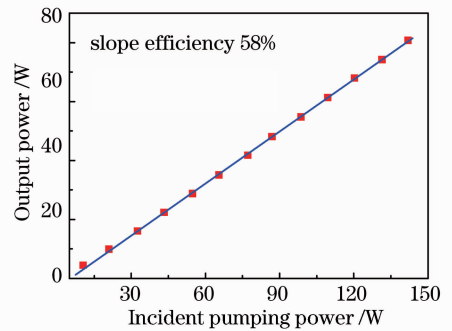


图 21 掺铥光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 21 Average output power of the fiber power amplifier versus incident pumping power

2012 年, 美国中佛罗里达大学 Sims 等^[48]采用啁啾脉冲放大 (CPA) 技术实现了脉冲能量为 1 μJ 的飞秒脉冲掺铥光纤激光器。激光种子源的重复频率为 60 MHz, 脉冲宽度为 150 fs, 掺铥光纤功率放大器采用了 25/400 μm 的保偏掺铥光纤, 在进行功率放大前, 激光种子源的脉宽被啁啾布拉格光栅 (CFBG) 展宽到了 160 ps, 激光重复频率也被电光开关 (EOM) 降到了 100 kHz。最后经过放大的激光脉冲被动光栅对压缩到了 300 fs, 相应的激光峰值功率高达 3 MW。

2013 年, 美国 PolarOnyx 公司在 Photonics

West 光学会议上报道了脉冲能量高达 $156 \mu\text{J}$ 、脉冲宽度 780 fs 的掺铥光纤放大系统^[49~51],图 22 所示为该激光系统的实验装置原理图。其中种子源为 SESAM 被动锁模的皮秒脉冲掺铥光纤激光器,重复频率为 2.5 MHz ,脉冲宽度为 2.2 ps 。声光开关(AOM)将重复频率进一步降到了 100 kHz ,最后经

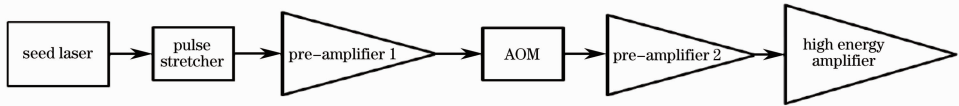


图 22 高脉冲能量全光纤结构飞秒脉冲掺铥光纤放大系统实验装置图

Fig. 22 Schematic setup of the high energy femtosecond thulium-doped fiber MOPA system

4 结束语

$2.0 \mu\text{m}$ 波段掺铥超短脉冲光纤激光器从产生到现在已有十几年时间,然而只在最近几年 $2.0 \mu\text{m}$ 波段掺铥超短脉冲光纤激光器才取得了较大的研究进展,如光纤振荡器输出最窄脉冲宽度达到了 119 fs ^[21],被动锁模光纤振荡器输出最高单脉冲能量达到了 8.75 nJ ^[46],掺铥光纤激光放大器输出最高平均功率达到了 80 W ,以及放大器输出最高单脉冲能量达到了 $156 \mu\text{J}$ ^[51]。此外, $2.0 \mu\text{m}$ 波段掺铥超短脉冲光纤激光器也从原来的空间结构开始向全光纤化结构转变,以及从实验室演示逐步向工业化应用转变等,这些都归因于新型增益光纤(铥钬共掺石英光纤、掺铥锗硅光纤以及掺铥玻璃光纤等)、新型色散补偿元件(啁啾布拉格光栅、小芯径色散补偿光纤以及空心光子晶体光纤等)、以及新型被动锁模材料(碳纳米管、石墨烯以及氧化石墨烯等)的出现。同时,除了基于掺铥或铥钬共掺光纤的超短脉冲光纤激光器以外,还出现了单掺钬的超短脉冲光纤激光器^[62],其平均输出功率达到了 46 mW ,脉冲宽度为 890 fs ,工作中心波长为 2085 nm 。此外,采用掺铥或钬共掺的氟化物玻璃(ZBLAN)光纤作为增益介质也实现了超短激光脉冲输出^[63,64],其输出的脉冲激光的中心波长达到了 $2.8 \mu\text{m}$ 左右,脉冲宽度约为 20 ps ,这些新发展为超短脉冲光纤激光器的研究开辟了新的思路、新的领域。然而, $2.0 \mu\text{m}$ 波段超短脉冲光纤激光器的发展仍有许多不足:1)光纤强烈的非线性效应限制了激光单脉冲能量的进一步提高。针对这一问题可以采用大芯径掺杂光纤作为增益介质,如掺铥光子晶体光纤等;2) $2.0 \mu\text{m}$ 波段锁模元件制作复杂、成本昂贵,需要研制出性能稳定、成本低廉的工业化应用的光学元器件,如新型石墨烯或氧化石墨烯可饱和吸收体;3)激光器系统全光纤化程

过 2 级掺铥光纤放大器以及光栅对压缩后,激光平均输出功率达到了 15.6 W ,脉冲宽度为 780 fs ,激光峰值功率高达 200 MW 。该结果为目前 $2.0 \mu\text{m}$ 波段掺铥超短脉冲光纤放大器所产生的最高单脉冲能量和最高峰值功率。

度不够,环境稳定性相对较差。针对这些问题可采用全保偏结构的光学元器件,才能实现 $2.0 \mu\text{m}$ 波段高环境稳定性的线偏振超短激光脉冲输出。

因此,在以后的工作中本课题组将进一步优化激光器的设计、选取合理的掺杂增益光纤、色散补偿元件以及更高功率的多模半导体激光抽运源,争取实现 $2.0 \mu\text{m}$ 波段全光纤结构飞秒、皮秒脉冲光纤激光器平均输出功率达几百瓦量级;纳秒脉冲掺铥光纤激光器单脉冲能量达毫焦量级;以及采用高功率的脉冲激光作为抽运源抽运中红外高非线性光纤,以实现高功率中红外波段超连续谱激光输出。

参 考 文 献

- 1 M. Eckerle, C. Kieleck, J. Świdorski *et al.*. Actively Q-switched and mode-locked Tm^{3+} -doped silicate $2 \mu\text{m}$ fiber laser for supercontinuum generation in fluoride fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 512~514
- 2 D. Buccoliero, H. Steffensen, O. Bang *et al.*. Thulium pumped high power supercontinuum in loss-determined optimum lengths of tellurite photonic crystal fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(6): 061106
- 3 C. R. Phillips, Carsten Langrock, J. S. Pelc *et al.*. Supercontinuum generation in quasi-phase-matched LiNbO_3 waveguide pumped by a Tm-doped fiber laser system[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(19): 3912~3914
- 4 O. P. Kulkarni, V. V. Alexander, M. Kumar *et al.*. Supercontinuum generation from ~ 1.9 to $4.5 \mu\text{m}$ in ZBLAN fiber with high average power generation beyond $3.8 \mu\text{m}$ using a thulium-doped fiber amplifier[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(10): 2486~2498
- 5 Y. Tang, C. Huang, S. Wang *et al.*. High-power narrow-bandwidth thulium fiber laser with an all-fiber cavity[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(16): 17539~17544
- 6 Z. Yunjun, Y. Baoquan, J. Youlun *et al.*. LD-cladding-pumped 50 pm linewidth Tm^{3+} -doped silica fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7715~7719
- 7 F. Wang, D. Shen, D. Fan *et al.*. Spectrum narrowing of high power Tm³⁺ fiber laser using a volume Bragg grating[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 8937~8941
- 8 S. D. Jackson, Terence A. King. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008,

- 23(18): 1462~1464
- 9 P. F. Moulton, G. A. Rines, E. Slobodtchikov *et al.*. Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 85~92
- 10 Thomas Ehrenreich, Ryan Leveille, Imtiaz Majid *et al.*. 1-kW, all-glass Tm fiber laser[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 16
- 11 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, **40**(1): 0102001
刘 江,王 璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, **40**(1): 0102001
- 12 G. D. Goodno, L. D. Book, J. E. Rothenberg. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1204~1206
- 13 P. Hübner, C. Kieleck, Stuart D. Jackson *et al.*. High-power actively mode-locked sub-nanosecond Tm^{3+} -doped silica fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(13): 2483~2485
- 14 L. E. Nelson, E. P. Ippen, H. A. Haus. Broadly tunable sub-500 fs pulses from an additive-pulse mode-locked thulium-doped fiber ring laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(1): 19~21
- 15 W. Renard, G. Canat, P. Bourdon. 26 nJ picosecond solitons from thulium-doped single-mode master oscillator power fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(3): 377~379
- 16 M. Engelbrecht, F. Haxsen, A. Ruehl *et al.*. Ultrafast thulium-doped fiber-oscillator with pulse energy of 4.3 nJ[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(7): 690~692
- 17 F. Haxsen, A. Ruehl, M. Engelbrecht *et al.*. Stretched-pulse operation of a thulium-doped fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20471~20476
- 18 F. Haxsen, D. Wandt, U. Morgner *et al.*. Pulse characteristics of a passively mode-locked thulium fiber laser with positive and negative cavity dispersion[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 18981~18988
- 19 F. Haxsen, D. Wandt, U. Morgner *et al.*. Pulse energy of 151 nJ from ultrafast thulium-doped chirped-pulse fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2991~2993
- 20 F. Haxsen, D. Wandt, U. Morgner *et al.*. Monotonically chirped pulse evolution in an ultrashort pulse thulium-doped fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(6): 1014~1016
- 21 A. Wienke, F. Haxsen, D. Wandt *et al.*. Ultrafast, stretched-pulse thulium-doped fiber laser with a fiber-based dispersion management[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(13): 2466~2468
- 22 Q. Wang, T. Chen, B. Zhang *et al.*. All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring oscillator operated at solitary and noiselike modes[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(19): 3750~3752
- 23 Q. Wang, J. Geng, T. Luo *et al.*. Mode-locked 2 μm laser with highly thulium-doped silicate fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(23): 3616~3618
- 24 Q. Wang, J. Geng, Z. Jiang *et al.*. Mode-locked Tm-Ho-codoped fiber laser at 2.06 μm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(11): 682~684
- 25 S. Kivistö, T. Hakulinen, M. Guina *et al.*. Tunable Raman soliton source using mode-locked Tm-Ho fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(12): 934~936
- 26 S. Kivistö, O. G. Okhotnikov. 600-fs mode-locked Tm-Ho-doped fiber laser synchronized to optical clock with optically driven semiconductor saturable absorber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(8): 477~479
- 27 R. Gumenyuk, I. Vartiainen, H. Tuovinen *et al.*. Dissipative dispersion-managed soliton 2 μm thulium/holmium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 609~611
- 28 R. Gumenyuk, M. S. Gaponenko, K. V. Yumashev *et al.*. Vector soliton bunching in thulium-holmium fiber laser mode locked with PbS quantum-dot-doped glass absorber[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, **48**(7): 903~907
- 29 刘 江,曹 懿,王 璞. 全光纤结构被动锁模 2 μm 掺铥光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0905007-7
- 30 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0 μm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0902001
刘 江,王 璞. 高功率被动锁模 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0902001
- 31 J. Liu, P. Wang. High-energy near transform-limited pulses from an ultrafast thulium-doped all-fiber MOPA [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(16): 1384~1386
- 32 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian *et al.*. High-pulse-energy passively mode-locked 2.0 μm thulium-doped ultrafast all-fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602009
刘 江,徐 佳,王 潜等. 高能量全光纤结构被动锁模 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602009
- 33 Liu Jiang, Wang Pu. 2 μm thulium-doped ultrafast all-fiber laser with watts-level average output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0802004
刘 江,王 璞. 瓦级输出全光纤结构 2.0 μm 掺铥皮秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0802004
- 34 刘 江,王 潜,王 璞. 20 W 全光纤结构掺铥皮秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0610001-5
- 35 M. A. Solodyankin, E. D. Obraztsova, A. S. Lobach *et al.*. Mode-locked 1.93 μm thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1336~1338
- 36 K. Kieu, F. W. Wise. Soliton thulium-doped fiber laser with carbon nanotube saturable absorber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(3): 128~130
- 37 S. Kivistö, T. Hakulinen, A. Kaskela *et al.*. Carbon nanotube films for ultrafast broadband technology [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2358~2363
- 38 Q. Fang, K. Kieu, N. Peyghambarian. An all-fiber 2 μm wavelength-tunable mode-locked laser [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(15): 1656~1658
- 39 M. Zhang, E. J. R. Kelleher, F. Torrisi *et al.*. Tm-doped fiber laser mode-locked by graphene-polymer composite [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(22): 25077~25084
- 40 D. I. M. Zen, N. Saidin, S. S. A. Damanhuri *et al.*. Mode-locked thulium-bismuth codoped fiber laser using graphene saturable absorber in ring cavity[J]. *Appl. Opt.*, 2013, **52**(6): 1226~1229
- 41 刘 江,吴思达,徐 佳等. 基于氧化石墨烯锁模的 2 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0310001-7
- 42 J. Liu, S. Wu, J. Xu *et al.*. Mode-locked 2 μm thulium-doped fiber laser with graphene oxide saturable absorber[C]. CLEO: QELS-Fundamental Science, 2012. JW2A. 76.
- 43 M. Jung, J. Koo, P. Debnath *et al.*. A mode-locked 1.91 μm fiber laser based on interaction between graphene oxide and evanescent field[J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, **5**: 112702~112704
- 44 M. A. Chernysheva, A. A. Krylov, P. G. Kryukov *et al.*. Nonlinear amplifying loop-mirror-based mode-locked thulium-doped fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(14): 1254~1256
- 45 M. A. Chernysheva, A. A. Krylov, P. G. Kryukov *et al.*. Thulium-doped mode-locked all-fiber laser based on NALM and carbon nanotube saturable absorber[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(26): B124~B130
- 46 C. Rudy, M. Dignonnet, R. Byer *et al.*. Thulium-doped germanosilicate mode-locked fiber lasers [C]. Fiber Laser Applications, 2012. FTh4A.4
- 47 J. Liu, Q. Wang, P. Wang. High average power picosecond pulse generation from a thulium-doped all-fiber MOPA system [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(20): 22442~22447
- 48 R. A. Sims, P. Kadwani, A. S. L. Shah *et al.*. 1 μJ , sub-500

- fs chirped pulse amplification in a Tm-doped fiber system[J]. *Opt. Lett.*, 2013, **38**(2): 121~123
- 49 L. M. Yang, P. Wan, V. Protopopov *et al.*. 2 μm femtosecond fiber laser at low repetition rate and high pulse energy[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(5): 5683~5688
- 50 P. Wan, L. M. Yang, J. Liu. High pulse energy 2 μm femtosecond fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2013, **21**(2): 1798~1803
- 51 P. Wan, L. M. Yang, J. Liu. 156 micro-J ultrafast thulium-doped fiber laser[C]. *SPIE*, 2013, **8601**: 860138
- 52 J. Jiang, C. Mohr, J. Bethge *et al.*. 500 MHz, 58 fs highly coherent Tm fiber soliton laser[C]. *CLEO: Applications and Technology*, 2012. CTh5D.7
- 53 刘江,王璞. 850 MHz高重复频率、窄线宽被动锁模皮秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0908009-6
- 54 J. Liu, J. Xu, P. Wang. High repetition-rate narrow bandwidth SESAM mode-locked Yb-doped fiber lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(7): 539~541
- 55 Q. L. Bao, H. Zhang, Y. Wang *et al.*. Atomic layer graphene as saturable absorber for ultrafast pulsed laser[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, **19**(19): 3077~3083
- 56 H. Zhang, D. Y. Tang, Z. M. Zhao *et al.*. Large energy mode locking of an erbium-doped fiber laser with atomic layer graphene[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17630~17635
- 57 Z. Sun, T. Hasan, F. Bonaccorso *et al.*. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(2): 803~810
- 58 F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(9): 611~622
- 59 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802001
刘江,吴思达,王科等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调Q掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802001
- 60 刘江,王璞. 2.0 μm 石墨烯被动调Q掺镱全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1008004-6
- 61 J. Liu, J. Xu, P. Wang. Graphene-based passively Q-switched 2 μm thulium-doped fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(24): 5319~5322
- 62 A. Chamorovskiy, A. V. Marakulin, S. Ranta *et al.*. Femtosecond mode-locked holmium fiber laser pumped by semiconductor disk laser[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(9): 1448~1450
- 63 J. F. Li, D. D. Hudson, Y. Liu *et al.*. Efficient 2.87 μm fiber laser passively switched using a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(18): 3747~3749
- 64 C. Wei, X. Zhu, R. A. Norwood *et al.*. Passively continuous-wave mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(18): 3849~3851

栏目编辑: 宋梅梅