

# 高功率超短脉冲掺铥光纤激光器的研究进展

刘 江, 谭方舟, 刘 晨, 王 璞\*

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 掺铥光纤激光器可广泛应用于激光医疗、人眼安全雷达、非金属材料加工、光电对抗等众多领域, 具有其他波段光纤激光器不可替代的重要作用。主要介绍了本课题组在高功率超短脉冲掺铥光纤激光器方面的研究进展, 包括利用光纤布拉格光栅控制锁模掺铥光纤振荡器的脉冲宽度和光谱形状, 实现了  $2\ \mu\text{m}$  波段高重复频率、高稳定性的皮秒脉冲激光输出。同时, 采用该皮秒脉冲激光作为种子源, 研制出了百瓦量级全光纤结构的皮秒掺铥光纤放大器, 最后一级功率放大器的最大平均输出功率为 120.4 W, 脉冲宽度为 16 ps。此外, 设计并搭建了全光纤全偏结构的皮秒掺铥光纤放大系统, 实现了平均功率为 240 W 的线偏振皮秒脉冲激光输出, 偏振消光比大于 15 dB, 脉冲宽度为 45 ps。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 光纤放大器; 中红外激光器

**中图分类号** TN248

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0201003

## Progress on High-Power Ultrashort-Pulsed Thulium-Doped Fiber Lasers

Liu Jiang, Tan Fangzhou, Liu Chen, Wang Pu

*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** Thulium-doped fiber lasers is widely applied in laser medical, eye-safe radar, nonmetal material processing, and electro-optical countermeasure system, which has an irreplaceable role compared to other wavelength fiber lasers. Here, the progress on high power ultra-short pulse thulium-doped fiber lasers of our group is mainly introduced, which includes the controlling of pulse width and spectrum shape of mode-locked thulium-doped fiber oscillator by using fiber Bragg grating. High repetition and high stability picosecond pulsed laser output at waveband of  $2\ \mu\text{m}$  is realized. Using the picosecond fiber oscillator as a seed source, we demonstrate a picosecond thulium-doped fiber amplifier with hectowatt all-fiber structure. The maximum average output power of final step power amplifier is 120.4 W, corresponding to the pulse duration of 16 ps. In addition, we also design and build an all-fiber, all-polarization-maintaining structure, and picosecond thulium-doped fiber amplifier system. The linear polarization picosecond pulsed laser output with average power of 240 W is realized. The polarization extinction ratio is greater than 15 dB, and the pulse duration is 45 ps.

**Key words** lasers; fiber laser; fiber amplifier; mid-infrared laser

**OCIS codes** 140.3510; 140.3070; 320.6629

## 1 引 言

高功率光纤激光器具有电光转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构简单紧凑等优点, 已成为目前国际上最受关注、最有发展前景的激光器之一, 可依为最新一代高性能工业激光器、医疗激光器和军用激光器。

**收稿日期:** 2016-09-18; **收到修改稿日期:** 2016-11-18

**基金项目:** 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61527822)、国家自然科学基金重点项目(61235010)、国家自然科学基金青年项目(61505004)、中国博士后科学基金特别资助项目(2016T90019)、北京市教委科技计划一般项目(KM201610005028)

**作者简介:** 刘 江(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率光纤激光器、高功率光纤放大器等方面的研究。E-mail: liujiang@bjut.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

然而对于特殊材料加工、太赫兹辐射源等基础科学以及大科学工程等领域来说,不仅要求激光器具有高平均功率,更要求激光器具有高的峰值功率以及输出激光波长能向中红外波段延伸。目前,2  $\mu\text{m}$  波段高功率掺铥光纤激光器已成为国际前沿性研究热点之一。掺铥光纤具有较宽的增益带宽,可实现 1.7~2.1  $\mu\text{m}$  波段范围内的激光输出,如图 1 所示,图中 ESA 表示激发态吸收。掺铥光纤激光器可广泛应用于激光医疗、非金属材料加工、激光雷达、中红外光学频率梳等众多领域。与近红外波段掺铥光纤激光器相比,透明玻璃、聚合物等非金属材料对 2  $\mu\text{m}$  波段激光具有较强的吸收<sup>[1]</sup>,如图 2 所示,在非金属材料加工方面,2  $\mu\text{m}$  波段掺铥光纤激光器具有近红外波段激光器所无法替代的重要作用。

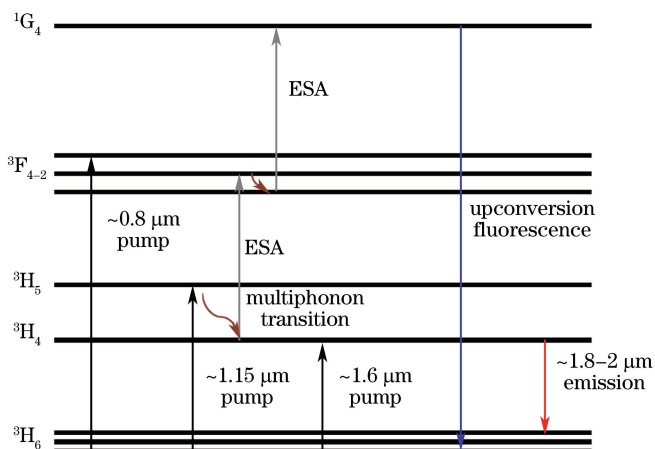


图 1  $\text{Tm}^{3+}$  跃迁时的能级图

Fig. 1 Energy level diagram of  $\text{Tm}^{3+}$  transitions

在生物医疗领域,水分子在 2  $\mu\text{m}$  波段附近具有较强的吸收峰,高功率掺铥光纤激光器可用作新一代激光手术刀,其能够使血液迅速凝结,具有手术创面小、止血性好等优点。例如,美国约翰霍普金斯医学院利用百瓦量级高重复频率的准连续掺铥光纤激光器治疗肾结石<sup>[2]</sup>,治疗效果明显优于 2.1  $\mu\text{m}$  波段传统 Ho:YAG 晶体激光器。此外,利用掺铥光纤激光器作为基频激光,经过周期性极化钽酸锂 (PPLN) 晶体四倍频之后,可得到波长为 465 nm 的蓝光激光<sup>[3]</sup>,该波段的激光可作为绿色荧光蛋白标记所用的光源,在生物医疗领域具有不可替代的作用<sup>[4]</sup>。

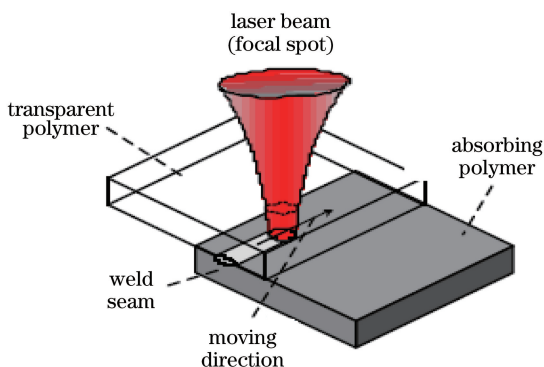


图 2 掺铥光纤激光器焊接聚合物材料示意图

Fig. 2 Schematic diagram for welding two polymers using thulium-doped fiber laser

在科学研究领域,高功率超短脉冲掺铥光纤激光器可作为抽运源,用于激发惰性气体,产生高次谐波,相对于近红外激光抽运源来说,可得到更短的阿秒脉冲激光输出<sup>[5]</sup>。此外,在 2~5  $\mu\text{m}$  波段高功率中红外激光的产生方面,高功率脉冲掺铥光纤激光器也为首选的抽运源。利用高峰值功率脉冲掺铥光纤激光器作为抽运源,获得的输出激光波长将覆盖 X 射线-紫外光-可见光-近红外-中红外-远红外-太赫兹波段,如图 3 所示,其频率转换主要包括光学参量振荡器 (OPO)、中红外差频产生 (DFG)、中红外超连续谱产生 (SCG)、中红外拉曼、四倍频 (FHG) 等过程。

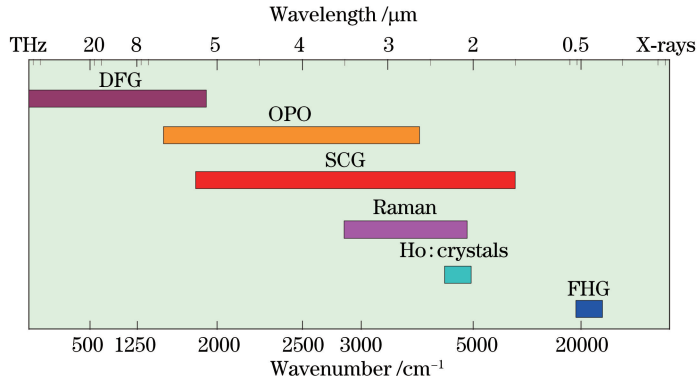


图 3 脉冲掺铥光纤激光器作为抽运源产生的中红外激光

Fig. 3 Mid-infrared laser pumped by pulse thulium-doped fiber laser

本文首先从非线性薛定谔方程出发,分析了超短脉冲形成的动力学过程。由于掺铥光纤激光器工作在全负色散状态,输出光谱具有明显的 Kelly 边带,Kelly 边带不仅影响锁模激光的稳定性,还影响激光脉冲的后续高功率放大。其次,主要介绍了本课题组在高功率超短脉冲掺铥光纤激光器方面的最新研究进展,包括研制出了百瓦量级全光纤结构的皮秒脉冲掺铥光纤放大器,该放大器的最大平均输出功率为 120.4 W,脉冲宽度为 16 ps。同时,利用全保偏(PM)光纤以及基于保偏光纤的光学元器件,设计并搭建了全光纤线偏振皮秒掺铥光纤激光放大系统,最后一级光纤功率放大器的最大平均输出功率达到了 240 W,偏振消光比大于 15 dB,脉冲宽度为 45 ps。此外,利用啁啾脉冲放大(CPA)技术,实现了平均功率为 35.4 W、脉冲宽度为 241 fs 的掺铥光纤放大器,相应的脉冲峰值功率达到了 3 MW。

## 2 超短脉冲动力学过程

通常,光纤激光器的脉冲动力学过程可用非线性薛定谔方程来描述<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{-i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{-\beta_3}{\sigma} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma |A|^2 A - i\gamma T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial z} - \frac{\gamma}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A), \quad (1)$$

式中  $A$  是脉冲包络, $z$  是沿光纤的传输距离, $T$  是脉冲本征时间, $\beta_2$  是二阶色散, $\beta_3$  是三阶色散, $\gamma$  是非线性参数, $\omega_0$  是载流子频率, $T_R$  是与拉曼效应相关的参数。(1)式中包含了多种效应,例如展宽脉冲的色散、展宽光谱的自相位调制、群速度的光强相关性导致的自陡峭效应和拉曼效应,每个效应都强烈地依赖于激光腔和腔内的元件。然而,二阶色散[群速度色散(GVD)]具有很强的主导作用,一般决定了锁模光纤激光器可获得的脉冲宽度。在皮秒和亚皮秒量级激光器中,三阶色散通常影响很小,一般可忽略。然而,当群速度色散接近零时,在亚皮秒激光器中,太大的不可补偿的三阶色散将可能限制激光器能获得的最短激光脉冲宽度。在标准的单模光纤中,拉曼散射效应很小,也可以忽略。对于工作在反常色散机制的强的短脉冲,也可出现拉曼效应,产生新的波长成分(拉曼频移)和额外的光谱展宽。非线性引起了光谱展宽,在极高非线性光纤中可能导致超连续谱的产生。通过分步傅里叶转换方法解(1)式,联合描述半导体可饱和吸收镜(SESAM)的速率方程,能够模拟被动锁模光纤激光器的脉冲演化。

如上所述,可饱和吸收体能够启动锁模和提供脉冲整形,然而,光纤激光器腔内净色散对脉冲整形也具有很强的作用。根据光纤激光器腔内的色散值,激光器可工作在孤子脉冲机制、展宽脉冲机制和全正色散机制三种状况下。

在孤子脉冲机制下,反常群速度色散补偿自相位调制效应能够保证脉冲无明显变化地长距离传输。在锁模光纤激光器中,孤子脉冲机制允许高质量无啁啾(或近似啁啾)的转换极限脉冲。孤子激光的脉宽通常与可饱和吸收体的恢复时间无关。然而,可饱和吸收体太长的恢复时间将影响锁模激光脉冲的质量和锁模的稳定性。工作在孤子脉冲机制的光纤激光器一般输出亚皮秒激光脉冲,其脉冲宽度依赖于腔内的净色散。锁模光纤激光器的典型特征是光谱上有明显的 Kelly 边带<sup>[7]</sup>。这些所谓的 Kelly 边带可以用来方便地估算激光腔的色散<sup>[8]</sup>。Kelly 边带的出现是孤子波与色散波相互作用的结果,共同传输的色散波来源于腔内与

周期性损耗相关的扰动的孤子波。在特定频率处,孤子波与色散波是同相位的,在光谱上产生了尖峰。受限于孤子面积理论,孤子激光器的脉冲能量一般相对较低,在几十皮焦量级。由于非线性效应,更高的抽运功率将导致波分裂,根据能量量子化,波分裂即孤子分裂。通常,被动锁模掺铒光纤激光器工作在全负色散状态下,输出脉冲具有典型的孤子锁模特征,即激光单脉冲能量小、光谱具有明显的 Kelly 边带等。

工作在净反常色散腔的另一种机制是色散管理孤子脉冲机制。在这种机制下的光纤激光器包含了反常色散和正常色散器件,其产生的孤子可被描述为平均孤子。能够产生最短脉冲的光纤激光器被称为展宽脉冲激光器。工作在展宽脉冲机制的光纤激光器包含反常和正常色散器件,产生啁啾信号。腔的总色散接近于零,可以是反常或正常的。但是,反常展宽脉冲机制和色散管理孤子机制的边界是不确定的。在展宽脉冲机制下,腔内脉冲传输经历强烈的时域和光谱变化,即脉冲是“呼吸的”。展宽脉冲光纤激光器一般比孤子脉冲光纤激光器输出更高的脉冲能量和更短的脉冲宽度<sup>[9-13]</sup>。由于强烈的脉冲展宽(啁啾)降低了腔内的峰值功率,因此允许激光器获得更高的脉冲能量。

能够允许更高能量脉冲产生的另一种机制是全正色散机制,有时也称为无色散补偿机制,工作在这种机制的激光器只包含正常色散元件。在全正色散掺铒光纤激光器中已产生了大于 20 nJ 的脉冲能量<sup>[14]</sup>。这类激光器一般需要光谱滤波效应来实现脉冲整形,光谱滤波效应可通过波分复用器(WDM)、干涉滤波器或高度共振的可饱和吸收体来实现。工作在全正色散机制的光纤激光器也有自启动锁模困难的问题。在更广义的范畴内,全正色散激光器可被认为工作在自相似机制下,这种机制下的脉冲演化不同于孤子脉冲和展宽脉冲的演化。对比孤子和展宽脉冲机制下的孤子和色散管理孤子,自相似脉冲是非线性薛定谔方程的渐进解。由于腔的净正常色散和抛物线形增益特性,脉冲具有抛物线形状。自相似脉冲的腔内光谱线宽变化明显,光谱线宽在放大的增益光纤部分明显增大,在腔内必要的光谱滤波效应下明显减小,这样就能够获得高脉冲能量激光输出。

### 3 高功率超短脉冲掺铒光纤激光器研究进展

要实现掺铒光纤激光器超短脉冲输出,采用的技术手段主要包括主动锁模、非线性偏振演化锁模、可饱和吸收体锁模、非线性放大环境锁模等<sup>[15-48]</sup>。而用于锁模的可饱和吸收材料主要包括半导体、碳纳米管、石墨烯、氧化石墨烯以及拓扑绝缘体等。最近几年,高功率超短脉冲掺铒光纤激光器得到了迅速发展。2010年,德国汉诺威激光中心<sup>[49]</sup>利用啁啾脉冲放大技术得到了平均输出功率为 5.7 W 的飞秒掺铒光纤放大器,种子激光经过大模场面积(LMA)掺铒光纤放大器放大之后,相应的单脉冲能量达到了 151 nJ,脉冲在放大之后也被压缩到了 258 fs。2012年,本课题组<sup>[50]</sup>报道了高功率全光纤结构皮秒掺铒光纤主振荡功率放大器,其最大平均输出功率为 20.7 W,斜率效率为 42%,脉冲宽度为 18 ps,中心波长为 1963 nm。同年,美国中佛罗里达大学<sup>[51]</sup>采用啁啾脉冲放大技术实现了高脉冲能量飞秒掺铒光纤放大器,种子激光的重复频率为 60 MHz,脉冲宽度为 150 fs,光纤功率放大器采用了 25/400  $\mu\text{m}$  的大模场面积掺铒光纤作为增益介质,在进行功率放大之前,利用啁啾光纤布拉格光栅(FBG)将种子激光脉宽展宽到了 160 ps,重复频率也降到了 100 kHz,经过放大器放大后的激光脉冲最后利用光栅对压缩到了 300 fs,相应的峰值功率高达 3 MW。

2013年,本课题组<sup>[52]</sup>率先在国际上研制出了百瓦量级全光纤结构皮秒掺铒光纤激光器,实验装置示意图如图 4 所示,该激光系统由皮秒掺铒光纤振荡器和三级全光纤结构掺铒光纤放大器组成。其中,皮秒掺铒光纤振荡器采用了 SESAM 作为可饱和吸收体,为了减小脉冲在后级掺铒光纤放大器中的非线性效应,实验采用了纤芯抽运高掺杂双包层掺铒光纤来提高被动锁模掺铒光纤振荡器的重复频率,并利用窄带宽 FBG 作为光谱滤波器来控制锁模激光脉冲的宽度以及稳定激光锁模状态。

从图 4 中可以看出,中心波长为 1550 nm 的连续掺铒光纤激光器作为掺铒光纤振荡器和第一级掺铒光纤预放大器共用的抽运源,未被第一级掺铒光纤预放大器吸收的 1550 nm 抽运光将用来抽运掺铒光纤振荡器。在掺铒光纤振荡器中,SESAM 工作的中心波长为 2000 nm,调制深度为 8%,非饱和吸收损耗为 5%,恢复时间为 500 fs;双包层掺铒光纤(型号:Nufern SM-TDF-10P/130-HE)的长度为 0.23 m,纤芯直径为 10  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.15;内包层直径为 130  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.46。在第一级掺铒光纤预放大器中,单包层掺铒光纤作为激光增益介质,其长度为 0.75 m,纤芯直径为 9.0  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.16。第一级掺铒光纤预放

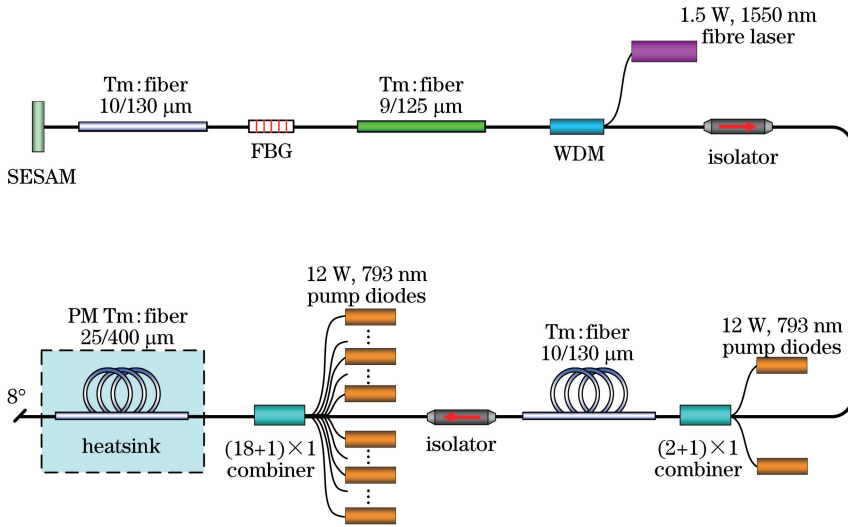


图 4 高功率全光纤结构皮秒掺铥光纤放大器实验装置示意图

Fig. 4 Schematic setup of the high-power all-fiber structure picosecond thulium-doped fiber amplifier

放大器输出激光的脉冲串和射频谱如图 5 所示,图中 RBM 代表扫描分辨率,从图中可以看出,锁模激光的中心频率为 333.75 MHz,与掺铥光纤振荡器的腔长相吻合,采用频谱仪测得激光信噪比大于 65 dB,表明激光锁模状态非常稳定。当 1550 nm 连续掺铥光纤激光器的输出功率为 900 mW 时,掺铥光纤振荡器和第一级掺铥光纤预放大器共产生了 110 mW 的平均输出功率,此时测得输出激光的中心波长为 1963 nm,3 dB 光谱带宽为 0.32 nm,脉冲宽度( $\tau_{\text{pulse}}$ )为 19.5 ps,如图 6 所示,图中 FWHM 代表半峰全宽。

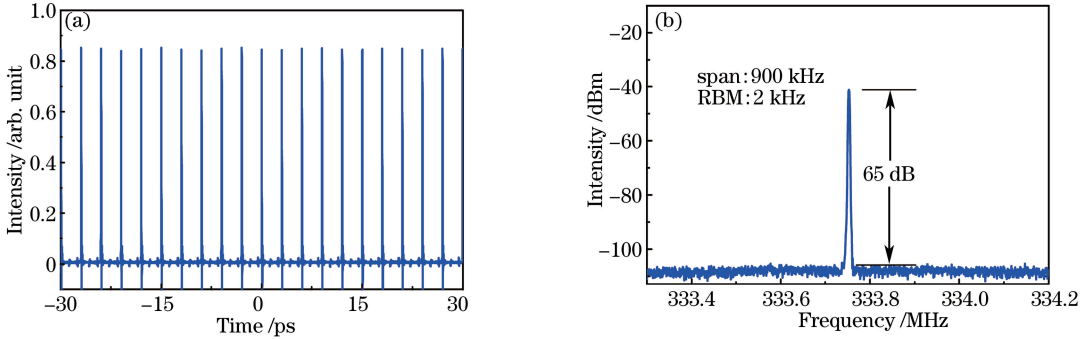


图 5 第一级掺铥光纤预放大器的(a)脉冲串和(b)射频谱

Fig. 5 (a) Pulse train and (b) radio frequency spectrum of the first-stage thulium-doped fiber pre-amplifier

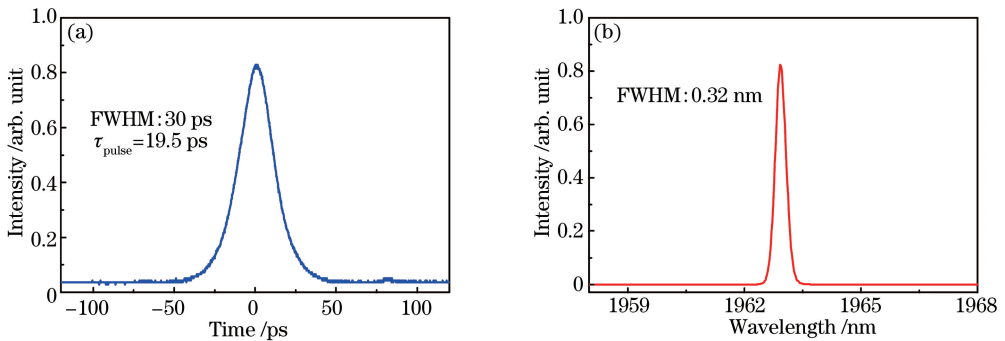


图 6 第一级掺铥光纤预放大器(a)输出脉冲的自相关信号和(b)输出的光谱

Fig. 6 (a) Autocorrelation signal of output pulse and (b) output spectrum of the first-stage thulium-doped fiber pre-amplifier

第二级掺铥光纤预放大器主要将第一级掺铥光纤预放大器进行进一步功率放大,以防止在功率放大时因信号光功率不足,掺铥光纤功率放大器中产生放大的自发辐射或激光振荡。第二级掺铥光纤预放大器主

要由半导体抽运源、 $(2+1)\times 1$  抽运合束器、4 m 长的双包层掺铥光纤组成。其中：半导体抽运源的中心波长为 793 nm,最大输出功率为 12 W;而掺铥光纤预放大器与掺铥光纤振荡器所用的光纤相同。在第二级掺铥光纤预放大器抽运功率为 17 W 时,该级预放大器产生了 5 W 的平均输出功率,而输出激光的脉冲宽度和光谱与第一级掺铥光纤预放大器相同。第三级为掺铥光纤功率放大器,主要由半导体抽运源、 $(18+1)\times 1$  抽运合束器以及大模场面积双包层保偏掺铥光纤组成。如图 4 所示,抽运源由 18 个中心波长为 793 nm、最大输出功率为 12 W 的半导体激光器构成,经 $(18+1)\times 1$  高功率抽运合束器后耦合进掺铥增益光纤(掺铥光纤的长度为 5 m,纤芯直径为 25  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.09;内包层直径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.45),该增益光纤在 793 nm 处包层抽运吸收率为 2.4 dB/m。考虑到掺铥光纤功率放大器的最大抽运功率可达 205 W,同时参考掺铥光纤功率放大器的最高转换效率<sup>[53]</sup>,粗略估计在此光纤放大器中将产生近百瓦的热量。单纯的空气冷却已不能满足散热要求,因此采用自制的水冷装置对大模场面积掺铥光纤进行循环冷却,实验中维持冷却水的温度在 12  $^{\circ}\text{C}$  左右。为方便冷却大模场面积双包层掺铥光纤,在增益光纤之后熔接了约 0.7 m 长的纤芯匹配的无源光纤,输出端切成 8 $^{\circ}$ 角,避免产生菲涅耳反射,防止在光纤功率放大器中产生激光振荡。

掺铥光纤功率放大器的平均输出功率随抽运功率的变化关系如图 7(a)所示,从图中可以看出,掺铥光纤功率放大器的平均输出功率随抽运功率的增加几乎呈线性增加。当抽运功率为 205 W 时,掺铥光纤功率放大器产生了 120.4 W 的平均输出功率,相应的斜率效率为 59%。由于光纤功率放大器中掺铥光纤的纤芯直径为 25  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.09, $V$  值大约为 3.6,理论上该纤芯直径的光纤支持的模式大约为 5 个横模,因此光束质量  $M^2$  应该小于 1.5。掺铥光纤功率放大器平均输出功率为 120 W 时测得的激光脉冲的自相关信号如图 7(b)所示,相应的激光脉冲宽度为 16 ps,比种子激光的脉冲宽度有所减小,相应的激光峰值功率为 22.5 kW。由于光纤功率放大器中的自相位调制作用,在高功率放大之后输出激光的中心波长为 1965 nm,3 dB 光谱带宽变为了 1.9 nm。在最高平均输出功率情况下,没有发现光纤输出端面发生损坏的现象,这也归因于掺铥光纤具有较大的纤芯直径以及光纤输出端具有较好的冷却性能。

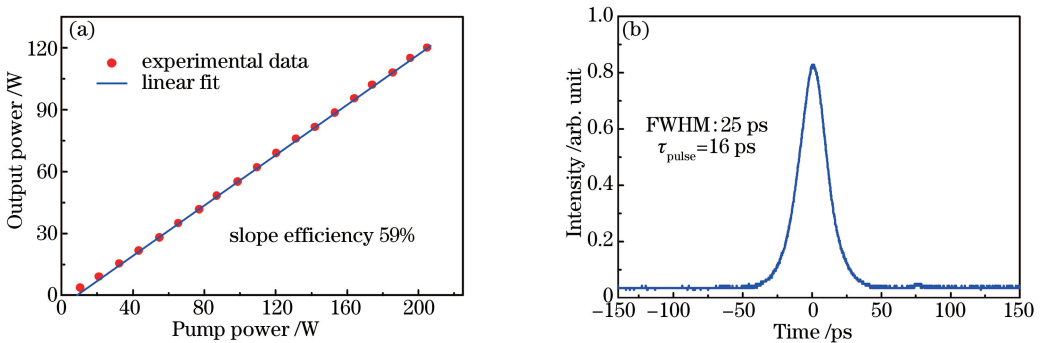


图 7 掺铥光纤功率放大器(a)平均输出功率随抽运功率的变化和(b)输出脉冲的自相关信号

Fig. 7 (a) Variation of average output power with pump power and (b) autocorrelation signal of output pulse of the thulium-doped fiber power amplifier

2013 年,美国 PolarOnyx 公司<sup>[54]</sup>也报道了平均输出功率为 36 W 的飞秒掺铥光纤放大器,种子激光为 SESAM 被动锁模的皮秒掺铥光纤激光器,其重复频率为 30.8 MHz,脉冲宽度为 2.9 ps。经过多级掺铥光纤放大器放大以及光栅对压缩之后,最终平均输出功率达到了 36 W,脉冲宽度为 790 fs。2014 年,德国耶拿大学<sup>[55]</sup>采用空间抽运耦合方式,并以大模场面积掺铥光子晶体光纤(PCF)作为增益介质,有效抑制了超短脉冲激光在放大过程中的非线性效应,实现了平均功率为 152 W 的飞秒脉冲激光输出,压缩后的脉冲宽度为 690 fs,其实验装置如图 8 所示。

2015 年,耶拿大学<sup>[56]</sup>利用啁啾脉冲放大和非线性脉冲压缩技术,采用空芯 Kagome 光子晶体光纤作为脉冲压缩器,实现了平均输出功率为 2 W、峰值功率高达 200 MW 的飞秒脉冲输出,压缩之后的激光脉冲宽度为 70 fs,其实验装置示意图如图 9 所示,图中 Tm:FCPA 代表啁啾脉冲掺铥光纤放大器。同年,耶拿大学<sup>[57]</sup>采用长度为 14 cm、纤芯直径为 108  $\mu\text{m}$  的实芯光纤作为脉冲压缩器,实现了脉冲宽度仅为 24 fs 的脉冲激光输出,其平均输出功率为 24.6 W,峰值功率为 24 MW。上述报道的高峰值功率超短脉冲掺铥光纤放

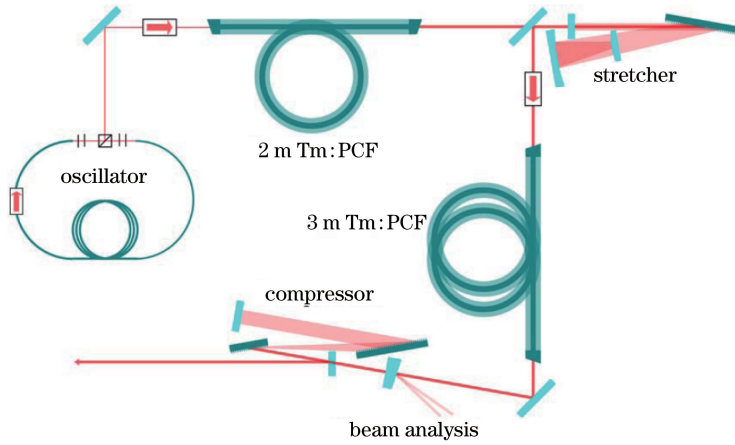


图 8 152 W 平均功率飞秒掺铥光纤放大器实验装置示意图

Fig. 8 Schematic setup of the femtosecond thulium-doped fiber amplifier with the average power of 152 W

大器都采用了空间抽运耦合方式,且均以大模场面积光子晶体光纤作为增益介质,激光系统更加容易受到温度、压力等外界环境波动的影响。

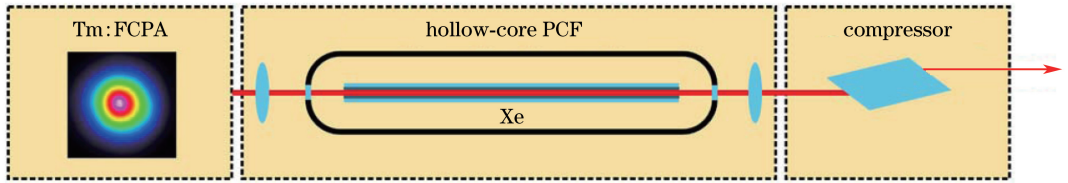


图 9 200 MW 峰值功率飞秒掺铥光纤放大器实验装置示意图

Fig. 9 Schematic setup of the femtosecond thulium-doped fiber amplifier with the peak power of 200 MW

2016 年,本课题组<sup>[58]</sup>搭建了百瓦量级全光纤结构线偏振皮秒掺铥光纤激光放大器,如图 10 所示,图中 UHNA 代表超高数值孔径,MFA 为模场适配器,该激光放大器由皮秒掺铥光纤振荡器和三级全保偏结构掺铥光纤放大器组成。在保偏掺铥光纤振荡器中,以 1550 nm 连续掺铥光纤激光器作为抽运源,其最大平均输出功率为 1 W;SESAM 的调制深度为 8%,恢复时间为 500 fs;实验中使用的双包层保偏掺铥光纤(型号: Nufern PM-TDF-10P/130-HE)的长度为 20 cm,纤芯直径为 10  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.15,其内包层直径为

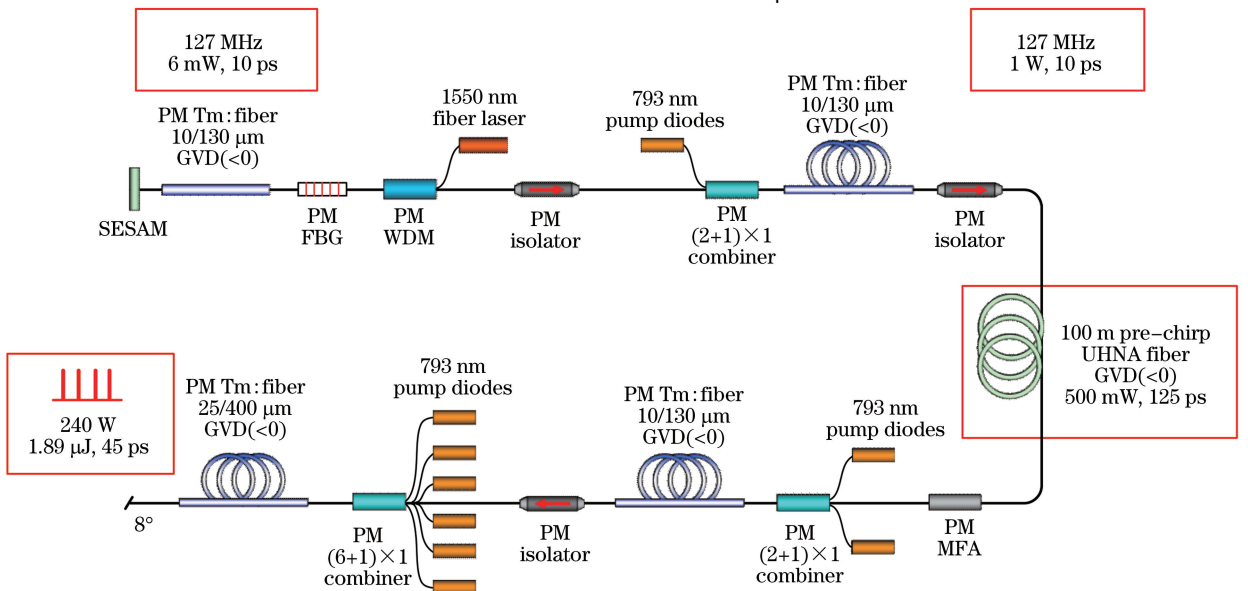


图 10 高功率线偏振皮秒掺铥光纤激光放大器实验装置示意图

Fig. 10 Schematic setup of the high-power linearly-polarized picosecond thulium-doped fiber laser amplifier

130  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.46。双包层保偏掺铥光纤的一端熔接保偏 FBG 作为脉冲激光输出端, FBG 工作的中心波长为 1984 nm, 反射率约为 70%, 3 dB 光谱带宽为 2 nm。快轴截止、慢轴通光的保偏光学隔离器位于掺铥光纤振荡器与第一级保偏掺铥光纤预放大器之间, 用于隔离任何反向传输的信号光。在 1550 nm 连续掺铥光纤激光器输出功率约为 250 mW 时, 适当地调节 SESAM 与掺铥增益光纤之间的耦合, 光纤振荡器开始产生稳定的锁模脉冲激光输出。掺铥光纤振荡器输出的脉冲串如图 11(a) 所示, 从图中可以看出, 锁模激光的中心频率为 127 MHz, 与光纤振荡器的腔长相吻合, 采用频谱仪测得激光脉冲信噪比大于 60 dB, 表明锁模状态非常稳定。当 1550 nm 连续掺铥光纤激光器的输出功率为 300 mW 时, 掺铥光纤振荡器产生了 6 mW 的平均输出功率, 此时测得输出激光的中心波长为 1984 nm, 3 dB 光谱带宽为 0.9 nm, 如图 11(b) 所示。采用中红外偏振片测得输出激光的偏振消光比大于 20 dB。

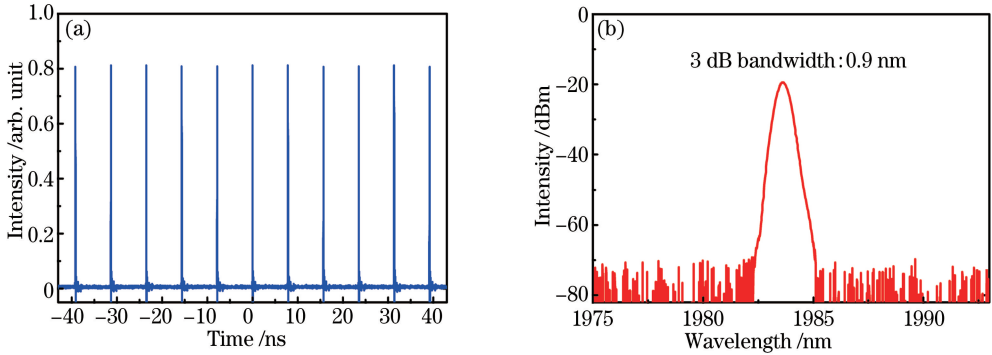


图 11 保偏掺铥光纤振荡器(a)输出的脉冲串和(b)输出的光谱

Fig. 11 (a) Output pulse train and (b) output spectrum of the PM thulium-doped fiber oscillator

第一级保偏掺铥光纤预放大器使用了与掺铥光纤振荡器相同型号的掺杂光纤, 其长度为 3 m, 该增益光纤在 793 nm 处包层抽运吸收率为 4.7 dB/m。采用中心波长为 793 nm 的多模半导体激光器作为激光抽运源, 其最大输出功率为 6 W。在第一级保偏掺铥光纤预放大器中, 当抽运功率为 5 W 时, 第一级保偏掺铥光纤预放大器的平均输出功率达到了 1 W, 此时采用自相关仪(型号: FR-103XL)测得激光脉冲宽度为 10 ps, 采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪(型号: YOKOGAWA AQ 6375)测得激光输出波长, 与光纤振荡器相比无明显变化。此时测得的输出激光脉冲的偏振消光比仍大于 20 dB, 表明激光脉冲在放大过程中没有出现退偏。

为了减小激光脉冲在光纤放大器中的非线性效应, 采用了纤芯直径为 2.2  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.35 的正群速度色散石英光纤用于激光脉宽展宽。第一级保偏掺铥光纤预放大器输出的近转换极限脉冲经过 100 m 正群速度色散光纤之后, 脉冲宽度由原来的 10 ps 展宽到了 125 ps, 如图 12(a) 所示。在自相位调制的作用下, 激光脉冲经过正群速度色散光纤之后, 光谱带宽也由原来的 0.9 nm 展宽到了 49 nm, 如图 12(b) 所示。

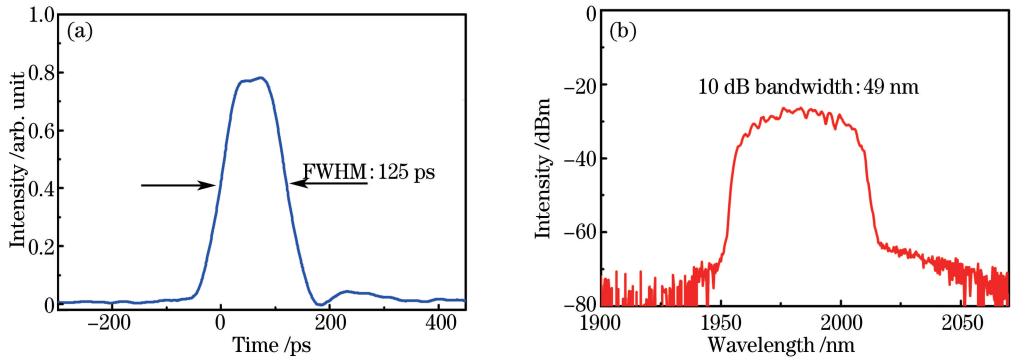


图 12 (a)100 m 正群色散的超高数值孔径光纤之后输出的脉冲宽度;(b)100 m 正群色散的超高数值孔径光纤之后输出的激光光谱

Fig. 12 (a) Pulse duration from a piece of 100 m UHNA fiber with positive GVD; (b) output spectrum from a piece of 100 m UHNA fiber with positive GVD



在第二级保偏掺铥光纤预放大器中,使用了与第一级保偏掺铥光纤预放大器相同型号、相同长度的掺铥光纤作为增益介质,在抽运功率为 14 W 时,第二级保偏掺铥光纤预放大器产生了 3 W 的平均输出功率。

在最后一级保偏掺铥光纤功率放大器中,采用了保偏大模场面积双包层掺铥光纤作为增益介质,保偏大模场面积掺铥光纤的长度为 4 m,纤芯直径为 25  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.09,内包层直径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.45,该增益光纤在 793 nm 处包层抽运吸收率为 2.4 dB/m。抽运源为光纤耦合输出的高功率多模半导体激光模块,半导体激光的中心波长为 793 nm,输出尾纤为 200/220  $\mu\text{m}$ ,最后从高功率保偏(6+1) $\times$ 1 抽运合束器输出的最高抽运功率为 530 W。为了提高掺铥光纤功率放大器的转换效率,将保偏大模场面积双包层掺铥光纤置于循环水冷却的热沉上,水温保持在 8  $^{\circ}\text{C}$  左右。保偏大模场面积双包层掺铥光纤之后熔接了一段匹配的保偏无源光纤,输出端面切成 8 $^{\circ}$ 角,避免产生菲涅耳反射。

掺铥光纤功率放大器的平均输出功率随抽运功率的增加几乎呈线性增加,如图 13(a)所示。当抽运功率增加到 530 W 时,掺铥光纤功率放大器产生了 240 W 的平均输出功率,相应的斜率效率为 46%。在掺铥光纤放大系统的平均输出功率最大时测得激光偏振消光比大于 15 dB。实验中也测量了掺铥主振荡功率放大器输出功率为 200 W 时的功率波动,在 10 min 内测得激光功率波动性为  $\pm 1\%$ 。由于经过 100 m 正群速度色散光纤之后,输出的激光脉冲具有正的啁啾,而后级掺铥光纤功率放大器具有负群速度色散,因此激光脉冲在光纤功率放大器中放大时将不断被压缩。当输出功率达到最大时,采用 25 GHz 实时示波器和 12.5 GHz 高速光电探头测得最窄激光脉冲宽度为 45 ps,相应的激光脉冲能量为 1.89  $\mu\text{J}$ ,峰值功率为 42 kW,如图 13(b)所示。由于自相位调制作用,放大后的激光光谱带宽随输出功率的增加而不断增加,在平均输出功率最大时,激光脉冲的 10 dB 光谱带宽大于 140 nm。另外,采用中红外波段扫描狭缝光束质量分析仪测量了高功率线偏振皮秒掺铥光纤放大器的光束质量,在掺铥光纤功率放大器的平均输出功率为 200 W 时,测得光束质量因子  $M^2$  小于 1.4,表明高功率线偏振皮秒掺铥光纤激光器具有较高的光亮度。

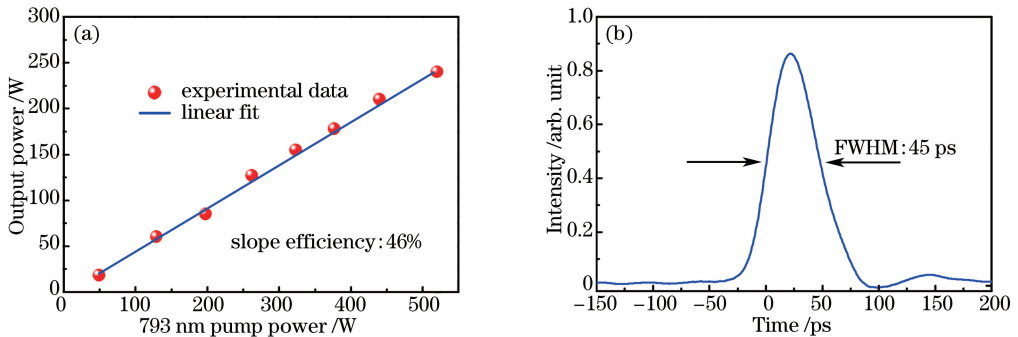


图 13 保偏掺铥光纤功率放大器(a)平均输出功率随抽运功率的变化和(b)输出的脉冲宽度

Fig. 13 (a) Variation of average output power with pump power and (b) output pulse duration of PM thulium-doped fiber power amplifier

2016 年,德国耶拿大学<sup>[59]</sup>采用空间抽运耦合方式和大模场面积掺铥光子晶体光纤作为增益介质实现了 2  $\mu\text{m}$  波段峰值功率为 1000 MW 量级的飞秒脉冲激光输出,其实验装置如图 14 所示,图中 AOM 为声光调制器,该放大器采用大模场面积掺铥光子晶体光纤作为增益介质,结合啁啾脉冲放大技术有效抑制放大器中的非线性效应,实现了重复频率为 61 kHz、平均功率为 28.7 W 的飞秒脉冲激光输出,压缩后的激光脉冲宽度为 200 fs,相应的峰值功率高达 2 GW,该结果也成为目前国际上 2  $\mu\text{m}$  波段超短脉冲激光器所产生的最大峰值功率。

最近,本课题组<sup>[60]</sup>利用啁啾脉冲放大技术搭建了高功率全光纤结构飞秒掺铥光纤激光器,如图 15 所示,图中 EDF 为掺铥光纤,HNLF 为高非线性光纤,PC 为偏振控制器,TDF 为掺铥光纤,DM 为二向色镜,SM 代表单模,MM 代表多模。该啁啾脉冲掺铥光纤放大系统由孤子自频移技术的 2  $\mu\text{m}$  波段激光种子源和两级掺铥光纤放大器组成。孤子自频移得到的激光种子源脉冲在经过激光脉宽展宽、高功率放大之后,利用透射式衍射光栅作为脉冲压缩器,实现了平均功率为 35.4 W、脉冲宽度为 241 fs 的掺铥光纤脉冲激光输出,相应的峰值功率为 3 MW。

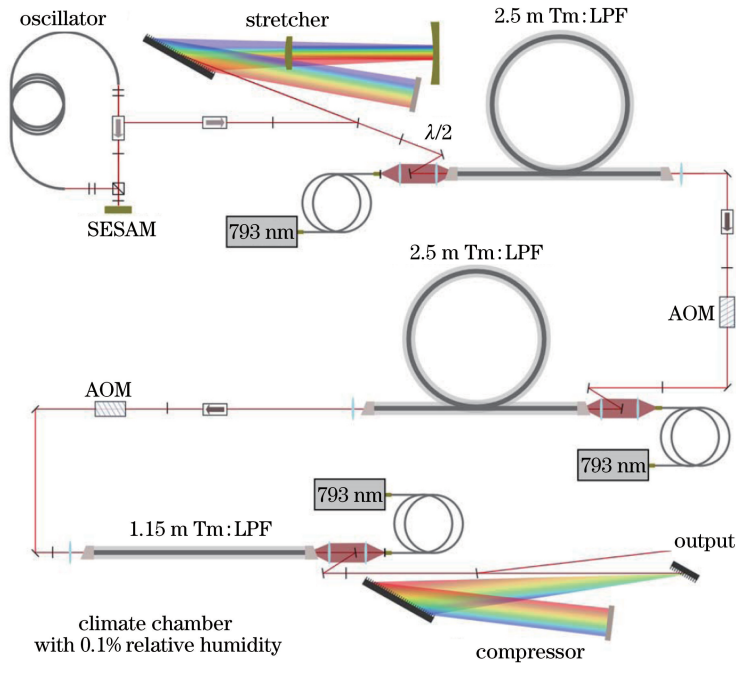


图 14 2 GW 峰值功率飞秒掺铥光纤放大器实验装置示意图

Fig. 14 Schematic setup of the femtosecond thulium-doped fiber amplifier with the peak power of 2 GW

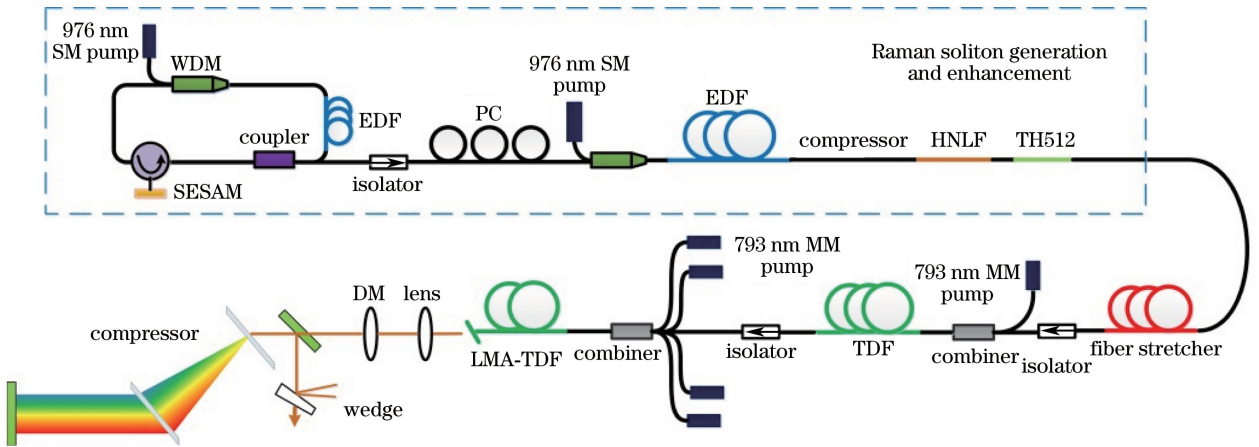


图 15 3 MW 峰值功率飞秒掺铥光纤放大器实验装置示意图

Fig. 15 Schematic setup of the femtosecond thulium-doped fiber amplifier with the peak power of 3 MW

## 4 总 结

高功率条件下,受激拉曼散射、自相位调制等非线性效应成为超短脉冲光纤放大器平均功率和峰值功率进一步提升的主要瓶颈。通常利用啁啾脉冲放大技术来减小光纤放大器中的非线性效应,先将激光种子源脉宽进行展宽,再输入到光纤功率放大器中进行功率放大,以降低激光脉冲的峰值功率,减小非线性效应,该过程积累线性啁啾。然后利用压缩器压缩功率放大之后的啁啾脉冲,从而获得高平均功率、高功率超短脉冲激光输出。

表 1 给出了过去 5 年时间,国内外关于高功率超短脉冲掺铥光纤激光器的主要报道结果。从表 1 中可以看出,利用啁啾脉冲放大技术,德国耶拿大学在高功率掺铥光纤啁啾脉冲放大方面处于领先地位,获得的超短脉冲掺铥光纤放大器的最大平均输出功率为 152 W<sup>[55]</sup>,脉冲宽度为 700 fs;同时也获得了脉冲宽度仅为 24 fs 的脉冲激光输出<sup>[57]</sup>;最近,该课题组也实现了峰值功率高达 2 GW 的超短脉冲激光输出<sup>[59]</sup>,这些结果主要归因于耶拿大学具有制备大模场面积光子晶体光纤和高功率啁啾脉冲压缩光栅的能力。目前,2 μm 波

段可利用的啁啾脉冲压缩光栅制备工艺复杂,脉宽可压缩比太小,国内在光子晶体光纤和光栅制备方面还十分落后,根本无法满足高功率超短脉冲激光的放大和压缩要求。本课题组通过利用 FBG 控制锁模掺铥光纤振荡器的脉冲宽度和光谱形状,结合主振荡功率放大和非线性压缩技术,实现了高功率掺铥光纤放大器中非线性效应的有效抑制,在国际上研制出了百瓦量级全光纤结构线偏振皮秒掺铥光纤激光器,其最大平均输出功率为 240 W,偏振消光比大于 15 dB,脉冲宽度为 45 ps。与啁啾脉冲放大技术相比,直接放大技术将种子激光直接放大,放大过程中自相位调制作用展宽了激光脉冲光谱,从而引入线性啁啾,在放大器放大之后,利用啁啾光栅压缩后将可以得到更窄的脉冲激光输出。

表 1 高功率超短脉冲掺铥光纤激光器结果汇总

Table 1 Summary of the results on high-power ultra-short pulse thulium-doped fiber laser

Time	Research organization	Method	Average power /W	Pulse width	Polarization
2012 <sup>[50]</sup>	Beijing University of Technology	Direct amplification	20.7	18 ps	Random
2013 <sup>[51]</sup>	University of Central Florida	CPA	0.76	300 fs	Random
2013 <sup>[52]</sup>	Beijing University of Technology	Direct amplification	120.4	16 ps	Random
2013 <sup>[54]</sup>	Polar Onyx	CPA	36	790 fs	Random
2014 <sup>[55]</sup>	Friedrich-Schiller-Universität Jena	CPA	152	700 fs	Linear
2015 <sup>[56]</sup>	Friedrich-Schiller-Universität Jena	CPA	2	70 fs	Linear
2016 <sup>[58]</sup>	Beijing University of Technology	Direct amplification	240	45 ps	Linear
2016 <sup>[59]</sup>	Friedrich-Schiller-Universität Jena	CPA	28.7	200 fs	Linear

### 参 考 文 献

- [1] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, *et al.* Welding of polymers using a 2  $\mu\text{m}$  thulium fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [2] Hardy L A, Wilson C R, Irby P B, *et al.* Rapid thulium fiber laser lithotripsy at pulse rates up to 500 Hz using a stone basket[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 0902604.
- [3] Honea E, Savage-Leuchs M, Bowers M S, *et al.* Pulsed blue laser source based on frequency quadrupling of a thulium fiber laser[J]. *SPIE*, 2013, 8601: 860111.
- [4] Gather M C, Yun S H. Single-cell biological lasers[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 406-410.
- [5] Popmintchev T, Chen M C, Arpin P, *et al.* The attosecond nonlinear optics of bright coherent X-ray generation[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 822-832.
- [6] Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Newyork: Academic Press, 2001.
- [7] Kelly S M. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(8): 806-807.
- [8] Dennis M L, Duling I N. Experimental study of sideband generation in femtosecond fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(6): 1469-1477.
- [9] Cautaerts V, Richardson D J, Paschotta R, *et al.* Stretched pulse Yb<sup>3+</sup>: silica fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(5): 316-318.
- [10] Tamura K, Ippen E P, Haus H A. Pulse dynamics in stretched-pulse fiber lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(2): 158-160.
- [11] Lim H, Ilday F Ö, Wise F W. Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 660-662.
- [12] Ortaç B, Hideur A, Chartier T, *et al.* 90-fs stretched-pulse ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(15): 1305-1307.
- [13] Ortaç B, Limpert J, Tünnermann A. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2149-2151.
- [14] Chong A, Renninger W H, Wise F W. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2408-2410.
- [15] Hübner P, Kieleck C, Jackson S D, *et al.* High-power actively mode-locked sub-nanosecond Tm<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2483-2485.
- [16] 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.
- [17] Engelbrecht M, Haxsen F, Ruehl A, *et al.* Ultrafast thulium-doped fiber-oscillator with pulse energy of 4.3 nJ[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(7): 690-692.
- [18] Haxsen F, Ruehl A, Engelbrecht M, *et al.* Stretched-pulse operation of a thulium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 16(25): 20471-20476.
- [19] Wienke A, Haxsen F, Wandt D, *et al.* Ultrafast, stretched-pulse thulium-doped fiber laser with a fiber-based dispersion management[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2466-2468.
- [20] Wang Q, Chen T, Zhang B, *et al.* All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring oscillator operated at solitary and noiselike modes[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3750-3752.
- [21] Kadel R, Washburn B R. All-fiber passively mode-locked thulium/holmium laser with two center wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(27): 6465-6470.
- [22] Wang Q, Geng J, Luo T, *et al.* Mode-locked 2  $\mu\text{m}$  laser with highly thulium-doped silicate fiber[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3616-3618.
- [23] Wang Q, Geng J, Jiang Z, *et al.* Mode-locked Tm-Ho-codoped fiber laser at 2.06  $\mu\text{m}$ [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 682-684.
- [24] Kivistoö 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.
- [25] Gumenyuk R, Vartiainen I, Tuovinen H, *et al.* Dissipative dispersion-managed soliton 2  $\mu\text{m}$  thulium/holmium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 609-611.
- [26] Liu J, Wang P. High-energy near transform-limited pulses from an ultrafast thulium-doped all-fiber MOPA[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(16): 1384-1386.
- [27] Zhou W, Shen D Y, Wang Y S, *et al.* Mode-locked thulium-doped fiber laser with a narrow bandwidth and high pulse energy[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(8): 587-590.
- [28] Solodyankin M A, Obraztsova E D, Lobach A S, *et al.* Mode-locked 1.93  $\mu\text{m}$  thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(12): 1336-1338.
- [29] Kieu K, Wise F W. Soliton thulium-doped fiber laser with carbon nanotube saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(3): 128-130.
- [30] Kivistö S, Hakulinen T, Kaskela A, *et al.* Carbon nanotube films for ultrafast broadband technology[J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2358-2363.
- [31] Wang Q, Chen T, Li M, *et al.* All-fiber ultrafast thulium-doped fiber ring laser with dissipative soliton and noise-like output in normal dispersion by single-wall carbon nanotubes[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(1): 011103.
- [32] Zhang M, Kelleher E J R, Torrisi F, *et al.* Tm-doped fiber laser mode-locked by graphene-polymer composite[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25077-25084.
- [33] Zen D I M, Saidin N, Damanhuri S S A, *et al.* Mode-locked thulium-bismuth codoped fiber laser using graphene saturable absorber in ring cavity[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1226-1229.
- [34] Sotor J, Sobon G, Pasternak I, *et al.* Simultaneous mode-locking at 1565 nm and 1944 nm in fiber laser based on common graphene saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18994-19002.
- [35] Sobon G, Sotor J, Pasternak I, *et al.* Thulium-doped all-fiber laser mode-locked by CVD-graphene/PMMA saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12797-12802.
- [36] Wang Q Q, Chen T, Zhang B, *et al.* All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring laser using optically deposited graphene saturable absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131117.
- [37] Liu J, Wu S, Xu J, *et al.* Mode-locked 2  $\mu\text{m}$  thulium-doped fiber laser with graphene oxide saturable absorber[C]. California: CLEO: Applications and Technology, Optical Society of America, 2012: JW2A.76.
- [38] Jung M, Koo J, Debnath P, *et al.* A mode-locked 1.91  $\mu\text{m}$  fiber laser based on interaction between graphene oxide and evanescent field[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(11): 112702.
- [39] Jung M, Koo J, Park J, *et al.* Mode-locked pulse generation from an all-fiberized, Tm-Ho-codoped fiber laser incorporating a graphene oxide-deposited side-polished fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20062-20072.
- [40] Chernysheva M A, Krylov A A, Kryukov P G, *et al.* Nonlinear amplifying loop-mirror-based mode-locked thulium-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(14): 1254-1256.
- [41] Rudy C, Digonnet M, Byer R, *et al.* Thulium-doped germanosilicate mode-locked fiber lasers in lasers, sources, and related photonic devices[C]. California: OSA Technical Digest (CD), Optical Society of America, 2012: FT4A.4.

- [42] Chernysheva M A, Krylov A A, Kryukov P G, *et al.* Thulium-doped mode-locked all-fiber laser based on NALM and carbon nanotube saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(26): B124-B130.
- [43] Chernysheva M A, Krylov A A, Mou C, *et al.* Higher-order soliton generation in hybrid mode-locked thulium-doped fiber ring laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 425-432.
- [44] Haxsen F, Wandt D, Morgner U, *et al.* Monotonically chirped pulse evolution in an ultrashort pulse thulium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1014-1016.
- [45] Jung M, Lee J, Koo J, *et al.* A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> topological insulator[J]. *Optics Express* 2014, 22(7): 7865-7874.
- [46] Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian, *et al.* High-pulse-energy passively mode-locked 2.0  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602009.
- [47] Liu Jiang, Wang Pu. 2  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  掺铥皮秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802004.
- [48] Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0  $\mu\text{m}$ [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0902001.  
刘江, 王璞. 高功率被动锁模 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥飞秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0902001.
- [49] 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.
- [50] Liu J, Wang Q, Wang P. High average power picosecond pulse generation from a thulium-doped all-fiber MOPA system[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22442-22447.
- [51] Sims R A, Kadwani P, Shah A S L, *et al.* 1  $\mu\text{J}$ , sub-500 fs chirped pulse amplification in a Tm-doped fiber system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 121-123.
- [52] Liu J, Xu J, Liu K, *et al.* High average power picosecond pulse and supercontinuum generation from a thulium-doped, all-fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4150-4153.
- [53] 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.
- [54] Wan P, Yang L, Liu J. High power 2  $\mu\text{m}$  femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21374-21379.
- [55] 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.
- [56] Gebhardt M, Gaida C, Hädrich S, *et al.* Nonlinear compression of an ultrashort-pulse thulium-based fiber laser to sub-70 fs in Kagome photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2770-2773.
- [57] 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  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5160-5163.
- [58] Liu J, Liu C, Shi H, *et al.* High-power linearly-polarized picosecond thulium-doped all-fiber master-oscillator power-amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 15005-15011.
- [59] 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.
- [60] Tan F, Shi H, Sun R, *et al.* 1  $\mu\text{J}$ , 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.