

# 高功率掺铥石英光纤激光器研究进展

刘茵紫, 邢颖滨, 徐中巍, 李进延

华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 掺铥光纤激光器在医疗、塑料焊接、激光雷达和光学参量振荡等领域有着重要应用。介绍了掺铥石英光纤、高功率连续掺铥光纤激光器和脉冲掺铥光纤激光器最新研究进展,分析和讨论了掺铥光纤激光器的发展和技术瓶颈,分别从光纤设计、抽运方式以及激光器结构三个方面提出优化和调整,通过改善掺铥光纤激光器的热管理和非线性效应,实现更高输出功率的掺铥光纤激光器。

**关键词** 激光器与激光光学; 掺铥石英光纤; 掺铥光纤激光器; 连续激光; 脉冲激光

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.050004

## Research Progress in High Power Tm<sup>3+</sup>-Doped Silica Fiber Lasers

Liu Yinzi, Xing Yingbin, Xu Zhongwei, Li Jinyan

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** Thulium-doped fiber lasers (TDFLs) have been applied in extensive areas, such as medical treatment, plastic welding, lidar, and optical-parameter-oscillation (OPO). In this paper, the research progress of Tm<sup>3+</sup>-doped silica fibers and high power TDFLs is presented and the bottlenecks of TDFLs are discussed and analyzed. Adjustments and optimization are promoted from three aspects including fiber design, laser structure and pump approach, and high power TDFLs will be achieved by improving thermal management and non-linear effect.

**Key words** lasers and laser optics; thulium-doped silica fiber; thulium-doped fiber laser; continuous-wave laser; pulsed laser

**OCIS codes** 140.3510; 140.3360; 140.4780; 140.3538

## 1 引言

光纤激光器相比于其他固体激光器,具有小巧紧凑、光束质量高、稳定性好、适用于恶劣工作环境等特点。科研人员对稀土掺杂光纤的研究不断深入,相继研发出了基于掺铒光纤(EDF)和掺镱光纤(YDF)的光纤激光器。近年来,掺铥光纤(TDF)激光器也因其高非线性阈值和高端面损伤阈值的特点及其波长特性而成为高功率光纤激光器领域中的研究热点<sup>[1-4]</sup>。

掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤激光器输出激光的工作波段在 2 μm 附近,这个波长同时也在人眼安全的波段内,因此具有广泛的应用前景。研究表明<sup>[5]</sup>,0.69 μm

和 1.064 μm 激光波长对人眼的损伤阈值为 10<sup>-7</sup> J/cm<sup>2</sup>,而 2.06 μm 波长的激光对人眼的损伤阈值为 10 J/cm<sup>2</sup>,激光对人眼的损伤阈值提高了 8 个数量级,这是因为水分子在 2 μm 波长附近有一很强的中红外吸收峰,因而在空间光通信领域中,非常适合作为人身安全要求较高的激光光源。在生物医疗领域中,2 μm 激光对组织的穿透深度浅,可用于烧灼、汽化、切割和凝血,在外科手术中可作为微创激光手术刀,进行肿瘤切除、疼痛神经刺激、输尿管肿物切除、碎石手术以及高精度眼科手术等<sup>[6-8]</sup>。2015年,Wilson等<sup>[9]</sup>用 IPG公司生产的 TLR 110-1908型 TDF激光器脉冲进行肾结石消融和输尿管穿孔实验,得到的治疗效果优于 Ho:YAG激光器。

收稿日期: 2017-10-26; 收到修改稿日期: 2017-11-28

作者简介: 刘茵紫(1994—),女,硕士研究生,主要从事 2 μm 高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: yzliu@hust.edu.cn

导师简介: 李进延(1972—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事特种光纤方面的研究。

E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

在激光光学领域,  $2\ \mu\text{m}$  的激光是用作抽运中红外光参量振荡器(OPO)的理想光源<sup>[10-13]</sup>, 可实现  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ,  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  的中红外激光输出; 用高功率脉冲 TDF 激光器抽运高非线性中红外光纤, 可产生  $2\sim 5\ \mu\text{m}$  中红外超连续谱<sup>[14-15]</sup>, 对其进行四倍频还可得到蓝光输出<sup>[16]</sup>。

自 1988 年英国南安普顿大学 Hanna 等<sup>[17]</sup> 报道了掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤激光器以来, 掺铥光纤激光器经过了近三十年的发展, 其输出功率实现了从最初的毫瓦级到千瓦级的飞跃。2010 年的 Photonics West 会议上, Q-peak 公司 Ehrenreich 等<sup>[18]</sup> 报道了基于主振荡功率放大结构(MOPA)的高功率全光纤 TDF 激光器, 该系统采用两级抽运, 每一级采用 6 个 79X-nm 的抽运源, 增益介质为长 12 m、芯包比为 20/400 的大模场 TDF, 经过两级放大获得了超过 1 kW 的单模连续输出, 系统最终的斜率效率为 53.2%, 是目前 TDF 激光器获得的最大连续输出。2014 年, Gaida 等<sup>[19]</sup> 采用啁啾脉冲放大(CPA)技术获得了峰值功率为 200 MW、平均功率为 24 W 的输出, 成为目前脉冲掺铥光纤激光器实现的最高峰值功率, 该系统共设有三级放大, 均用模场直径为  $65\ \mu\text{m}$  的大模场掺铥光子晶体光纤(PCF)作为增益光纤, 放大前先将脉冲展宽至 900 ps, 一级放大和二级放大之间插入一个声光调制器将重复频率从 24 MHz 降至 200 kHz, 经过压缩后脉冲持续时间被压缩至 360 fs, 单脉冲能量为 120  $\mu\text{J}$ 。

## 2 掺铥石英光纤研究

### 2.1 $\text{Tm}^{3+}$ 的光谱特性

铥为镧系元素, 1878 年由瑞典的克莱夫等从“钪土”中分离出来, 外观上呈银白色。铥元素一般呈 +3 价或 +2 价,  $\text{Tm}^{3+}$  属于四能级系统, 可以实现多个波段的激光振荡, 用适当的波长选择元件就可以得到  $1.6\sim 2.1\ \mu\text{m}$  的可调谐激光输出。图 1 所示为掺  $\text{Tm}^{3+}$  玻璃的吸收截面, 位于 793, 1212, 1580 nm 的三个吸收峰分别对应图 2 中  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ ,  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ ,  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  三种能级跃迁过程。

${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  的能级跃迁过程对应的抽运波长为 1580 nm, 直接将粒子抽运到上能级, 具有最高的斯托克斯效率和内量子效率, 热负载也最低, 但是二能级较难实现粒子数反转, 阈值较高, 另外, 1580 nm 峰值吸收截面较小 ( $4.5 \times 10^{-25}\ \text{m}^2$ ), 需要较大的稀土离子掺杂浓度或增益长度, 因此较少采用此种方式。

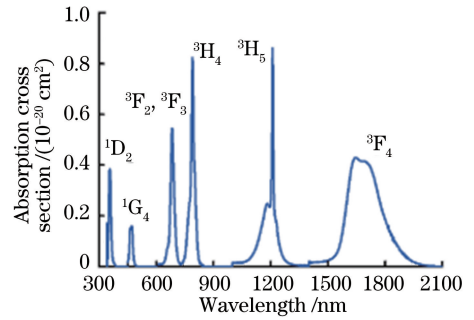


图 1 掺  $\text{Tm}^{3+}$  玻璃的吸收截面

Fig. 1 Absorption cross section of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped glass

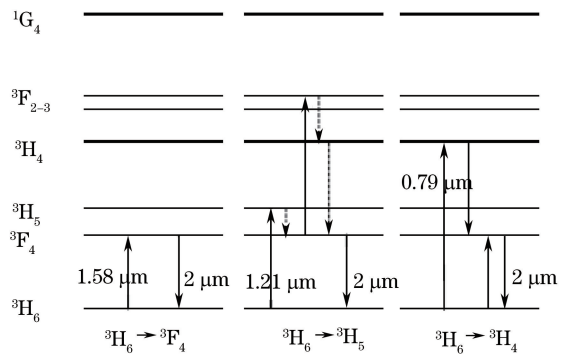


图 2 三种抽运方式的能级跃迁过程

Fig. 2 Schematic of the energy-level transition for  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silica

${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$  的能级跃迁过程对应于吸收波段中心 1212 nm 左右, 因为缺少 1212 nm 抽运源, 可以采用 1064 nm 或 1319 nm 的 Nd:YAG 激光器作为抽运源。基态  ${}^3\text{H}_6$  上一个  $\text{Tm}^{3+}$  离子吸收一个抽运光子后激发到  ${}^3\text{H}_5$  能级, 然后无辐射弛豫到  ${}^3\text{F}_4$  能级, 再从  ${}^3\text{F}_4$  能级向基态跃迁, 产生 2000 nm 左右波长的激光。当用这种方式抽运时, 部分  ${}^3\text{F}_4$  态上的粒子会发生上转换过程跃迁至  ${}^3\text{F}_{2,3}$ , 然后无辐射跃迁至  ${}^3\text{H}_4$ , 再向下返回基态并发出近红外光,  ${}^3\text{H}_4$  上的粒子也可以向上跃迁至  ${}^1\text{G}_4$ , 若辐射至  ${}^3\text{F}_4$  发出红光, 若直接返回基态则会发出蓝光。

${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$  的能级跃迁过程中, 处于基态  ${}^3\text{H}_6$  上的  $\text{Tm}^{3+}$  离子吸收一个光子向上跃迁到  ${}^3\text{H}_4$  能级, 从  ${}^3\text{H}_4$  能级弛豫到  ${}^3\text{F}_4$  能级时放出光子, 将另一个  $\text{Tm}^{3+}$  离子从  ${}^3\text{H}_6$  基态能级激发到  ${}^3\text{F}_4$  能级,  ${}^3\text{F}_4$  能级上的  $\text{Tm}^{3+}$  离子再向基态跃迁, 发射 2000 nm 左右波长的激光, 即发生交叉弛豫(CR), 理论上量子效率可达 200%, 有效降低激光器阈值。采用工艺成熟的激光二极管(LD)抽运时, 793~795 nm 波长与  $\text{Tm}^{3+}$  吸收峰匹配良好, 有较高的抽运效率和抽运光耦合效率。

## 2.2 掺铥石英光纤研究进展

与其他玻璃基质相比,掺铥石英光纤具有柔性好、成本低廉、背景损耗低和与无源光纤熔接损耗低等优点,因而被广泛应用于掺铥光纤激光器的研究中。为了实现高效率大功率的  $2\ \mu\text{m}$  光纤激光器,有必要对掺铥石英光纤进行系统的研究和总结。

目前掺铥石英光纤发展的瓶颈主要在于抽运吸收效率不高,这是由石英材料具有较高的声子能量而导致的。另外,用  $793\ \text{nm}$  抽运掺铥光纤激光器时存在较高的量子缺陷,使得大部分能量以热能的形式散失。掺铥光纤中的交叉弛豫机制可以较好地克服这种缺陷,突破斯托克斯极限(41%)。通过提高石英光纤中铥离子的掺杂浓度可有效增强交叉弛豫效应,从而提高光纤的吸收效率。同时缩短光纤长度有利于提高光纤单位长度的光增益,抑制非线性效应。2009年,Wang等<sup>[20]</sup>报道了一种高掺杂双包层掺铥石英光纤,掺杂浓度为5%(质量分数),芯包比为18/125,纤芯和内包层数值孔径(NA)分别为0.07和0.58,光纤斜率效率为68.3%,单位长度增益为2 dB/cm,随后在实验中将30 cm长的掺铥光纤用于基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)的被动锁模光纤激光器中,获得了脉冲能量为0.76 nJ,脉冲持续时间为1.5 ps的脉冲激光。2015年,南安普顿大学 Shardlow等<sup>[21]</sup>报道了一种激光效率高达70%的TDF,该光纤采用改进的化学气相沉积法(MCVD)拉制且优化了激光模场和掺杂区域的重叠因子,不同掺杂浓度下光纤的斜率效率如图3所示。掺杂浓度为3.6%(质量分数)时,该TDF的斜率效率达到了70%,这是目前所报道的斜率效率最高的TDF。

有研究表明,石英光纤中掺铥浓度在0.35%~1.6%(质量分数)范围内,激光器的斜率效率与掺铥

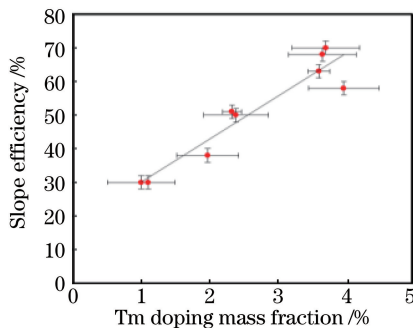


图3 793 nm 波长抽运下不同掺杂浓度对应的 TDF 斜率效率

Fig. 3 Slope efficiency obtained for 793 nm pumped TDF as a function of the  $\text{Tm}^{3+}$  doping concentration

浓度成正比,光纤中的铥离子浓度每增加1%(质量分数),激光器斜率效率可提高32%<sup>[22]</sup>。但进一步提高掺杂浓度将会引起  $\text{Tm}^{3+}$  离子的团簇,这会诱发产生光子猝灭,最终降低激光器的光光效率。因此在提高铥离子浓度的同时,还需要在石英玻璃中掺入一定量的  $\text{Al}^{3+}$  充当分散剂,使  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  在预制棒中分布均匀,增大  $\text{Tm}^{3+}$  溶解度。除此之外还可以掺入  $\text{P}^{5+}$ 、 $\text{Ge}^{4+}$ 、F 等来调整纤芯折射率,从而改善纤芯与包层黏度适配度。2015年, Lee等<sup>[23]</sup>研制出了一种多组分玻璃,并用管-棒法将其拉制成芯包比为10/125的光纤,其掺杂浓度达到7%(质量分数),用波长为1567 nm的激光抽运,测得其单位长度增益为5.81 dB/m。

从结构上对掺铥光纤进行优化和改进是提高激光效率的另一种思路。2009年,Geng等<sup>[24]</sup>利用管-棒法制备出了一种双包层单模光纤,其横截面如图4所示。该光纤芯包比为10/125,数值孔径分别为0.136和0.46,纤芯掺杂浓度为5%(质量分数)。通过在内包层中插入一根低折射率的石英芯棒来破坏内包层的对称性,从而增加包层抽运光的吸收。用800 nm激光进行包层抽运,测得吸收效率为12 dB/m。



图4 双包层单模 TDF 剖面图

Fig. 4 Cross section of the double-clad single-mode TDF

2015年,Darwich等<sup>[25]</sup>用粉末烧结法研制出了一种三包层光纤,该光纤的横截面和折射率剖面如图5所示。纤芯采用高掺杂掺铥铝硅酸盐石英玻璃制成,第一内包层采用掺铝玻璃制成,两者的数值孔径分别为0.076和0.45,折射率差为  $2 \times 10^{-3}$ ,芯包比为18/53.5,第二内包层由纯石英构成,设计为D字型( $221\ \mu\text{m} \times 289\ \mu\text{m}$ ),外包层为一层低折射率的聚合物。测得光纤在880 nm处的背景损耗为0.57 dB/m,790 nm处的包层吸收为3.22 dB/m。实验中,通过使用一段4.5 m长的三包层光纤与两块双色镜来构成法布里-珀罗谐振腔型的掺铥激光器。使用功率为30 W的793 nm LD对其进行抽

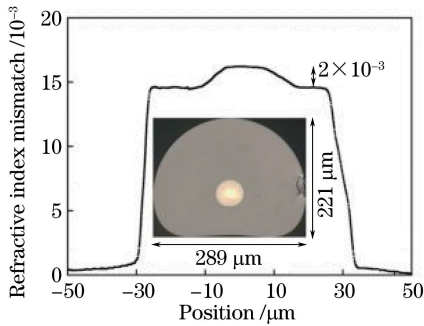


图5 三包层 TDF 的横截面及折射率剖面

Fig. 5 Cross section and refractive index profile of the triple-clad TDF

运,测得在 20 °C 和 0 °C 的实验环境中激光器的斜率效率分别为 47.7% 和 50.4%,激光器输出激光的  $M^2 < 1.1$ 。

当光纤中功率增加到一定阈值之后,随之而来的非线性效应将导致功率无法再进一步提升,大量的热累积带来附加损耗。虽然非线性效应与光纤模场面积成反比,通过增大模场面积可以提高非线性效应阈值<sup>[26]</sup>,但大模场同时会引起多模运转,影响光束质量。与传统光纤相比,大模场光子晶体光纤(LMA-PCF)具有无截止单模、低限制损耗、大模场面积及大数值孔径等优良特性,在单模高功率光纤激光器,尤其是高峰值功率脉冲光纤激光器的实现中有着良好的应用前途。2012年,Kadwani等<sup>[27]</sup>首次报道了基于LMA-PCF的调Q脉冲激光器,该光纤芯包比为50/250,纤芯和内包层的NA分别为0.04和0.45,孔间距( $\Delta$ )为12.8  $\mu\text{m}$ ,空气孔直径与孔间距之比( $d/\Delta$ )为0.18,掺杂浓度为2.5%(质量分数),吸收系数为5.8 dB/m,取2.7 m该PCF,在入纤功率为37 W、重复频率为10 kHz的情况下,获得8.9 kW的峰值功率,脉冲能量为435  $\mu\text{J}$ ,  $M^2$ 小于1.15。2013年,该课题组分别用模场直径为36  $\mu\text{m}$ 的PCF和模场直径为54  $\mu\text{m}$ 的PCF芯棒作为MOPA结构的两级增益介质,获得了峰值功率为890 kW、脉冲能量为6.4 mJ的单模输出,脉冲持续时间为10 ns,实验过程中没有观察到非线性效应和光谱恶化现象<sup>[28]</sup>。

### 3 高功率掺铥光纤激光器研究进展

#### 3.1 振荡结构掺铥光纤激光器

20世纪80年代末,英国南安普顿大学Hanna等在国际上首次报道了掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤激光器。由于激光抽运技术以及掺铥光纤制备工艺的限制,

所报道的掺铥光纤激光器平均输出功率为100  $\mu\text{W}$ ,斜率效率仅为13%。随着各种光学器件的发展,掺铥光纤的制作工艺不断优化,特别是半导体激光器和包层抽运技术的出现,掺铥光纤激光器(TDFL)的发展有了质的飞跃。2007年,Slobodtchikov等<sup>[29]</sup>通过双向抽运长为5 m、芯包比为25/400的TDF,得到263 W的连续输出,斜率效率为59.1%,激光器阈值为11 W,测得光纤损耗系数为2.9 dB/m;同年,Meleshkevich等<sup>[30]</sup>用18个40 W的掺铥光纤激光器对长8 m的TDF进行端面包层抽运,用一对反射率 $< 1$  dB的布拉格光栅构成反射腔壁,获得了415 W的单模输出,系统的斜率效率达到60%,且 $M^2 < 1.1$ 。

2009年,Moulton等<sup>[31]</sup>采用两个350 W的LD对芯包比为20/400的商用TDF进行双端抽运,光纤掺杂浓度在2.5%~2.9%(质量分数)之间,芯包NA分别为0.2和0.46,具体结构如图6所示,在实际抽运功率为500 W的情况下获得了225 W的输出功率,斜率效率为46%。随后,他们对TDF进行了以下优化:将掺杂浓度提高30%;增大光纤纤芯直径至25  $\mu\text{m}$ ,在纤芯周围插入一圈高折射率基质,将纤芯NA降至0.08;并对光纤进行了充分的热处理,测得优化后的光纤斜率效率达到71.9%,在795 nm波段的光源抽运下,量子效率达到1.84。取上述光纤5 m用于同样的振荡结构中,输出功率提升至300 W,测得系统斜率效率为61.8%, $M^2$ 为1.2。最后,他们设计了芯包比为40/620、纤芯NA为0.2的大模场TDF,进一步提高了光纤亮度,采用与前述相似的结构,将抽运功率增至1 kW,用双色镜取

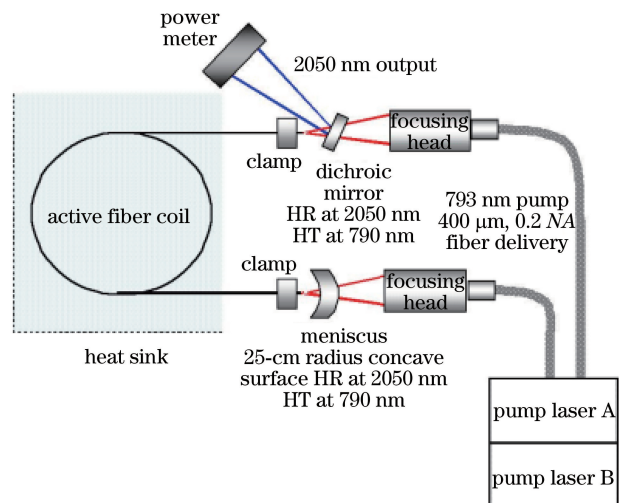


图6 高功率 TDFL 结构图

Fig. 6 System configuration of high-power TDFL

代图 6 装置中的半月镜,利用玻璃-空气界面 4% 的菲涅耳反射构成输出镜,获得了最大功率为 885 W 的多模输出,斜率效率为 49.2%,如图 7 所示。

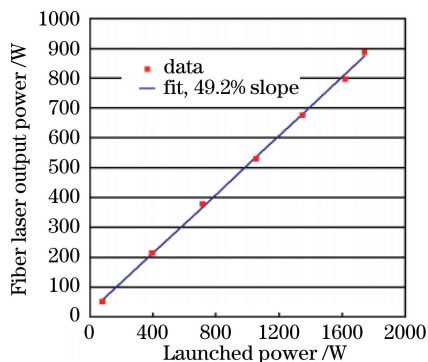


图 7 输出激光功率随抽运光功率的变化

Fig. 7 Fiber laser output power versus launched pump power

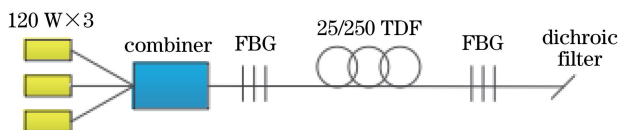


图 8 高功率全光纤 TDFL 结构图

Fig. 8 System configuration of the high-power all-fiberized TDFL

2014 年,清华大学胡震岳等<sup>[33]</sup>报道了一种高功率全光纤 TDF 激光器,如图 9 所示。有源光纤的芯包比为 25/400, NA 分别为 0.09 和 0.46,测得在 790 nm 处的吸收系数为 4 dB/m。该激光器采用直腔结构,由一对 FBG 提供反馈,7 个工作在 790 nm

2014 年,武汉光电国家实验室邢颖滨等<sup>[32]</sup>采用改进的汽相-液相混合掺杂法研制出八边形芯包比为 25/250 的大模场 TDF,掺杂浓度为 0.044,在 793 nm 处的吸收系数和在 860 nm 处的背景损耗分别为 4.8 dB/m 和 25 dB/km。取 4 m 该 TDF 作为增益介质,与一对反射率分别为 98.55% 和 11.32% 的光纤布拉格光栅(FBG)构成图 8 所示全光纤振荡结构,由 3 个工作在 793 nm 处的 LD 进行抽运,输出端用一双色镜滤除未被吸收的抽运光,对 LD 和 TDF 分别进行水冷,在入纤功率为 252 W 的情况下获得 121 W 的输出,测得斜率效率为 51%,光光效率为 48%。实验中,当抽运功率超过 260 W 时,TDF 表面温度急剧升高,热问题成为限制功率提升的首要因素。

的 70 W LD 抽运,在入纤功率为 443 W 时,得到 227 W 的输出激光,斜率效率为 54.3%,光光效率为 51.2%, $M^2$  为 1.56,激光工作波长为 1908 nm,这是目前掺铊光纤激光器在 1.9  $\mu\text{m}$  波段得到的最大输出。

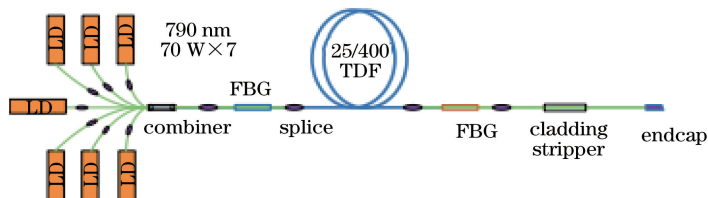


图 9 227 W 高功率全光纤 TDFL 结构图

Fig. 9 System configuration of the 227-W high-power all-fiberized TDFL

2016 年,Walbaum 等<sup>[34]</sup>研制了一种芯包比为 25/400 的大模场掺铊石英光纤,取 7 m 该有源光纤与两个 FBG 构成直腔结构并实现了全光纤化。为

防止高功率损伤光纤,在输出端熔接一个涂有抗反射(AR)增透膜的石英端帽,如图 10 所示,采用直接水冷的方式,通过优化熔点参数,最终在 1970 nm

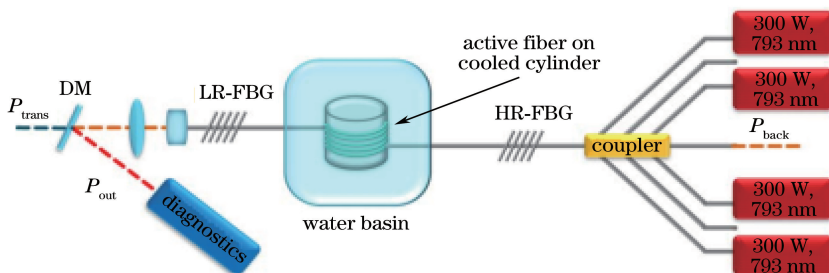


图 10 全光纤化高功率 TDFL 结构图

Fig. 10 System configuration of the high-power all-fiberized TDFL

波段获得了 567 W 的双横模输出,系统斜率效率为 49.4%,这是目前基于振荡方式的全光纤 TDF 实现的最大功率。

### 3.2 放大结构掺铥光纤激光器

结构设计上,与传统的线性腔相比,全光纤 MOPA 系统具有灵活小巧、效率高、光束质量好等优点,通过扩展模式面积提高受激布里渊散射等非线性效应的阈值,容易得到高功率和窄线宽输出,被广泛应用于高功率 TDF 激光器。

2010 年,McComb 等<sup>[35]</sup>报道了一种 1927 ~

2097 nm 可调谐窄线宽 TDF 激光器,如图 11 所示,种子源采用两个工作在 790 nm、功率为 40 W 的 LD 抽运,谐振腔包括 1/4 波片、半波片、偏振分光镜和衍射光栅,可补偿光相位延迟,控制波长选择。放大级的设计上,他们采用两个 793 nm、300 W 的 LD 双端抽运芯包比为 25/400 的大模场 TDF,抽运耦合效率为 75%,光纤输入端面和输出端面分别切 8° 和 10° 角防止寄生激光破坏光路器件。该系统得到的平均输出功率大于 200 W,线宽小于 200 pm,  $M^2$  为 1.2,斜率效率大于 50%。

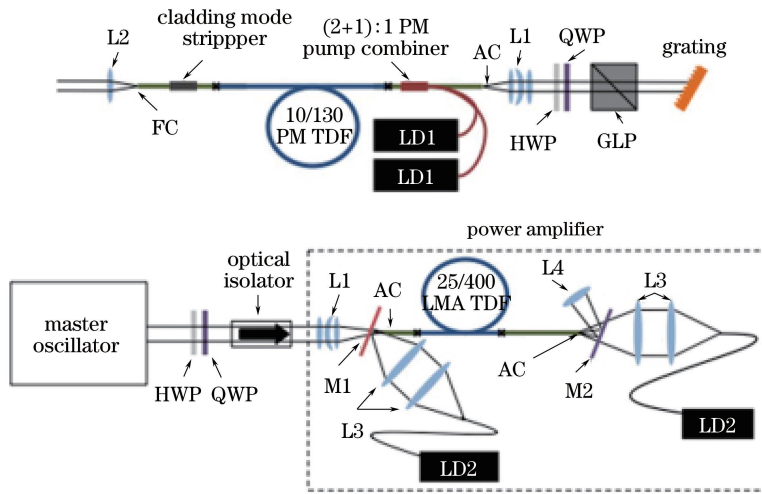


图 11 宽调谐窄线宽 TDFL。(a)种子源结构图;(b)放大级结构图

Fig. 11 (a) Master oscillator and (b) power amplifier of high-power widely tunable TDFL

2014 年,Creeden 等<sup>[36]</sup>报道了他们研制的超高效率、高功率光纤激光器,其结构如图 12 所示。该系统放大级的增益光纤为准三包层结构,在纤芯和

包层中间设计了一层基质层,纤芯/基质/包层比为 25/45/250,纤芯 NA 为 0.1,掺杂浓度为  $28.5 \times 10^{25}$  ion/m<sup>3</sup>,1908 nm 处纤芯吸收系数为

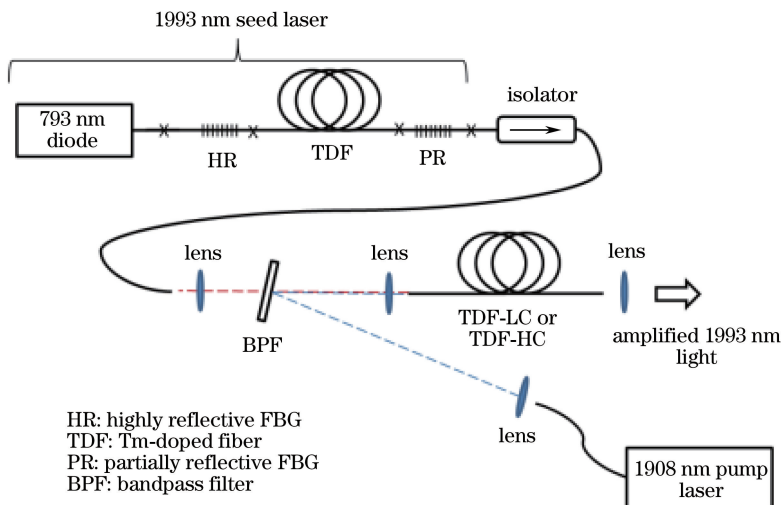


图 12 超高效率、高功率 TDFL 结构图

Fig. 12 System configuration of ultrahigh-efficiency and high-power TDFL

28.59 dB/m,用截断法选取 8.5 m 纤芯用于实验。为克服 793 nm 处的高量子缺陷,提高抽运亮度,他们采用新型同带共振抽运方式,由一个工作在 1908 nm 的掺铥光纤激光器抽运,通过带宽为 2 nm 的窄带滤波器将抽运光耦合进增益光纤的基质层,最终获得超过 87 W 的输出。随后他们在 1908 nm 的 TDF 激光器后串联一个 793 nm 的 LD,通过提高抽运功率,将输出功率提升至 123 W,斜率效率达到 91.6%,光光效率为 90.4%,输出功率随抽运光的变化如图 13 所示。

2014 年,北京工业大学刘江等<sup>[37]</sup>用全光纤 MOPA 结构实现了高功率、单频、单偏振连续输出,如图 14 所示,种子源为一个线宽小于 2 MHz 的单频分布反馈式(DFB)激光器,四级全光纤结构放大器采用 25/400 的大芯径保偏双层掺铥光纤作为激光增

益介质,在最后一级放大器总抽运功率达到 300 W 的情况下,得到 210 W 的平均输出,测得偏振消光比大于 17 dB,激光工作波长位于 2000.9 nm。

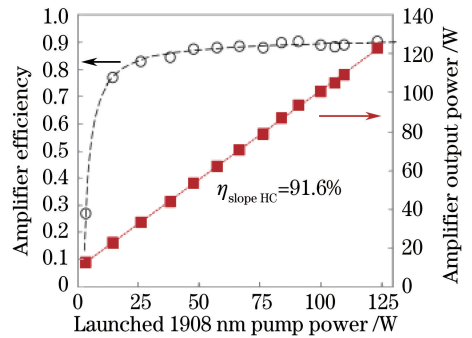


图 13 输出激光功率随抽运光的变化

Fig. 13 Fiber laser output power versus launched pump power

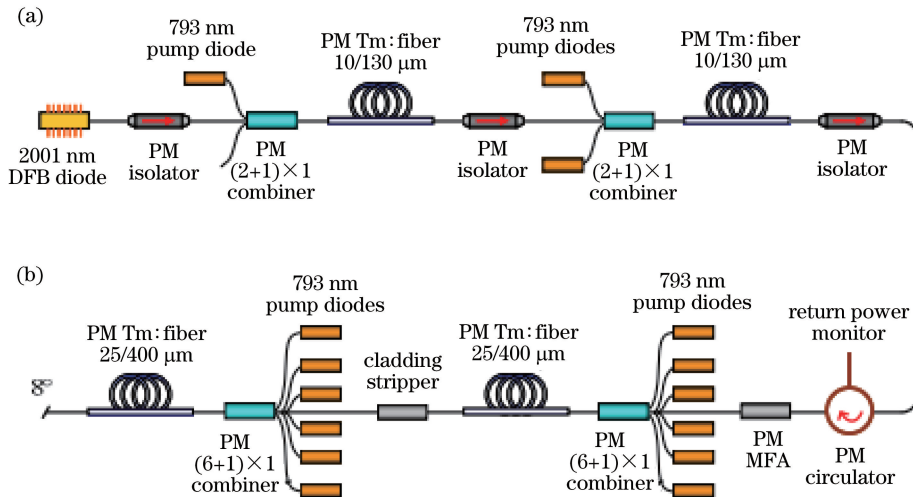


图 14 高功率单模单偏振 TDFL 结构图

Fig. 14 System configuration of high-power, single-frequency, single-polarization TDFL

2015 年,国防科技大学王雄等<sup>[38]</sup>报道的全光纤高功率单频掺铥光纤激光器结构如图 15 所示,线宽为 100 kHz 的超短腔单频光纤激光器作为种子源,两级预放大级分别采用了长度为 2.5 m,芯包比为

9/125 的单模掺铥光纤和长度为 8 m,芯包比为 10/130 的双包层掺铥光纤作为增益介质,输出端采用一个耦合比为 90:10 的 2×2 耦合器。主放大级由 6 个工作波长为 793 nm 的 LD 提供抽运,总抽运

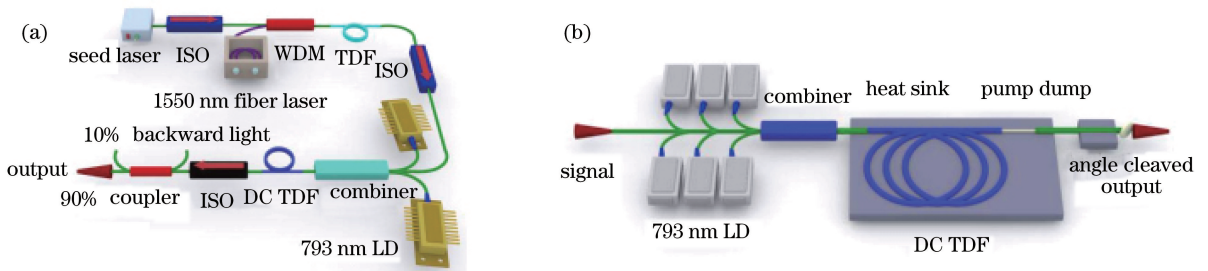


图 15 全光纤高功率单频 TDFL。(a)预防放大级;(b)主放大级

Fig. 15 (a) Pre-amplifying part and (b) main-amplifier of the high power single-frequency Tm-doped all-fiberized TDFL

功率为 550 W,增益光纤为一段长度为 2.9 m,芯包比为 25/250 的 DC-TDF,其纤芯和包层的 NA 分别为 0.1 和 0.46,在 793 nm 处的包层吸收系数为 9 dB/m,TDF 后熔接一段长为 0.4 m 且模场匹配的无源光纤,在熔点处通过高折射率胶滤除内包层中未被吸收的抽运光,无源光纤末端切割 8°角以防止回光,增益光纤及滤模熔点皆放置在恒温 14 °C 的水冷板上进行热处理。该 MOPA 系统最终获得 310 W 的输出功率,斜率效率为 56%,光信噪比为 40 dB,工作波长为 1970.77 nm,整个实验过程中没有观察到放大自发辐射(ASE)和功率下滑现象,输出功率仅受限于最大抽运功率。

2016 年,哈尔滨工业大学杨超等<sup>[39]</sup>实现了基于 MOPA 结构的高功率窄线宽全光纤 TDF 激光器,

其结构如图 16 所示,TDF 的芯包比为 25/400,芯包 NA 分别为 0.09 和 0.46,在 790 nm 波段的吸收系数为 1.67 dB/m,取 5 m 和 4.4 m 该 TDF 分别作为种子源和放大级的增益光纤,分别用两个工作在 790 nm 的 LD 向种子源和放大级提供 220 W 和 229.4 W 的抽运,两级之间熔接一段 1.5 m 且模场匹配的去涂覆无源光纤滤除高阶模和未被吸收的抽运光,增益光纤均被放置在刻有螺旋 U 型通道的铜板上进行散热。该系统最终获得输出功率为 152 W,且输出功率仅受限于抽运功率,种子源和放大级的斜率效率分别为 42.5%和 45.3%,系统的光光效率为 35%,输出线宽为 0.18 nm,工作波长为 1908 nm,通过控制部分反射 FBG 的温度,可以选择系统工作的中心波长。

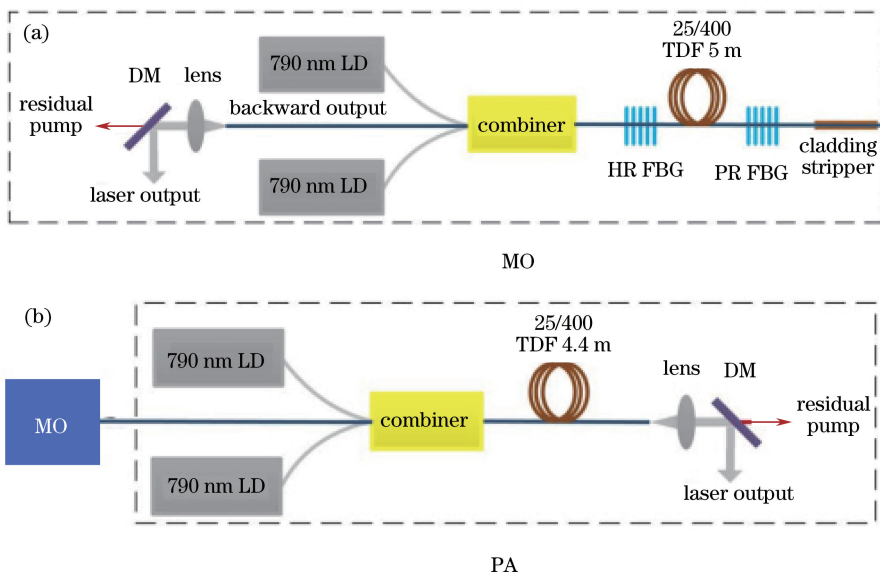


图 16 高功率窄线宽全光纤 TDFL。(a)种子源;(b)放大级

Fig. 16 (a) Master-oscillator and (b) power-amplifier of high-power, narrow linewidth, all-fiberized TDFL

2017 年,为解决寄生激光(峰值增益区间为 2000~2040 nm)导致的功率及效率受限问题,Anderson 等<sup>[40]</sup>提出了一种增益竞争的方法,其具体结构如图 17 所示,两个工作波长分别为 1950 nm 和 2130 nm 的 TDFL 作为双种子源,波分复用器(WDM)与放大级通过一个模场适配器连接,放大

级增益光纤为一段长 10 m 的三包层 TDF,其纤芯/基质/包层之比为 10/65/400,纤芯 NA 为 0.1。由于 TDF 在 1950 nm 处发射截面较大,1950 nm 波长的激光可获得更大增益,随着光信号在光纤中传输,1950 nm 波长的激光逐渐会被纤芯中的铥离子吸收且对 2130 nm 的激光进行放大。在两种子源

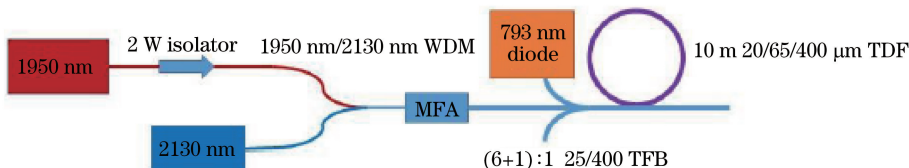


图 17 高功率全光纤 TDFL 结构图

Fig. 17 System configuration of high power all-fiberized TDFL



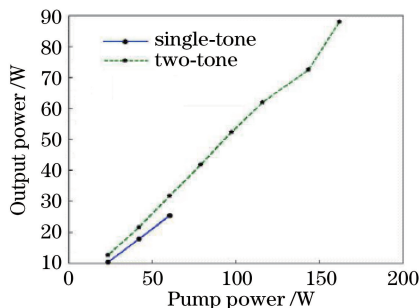


图 18 双种子源与单种子源放大系统激光功率随抽运光功率的变化对比

Fig. 18 Output power versus pump power for the two-tone configuration (green-dash) and single-tone (blue) direct amplification of 2130 nm

(1950 nm/2130 nm)的输入比为 0.8/3.7(W)的情况下,获得了波长为 2130 nm 的输出激光,输出功率达到 80 W,光光效率为 54%,这是目前在 21XX nm 波段获得的最大输出,对比图 18 可看出,采用双种子源与采用波长为 2130 nm 的单种子源相比,寄生激光阈值提高了 3.5 倍。

2017 年, Yao 等<sup>[41]</sup>报道了一种基于全光纤

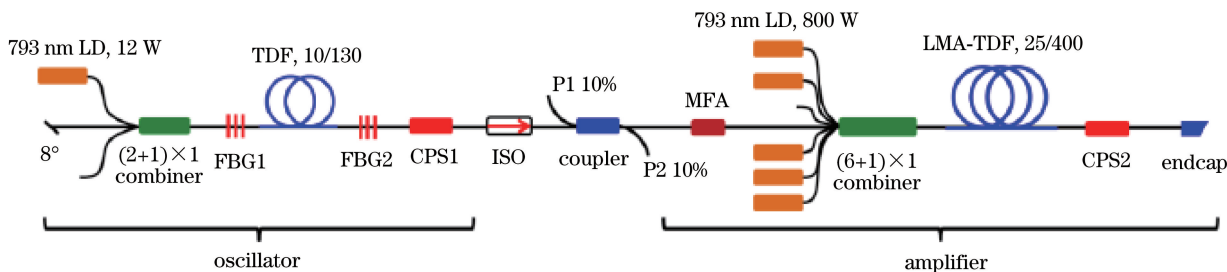


图 19 全光纤高功率窄线宽 TDFL 结构图

Fig. 19 Experimental setup of high power narrow spectral bandwidth all-fiberized TDFL

在连续激光器方面,因抽运源功率的限制,以及光纤熔接耦合匹配问题和散热问题,功率普遍只能达到百瓦量级,所以人们希望在连续激光器上有更大的提升。获得更高功率的连续激光器的主要方法有提高抽运源亮度,采用新型结构高效率掺铥光纤,增加优化放大级等。随着新型掺铥光纤的研制以及激光技术的发展,高功率掺铥光纤激光器的产品化在不久的将来有望实现。

### 3.3 高功率脉冲激光掺铥光纤激光器

具有高峰值功率、高精度、高灵敏度和高响应速度的脉冲激光更适用于激光医疗和 OPO,而且相比 1  $\mu\text{m}$  波段, 2  $\mu\text{m}$  波段通过放大后更容易获得超短脉冲激光,且具有更高的非线性阈值,因此具有良好的发展前景<sup>[42]</sup>。

MOPA 结构的高功率窄线宽 TDF 激光器,如图 19 所示,种子源增益光纤采用一段长为 3 m、芯包比为 10/130 的单包层 TDF,其在 793 nm 处的吸收系数为 3 dB/m,两个 FBG 的反射率分别为 99.6% 和 10%,由于该线形腔可支持 LP<sub>00</sub> 和 LP<sub>11</sub> 两个模式传输,在输出功率为 5 W 时存在由模式竞争引起的模式跳变及功率抖动,因此采用稳定输出功率为 3.5 W 时的光源作为种子源进行后续放大,此时输出激光的 3 dB 带宽为 67 pm。耦合比为 90:10 的耦合器两个端口 P1 和 P2 分别用来监测回光及种子源输出功率情况,种子源和放大级之间通过一个模场适配器连接。放大级增益光纤长 3.7 m,芯包比为 25/400,纤芯和包层的 NA 分别为 0.09 和 0.46,在 793 nm 处的吸收系数为 4 dB/m,采用包层抽运方式,在入纤功率为 780 W 的情况下获得了 400 W 的输出功率,斜率效率为 53%,中心波长为 1941 nm,放大级的 TDF 被置于恒温 10  $^{\circ}\text{C}$  的水循环系统进行热管理,且该系统的种子源及放大级后均接有包层光滤除器(CPS1, CPS2)用于滤除剩余抽运光。

2013 年, Gaida 等<sup>[43]</sup>报道了峰值功率达到 MW 级的脉冲 TDF 激光器,该激光器基于两级放大的 MOPA 结构,具体结构如图 20 所示。种子源采用芯包比为 10/130 的保偏光纤,通过声光调制器产生脉冲宽度为 100 ns、重复频率为 20 kHz 的脉冲,脉冲工作波长为 1965 nm。为获得高功率的脉冲,在对种子源产生的脉冲进行放大之前,通过一个电光调制器将重复频率降到 1 kHz,然后通过一段芯包比为 50/250、模场直径为 36  $\mu\text{m}$  的掺铥 PCF 进行一级放大,最后采用一根模场直径为 54  $\mu\text{m}$  的 PCF 芯棒作为增益介质,通过后向抽运方式对脉冲进行二级放大,水冷系统温度保持在 13  $^{\circ}\text{C}$ 。经过两级放大后,脉冲峰值功率超过了 890 kW,脉冲最大平均功率为 7.3 W,单脉冲能量为 6.4 mJ, ASE 功率小于 500 mW。

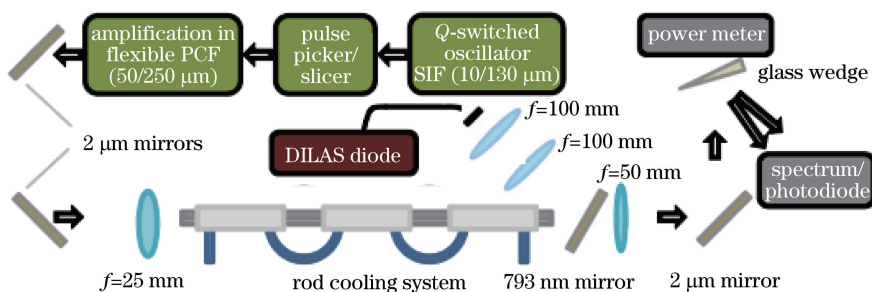


图 20 MW 级峰值功率 TDFL 结构图

Fig. 20 System configuration of MW-level peak power TDFL

2014 年, Stutzki 等<sup>[44]</sup>搭建了三级啁啾脉冲放大系统, 激光器结构如图 21 所示。该系统由被动锁模掺铈光纤振荡器产生脉冲宽度为 500 fs、重复频率为 49.1 MHz 的种子脉冲激光。两级放大均采用了芯包比为 50/250 的掺铈保偏 PCF, 在 793 nm 处的吸收系数为 6 dB/m。其有效模场直径为 35  $\mu\text{m}$ , 因此能够有效抑制放大过程中非线性效应的产生。首先脉冲激光经过了一个 Öffner 展宽器, 脉冲宽度被展宽到 400 ps。主放大器采用双端抽运方式, 入纤功率为 540 W, 两端熔有带角度的端帽, 且光纤被置于恒温 20 °C 的通水管道中进行水冷。输出脉冲激光未经压缩时的平均输出功率大于 241 W, 放大系统总斜率效率为 46%, 偏振消光比为 13.2 dB。最后使用两个 943 line/mm 的多层电介质光栅和一个后向反射棱镜对脉冲激光进行脉宽压缩, 压缩效率为 77%, 脉冲宽度低于 700 fs。经压缩后脉冲激光平均功率为 152 W, 峰值功率为 4 MW。

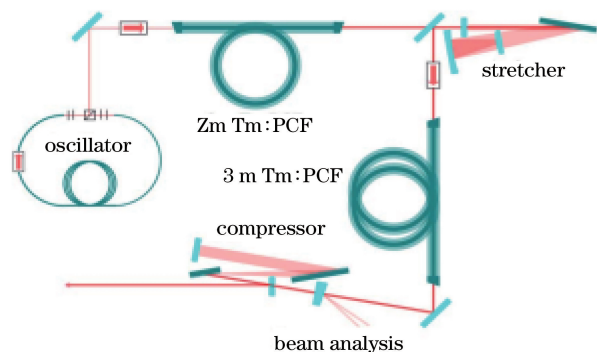


图 21 4 MW 峰值功率的 CPA 系统的结构图

Fig. 21 System configuration of 4 MW peak power CPA system

2016 年, 该课题组采用图 22 所示 CPA 系统<sup>[45]</sup>, 种子源工作波长为 1954 nm, 经过非线性极化演化后输出重复频率为 33.1 MHz 的锁模脉冲, 放大前通过一个 Öffner 展宽器对脉冲进行整形, 脉冲宽度被展宽至 1 ns。前两级放大皆采用长为

2.5 m 的保偏 PCF 作为增益介质, 两个输出功率为 30 W 和 50 W 的 LD 分别为一级放大和二级放大提供抽运, 两个声光调制器 (AOM) 用来降低重复频率, 脉冲的重复频率为 61 kHz, 经过两级放大, 平均功率为 50 mW。主放大级的增益介质为长 1.15 m、纤芯直径为 81  $\mu\text{m}$  的大节距棒状 PCF, 采用后向抽运方式, 入纤功率为 250 W, 经过一个效率为 82% 的 Treacy 型压缩器后最终获得了峰值功率为 2 GW、平均功率为 28.7 W、脉冲能量为 470  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度为 200 fs 的超短脉冲。另外, 为避免 1.9  $\mu\text{m}$  处  $\text{OH}^-$  吸收峰的影响, 实验均在相对湿度为 0.1% 的干燥封闭气候室中进行。

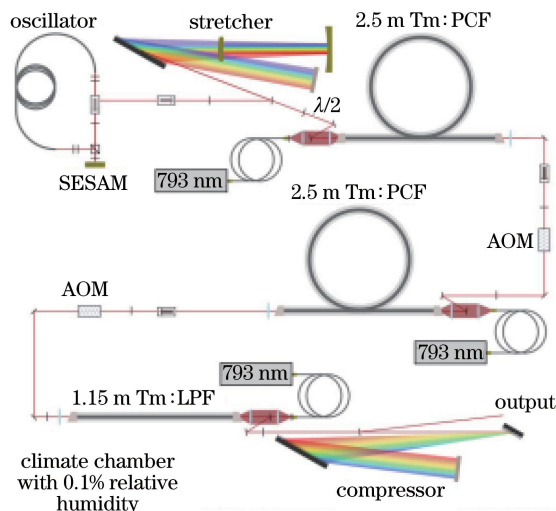


图 22 2 GW 峰值功率的 CPA 系统的结构图

Fig. 22 Experimental setup of 2 GW peak power CPA system

2017 年, 基于非线性脉冲压缩技术, 他们采用图 23 所示结构对上述 CPA 产生的高功率的超短脉冲进行了进一步放大和脉宽压缩, 利用长为 1 m、空气孔直径为 350  $\mu\text{m}$  的载  $\text{N}_2$  空芯光纤 (HCF) 对脉冲光谱进行展宽, 然后用涂有抗反射增透膜的石英块补偿自相位调制引起的啁啾, 最终实

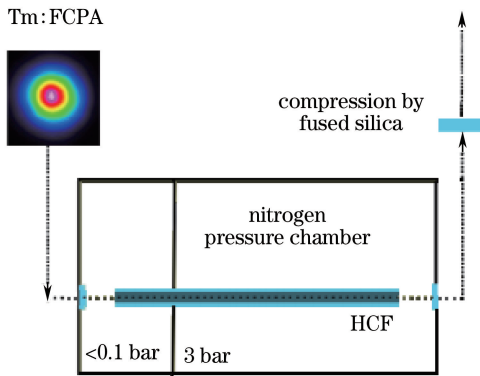


图 23 4 GW 峰值功率的脉冲压缩系统的结构图

Fig. 23 Experimental setup of 4 GW peak power pulse compression system

现了峰值功率为 4 GW、平均功率为 15.4 W 的脉冲输出,脉冲能量为 252  $\mu\text{J}$ ,脉冲宽度为 46 fs<sup>[46]</sup>。

2016年,北京工业大学刘江等<sup>[47]</sup>报道了百瓦级

全光纤保偏皮秒脉冲掺铥光纤激光器系统,激光器结构如图 24 所示。脉冲激光振荡器采用了基于 SESAM 的被动锁模技术,产生重复频率为 611.5 MHz 的皮秒脉冲,并通过三级全保偏结构 TDF 对其进行放大。第一级放大采用了一段长为 3 m、芯包比为 10/130 的保偏掺铥光纤,在 793 nm 波段的包层吸收系数为 4.7 dB/m;后两级放大器则均采用长 4.5 m、芯包比为 25/400 的大模场面积双包层掺铥光纤,纤芯与内包层的数值孔径分别为 0.09 和 0.45,在 793 nm 处的包层吸收系数为 2.4 dB/m。当第二、三级放大器的抽运功率分别达到 135 W 和 300 W 时,该系统可输出平均功率为 203 W 的线偏振皮秒脉冲激光,对应的脉冲激光峰值功率为 22 kW,偏振消光比大于 15 dB,脉冲宽度为 15 ps。该系统采用了全保偏光纤结构,因此具有良好的环境稳定性。

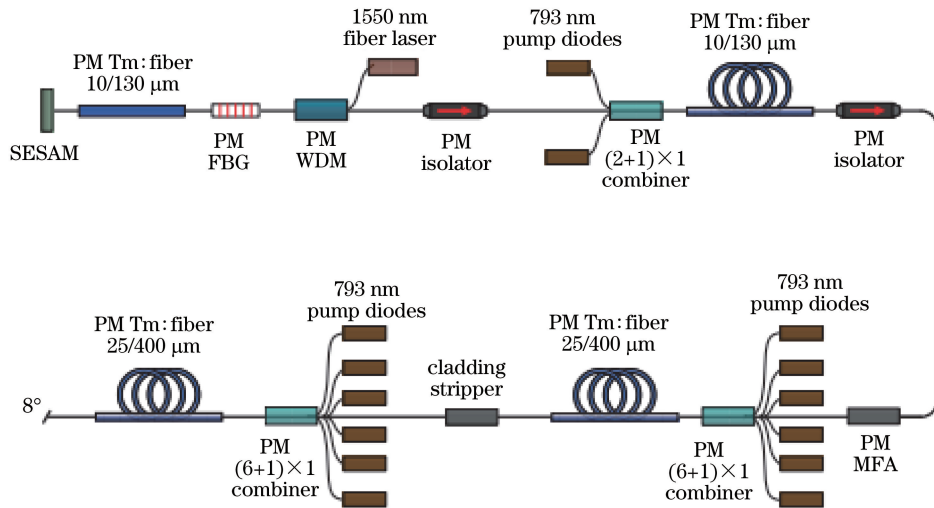


图 24 高功率全保偏全光纤结构皮秒脉冲 TDFL 结构图

Fig. 24 System configuration of high-power, polarized, all-fiberized picosecond pulsed TDFL

2017年,欧阳德钦等<sup>[48]</sup>报道了一种高平均功率重复频率可调的全光纤化 TDFL,其具体结构如图 25 所示。种子源为一增益开关 TDFL,采用长 1.5 m、芯包比为 9/125 的单模掺铥光纤作为增益介质,抽运源为一个重复频率在 10~500 kHz 之间可调的掺铒光纤激光器(EDFL),提供 1.2 W 抽运功率,可通过调整 EDFL 的参数,如脉宽、重复频率、脉冲能量,改变种子源输出的脉冲参数。抽运脉冲宽度为 50 ns,重复频率为 200 kHz 时,种子源输出脉冲随抽运功率的变化情况如图 26 所示。实验采用脉宽 600 ns、重复频率 100 kHz、输出功率 87 mW 的稳定脉冲进行后续放大。前两级预放大采用的 TDF 均长 3 m,芯包比为 10/130,纤芯和包层的 NA 分别为 0.15 和 0.46,在

793 nm 处的吸收系数为 3 dB/m,经过两级放大后,脉冲平均功率提升至 8.8 W。主放大级采用两个 120 W、工作波长为 793 nm 的 LD 抽运大模场 TDF, TDF 的芯包比为 25/250,纤芯和包层的 NA 分别为 0.09 和 0.46,在 793 nm 处的吸收系数为 9.5 dB/m,合束器的尾纤的芯包比为 200/220,NA 为 0.22,输出端熔接一个 CPS 滤除剩余抽运光,带 8°角的端帽用于抑制光纤端面 4% 的非涅耳反射。经过三级放大,在入纤功率 200 W 的情况下实现了平均功率为 115 W 的脉冲输出,脉冲能量为 1.15 mJ,斜率效率为 55.6%,实验过程没有观察到功率饱和现象明显的非线性现象,仅在长波长处存在微弱的 ASE,如增加抽运功率还能进一步提高输出功率。

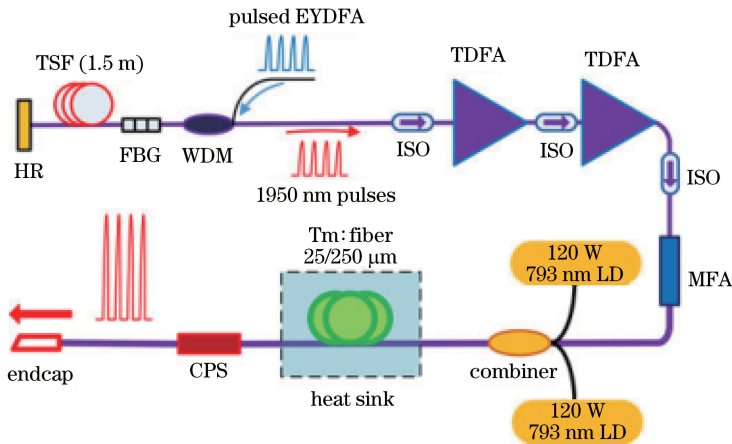


图 25 高平均功率重复频率可调全光纤 TDFL

Fig. 25 System configuration of high average power repetition-rate-switchable all-fiberized TDFL

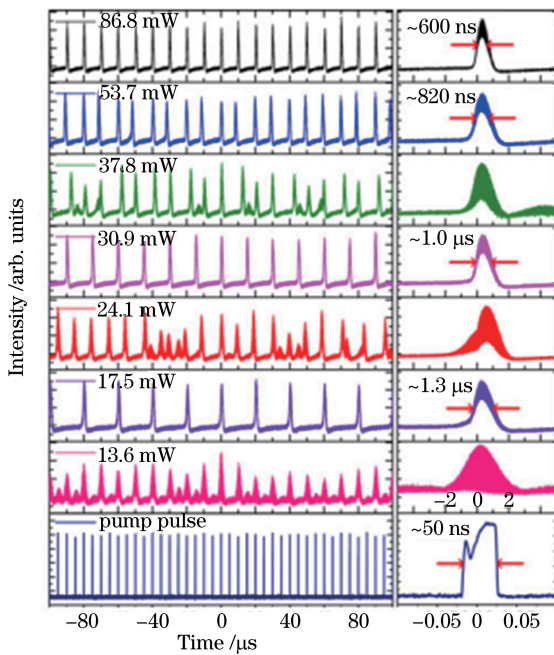


图 26 脉冲宽度为 50 ns、重复频率为 200 kHz 时种子源输出脉冲随抽运功率的变化

Fig. 26 Seed pulse evolution with pump power at the pump pulse width of 50 ns and repetition rate of 200 kHz

目前,用于实现高功率脉冲激光的手段主要有锁模技术、调 Q 技术、增益开关、啁啾脉冲放大技术等,高功率下的受激拉曼散射、受激布里渊散射等非线性效应是限制峰值功率和平均功率进一步提升的主要因素。通过啁啾脉冲放大技术先将脉冲展宽放大再进行压缩,可获得高平均功率和高峰值功率的超短脉冲,但是目前  $2\ \mu\text{m}$  波段的可利用的啁啾脉冲压缩光栅制备工艺复杂,脉宽压缩比较小,难以满足高功率脉冲的放大和压缩。另外,掺铥石英

光纤弯曲损耗较大,易受环境影响,针对  $2\ \mu\text{m}$  波段短脉冲激光器,研制出性能稳定、成本低廉的全保偏结构光学元器件,才能获得高环境稳定性的高功率超短脉冲输出。

#### 4 结束语

本文介绍了掺铥石英光纤的制备,分析了掺铥石英光纤目前的瓶颈,即抽运吸收效率不高,并从提高掺杂浓度和设计新型结构光纤两方面总结了优化方案;梳理了国内外 TDF 激光器的发展历程,从连续激光和脉冲激光两方面总结了近十年来的一些优秀研究成果。高功率掺铥光纤激光器目前的主要瓶颈在于  $793\ \text{nm}$  抽运波段较高的量子亏损和光纤中热累积共同导致的低效率,以及窄线宽掺铥光纤激光器对提高掺铥光纤掺杂浓度的进一步需求<sup>[49]</sup>。

为了进一步提高掺铥光纤激光器的输出功率,可以通过以下三个方面进行优化和调整。1) 采用新型结构的掺铥光纤,如三包层结构光纤,通过在纤芯相邻区域增加一层内包层,不仅能够进一步提高纤芯的掺杂浓度,同时还能保持与双包层光纤纤芯相同的数值孔径,以达到进一步提高掺铥光纤吸收系数的目的;大模场掺铥光子晶体光纤,通过调整包层中空气孔大小以及占空比来改变光纤在  $2000\ \text{nm}$  处的色散以及非线性系数,不仅能够提高非线性阈值,以获得更高峰值功率的脉冲输出,还能够保持激光的单模传输,以保证高的光束质量。2) 采用同带抽运、混合抽运等高效抽运方式。与直接用 LD 抽运不同,同带抽运一般采用激光器进行二次抽运,激光器的输出尾纤纤芯通常比目前商用的多模 LD 尾纤纤芯小一个量级,因而可大大提高抽运亮度,从而

增加了可注入双包层光纤的抽运光功率;采用与激光波长更为接近的抽运光可降低量子亏损,减轻光纤内的热负载<sup>[50]</sup>,从而提高激光器的效率。另外,基于 MOPA 结构的特点,可用窄线宽、低功率、光束质量优良的种子源经过放大得到高功率窄线宽输出。3) 通过组束的方法进一步提高输出功率。目前, TDF 激光器的平均输出功率已达到百瓦级水平,通过改善掺铥石英光纤性能参数,优化 TDF 激光器结构,下一步要在千瓦级的输出上继续扩展,实现高功率窄线宽低噪声的连续激光。

脉冲激光方面,主要待解决的问题在于高峰值功率下的非线性效应,环境稳定性较差,难以实现自启动,锁模元件成本较高,激光器系统全光纤化程度不高等。利用啁啾脉冲放大技术可以较好地解决非线性效应问题,基于此技术,目前国内外均有峰值功率达到兆瓦级成果的报道。另外,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)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<sup>[51]</sup>,给高功率掺铥超短脉冲光纤激光器的发展带来了更多发展思路。

### 参 考 文 献

- [1] Liu J, Liu K, Tan F Z, *et al.* Hundred-watt-level all-fiber thulium-doped fiber laser and superfluorescent source [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0402005.  
刘江, 刘昆, 谭方舟, 等. 百瓦级全光纤掺铥光纤激光器及超荧光光源[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402005.
- [2] Liang S, Xu L, Fu Q, *et al.* Highpeak power picosecond pulses from an all-fiber master oscillator power amplifier seeded by a 1.95  $\mu\text{m}$  gain-switched diode [C]. Advanced Solid State Lasers, 2017: ATh3A.4.
- [3] Zhang X J, Duan Y F, Zhao S, *et al.* Experimental study on high efficient all-fiber lasers at 1018 nm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0414002.  
张秀娟, 段云锋, 赵水, 等. 高效率 1018 nm 全光纤激光器实验研究[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0414002.
- [4] Sims R A, Kadwani P, Shah A S, *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.
- [5] Li Q, He B Y. Analysis of laser injury on eyes[C]//

The 14th National Seminar on Infrared Heating and Infrared Medical Development Set of Papers and Abstraction, 2013.

李强, 何炳阳. 激光对人眼的损伤分析[C]//全国第十四届红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集, 2013.

- [6] Xia S J. Two-micron (thulium) laser resection of the prostate-tangerine technique: a new method for BPH treatment[J]. Asian Journal of Andrology, 2009, 11(3): 277-281.
- [7] Yang K, Ren Q S, Wei S G, *et al.* Application of 2  $\mu\text{m}$  Tm laser on biomedicine [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(9): 52-56.  
杨昆, 任秋实, 魏石刚, 等. 2  $\mu\text{m}$  铥(Tm)激光器在生物医学中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 52-56.
- [8] Lubatschowski H, Fiebig M, Fuhrberg P, *et al.* Characterization of tissue processing with a continuous-wave Tm : YAG laser at 2.06- $\mu\text{m}$  wavelength[C]. SPIE, 1998, 3254: 249-253.
- [9] Wilson C R, Hardy L A, Irby P B, *et al.* Thulium fiber laser damage to the ureter [C]. SPIE, 2015, 9542: 95420C.
- [10] Leindecker N, Marandi A, Byer R L, *et al.* Octave-spanning ultrafast OPO with 2.6-6.1  $\mu\text{m}$  instantaneous bandwidth pumped by femtosecond Tm-fiber laser [J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7046-7053.
- [11] Elder I. High average power thulium fiber laser pumped mid-IR source [C]. SPIE. 2007, 6738: 673804.
- [12] Kieleck C, Berrou A, Donelan B, *et al.* 6.5 W ZnGeP<sub>2</sub> OPO directly pumped by a Q-switched Tm<sup>3+</sup>-doped single-oscillator fiber laser [J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1101-1104.
- [13] Gebhardt M, Gaida C, Kadwani P, *et al.* High peak-power mid-infrared ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by a Tm: fiber master oscillator power amplifier system[J]. Optics Letters, 2014, 39(5): 1212-1215.
- [14] Liu K, Liu J, Shi H, *et al.* High power mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode ZBLAN fiber with up to 21.8 W average output power [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24384-24391.
- [15] Swiderski J, Michalska M, Maze G. Mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a gain-switched mode-locked Tm-doped fiber laser and amplifier system [J]. Optics Express, 2013, 21

- (7): 7851-7857.
- [16] Honea E, Savage-Leuchs M, Bowers M S, *et al.* Pulsed blue laser source based on frequency quadrupling of a thulium fiber laser[C]. SPIE, 2013, 8601: 860111.
- [17] Hanna D C, Jauncey I M, Percival R M, *et al.* Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 1988, 24(19): 1222-1223.
- [18] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, *et al.* 1-kW, all-glass Tm: fiber laser [C]. SPIE, 2010, 7580: 758016.
- [19] Gaida C, Stutzki F, Gebhardt M, *et al.* 200 MW peak power from a Tm-doped fiber CPA system[C]. Advanced Solid State Lasers, Optical Society of America, 2014: ATu5A.2.
- [20] 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.
- [21] Shardlow P C, Jain D, Parker R, *et al.* Optimizing Tm-doped silica fibres for high lasing efficiency[C]. The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Optical Society of America, 2015: CJ\_14\_3.
- [22] Feng G F, Yang J Y, Ma J, *et al.* Fabrication of double-clad thulium doped fiber [J]. Modern Transmission, 2013(4): 59-61.  
冯高峰, 杨军勇, 马静, 等. 双包层掺铥光纤的研制[J]. 现代传输, 2013(4): 59-61.
- [23] Lee Y W, Ling H Y, Lin Y H, *et al.* Heavily Tm<sup>3+</sup>-doped silicate fiber with high gain per unit length[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(3): 549-557.
- [24] Geng J, Wang Q, Luo T, *et al.* Single-frequency narrow-linewidth Tm-doped fiber laser using silicate glass fiber[J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3493-3495.
- [25] Darwich D, Dauliat R, Jamier R, *et al.* 50.4% slope efficiency thulium-doped large-mode-area fiber laser fabricated by powder technology[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 384-387.
- [26] Mortensen N A. Effective area of photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2002, 10(7): 341-348.
- [27] Kadwani P, Modsching N, Sims R A, *et al.* Q-switched thulium-doped photonic crystal fiber laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(10): 1664-1666.
- [28] Gaida C, Gebhardt M, Kadwani P, *et al.* Amplification of ns-pulses beyond 1 MW-peak power in Tm<sup>3+</sup>-doped photonic crystal fiber rod[C]. 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), IEEE, 2013: 1-2.
- [29] Slobodtchikov E, Moulton P F, Frith G. Efficient, high-power, Tm-doped silica fiber laser [C]. Advanced Solid-State Photonics, Optical Society of America, 2007: MF2.
- [30] Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, *et al.* 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format [C]. European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference, CLEOE-IQEC 2007, IEEE, 2007.
- [31] Moulton P F, Rines G A, Slobodtchikov E V, *et al.* Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 85-92.
- [32] Ying-Bin X, Lei L, Fan B, *et al.* Fabrication of Tm-doped fibers for high power and 121 W output all-fiber Tm-doped fiber laser [J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(3): 034204.
- [33] Hu Z Y, Yan P, Xiao Q R, *et al.* 227-W output all-fiberized Tm-doped fiber laser at 1908 nm [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(10): 104206.
- [34] Walbaum T, Heinzig M, Schreiber T, *et al.* Monolithic thulium fiber laser with 567 W output power at 1970 nm [J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2632-2635.
- [35] McComb T S, Sims R A, Willis C C C, *et al.* High-power widely tunable thulium fiber lasers [J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6236-6242.
- [36] Creeden D, Johnson B R, Rines G A, *et al.* High power resonant pumping of Tm-doped fiber amplifiers in core- and cladding-pumped configurations[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 29067-29080.
- [37] Liu J, Shi H, Liu K, *et al.* 210 W single-frequency, single-polarization, thulium-doped all-fiber MOPA [J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13572-13578.
- [38] Wang X, Jin X, Wu W, *et al.* 310-W single frequency Tm-doped all-fiber MOPA [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 677-680.
- [39] Yang C, Ju Y, Yao B, *et al.* High-power Tm<sup>3+</sup>-doped all-fiber laser operating at 1908 nm by a master oscillator power amplifier configuration with narrow spectral linewidth[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(6): 061403.
- [40] Anderson B, Flores A, Grosek J, *et al.* High power Tm-doped all-fiber amplifier at 2130 nm[C]. CLEO:

- Science and Innovations, Optical Society of America, 2017: SM1L.3.
- [41] Yao W, Shao Z, Shen C, *et al.* 400 W all-fiberized Tm-doped MOPA at 1941 nm with narrow spectral linewidth [C]. Laser Applications Conference, Optical Society of America, 2017: JTu2A.33.
- [42] Liu J, Tan F Z, Liu C, *et al.* Progress on high-power ultrashort-pulsed thulium-doped fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201003.  
刘江, 谭方舟, 刘晨, 等. 高功率超短脉冲掺铥光纤激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201003.
- [43] Gaida C, Gebhardt M, Kadwani P, *et al.* Amplification of ns-pulses beyond 1 MW-peak power in Tm<sup>3+</sup>-doped photonic crystal fiber rod [C]. 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), IEEE, 2013.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Gebhardt M, Gaida C, Stutzki F, *et al.* High-average power, 4 GW pulses with sub-8 optical cycles from a Tm-doped fiber laser driven nonlinear pulse compression stage [C]. SPIE, 2017, 10083: 100830B.
- [47] Liu J, Liu C, Shi H X, *et al.* 203 W all-polarization-maintaining picosecond thulium-doped all-fiber laser [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(19): 194208.  
刘江, 刘晨, 师红星, 等. 203 W 全光纤全保偏结构皮秒掺铥光纤激光器 [J]. 物理学报, 2016, 65(19): 194208.
- [48] Ouyang D, Zhao J, Zheng Z, *et al.* Repetition-rate-switchable and self mode-locked pulses generation from a gain-switched thulium-doped fiber laser and their amplification properties [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1503710.
- [49] Yang C S, Chen D, Zhao Q L, *et al.* Research progress of 2.0  $\mu\text{m}$ -band Tm-doped continuous wave single-frequency fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201006.  
杨昌盛, 陈丹, 赵齐来, 等. 2.0  $\mu\text{m}$  波段掺铥连续单频光纤激光器的研究进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201006.
- [50] Hu Z T, He B, Zhou J, *et al.* Research progress in thermal effect of high power fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080002.  
胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080002.
- [51] Wang P, Liu J. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber lasers at 2  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0601002.  
王璞, 刘江. 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601002.