

## 激光与光电子学进展

## 高功率连续掺铥光纤激光器的研究进展

董亚举, 白雪涛, 郑义\*

北京交通大学物理科学与工程学院, 北京 100044

**摘要** 近年来, 掺铥光纤激光器凭借其结构紧凑、光束质量好、量子效率高等优势得到了越来越多的关注。其中, 高功率连续掺铥光纤激光器已经在医疗、军事安全、空间通信、大气污染检测、材料加工等众多领域有了重要应用。过去近 20 年时间里, 高功率连续掺铥光纤激光器发展十分迅速, 目前最高输出功率已达千瓦量级。本文从振荡器和放大系统两个方面对以往报道的高功率连续掺铥光纤激光器进行了回顾, 并给出了关于未来发展趋势的一些看法。

**关键词** 光纤激光器; 连续激光; 高功率; 掺铥

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222806

## Research Progress of High Power Continuous Wave Thulium-Doped Fiber Laser

Dong Yaju, Bai Xuetao, Zheng Yi\*

*School of Physical Sciences and Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

**Abstract** In recent years, Thulium-doped fiber laser has attracted more and more attention because of its compact structure, near diffraction limit beam quality, and high quantum efficiency. Among these laser sources, high power continuous wave (CW) thulium-doped fiber lasers have been widely used in many fields, such as medical treatment, military security, space communication, air pollution detection, material processing, and so on. In the past 20 years, high power CW thulium-doped fiber lasers have developed rapidly, and the highest output power has reached kilowatt level. In this paper, the high power CW thulium-doped fiber lasers reported in the past are reviewed from the aspects of oscillator and amplification system, and some views on the future development trend are given.

**Key words** fiber laser; continuous wave laser; high power; thulium-doped

## 1 引言

掺铥光纤激光器(TDFL)除了具有高输出功率、接近衍射极限的高光束质量、结构紧凑、良好的稳定性等光纤激光器的共有优势之外,还具有自身特有的优点。首先,掺铥光纤激光器具有非常宽的增益谱,其工作波长从 $1.6\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 可以覆盖将近500 nm的带宽<sup>[1]</sup>。其次,由于铥离子特殊的能级结构,铥离子间会发生交叉弛豫现象,因此理论上以铥离子为掺杂离子的激光器的量子效率可达200%<sup>[2]</sup>。掺铥光纤激光器的工作波长在 $2\ \mu\text{m}$ 附近,因处于这个特殊的波长范围,掺铥光纤激光器在医疗、军事安全、大气检测、材料加工等诸多领域都有着十分广阔的

应用。在医学领域,由于水分子在1940 nm附近存在强烈的吸收峰<sup>[3-4]</sup>,该波段的掺铥光纤激光光源对生物组织的穿透深度较浅,因此掺铥光纤激光器被广泛应用在非侵入式手术等医疗领域<sup>[5-7]</sup>。又因为眼睛对 $2\ \mu\text{m}$ 激光的损伤阈值更高<sup>[8]</sup>,所以相比于短波长激光, $2\ \mu\text{m}$ 是更加安全的波长。 $2\ \mu\text{m}$ 激光在大气中传输损耗小、抗干扰能力强、探测精度高。因此,高功率的掺铥光纤激光器还被广泛应用在空间遥感领域<sup>[9-11]</sup>。高分子材料通常在中红外波段具有强吸收特性,因此,高功率的掺铥光纤激光器也非常适合应用于高分子材料的直接切割和焊接。除此之外,利用掺铥光纤激光器泵浦掺钕光纤激光器可以获得波长更长的激光输出<sup>[12]</sup>,掺铥光纤激光器也是获得3~

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-11-23; 录用日期: 2022-12-19; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(61735005,61925010)、北京市自然科学基金(4182054,4212052)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(2021RC206)、高端外国专家引进计划(G2022104010L)

通信作者: \*yizheng@bjtu.edu.cn

5  $\mu\text{m}$  中红外激光的理想泵浦源<sup>[13-14]</sup>。正是由于掺铥光纤激光器有着广泛的应用场景和极高的应用价值,高功率连续掺铥光纤激光器是激光领域研究的热点。以下将从振荡器和放大系统两个方面对过去近 20 年报道的高功率连续掺铥光纤激光器进行详细的综述,并从中总结出高功率连续掺铥光纤激光器的发展趋势。

## 2 铥离子的光谱特性

铥的原子序数为 69,属于镧系稀土元素。铥离子的能级结构如图 1<sup>[1]</sup>所示,其能级十分丰富,因此利用不同的跃迁方式可以实现多个波段的激光振荡。其中,铥离子由 ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ 的跃迁便可产生 2  $\mu\text{m}$  波段附近的激光输出。

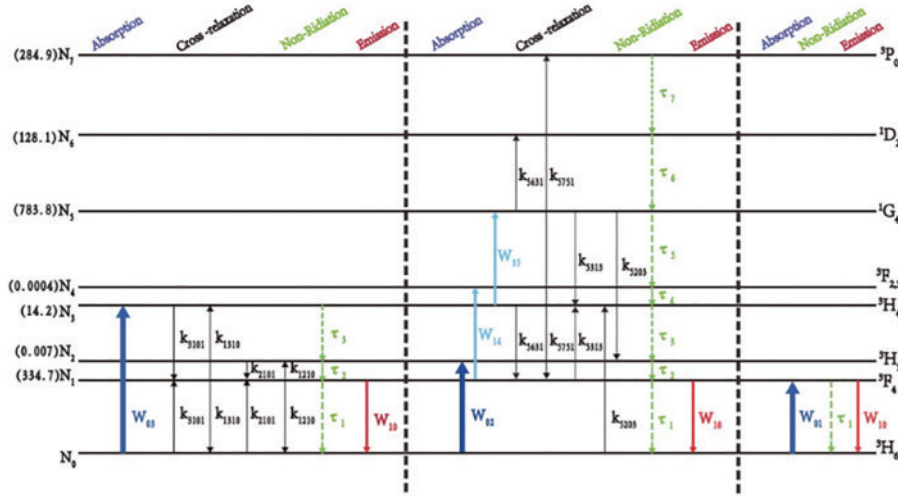


图 1 铥离子能级结构图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Energy level diagram of Tm<sup>3+</sup><sup>[1]</sup>

铥离子在石英基质中的吸收谱如图 2<sup>[1]</sup>所示。可以看出,在石英光纤中铥离子在 680、790、1220、1630 nm 附近存在着强烈的吸收。其中 790 nm 吸收峰

对应 ${}^3\text{H}_6$ 和 ${}^3\text{H}_4$ 两个能级,波长在 790 nm 附近的泵浦源可以将铥离子从 ${}^3\text{H}_6$ 能级抽运至 ${}^3\text{H}_4$ 能级,之后铥离子会以辐射跃迁和非辐射跃迁的形式跃迁至 ${}^3\text{H}_5$ 能级,由

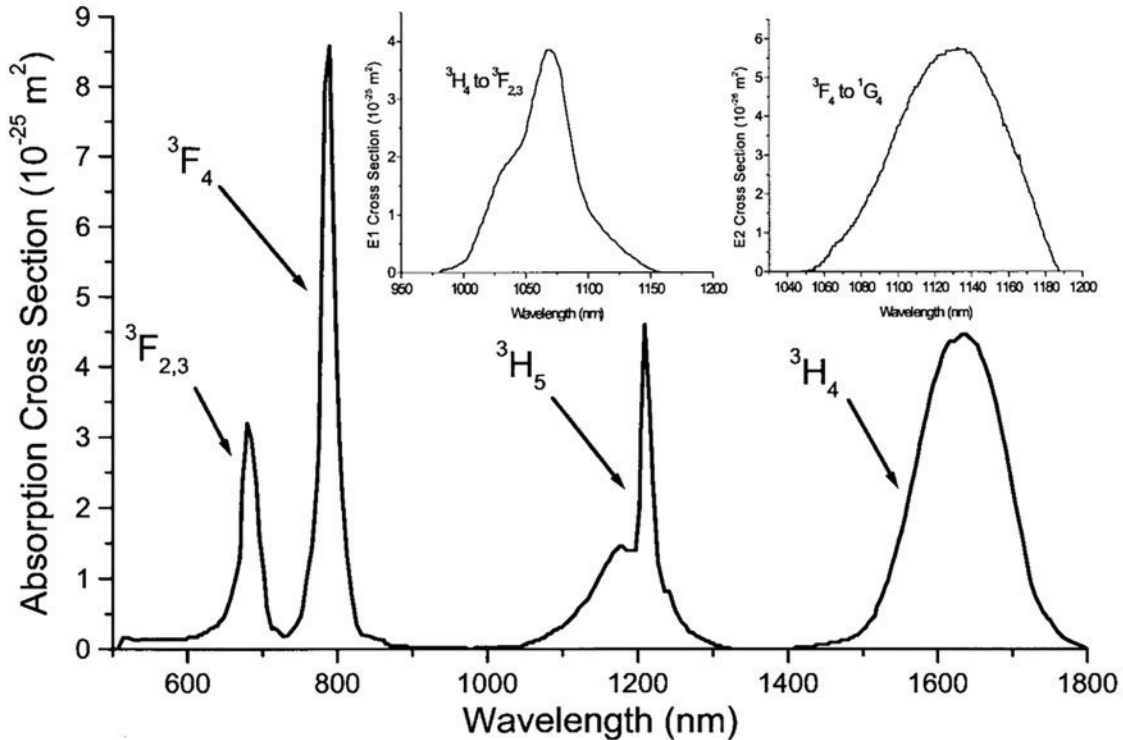


图 2 铥离子在硅基玻璃中的吸收光谱<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Absorption spectrum of thulium within silica glass<sup>[1]</sup>

于 ${}^3\text{H}_5$ 能级寿命非常短,所以铥离子会迅速跃迁至 ${}^3\text{F}_4$ 能级,并最终在 ${}^3\text{F}_4$ 和 ${}^3\text{H}_6$ 两个能级间形成粒子数反转,当达到激光器阈值后,便会产生 $2\ \mu\text{m}$ 附近的激光。近年来,由于 $793\ \text{nm}$ 的高功率半导体激光器(LD)日益成熟,所以 $793\ \text{nm}$  LD成为高功率连续掺铥激光器最常用的泵浦源。除了选择 $793\ \text{nm}$  LD作为泵浦源外,同样可以利用 $1220\ \text{nm}$ 和 $1630\ \text{nm}$ 波长附近的光源来激发铥离子。前者通常采用中心波长在 $1064\ \text{nm}$ 的掺镱光纤激光器作为泵浦光源,该波长的光源能够将铥离子从 ${}^3\text{H}_6$ 能级抽运至 ${}^3\text{H}_5$ 能级,之后铥离子会迅速从 ${}^3\text{H}_5$ 能级跃迁至 ${}^3\text{F}_4$ 能级,并在 ${}^3\text{F}_4$ 和 ${}^3\text{H}_6$ 两个能级间形成粒子数反转并最终输出 $2\ \mu\text{m}$ 激光。而后者一般会选择掺镱光纤激光器或掺铥光纤激光器作为泵浦源,此时铥离子会被直接激发到激光上能级,即 ${}^3\text{F}_4$ 能级,并在 ${}^3\text{F}_4$ 和 ${}^3\text{H}_6$ 两个能级间形成粒子数反转,在这样的泵浦方式下,泵浦上能级和下能级与激光上能级和下能级相同,因此也被称为同带泵浦。

掺铥光纤激光器的激光上能级和下能级分别是 ${}^3\text{F}_4$ 和 ${}^3\text{H}_6$ ,铥离子在硅基玻璃中的发射光谱如图3<sup>[1]</sup>所示。可以看出,铥离子在 $2\ \mu\text{m}$ 波段的发射谱的宽度近 $500\ \text{nm}$ 。

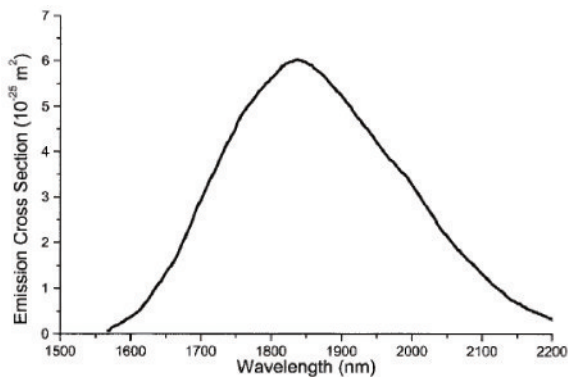


图3 铥离子在硅基玻璃中的发射光谱<sup>[1]</sup>

Fig. 3 Emission spectrum of thulium within silica glass<sup>[1]</sup>

### 3 高功率连续掺铥光纤激光器的研究进展

#### 3.1 振荡器

早期的掺铥光纤激光器的泵浦源一般采用的是低功率的 $1064\ \text{nm}$ 的YAG激光器或 $790\ \text{nm}$ 的染料激光器<sup>[15]</sup>,由于泵浦源功率较低且受限于当时落后的掺杂光纤制备工艺,所以掺铥光纤激光器的输出功率仅仅在瓦量级。随着双包层泵浦技术的提出以及高功率半导体激光器技术的日益成熟,掺铥光纤激光器的输出功率也在不断提升。

1998年,英国曼彻斯特大学的Jackson等<sup>[16]</sup>利用 $790\ \text{nm}$ 的半导体激光器作为泵浦源,采用包层泵浦技术搭建起空间结构的连续可调谐掺铥光纤激光器,最

大输出功率 $5.4\ \text{W}$ ,斜效率 $31\%$ ,光光效率 $22\%$ ,通过调节光纤长度输出波长在 $1880\sim 2033\ \text{nm}$ 范围内可调,其中 $1940\sim 2010\ \text{nm}$ 波长范围内输出功率均超过 $4\ \text{W}$ 。2004年,Frith等<sup>[17]</sup>采用光纤芯径 $25\ \mu\text{m}$ 、包层直径 $400\ \mu\text{m}$ 的掺铥光纤搭建了空间结构的掺铥光纤激光器,工作波长为 $2\ \mu\text{m}$ ,输出功率达到 $118\ \text{W}$ ,斜效率为 $54\%$ ,量子效率达到 $120\%$ 。2006年,英国南安普敦大学的Shen等<sup>[18]</sup>利用 $1565\ \text{nm}$ 的铒镱共掺光纤激光器泵浦掺铥光纤激光器,分别采用包层泵浦和纤芯泵浦两种方式获得了宽调谐范围的连续掺铥光纤激光器,在包层泵浦方式下,通过在腔内添加一个衍射光栅即可实现 $1859\sim 2061\ \text{nm}$ 范围内调谐,其中在 $1941\ \text{nm}$ 波长处获得 $17.4\ \text{W}$ 的最大输出功率,相对于入射的泵浦功率,输出激光的斜效率为 $50\%$ 。纤芯泵浦方式下,在 $1827\ \text{nm}$ 波长处获得 $8.4\ \text{W}$ 的输出功率,相对于吸收的泵浦功率斜效率为 $46\%$ ,并且波长在 $1723\sim 1973\ \text{nm}$ 范围内可调谐。

2007年,Wu等<sup>[19]</sup>以 $20\ \text{cm}$ 长的掺铥锆酸盐石英单模光纤为增益光纤,搭建起空间结构的掺铥光纤激光器,实验装置如图4所示。单端泵浦方式下,在 $1900\ \text{nm}$ 处获得了 $64\ \text{W}$ 的连续激光输出,斜效率为 $68\%$ ,量子效率达 $180\%$ 。为了获得更高的输出功率,他们又在谐振腔的另一端通过空间透镜耦合的方式增加了泵浦源从而实现双端泵浦,并使用了 $40\ \text{cm}$ 长的增益光纤,最终获得了 $104\ \text{W}$ 的 $1900\ \text{nm}$ 连续激光输出。

同年,IPG公司以 $1567\ \text{nm}$ 的掺铒光纤激光器作为泵浦源,利用 $8\ \text{m}$ 长的低浓度掺铥光纤和光纤布拉格光栅(FBG)搭建起了全光纤结构的单模掺铥光纤激光器,获得了 $415\ \text{W}$ 的单模激光输出,输出功率仅受限于泵浦功率。激光波长为 $1940\ \text{nm}$ ,光束质量因子 $M^2\leq 1.1$ ,这是当时报道的单模掺铥激光获得的最高输出功率<sup>[20]</sup>。对输出光谱进行分析,可以发现,随着输出功率的提升,谱线宽度维持在 $1\ \text{nm}$ 左右但是带有一定的漂移,这主要是因为功率提升引起系统温度升高,进而导致FBG受到一定程度的影响。因此, $2\ \mu\text{m}$ 光纤无源器件的稳定性也是影响功率进一步提升以及激光器输出稳定性的重要因素之一。为了消除这种影响,可以从提升光纤器件的稳定性和优化系统结构进行有效散热等方面考虑。

2008年,Tang等<sup>[21]</sup>报道了一种通过改变输出镜反射率和掺铥光纤长度来改变输出波长的线形腔结构可调谐掺铥光纤激光器,改变输出镜反射率可实现 $1949\sim 2055\ \text{nm}$ 范围内波长调谐,并在 $1949\ \text{nm}$ 处获得 $32\ \text{W}$ 最大输出功率,斜效率约为 $70\%$ 。2009年,哈尔滨工业大学Zhang等<sup>[22]</sup>报道了全光纤线形腔结构的掺铥光纤激光器,该激光器由一个反射型光纤布拉格光栅和掺铥光纤端面形成的菲涅耳反射构成谐振腔,采用 $793\ \text{nm}$  LD泵浦,其中掺铥光纤纤芯直径为 $25\ \mu\text{m}$ 、

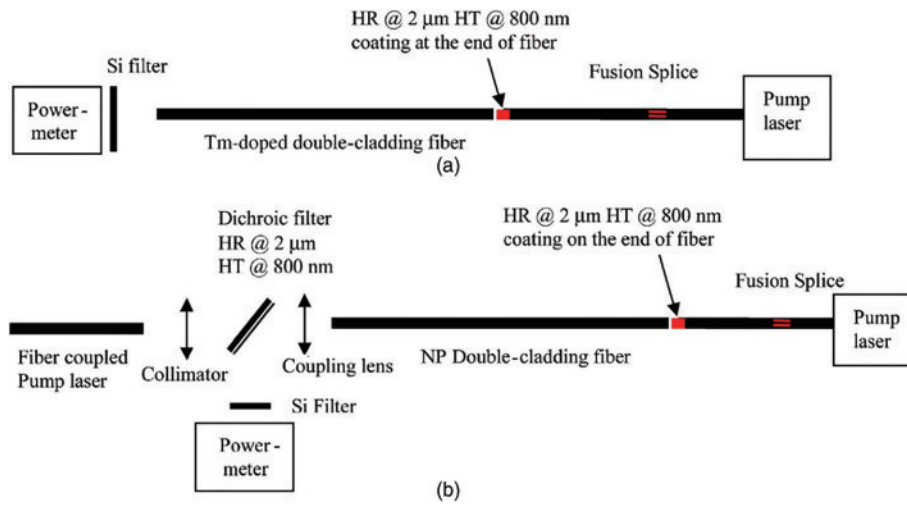


图 4 掺铥锗酸盐光纤激光器实验装置图。(a) 单端泵浦装置图；(b) 双端泵浦装置图<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Experiment setup of thulium-doped germanate fiber laser. (a) One-end pump configuration; (b) dual-end pump configuration<sup>[19]</sup>

内包层直径为 250  $\mu\text{m}$ ，增益光纤所用长度为 3.2 m，光纤的主要部分放置在水中进行散热，最终获得 39.4 W 的输出功率。除此之外，还对比了 FBG 和二向色镜分别作为高反射耦合器时所得到的输出功率和光谱特性，使用 FBG 的全光纤结构的阈值功率和斜效率分别为 6.8 W 和 34%，而使用二向色镜的方案阈值功率和斜效率分别为 4.4 W 和 40.4%。可以看出，全光纤结构的斜效率更低而阈值功率更高。这主要是因为 1940 nm 波长处二向色镜比 FBG 的反射率更高以及泵浦光在光纤熔接点处有损耗。在高功率运转时，全光纤结构的输出光谱出现了多峰值，但总的线宽小于 2 nm，比二向色镜方案的线宽更窄。由此可见，相比

于空间结构，全光纤结构在一开始受限于光纤器件的性能和熔接质量，其优势并不明显。随着光纤器件制备工艺和熔接水平的不断提升，全光纤结构逐渐展现出巨大的优势。

同年，Moulton 等<sup>[23]</sup>报道了空间结构的高功率掺铥光纤激光器，他们用 793 nm LD 泵浦纤芯直径 25  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 (NA) 0.08 的掺铥光纤获得了 300 W 的单模激光输出，斜效率为 61.8%， $M^2$  为 1.2。之后又以相似的结构，使用纤芯直径 40  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.2 的大模场光纤获得了 885 W 的 2040 nm 多模激光输出，斜效率为 49.2%，这是单个掺铥光纤振荡器所获得的最大输出功率，实验装置如图 5 所示。

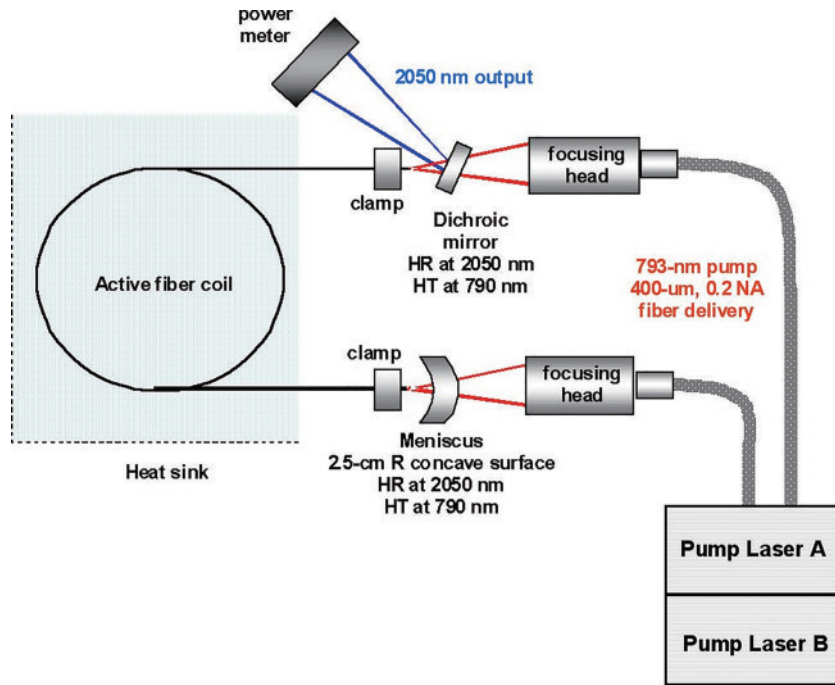


图 5 高功率掺铥光纤激光器实验图<sup>[23]</sup>

Fig. 5 Experimental diagram of high power thulium-doped fiber laser<sup>[23]</sup>

2012年,上海交通大学 Tang 等<sup>[24]</sup>报道了全光纤线形腔结构的高功率窄线宽掺铥光纤激光器,该激光器由一对反射率分别为 98.7% 和 10% 的光纤布拉格光栅构成谐振腔,光栅的中心波长为 2019.8 nm。采用 Nufern 公司纤芯和包层尺寸分别为 25  $\mu\text{m}$  和 400  $\mu\text{m}$  的双包层掺铥石英光纤作为增益介质,并用 6 个高功率 793 nm LD 进行泵浦,获得 137 W 的输出功率,激光波长为 2019 nm,谱线宽度小于 3 nm,斜效率为 62%。

2014年,清华大学 Hu 等<sup>[25]</sup>报道了全光纤线形腔结构的高功率掺铥光纤激光器,该激光器由光纤布拉格光栅和 3 m 长的增益光纤构成,增益光纤纤芯直径为 25  $\mu\text{m}$ 、NA 为 0.09,纤芯截面为圆形,内包层直径为 400  $\mu\text{m}$ 、NA 为 0.46,截面为八边形,在 790 nm 波长处增益光纤的吸收系数为 4 dB/m。高反射率光栅在 1908 nm 处的反射率为 99.7%,低反光栅反射率为 10%。7 个最大输出功率为 70 W 的 790 nm LD 作为泵浦源,最终获得了 227 W 的输出功率,激光波长为 1908 nm,斜效率为 54.3%,光光效率为 51.2%, $M^2$  为 1.56。实验装置如图 6 所示,这是当时所报道的工作

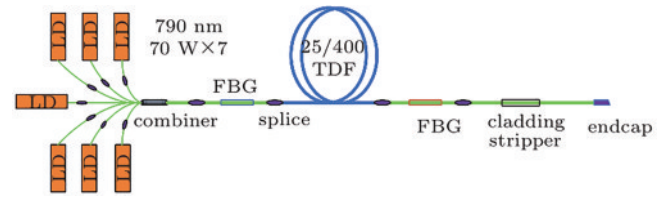


图 6 227 W 掺铥光纤激光器实验图<sup>[25]</sup>

Fig. 6 Experimental diagram of 227 W thulium-doped fiber laser<sup>[25]</sup>

波长在 1908 nm 的掺铥光纤激光器所获得的最高输出功率。

同年,国防科技大学 Wang 等<sup>[26]</sup>采用两个高功率的 1173 nm 拉曼光纤激光器(RFL)为泵浦源,搭建起了全光纤直腔结构的高效率窄线宽掺铥光纤激光器,实验装置如图 7 所示,最终获得 96 W 的输出功率,斜效率为 42%,输出激光波长为 1943.3 nm,3 dB 带宽为 0.1 nm。这是当时首次报道的泵浦波长在 1200 nm 附近输出功率在百瓦量级的掺铥光纤激光器,这也为提高掺铥光纤激光器输出功率提供了一种非常有前景的泵浦方案。

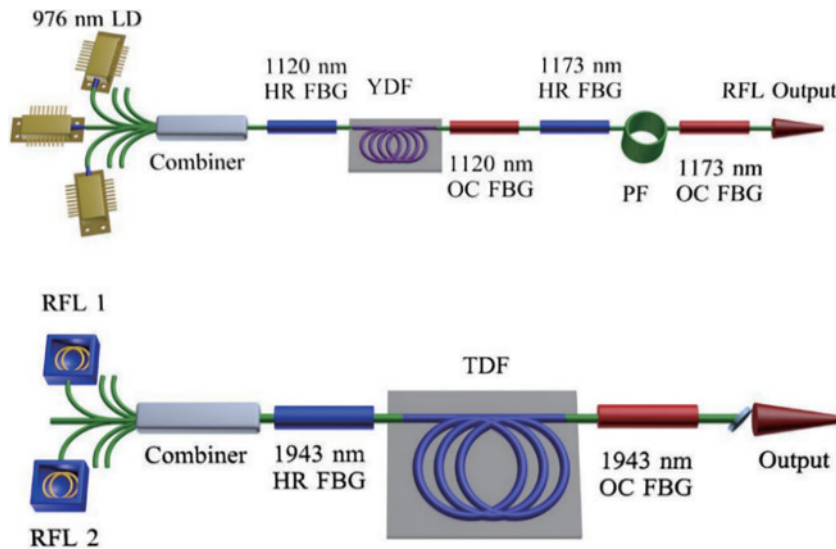


图 7 RFL 泵浦高功率高效率掺铥光纤激光器实验装置图<sup>[26]</sup>

Fig. 7 Experimental diagram of RFL pumped high power and high efficiency thulium-doped fiber laser<sup>[26]</sup>

2015年,华中科技大学 Xing 等<sup>[27]</sup>报道了利用自制的掺铥双包层石英光纤搭建的全光纤线形腔结构的掺铥光纤激光器,所用掺铥光纤横截面为八边形,芯径和内包层直径分别为 25  $\mu\text{m}$  和 250  $\mu\text{m}$ 。采用 3 个高功率 793 nm LD 进行泵浦获得了 121 W 的输出功率,斜效率达 51%,这是首次利用国产掺铥光纤在 1915 nm 波长下获得百瓦量级的输出功率。另外,实验中发现当泵浦功率略高于 260 W 时,增益光纤的温度迅速升高至 60  $^{\circ}\text{C}$ ,严重影响了输出功率的进一步提升,进一步分析发现,沿着增益光纤径向和轴向的温度分布具有很大的不同:温度沿着轴向明显下降但温度梯度较小;径向

温度也有明显下降但是温度梯度巨大。这意味着增益光纤中的热量主要是沿着径向流动。因此,增大增益光纤的内包层直径可以获得更好的散热效果,这也为掺铥光纤激光器的热管理和功率提升提供了思路。

2016年,德国夫琅禾费应用光学与精密工程研究所的 Walbaum 等<sup>[28]</sup>采用全光纤线形腔结构,利用 4 台 300 W 的 793 nm LD 泵浦掺铥光纤,通过提高光纤熔接质量以及采用直接水冷的方式获得了 567 W 的多模激光输出,激光波长为 1970 nm,斜效率为 49.4%, $M^2$  为 2.6。实验装置如图 8 所示。这是当时所报道的单个掺铥光纤振荡器所获得的最高输出功率。

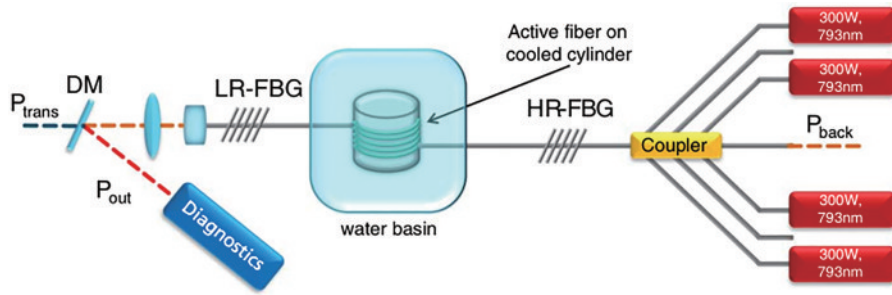


图 8 567 W 直腔结构掺铥光纤激光器装置图<sup>[28]</sup>

Fig. 8 Device diagram of 567 W thulium-doped fiber laser with linear cavity structure<sup>[28]</sup>

掺铥光纤振荡器的研究进展如表 1 所示,其中, $\lambda$  为泵浦波长, $P$  为激光输出功率。由于早期的光纤耦合器件制作水平较低,不足以支撑高功率激光输出,所以早期的掺铥光纤振荡器一般采用空间结构<sup>[16-19]</sup>。但是,空间结构存在激光器体积大、易受外界环境影响、耦合效率低等弊端,随着高功率光纤耦合器件制备水平的提升,结构紧凑、耦合效率高的全光纤结构成为了研究的热点<sup>[24-28]</sup>。此外,光纤振荡器大多为多纵模输出,这主要是因为铥离子具有很宽的发射谱,可以通过在谐振腔内增加合适的波长选择元件得到不同的波长输出,由于不同波长的增益系数不同,可以挑选出最佳波长以获得最大输出功率。另一方面,还可以对振荡器的输出波长范围进行研究。从表 1 可以看出,对于泵浦源的选择,采用最多的是波长在 793 nm 附近的半

导体激光器,793 nm LD 作为泵浦源主要优势在于其特有的交叉弛豫效应,量子效率理论上可以达到 200%,这大大提高了掺铥光纤的斜率效率进而提升了整个激光器的工作效率。另外,高功率的 793 nm LD 技术成熟、易于获得、成本低。除了 793 nm LD 外,工作波长在 1173 nm 的拉曼光纤激光器以及波长为 1565 nm 附近的掺铥光纤激光器或铥镱共掺光纤激光器也可以用作高功率掺铥光纤激光器的泵浦源,长波长泵浦源的优势在于其量子亏损低,可以提高激光器的斜率效率,且系统产热少,减轻了热管理的压力,有利于功率的进一步提升。但工作波长位于 1220 nm 和 1630 nm 吸收峰附近的高功率激光光源难以获得,且成本高,所以此种泵浦源较少采用。

表 1 高功率连续掺铥光纤振荡器的研究进展

Table 1 Research progress of high power continuous wave thulium-doped fiber oscillators

Author	Pump wavelength $\lambda$ /nm	System structure	Output power $P$ /W	Year
Jackson <i>et al.</i> <sup>[16]</sup>	790	Space structure	5.4	1998
Frith <i>et al.</i> <sup>[17]</sup>	793	Space structure	118	2004
Shen <i>et al.</i> <sup>[18]</sup>	1565	Space structure	19.2	2006
Wu <i>et al.</i> <sup>[19]</sup>	800	Space structure	104	2007
IPG <sup>[20]</sup>	1567	All fiber linear cavity	415	2007
Tang <i>et al.</i> <sup>[21]</sup>	790	Space structure	32	2008
Zhang <i>et al.</i> <sup>[22]</sup>	793	All fiber linear cavity	39.4	2009
Moulton <i>et al.</i> <sup>[23]</sup>	790	Space structure	885	2009
Tang <i>et al.</i> <sup>[24]</sup>	793	All fiber linear cavity	137	2012
Hu <i>et al.</i> <sup>[25]</sup>	790	All fiber linear cavity	227	2014
Wang <i>et al.</i> <sup>[26]</sup>	1173	All fiber linear cavity	96	2014
Xing <i>et al.</i> <sup>[27]</sup>	793	All fiber linear cavity	121	2015
Walbaum <i>et al.</i> <sup>[28]</sup>	793	All fiber linear cavity	567	2016

### 3.2 放大系统

单个掺铥光纤振荡器可以获得百瓦级的输出功率,但是由于在高功率工作时激光器热效应严重,制约了功率的进一步提升,因此,研究人员提出了主振荡功率放大(MOPA)技术,MOPA 结构包含振荡级和多级放大装置,其中振荡级提供低功率、高光束质量的种子光,并经过放大级放大后便可得到高功率、高光束质量的激光。

2008 年,英国南安普敦大学 Pearson 等<sup>[29]</sup>报道了

基于 MOPA 结构的高功率可调谐线偏振掺铥光纤激光器,放大级所用增益光纤为 3.7 m 长的掺铥保偏光纤,在 795 nm 波长下光纤的吸收系数为 4.5 dB/m,调谐范围 1820~2010 nm 由种子光决定,输出功率 100 W,且输出功率仅受限于泵浦功率。

2009 年,Goodno 等<sup>[30]</sup>报道了基于空间 MOPA 结构的单频单模高功率掺铥光纤激光器。该系统采用 2040 nm 的窄线宽分布反馈式(DFB)激光器作为种子源,放大系统包含三级预放大和一级主放大,预放大级

为全光纤结构,主放大级采用 3.1 m 掺铥光纤和 790 nm LD 双端泵浦方式。种子光经预放大级功率提升至 16 W,并由主放大级放大后得到 608 W 单频单模

的激光输出,激光波长为 2040 nm,线宽小于 5 MHz,  $M^2=1.05$ 。实验装置如图 9 所示,这是当时单频单模掺铥光纤激光器达到的最高输出功率。

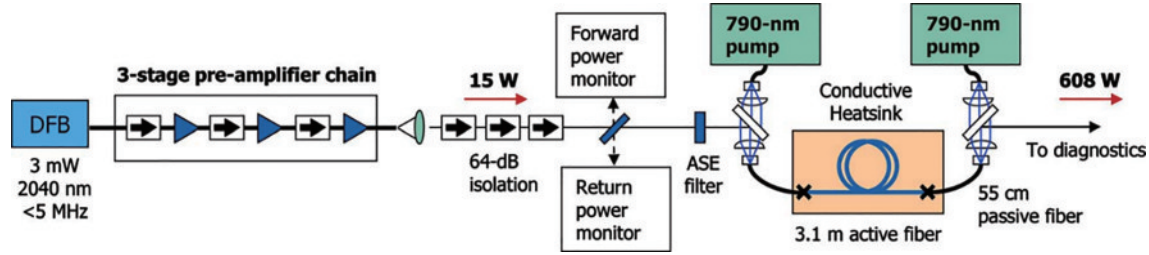


图 9 608 W 单模单频 MOPA 结构掺铥光纤激光器装置图<sup>[30]</sup>

Fig. 9 Device diagram of 608 W single mode single frequency MOPA structure thulium-doped fiber laser<sup>[30]</sup>

2010 年, Q-peak 公司搭建了全光纤 MOPA 结构的千瓦级掺铥光纤激光器,整个系统包含两级放大,每级放大均使用 12 m 长的大模场(芯径为 25  $\mu\text{m}$ ,包层直径为 400  $\mu\text{m}$ )掺铥光纤作为增益光纤,共采用 12 个高

功率 LD 进行泵浦,种子光功率为 50 W,工作波长为 2045 nm,最终获得了大于 1 kW 的输出功率,斜效率为 53.2%。实验装置如图 10<sup>[31]</sup>所示,这是掺铥光纤激光器输出功率首次突破千瓦量级。

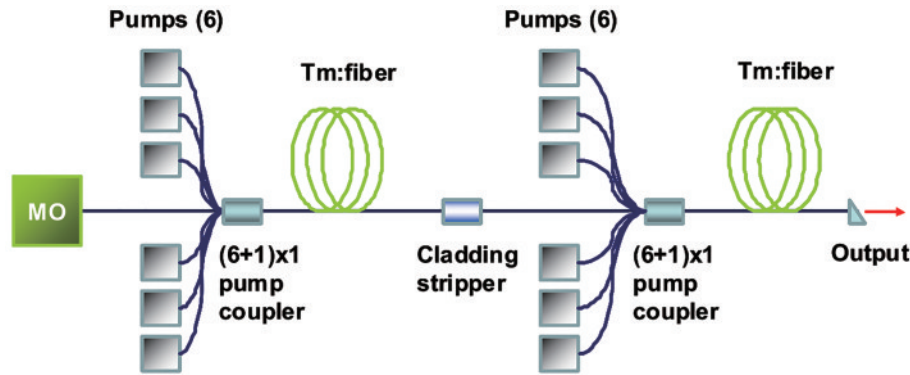


图 10 千瓦级掺铥光纤激光器装置图<sup>[31]</sup>

Fig. 10 Device diagram of kilowatt thulium-doped fiber laser<sup>[31]</sup>

2014 年, Creeden 等<sup>[32]</sup>采用同带泵浦的方法搭建了一个高效率、高功率的单频掺铥光纤激光器,整个系统采用一个 1993 nm 的掺铥光纤激光器作为种子源, 1908 nm 的掺铥光纤激光器作为泵浦源进行抽运。在包层泵浦方式下,获得了 123.1 W 的输出功率,输出激光波长 1993 nm,光谱半峰全宽(FWHM)为 0.1 nm,与种子光线宽保持一致,斜效率高达 91.6%,这是掺铥光纤激光器达到的最高斜效率。由于通常采用的 793 nm LD 泵浦方式在激光器高功率运行时存在着产热严重等问题,严重制约了输出功率的进一步提升,而同带泵浦是提高激光系统光光转换效率、降低废热产生的有效方法,这为进一步提升掺铥光纤激光器的输出功率提供了新思路。

2015 年,国防科技大学 Wang 等<sup>[33]</sup>搭建了全光纤 MOPA 结构的单频掺铥光纤激光器,系统包含两级预放大和一级主放大,两级预放大分别采用自制的 1550 nm 光纤激光器和 793 nm LD 作为泵浦源,主放

同年, Yin 等<sup>[35]</sup>报道了高功率可调谐全光纤 MOPA 结构掺铥光纤激光器,整个系统包括一个低功

大级采用 793 nm LD 为泵浦源。一个输出功率为 40 mW 线宽小于 100 kHz 的超短腔单频光纤激光器作为整个 MOPA 系统的种子激光器。泵浦功率达到 550 W 时获得 310 W 的单频激光输出,激光波长为 1970.77 nm,斜效率为 56%,光信噪比为 40 dB,激光器输出功率仅受限于泵浦功率。这是国内首次报道的输出功率超过 300 W 的全光纤 MOPA 结构单频掺铥光纤激光器。

2016 年,北京工业大学 Liu 等<sup>[34]</sup>搭建了全光纤 MOPA 结构的高功率窄线宽掺铥光纤激光器,实验装置如图 11 所示,系统包含一个低功率、窄线宽光纤振荡器和两级包层泵浦掺铥光纤放大器,振荡器采用环形腔结构,种子光中心波长为 2000.3 nm,功率为 560 mW,最终获得 342 W 的单频激光输出,输出光谱半峰全宽为 90 pm,斜效率为 56%,  $M^2 < 1.15$ ,且在激光器运行过程中未发现受激布里渊散射等非线性效应。

率种子振荡器和一级光纤放大器,其中振荡器包括一个可调谐带通滤波器作为波长选择器件,种子光为

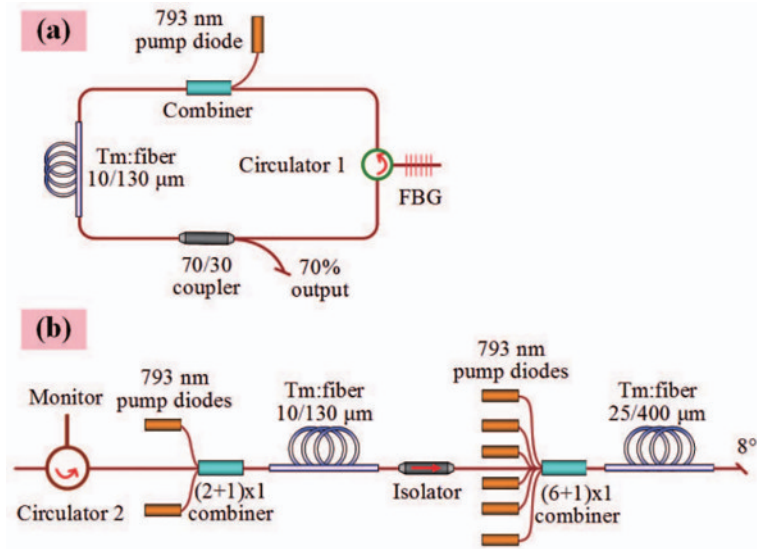


图 11 342 W 窄线宽 MOPA 结构掺铥光纤激光器装置图。(a)振荡级;(b)放大级<sup>[34]</sup>

Fig. 11 Device diagram of 342 W narrow linewidth MOPA structure thulium-doped fiber laser. (a) Oscillator; (b) amplifier<sup>[34]</sup>

5 W 的单模可调谐激光,经过放大后在 1930 nm 处获得最大输出功率为 327.5 W,斜效率为 57.4%。在 1910~2050 nm 调谐范围内输出功率超过 270 W,并且展现出极好的光谱特性和高功率稳定性。这是国内首次报道在 2 μm 波段具有宽调谐范围且功率超过 300 W 的全光纤 MOPA 结构掺铥光纤激光器。

2018 年, Yao 等<sup>[36]</sup>利用 3×1 信号合束器成功对 3 个掺铥光纤放大器进行非相干合束,三个放大级的输出功

率分别是 323 W、305 W 和 229 W。3×1 信号合束器的传输效率为 92%,最终获得了 790 W 的多模激光输出,激光波长为 1941 nm,斜效率为 52.2%, $M^2=2.7$ 。实验装置如图 12 所示。并且进一步分析表明该结构在保持高光束质量的同时还支持千瓦量级的输出功率。非相干合束提供了一种提升输出功率的新思路,但该方案对信号合束器的传输效率以及最大承受功率都有着较高的要求,因此制作难度大,整个方案不容易实现。

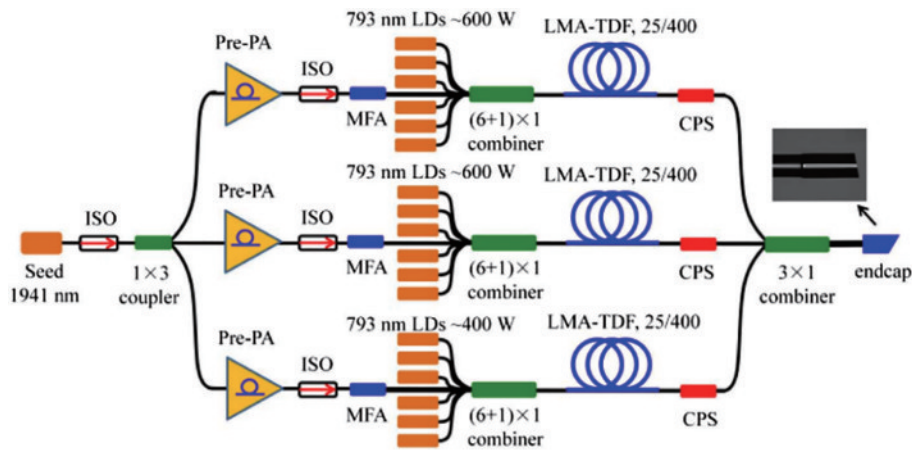


图 12 三个光纤放大器的非相干合束装置图<sup>[36]</sup>

Fig. 12 Device diagram of incoherent beam combining of three fiber amplifiers<sup>[36]</sup>

2020 年,华中科技大学刘茵紫等<sup>[37]</sup>采用改进的化学气相沉积工艺结合溶液掺杂法制备了掺铥光纤预制棒,并拉制成纤芯/包层尺寸约为 25/400 μm 的双包层掺铥光纤,在 793 nm 处包层吸收系数为 3 dB/m,并且利用自制的大模场掺铥光纤搭建了高功率全光纤 MOPA 结构的单频掺铥光纤激光器,其中采用一对 FBG 搭建的窄线宽振荡器作为种子源,种子光中心波长为 1980.89 nm,3 dB 带宽为 75 pm,经一级放大后得到了 530 W 的输出功率,斜效率为 50%,输出激光波长为 1980.89 nm,3 dB 带宽为 0.11 nm,实验中没有出

现明显的非线性效应,输出功率仅受限于泵浦功率。这是当时国内 2 μm 波段全光纤结构掺铥放大器实现的最高输出功率。2021 年,美国空军实验室 Anderson 等<sup>[38]</sup>利用多台 793 nm LD 作为泵浦源,采用全光纤 MOPA 结构将工作波长为 1950 nm 的单频 DFB 激光器经过多级放大,获得了窄线宽且光束质量接近衍射极限的 1.1 kW 单模激光输出,斜效率为 51%, $M^2<1.1$ 。这是首次报道的输出功率达到千瓦量级的窄线宽掺铥光纤放大器。

高功率连续掺铥光纤放大器的研究进展如表 2 所



示,其中, $\lambda$ 为泵浦波长, $P$ 为激光输出功率。可以看出,同振荡器相似,放大系统也逐渐由空间结构向全光纤结构发展。不同的是,放大器中多为单频激光放大,其原因主要是单频激光线宽窄、噪声低,经过放大之后依然能保持良好的光束质量,所以,放大器中多采用单频激光作为种子光。从表 2 可以明显看出,放大系统使用的泵浦源普遍也是 793 nm LD,1908 nm 的掺铥光

纤激光器作为泵浦源虽然能获得极高的效率,但是由于该波段的高功率泵浦源难以获得且成本高,因此采用较少。同单一的振荡器相比,放大结构的优势在于可以将信号光逐级放大,有效减小了整个系统热管理的压力,而且容易获得高功率的单频输出。因此放大系统是目前提升掺铥光纤激光器输出功率最为有效的方法之一,也是目前研究的热点。

表 2 高功率连续掺铥光纤放大系统的研究进展

Table 2 Research progress of high-power continuous thulium-doped fiber amplification system

Author	Pump wavelength $\lambda$ /nm	System structure	Output power $P$ /W	Year
Pearson <i>et al.</i> [29]	793	Space MOPA	100	2008
Goodno <i>et al.</i> [30]	790	Space MOPA	608	2009
Q-peak [31]	79X	All fiber MOPA	1050	2010
Creeden <i>et al.</i> [32]	1908	All fiber MOPA	123.1	2014
Wang <i>et al.</i> [33]	793	All fiber MOPA	310	2015
Liu <i>et al.</i> [34]	793	All fiber MOPA	342	2016
Yin <i>et al.</i> [35]	793	All fiber MOPA	327.5	2016
Yao <i>et al.</i> [36]	793	All fiber MOPA	790	2018
Liu <i>et al.</i> [37]	793	All fiber MOPA	530	2020
Anderson <i>et al.</i> [38]	793	All fiber MOPA	1101	2021

## 4 结束语

在过去二十多年的时间里,连续掺铥光纤激光器的输出功率有了巨大的提升。单个全光纤振荡器的输出功率已超过 500 W [28]。全光纤 MOPA 结构更是获得了千瓦量级的输出功率 [31, 38]。但是,依然有不少问题在制约着功率的进一步提升。首先,当功率升高时,系统会产生大量的热严重影响输出功率的提升和激光器的稳定性,甚至会对激光器造成损坏,因此,有效的散热是至关重要的。通过采用多级放大结构能够有效分散系统的热量分布,降低热管理的压力。采用波长与激光波长接近的泵浦源能够降低量子亏损,减少产热。此外,一些具有良好散热性能的新型光纤,如金属包层光纤 [39],也提供了热管理的新思路。其次,激光器输出功率越高,光纤中的非线性效应对功率提升的影响越明显。一些新型的大模场光子晶体光纤具有较高的非线性阈值,可以有效减少非线性效应的影响。除了温度和非线性效应的影响外,2  $\mu$ m 光纤器件的性能在一定程度上也制约着输出功率的提升,当功率超过光纤器件的最大承受功率时,器件便会受到损坏,而且高功率引起的温度升高使得光纤器件的性能受到影响。所以研制高稳定性、高承受功率的光纤器件是进一步提升掺铥光纤激光器输出功率的重要途径。此外,增益光纤对泵浦光的吸收效率以及泵浦源的亮度也是影响功率提升的重要因素。总体来说,提升掺铥光纤激光器的输出功率可以从实现有效温度控制、研制高效率掺铥光纤、克服非线性效应、提升光纤器件性能、优化系统结构、提高泵浦源亮度等方面入手。

高功率铥激光已经在医疗、军事安全、空间通信、

材料加工等领域得到了重要应用。并且随着输出功率和激光性能的进一步提升,高功率连续掺铥光纤激光器将会产生更多重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 948-956.
- [2] Jackson S D. Cross relaxation and energy transfer upconversion processes relevant to the functioning of 2  $\mu$ m Tm<sup>3+</sup>-doped silica fibre lasers[J]. *Optics Communications*, 2004, 230(1/2/3): 197-203.
- [3] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m wavelength region[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3): 555-563.
- [4] Kou L, Labrie D, Chylek P. Refractive indices of water and ice in the 0.65- to 2.5- $\mu$ m spectral range[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(19): 3531-3540.
- [5] Bach T, Herrmann T R W, Cellarius C, et al. Bladder neck incision using a 70 W 2 micron continuous wave laser (RevoLix)[J]. *World Journal of Urology*, 2007, 25(3): 263-267.
- [6] Fried N M. High-power laser vaporization of the canine prostate using a 110 W Thulium fiber laser at 1.91  $\mu$ m[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2005, 36(1): 52-56.
- [7] Huang Y Z, Jivraj J, Zhou J Q, et al. Pulsed and CW adjustable 1942 nm single-mode all-fiber Tm-doped fiber laser system for surgical laser soft tissue ablation applications[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16674-16686.
- [8] 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. 锦州: 锦州市光学学会, 2013: 98-104.

- 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. Jinzhou: Jinzhou Optical Society, 2013: 98-104.
- [9] de Young R J, Barnes N P. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system[J]. Applied Optics, 2010, 49(4): 562-567.
- [10] Koch G J, Beyon J Y, Barnes B W, et al. High-energy 2  $\mu\text{m}$  Doppler lidar for wind measurements[J]. Optical Engineering, 2007, 46(11): 116201.
- [11] Krishnamurthy R, Choukulkar A, Calhoun R, et al. Coherent Doppler lidar for wind farm characterization[J]. Wind Energy, 2013, 16(2): 189-206.
- [12] Hemming A, Bennetts S, Simakov N, et al. High power operation of cladding pumped holmium-doped silica fibre lasers[J]. Optics Express, 2013, 21(4): 4560-4566.
- [13] Lippert E, Nicolas S, Arisholm G, et al. Midinfrared laser source with high power and beam quality[J]. Applied Optics, 2006, 45(16): 3839-3845.
- [14] Swiderski J, Michalska M. Mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode thulium-doped fiber amplifier[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(3): 035105.
- [15] Hanna D C, Perry I R, Lincoln J R, et al. A 1-Watt thulium-doped cw fibre laser operating at 2  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Communications, 1990, 80(1): 52-56.
- [16] Jackson S D, King T A. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. Optics Letters, 1998, 23(18): 1462-1464.
- [17] Frith G P, Lancaster D G, Jackson S D. High-power 2- $\mu\text{m}$  Tm<sup>3+</sup>-doped fibre lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5620: 36-45.
- [18] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. High-power widely tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er, Yb co-doped fibre laser at 1.6  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2006, 14(13): 6084-6090.
- [19] Wu J F, Yao Z D, Zong J, et al. Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiber laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(6): 638-640.
- [20] Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, et al. 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format [C]//2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, June 17-22, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2007.
- [21] Tang Y L, Yang Y, Xu J Q. High power Tm<sup>3+</sup>-doped fiber lasers tuned by a variable reflective output coupler [J]. Research Letters in Optics, 2008, 2008: 919403.
- [22] Zhang Y J, Song S F, Yi T, et al. Ld-clad-pumped all-fiber Tm<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(8): 084211.
- [23] 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.
- [24] Tang Y L, Huang C Y, Wang S L, et al. High-power narrow-bandwidth thulium fiber laser with an all-fiber cavity[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17539-17544.
- [25] 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.
- [26] Wang X, Zhou P, Zhang H W, et al. 100 W-level Tm-doped fiber laser pumped by 1173 nm Raman fiber lasers [J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4329-4332.
- [27] Xing Y B, Liao L, Bu F, 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.
- [28] 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.
- [29] Pearson L, Shen D Y, Sahu J K, et al. High-power widely-tunable thulium-doped fiber master-oscillator power-amplifier around 2  $\mu\text{m}$ [C]//2008 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science, May 4-9, 2008, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [30] Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1204-1206.
- [31] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1 kW, all-glass Tm: fiber laser[C]//SPIE Conference on Fiber lasers VII, 2010, San Jose, Calif. Washington: SPIE, 2010.
- [32] 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.
- [33] Wang X, Jin X X, Wu W J, et al. 310-W single frequency Tm-doped all-fiber MOPA[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 677-680.
- [34] Liu J, Shi H X, Liu C, et al. High-power narrow-linewidth thulium-doped all-fiber MOPA[C]//2015 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), August 24-28, 2015, Busan, Republic of Korea. New York: IEEE Press, 2015.
- [35] Yin K, Zhu R Z, Zhang B, et al. 300 W-level, wavelength-widely-tunable, all-fiber integrated thulium-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 11085-11090.
- [36] Yao W C, Shen C F, Shao Z H, et al. 790 W incoherent beam combination of a Tm-doped fiber laser at 1941 nm using a 3  $\times$  1 signal combiner[J]. Applied Optics, 2018, 57(20): 5574-5577.
- [37] 刘茵紫, 邢颖滨, 廖雷, 等. 530 W 全光纤结构连续掺铥光纤激光器[J]. 物理学报, 2020, 69(18): 184209.
- Liu Y Z, Xing Y B, Liao L, et al. 530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(18): 184209.
- [38] Anderson B M, Solomon J, Flores A. 1.1 kW, beam-combinable thulium doped all-fiber amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11665: 116650B.
- [39] Daniel J M O, Simakov N, Hemming A, et al. Metal clad active fibres for power scaling and thermal management at kW power levels[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18592-18606.