

文章编号: 1672-8785(2017)05-0001-07

高功率连续波掺铥光纤激光器研究进展

张 伟^{1,2} 张嘉阳^{1,2} 吴闻迪¹ 余 婷¹ 叶锡生¹

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 掺铥光纤激光器 (Tm-Doped Fiber Laser, TDFL) 具有结构紧凑、散热性能优良、光束质量好、非线性效应阈值高等优点, 其量子转换效率在理论上可达 200%。TDFL 产生的 1.7 ~ 2.1 μm 激光在多个领域具有广泛应用。简要介绍了 Tm^{3+} 离子的吸收谱和能级结构、TDFL 三种泵浦方式的优缺点以及国内外高功率 TDFL 的研究进展, 并就其未来发展给出了初步看法。

关键词: 掺铥光纤激光器; 泵浦方式; 高功率

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.05.001

Research Progress of High Power Continuous-wave Tm-doped Fiber Laser

ZHANG Wei^{1,2}, ZHANG Jia-yang^{1,2}, WU Wen-di¹, YU Ting¹, YE Xi-sheng¹

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Tm-doped Fiber Lasers (TDFL) have the advantages of compact structure, excellent cooling capacity, good beam quality and high non-linear effect threshold etc. Theoretically, its quantum conversion efficiency can be up to 200%. The laser generated by TDFLs at the wavelengths from 1.7 μm to 2.1 μm has wide applications in many fields. The absorption spectrum and level structure of Tm^{3+} , the advantages and disadvantages of three different pumping methods and the research progress of high power TDFLs at home and abroad are presented in brief. Finally, the preliminary view on the future development of high power TDFLs is given.

Key words: Tm-doped fiber laser; pumping method; high power

0 引言

早在 1961 年, Snitzer E^[1] 就提出了将光纤应用于激光器的思路。进入 20 世纪 70 年代后, 低损耗石英光纤的出现^[2] 为光纤激光器的发展奠定了现实基础。在 20 世纪 80 年代末问世的双包层光纤^[3] 则极大地推动了高功率光纤激光器

的发展。在 20 世纪 90 年代末开始出现的大模场低数值孔径技术^[4] 再度促进了光纤激光器功率的提升。

对人眼安全的 2 μm 波段在测距、遥感、雷达、无线光通信、医疗以及光电对抗等众多领域具有重要的应用^[5-7]。同时, 工作在 2 μm 波段的激光还是产生 3 ~ 5 μm 中红外激光的重要

收稿日期: 2017-03-20

作者简介: 张伟(1991-), 男, 四川蓬溪人, 硕士研究生, 主要从事中红外激光技术研究。

E-mail: zhangwei2016@siom.ac.cn

泵浦源^[8-9]。TDFL 激光器可实现 1.7 ~ 2.1 μm 的激光发射。与 1 μm 波段的掺镱光纤激光器相比, TDFL 激光器产生受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 和受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 等非线性效应的阈值较高^[10], 其光-光转换效率可达 60% 以上。同时, 处于铥离子 Tm^{3+} 吸收带的 790 nm 半导体激光器技术已经较为成熟, 并且可以用作高功率的泵浦源。铥离子的交叉弛豫使量子转换效率在理论上可达 200%^[11]。因此, 工作在 2 μm 波段的高功率 TDFL 激光器具有广阔的发展前景。

1 TDFL 激光器的基本原理

图 1 所示为铥离子的能级分布及其寿命^[12]。其中, 各能级右侧括号内的数值为该能级的寿命 (单位为 μs)。

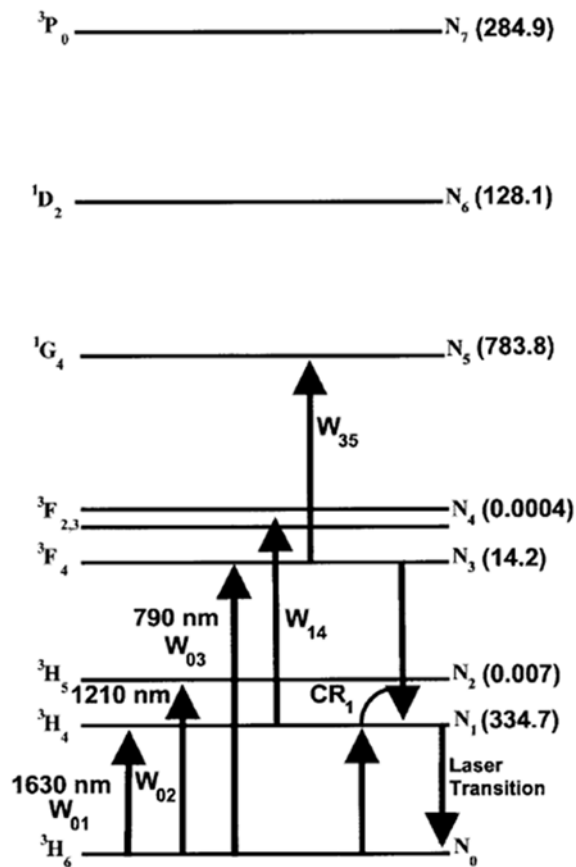


图 1 铥离子的能级分布及其寿命

图 2 所示为铥离子的吸收谱^[12]。从图 2 中可以看出, 铥离子在 680 nm、790 nm、1200 nm 以

及 1600 nm 附近存在吸收带。掺铥增益介质能够形成激光输出的泵浦能带主要是 790 nm、1200 nm 和 1600 nm 三个波段。由此可见, 2 μm 波段 TDFL 的泵浦方式主要有 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 、 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$ 和 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 三种^[13], 分别对应于上述 790 nm、1200 nm 和 1600 nm 三个波段。

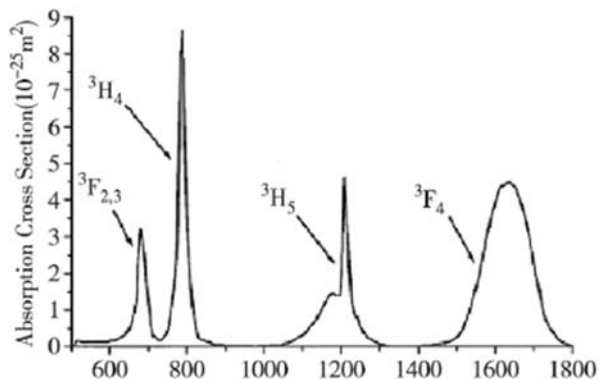


图 2 铥离子的吸收谱

790 nm 波段的泵浦涉及 $^3\text{H}_4$ 、 $^3\text{H}_5$ 、 $^3\text{F}_4$ 和 $^3\text{H}_6$ 四个能级。由于 $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 的发射谱与 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 的吸收谱之间有明显的重叠^[14], 因此会出现交叉弛豫现象。理论上, 量子效率可达 200%, 光能转换效率可达 80%。当采用 790 nm 激光泵浦时, $^3\text{F}_4$ 能级不会发生上转换现象, 所以容易实现粒子数反转。上转换效应发生在 $^3\text{H}_5$ 和 $^1\text{G}_4$ 两个能级之间 (见图 1), 但因 $^3\text{H}_5$ 能级的寿命极短, 所以上转换效应并不显著, 不会明显影响整个泵浦效率。

1.2 μm 波段的泵浦一般采用高功率的 1064 nm 激光器。此时, 粒子在 $^3\text{F}_{2,3}$ 、 $^3\text{H}_4$ 、 $^3\text{H}_5$ 、 $^3\text{F}_4$ 和 $^3\text{H}_6$ 等几个能级之间转换。激光上能级 $^3\text{F}_4$ 处有很明显的上转换效应, 这将会大大降低激光系统的效率。

1.6 μm 波段的泵浦仅涉及 $^3\text{F}_4$ 和 $^3\text{H}_6$ 两个能级, 属于同带泵浦。由于效率高 (80%)、热效应弱, 同带泵浦可以使用较短的增益介质, 进而抑制非线性效应。通过选用该波段范围内输出的掺铥光纤激光器作为泵浦源, 可以提高耦合效率。但是, 当采用 1.6 μm 泵浦时, 激光器属于二能级系统, 其实现粒子数反转所需的阈值较高。

2 研究进展

2.1 国外进展

国外的 TDFL 研究起步早、发展快,其研究机构主要包括英国的南安普顿大学和曼彻斯特大学、美国的 Q-Peak 公司、Nufern 公司和 Northrop Grumman 公司、德国 IPG 公司等。

1988 年, Hanna D C 等人^[15]首次利用 797 nm 染料激光器泵浦掺 Tm^{3+} 单模光纤,并在 1.88 ~ 1.96 μm 波段观察到了激光振荡。其斜率效率为 13%,阈值为 21 mW。1990 年, Hanna D C 等人^[16]利用 1064 nm 泵浦源获得了 1.35 W 激光输出,其对应的斜率效率为 37%。在随后近 10 年的时间内, TDFL 研究都没有取得突破性进展。直到 1998 年, Jackson S D 等人^[17]采用 790 nm 半导体激光器泵浦双包层掺铥光纤,获得了 1.880 ~ 2.033 μm 波段的激光调谐输出(最大功率为 5.4 W)。

2005 年, Frith G 等人^[18]利用 793 nm 半导体激光器对掺铥光纤进行了双端泵浦,获得了 2 μm 波段的 85 W 激光输出。其斜率效率为 56%,量子效率大于 130%。

大芯径光纤熔接机的出现使全光纤结构成为了可能,这极大地促进了高功率 TDFL 激光器

的发展。2007 年, Meleshkevich M 等人^[19]基于全光纤方案,利用 1567 nm 掺铥光纤激光器泵浦纤芯直径为 20 μm 、长度为 8 m 的掺 Tm^{3+} 双包层光纤。当泵浦功率为 720 W 时,获得了中心波长为 1940 nm、线宽小于 1 nm、 M^2 为 1.1、斜效率为 60%、功率为 415 W 的单模激光输出。

2009 年, Moulton P F 等人以波长为 791 ~ 795 nm 的激光二极管 (Laser Diode, LD) 阵列作为泵浦源,以 Nufern 公司生产的长度为 7 m、纤芯直径为 25 μm 的掺 Tm^{3+} 硅基光纤作为增益介质,在最大泵浦功率为 500 W 时得到了功率为 300 W 的激光输出。其斜率效率为 64.5%,波长为 2040 nm。随后, Moulton P F 等人^[20]采用一根长度为 7 m、纤芯直径为 35 μm 、包层直径为 625 μm 的多模光纤,获得了功率高达 885 W、波长为 2040 nm 的激光输出。其光-光转换效率为 49.2%,在水平和垂直方向上的 M^2 因子分别约为 6 和 10 (实验光路见图 3)。2009 年, Goodno G D 等人^[21]研制出了一种具有低相位噪声的单模单频 TDFL 激光器 (见图 4)。该系统采用了 4 级主振荡-功率放大 (Master Oscillator Power Amplifier, MOPA) 结构。其中,主放大器的

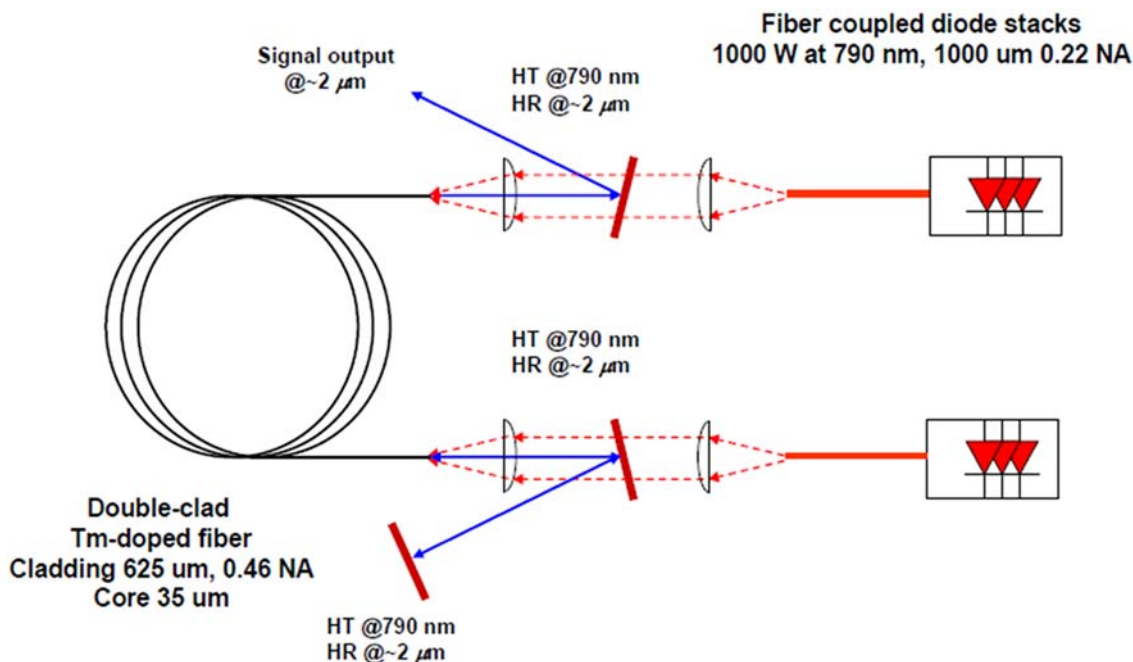


图 3 掺 Tm 光纤激光系统的实验光路

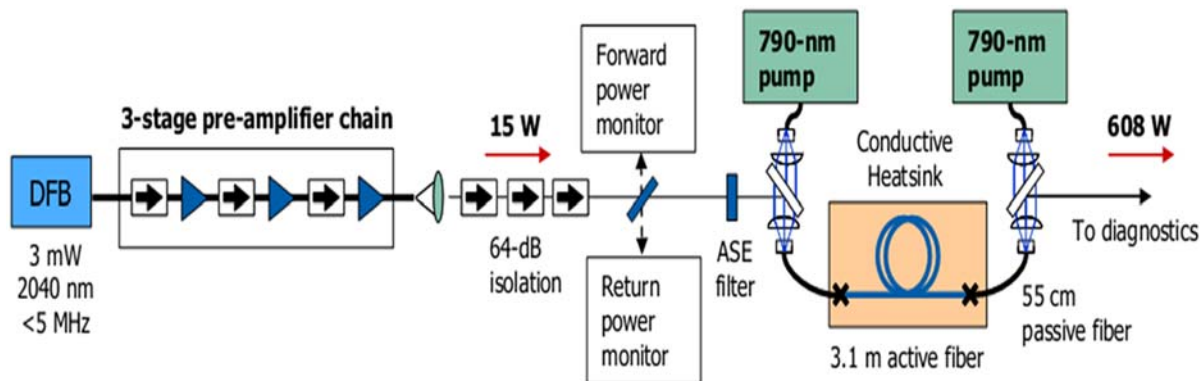


图 4 采用 4 级 MOPA 结构的 TDFL 激光器的示意图

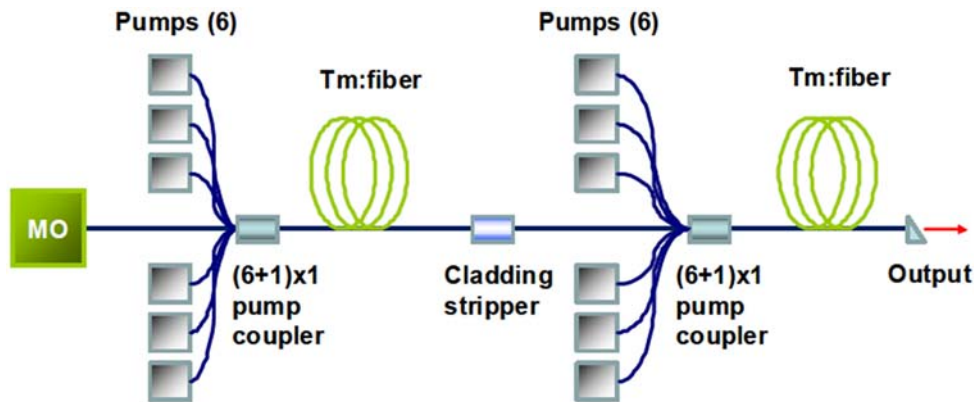


图 5 输出功率大于 1 kW 的多泵浦两级放大结构

双包层铽光纤的长度为 3.1 m，内包层的直径为 400 μm 、纤芯直径为 25 μm ；用两个波长为 790 nm 的 LD 作为泵浦源，输出激光的波长为 2040 nm，线宽小于 5 MHz，功率为 608 W，光束质量 $M^2 < 1.05 \pm 0.03$ 。这是目前公开报道的 TDFL 单模单频输出的最高功率。

2010 年，Moulton P F 等人介绍了采用 6 个 LD 作为泵浦源并获得激光输出功率大于 500 W 的实验结果（斜率效率为 61.6%）。同年，Moulton P F 等人^[22]基于图 5 所示的两级 MOPA 放大技术路线，以 12 个 LD 作为泵浦源，实现了大于 1 kW 的连续单模激光输出。其中心波长为 2045 nm，斜率效率为 53.2%。在这种激光器结构中，每一级铽光纤的长度为 12 m，纤芯直径为 20 μm ，包层直径为 400 μm 。这是目前公开报道的 TDFL 非单模单频输出的最高功率。

由上述概况可见，近十多年来，国外 2 μm 波段高功率 TDFL 激光器发展迅速。目前，大多

数采用波长为 793 nm 的高功率（数百瓦）LD 作为泵浦源，并选用较大芯径的掺铽光纤；斜率效率总体上可达 60% 左右，单模单频高光束质量输出的最高功率达 600 W 以上，非单模单频输出的最高功率达 1 kW 以上。

2.2 国内进展

国内很早就关注到了 TDFL 激光器的发展，但受限于泵浦源和掺铽光纤等条件，直到近几年才开始有了较大进展。主要研究机构包括深圳大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、哈尔滨工业大学、国防科技大学、北京工业大学、复旦大学以及北京交通大学等。

2007 年，杜戈果等人^[23]利用波长为 791 nm 的 LD 泵浦长度为 5 m 的 D 型双包层掺铽光纤，获得了 2 μm 波段的 6 W 激光输出（斜率效率为 50%）。

2008 年，徐剑秋等人^[24]研制出了一种采用腔镜反射率可调的线型腔结构的 TDFL 激光

器。通过调节输出端腔镜的反射率和掺铥光纤的长度, 获得了 240 nm 的可调谐范围; 当泵浦光的功率为 51 W 时, 获得了 32 W 的最高输出功率。

2009 年, 张云军等人^[25]采用全光纤结构实现了功率为 39.4 W 的 TDFL 连续激光输出。

2010 年, 唐玉龙等人^[26]利用波长为 793 nm 的 LD 泵浦纤芯直径为 30 μm 、数值孔径为 0.09 的掺铥双包层光纤, 获得了中心波长为 2.04 μm 、斜率效率为 56.3%、功率为 150 W 的激光输出。

2013 年, 王雄等人^[27]报道了关于高功率全光纤单频掺铥光纤放大器的研究进展 (实验装置见图 6)。他们基于 MOPA 结构实现了最大输出功率为 102 W、中心波长为 1.97 μm 、斜率效率为 50% 的单频激光输出。

2014 年, 刘江等人^[28]采用两级 MOPA 结构实现了功率为 210 W 的单频单偏振的连续激光输出 (实验装置结构见图 7)。基于全保偏光纤结构, 中心波长为 2000.9 nm, 偏振消光比大于 17 dB; 输出功率仅受限于泵浦功率, 而不受 SBS 效应的影响。

2015 年, 刘江等人^[29]报道了基于全光纤 MOPA 结构的高功率窄线宽 TDFL 激光器的实验结果。他们采用波长为 793 nm 的 LD 泵浦长度为 4 m、纤芯直径为 10 μm 、纤芯数值孔径为 0.15 的双包层掺铥光纤, 得到了中心波长为 2000.3 nm、3 dB 带宽为 0.09 nm、功率为 560 mW 的种子光; 经两级放大后, 获得了功率为 342 W 的连续激光输出 (实验装置见图 8)。

2016 年, 侯静等人^[30]报道了基于全光纤 M-

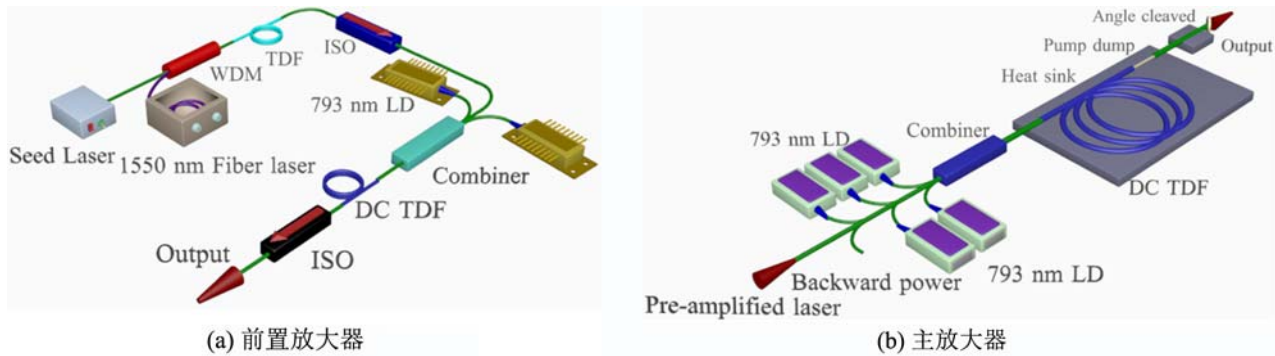


图 6 高功率全光纤单频 TDF 放大器

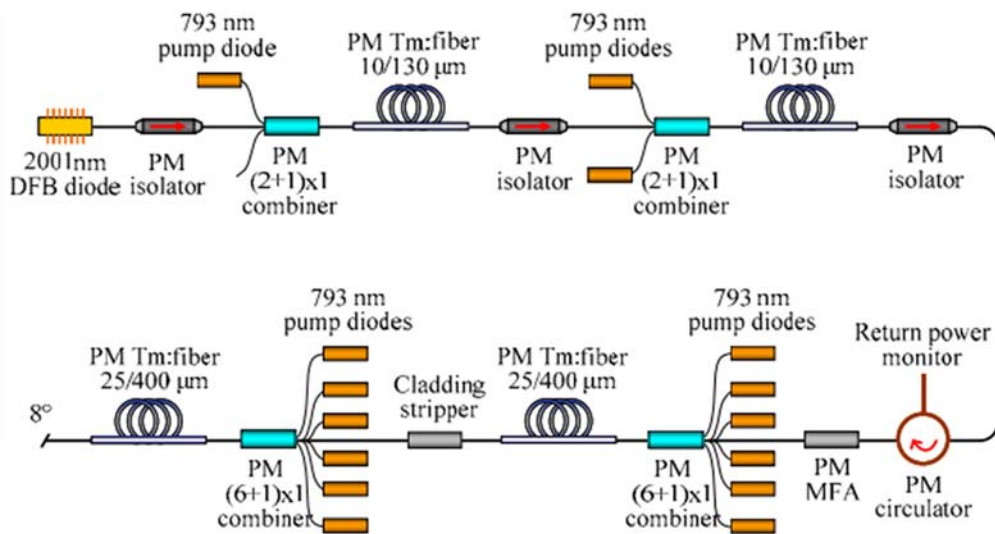


图 7 采用两级 MOPA 结构的 TDFL 激光器

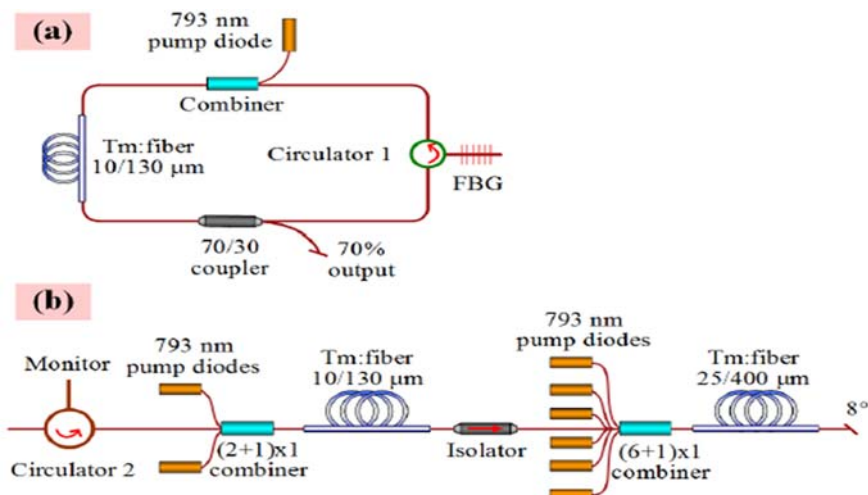


图 8 基于 MOPA 结构的高功率窄线宽 TDFL 激光器

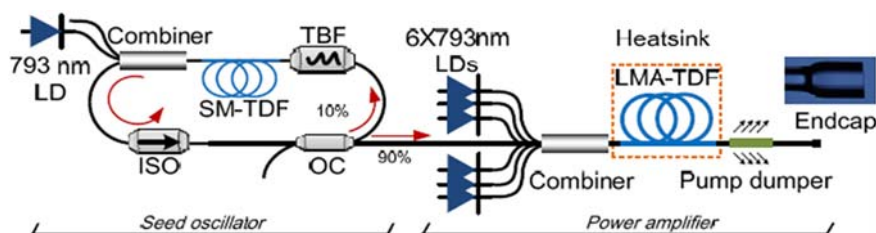


图 9 基于全光纤结构的高功率、波长可调谐 TDFL 激光器

OPA 结构的高功率、波长可调谐 TDFL 激光器的研究进展(实验系统结构见图 9)。以可调谐的带通滤波器作为波长选择元件,振荡器可提供 5 W 的单模种子激光,其波长可调范围为 1890 ~ 2050 nm。功率放大器在 2 μm 处所提供的增益约为 17 dB,并将激光放大到 300 W 量级。1930 nm 处的最大平均功率达到 327.5 W,斜率效率为 57.4%。在 1910 ~ 2050nm 的 140 nm 调谐范围内可实现大于 270 W 的激光运转。该装置具有高的光谱质量和功率稳定性。这是国内首次实现的 2 μm 波段的 300 W 量级全光纤宽调谐 TDFL 激光器。

由上述概况可见,近几年来,国内也掀起了一阵 TDFL 研究的热潮,且发展比较迅速。目前,2 μm 波段激光的输出功率达到了 300 W 的水平,斜率效率接近 60%,展现出了较好的发展势头。但是,与国外数年前的水平相比,仍然存在不小的差距。其主要原因是,国内掺铥双包层光纤技术还不够成熟,而且难以获得国外的大芯径掺铥光纤;波长为 793 nm 的国产 LD 的功

率仅为百瓦量级;国产泵浦隔离器等光纤器件的性能也有待提高。

3 结束语

十多年来,由于众多领域的广泛需求以及关键技术的不断突破,2 μm 波段 TDFL 激光器先后成为了国内外的研究热点并得到了迅速发展。国外在数年前已达到单模单频高光束质量输出功率大于 600 W、非单模单频输出功率大于 1 kW、斜率效率总体达到 60% 左右的水平。国内的 TDFL 研究起步较晚,但经过近几年的努力,已经达到 2 μm 波段激光的输出功率在 300 W 左右、斜率效率接近 60% 的水平。未来的发展将有赖于国内研发机构在 LD 泵浦源、掺铥光纤、隔离器等关键器件和材料方面的持续突破。

另外,追求高功率高光束质量依然是 TDFL 未来发展的主要方向之一。随着功率的不断提高,TDFL 的热效应和非线性效应等对激光输出功率和光束质量的影响将会越来越显著。因此,

高效的热管理技术和非线性效应抑制技术无疑也将会成为未来高功率 TDFL 研究的重点。

由此可见, TDFL 激光器的后续发展将会与高功率泵浦源、高性能掺铥双包层光纤、高功率隔离器、高效热管理以及非线性效应抑制等多个方面的新突破密切相关。

参考文献

- [1] Snitzer E. Optical Maser Action of Nd^{3+} in a Barium Crown Glass [J]. *Physical Review Letters*, 1961, **7**(12): 444–446.
- [2] Kapron F P, Keck D B, Maurer R D. Radiation Losses in Glass Optical Waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 1970, **17**(10): 423–425.
- [3] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double Clad, Offset Core Nd Fiber Laser [C]. Washington: OSA Technical Digest Series, 1988: PD5.
- [4] Broderick N G R, Offerhaus H L, Richardson D J, et al. Large Mode Area Fibers for High Power Applications [J]. *Optical Fiber Technology*, 1999, **5**(2): 185–196.
- [5] Honea E C, Beach R J, Sutton S B, et al. 115-W Tm: YAG Diode-pumped Solid-state Laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(9): 1592–1600.
- [6] 唐玉龙. 中红外固体激光器的理论和实验研究 —— $2\ \mu\text{m}$ 掺铥光纤激光器 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008.
- [7] 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] 刘沛沛, 白杨, 任兆玉, 等. $2\ \mu\text{m}$ 光纤激光器的研究进展 [J]. *靖外与激光工程*, 2009, **38**(1): 45–49.
- [9] 周俊, 董淑福, 周义建, 等. $2\ \mu\text{m}$ 光纤激光器的研究进展 [J]. *激光杂志*, 2008, **29**(3): 1–3.
- [10] Moulton P F. Power Scaling of High-efficiency Tm-doped Fiber Lasers [C]. Palo Alto: SPRC 2008 Annual Symposium, 2008: 6873–15.
- [11] Richards B D O, Shen S, Jha A. Spectroscopy of Tm-Ho Co-doped Tellurite Glass for Mid-IR Fibre Lasers in $1.8\text{--}2.2\ \mu\text{m}$ [C]. *SPIE*, 2005, **5984**: 598407.
- [12] Jackson S D, King T A. Theoretical Modeling of Tm-doped Silica Fiber Lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(5): 948.
- [13] 王郡婕. $2\ \mu\text{m}$ 高功率掺铥光纤激光器研究进展 [J]. *激光杂志*, 2015, **36**(8): 5–7.
- [14] 杜戈果, 刘东峰, 王贤华, 等. 掺铥 (Tm^{3+}) 光纤激光器 [J]. *激光与红外*, 1998, **28**(4): 210–214.
- [15] Hanna D C, Jauncey I M, Percival R M, et al. Continuous-wave Oscillation of a Monomode Thulium-doped Fiber Laser [J]. *Electronics Letters*, 1988, **24**(19): 1222–1223.
- [16] Hanna D C, Perry I R, Lincoln J R, et al. A 1-Watt Thulium-doped CW Fiber Laser Operating at $2\ \mu\text{m}$ [J]. *Optics Communications*, 1990, **80**(1): 52–56.
- [17] Jackson S D, King T A. High-power Diode-cladding-pumped Tm-doped Silica Fiber Laser [J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(18): 1462–1464.
- [18] Frith G, Lancaster D G, Jackson S D. 85 W Tm^{3+} -doped Silica Fiber Laser [J]. *Electronics Letters*, 2005, **41**(12): 687–688.
- [19] Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, et al. 415 W Single-mode CW Thulium Fiber Laser in All-fiber Format [C]. Munich: European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007: 1–1.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1-kW, All-glass Tm: Fiber Laser [C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 758016.
- [23] Du G G, Li D J, Zhang M, et al. LD-pumped 6 W CW Tm-doped Silica Double-cladding Fiber Laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, **25**(3): 957–959.
- [24] Tang Y, Yang Y, Xu J. High-power Tm-doped Fiber Lasers Tuned by a Variable Reflective Output Coupler [J]. *International Journal of Optics*, 2008, **2008**: 919403.
- [25] Zhang Y J, Song S F, Tian Y, et al. Ld-clad-pumped All-fiber Tm^{3+} -doped Silica Fiber Laser [J]. *Chin Phys Lett*, 2009, **26**(8): 084211.
- [26] Tang Y L, Xu J Q, Chen W, et al. 150-W Tm^{3+} -doped Fiber Lasers with Different Cooling Techniques and Output Couplings [J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(10): 104207.
- [27] Wang X, Zhou P, Wang X L, et al. 102 W Monolithic Single Frequency Tm-doped Fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(26): 32386–32392.
- [28] Liu J, Shi H X, Liu K, et al. 210 W Single-frequency, Single-polarization, Thulium-doped All-fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(11): 13572–13578.
- [29] Liu J, Shi H X, Wang P, et al. High-power Narrow-linewidth Thulium-doped All-fiber MOPA [C]. Busan: 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2015: 1–2.
- [30] 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.