

高功率掺铥光纤激光的研究进展

韩凯 马阎星 王小林 周朴 许晓军 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 掺铥光纤激光可调谐范围宽、人眼安全、非线性阈值高,功率提升潜力大,在遥感、激光雷达、医疗、光学参量振荡等领域具有重要的应用。主要报道了国内外在连续、脉冲掺铥光纤激光方面的进展。目前连续掺铥光纤激光已经实现 1 kW 的输出,其中单频连续掺铥光纤激光实现了 608 W 的输出,如果进一步采用高功率、高亮度的半导体激光作为抽运源,增多放大级,则有望实现更高功率的激光输出。在脉冲激光方面,采用调 Q 方式实现了重复频率 100 kHz,单脉冲能量 360 μJ 的纳秒脉冲输出;采用锁模方式实现了重复频率为 37 MHz,脉宽为 1.32 ps,平均功率为 3.4 mW 的输出。最后对掺铥光纤激光的未来发展进行了展望。

关键词 激光器;连续掺铥光纤激光;脉冲掺铥光纤激光;交叉弛豫;非线性阈值

中图分类号 TN248

OCIS 140.0140 140.3510 140.3580 140.3460

文献标识码 A

Progress of High Power Tm-Doped Fiber Laser

Han Kai Ma Yanxing Wang Xiaolin Zhou Pu Xu Xiaojun Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In recent years, Tm-doped fiber laser aroused much attention for its superior properties such as wide tunable range, eye-safe and high nonlinear threshold. Compared with Yb-doped fiber laser, Tm-doped fiber laser is of great advantage in power rising, which has significant application prospects in remote sensing, laser radar, medical care, optical parametric oscillation and other fields. The progress of continuous-wave (CW) and pulsed Tm-doped fiber laser at home and abroad is reported. At present, CW Tm-doped fiber laser has achieved 1 kW output, and single-frequency Tm-doped fiber laser has achieved 608 W output. Moreover, higher laser output will be achieved if high-power high-brightness LD pump source and multi-stage amplifier configuration are used. With Q-switched technology, the repetition rate of pulsed laser achieves 100 kHz, and the single nanosecond pulse energy reaches 360 μJ ; with mode-locked technology, the repetition rate of pulsed laser achieves 37 MHz and the average power of the picosecond pulse reaches 3.4 mW. Finally, the trend of Tm-doped fiber laser is discussed.

Key words lasers; continuous-wave Tm-doped fiber laser; pulsed Tm-doped fiber laser; cross relaxation; non-linear threshold

1 引言

光纤激光器因具有转换效率高、散热好、光束质量高、易于系统集成等显著特点而受到人们的广泛关注。近年来,对稀土掺杂光纤激光器的探索研究不断深入。掺铥(Tm)光纤(TDF)激光器由于其重要的应用价值,成为各国研究的热点。与掺镱(Yb)光纤(YDF)激光相比,掺 Tm 光纤激光具有若干优势。掺 Tm 光纤激光器的光谱可调谐范围更宽,超过 200 nm,从低于 1850 nm 到超过 2100 nm,该波段包含了 1940 nm 附近的水吸收峰,对组织的穿透深度浅,从而使得掺 Tm 光纤激光成为包括非侵入手术等医疗过程的有力工具;该波段还包含几个大气窗口,在遥感、激光雷达等领域也有重要的应用前景。由于掺 Tm 光纤激光器工作在人

收稿日期: 2010-04-12; 收到修改稿日期: 2010-06-22

基金项目: 国防科学技术大学优秀研究生创新基金(S090701)资助课题。

作者简介: 韩凯(1986—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: hankai0071@126.com

导师简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术领域方面的研究。

E-mail: zejinliu@vip.sina.com

眼安全波段,可允许的辐照水平可以比掺 Yb 激光高出几个数量级。此外,在连续或者脉冲模式下的掺 Tm 光纤激光器也是产生 3~5 μm 中红外光的一个颇具吸引力的高效抽运源^[1~4]。另一个活跃的研究领域是工作在 2 μm 波段的高功率、窄线宽掺 Tm 光纤激光器。尽管大模场面积(LMA)光纤技术取得了很大的进展,但是目前许多掺 Yb 光纤器件的特性仍然受到光学非线性的限制,这也导致了业界开始研究新型光纤技术。

掺 Tm 光纤激光在 0.8 μm 附近和 1.6 μm 附近分别有两个抽运带。直观上感觉,用 1.6 μm 的光作抽运,能量转换效率会高于 0.8 μm 的光抽运。然而,由于 Tm 离子特殊的交叉弛豫现象,在波长 0.8 μm 激光抽运下,基态³H₆ 上的粒子吸收抽运光子能量跃迁到激发态³H₄,处于激发态³H₄ 的粒子释放能量跃迁至较低能级³F₄,而释放的能量则会被另一个基态上的粒子所吸收,向上跃迁到能级³F₄,即在相邻的两个 Tm 离子之间发生了交叉弛豫,而能级³F₄ 正是产生激光的上能级。简单的说,每吸收一个抽运光子会有两个粒子跃迁到激光上能级^[5]。因此,用 0.8 μm 的光作为抽运同样能够产生很高的能量转换效率(可达 60%~65%)。工作在 1.6 μm 的半导体激光相对而言还是一门新技术,所以通常选用铒镱共掺光纤(Er:Yb 光纤)激光作为掺 Tm 光纤激光 1.6 μm 处的抽运源。这种结构总的能量转换效率显然低于直接用半导体激光作为抽运源时总的能量转换效率。工作在 0.8 μm 的半导体激光技术相对成熟,因此掺 Tm 光纤激光常常以 0.8 μm 的半导体激光作为抽运源。目前,工作在 1 μm 的光纤激光器功率的提升主要是受限于光纤放大器的非线性效应,而克服这种非线性效应并非易事。然而,工作在 2 μm 的掺 Tm 光纤激光当前的受限因素仅仅是抽运功率。这样看来,掺 Tm 光纤激光的功率还有很大的提升空间。除此之外,相对于传统掺 Yb 光纤激光,掺 Tm 光纤激光的受激布里渊散射(SBS)效应和受激拉曼散射(SRS)效应的产生阈值要高 4 倍以上,光纤端面的损伤阈值也高出近 1 个量级,因此在高功率输出方面具有更大优势^[6]。本文综述了国内外在连续、脉冲掺 Tm 光纤激光方面的进展。

2 国外掺 Tm 光纤激光的研究进展

近年来,掺 Tm 光纤激光器获得了长足的发展,在连续激光方面,从原来的单包层掺 Tm 光纤连续输出毫瓦量级发展到双包层掺 Tm 光纤上千瓦的连续波输出,并且在效率、光束质量、常温工作、小型化和产品化方面都取得了很大的进步。Q-peak 公司、IPG 公司、Nufern 公司、英国南安普顿大学等对高功率连续输出掺 Tm 光纤激光做了大量研究并处于领先地位。在脉冲激光方面,掺 Tm 光纤激光器的研究已经到调 Q、锁模、飞秒输出阶段,相关理论也逐步完善起来。目前单频脉冲掺 Tm 光纤激光已经广泛地应用于生物医学、激光雷达、遥感等领域。美国中央佛罗里达大学、AdValue 公司、Spectrode 公司、BAE 公司和俄罗斯科学院在这些方面走在前列。

2.1 连续激光

2.1.1 连续多模激光

2007 年,美国 Q-peak 公司等利用 Nufern 公司的掺 Tm 光纤获得了波长为 2050 nm,功率为 263 W 的高功率激光输出,实验光路如图 1 所示。光-光转换效率达到了 52%,光束质量 M^2 因子约为 2^[6~8]。

2009 年 Q-peak 公司 Moulton 等^[8]报道了 885 W 掺 Tm 光纤激光输出,实验光路如图 2 所示。采用的掺 Tm 光纤纤芯半径为 35 μm ,输出激光中心波长为 2040 nm,光-光转换效率达到 49.2%,在水平和垂直方向光束质量 M^2 因子分别约为 6 和 10。

掺 Tm 光纤激光的功率水平不断实现突破,其中波长 0.79 μm 的带尾纤的高功率、高亮度半导体激光抽运源是实现连续大功率输出的关键。根据 2010 年 Photonics West 会议的最新报道^[6],Q-peak 公司 Moulton 等^[8]采用 6 个半导体激光抽运源可以实现大于 500 W 的功率输出,斜率效率为 61.6%。采用 12 个半导体激光器抽运两个放大级(图 3),主振荡器输出波长

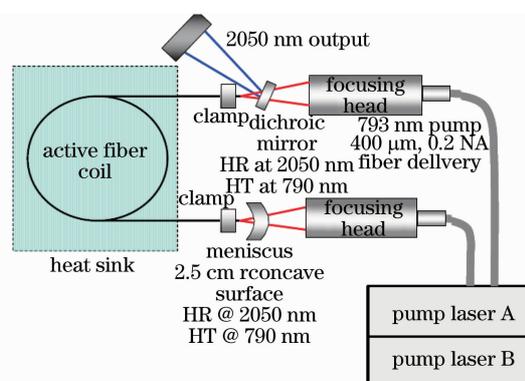


图 1 2007 年 Q-peak 公司的掺 Tm 光纤激光系统
Fig. 1 Tm-doped fiber laser of Q-peak company in 2007

2045 nm, 功率 50 W 的光经过这两个放大级后, 已经实现大于 1 kW 的功率输出, 斜率效率为 53.2%。

2.1.2 连续单模激光

然而, 在上述实验中采用的都是多模掺 Tm 光纤, 获得的激光均是非基模光束。在单纵模掺 Tm 光纤激光方面, 2007 年, 美国 NP Photonics 公司 Jihong Geng 等^[9] 利用工作在 805 nm 的激光二极管(LD)抽运重掺杂的掺 Tm 光纤获得了 50 mW, 波长为 1893 nm 的单纵模激光输出, 在 30 mW 的抽运阈值下, 激光器的斜率效率仍然达到了 35%。

2008 年, IPG 光子技术公司实现了掺 Tm 光纤激光单横模 415 W 高功率输出, 得到了近衍射极限的光束质量, $M^2 < 1.1$ 。采用的掺 Tm 光纤纤芯半径为 20 μm , 激光中心波长为 1940 nm, 线宽小于 1 nm, 激光器的斜率效率达到 60%。这是当时掺 Tm 光纤激光单模输出的最高水平^[10]。

2.1.3 连续单频激光

在单频掺 Tm 光纤激光方面, 早在 2007 年, IPG 光子技术公司采用分布反馈(DFB)光纤激光器获得波长为 1930 nm 的 20 mW 的单频种子源, 经过主振荡功率放大器(MOPA)结构放大, 获得了超过 20 W 的激光输出, 如图 4 所示。其中种子源的线宽在 20~50 kHz 之间, 斜率效率为 10%; 而 MOPA 结构总的斜率效率达到 65%。该公司还指出增多 MOPA 结构中的放大级, 便可以很快获得超过 100 W 的功率输出^[11]。

英国南安普顿大学 Z. Zhang 等^[12] 也对单频 2 μm 掺 Tm 光纤激光做了大量研究。2008 年, 他们采用 1565 nm 的 Er:Yb 光纤激光作为抽运源, 采用光纤分布反馈结构(图 5), 在 3.5 W 的抽运功率下, 单端输出两个波长在 1943 nm 的正交偏振模, 功率为 875 mW; 采用分布反馈 MOPA 结构, 在 8.1 W 的抽运功率下, 得到了 3.1 W 的输出, 其中每个偏振模的光谱宽度约为 660 MHz。该课题组同时指出只要解决了热沉积对分布反馈光栅的影响, 加大抽运功率便可以获得更大的功率输出。

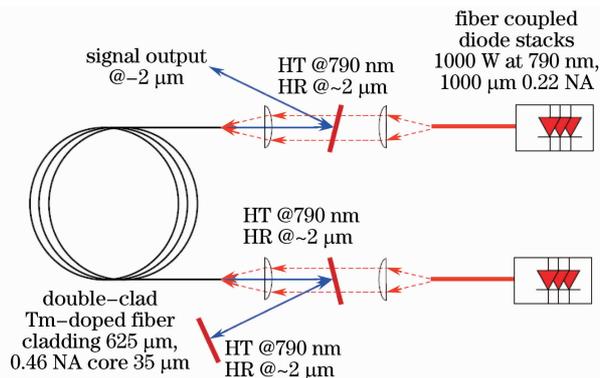


图 2 2009 年 Q-peak 公司的掺 Tm 光纤激光系统实验光路

Fig. 2 Tm-doped fiber laser of Q-peak company in 2009

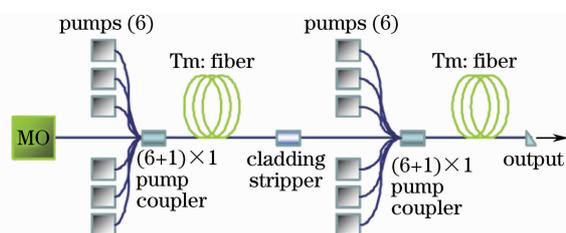


图 3 多抽运两级放大结构

Fig. 3 Multi-pump two-stage MOPA configuration

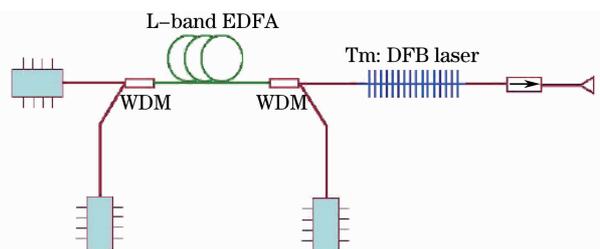


图 4 IPG 公司 MOPA 结构中的种子源部分

Fig. 4 Seed laser in MOPA of IPG

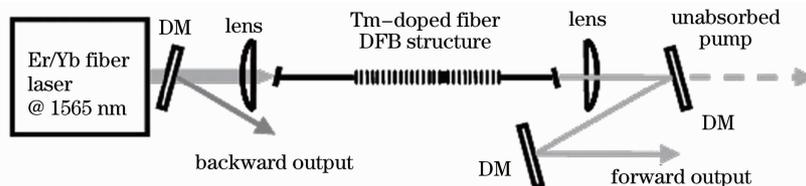


图 5 南安普顿大学的掺 Tm 分布反馈光纤激光器

Fig. 5 Tm-doped fiber DFB laser configuration of University of Southampton

同年, 该课题组在原结构的基础上增多了 MOPA 结构的放大级, 采用两级放大分布反馈窄线宽 MOPA 结构获得了 10 W 的两个单频线偏振模输出(图 6)^[13]。其中抽运源为工作在 1565 nm 线宽小于 2 nm 的单模 Er:Yb 光纤激光。耦合到预放级的种子光功率为 600 mW, 经过预放后达到 3.15 W, 再经过主放大级后放大到 10 W, 此时的抽运功率为 16 W, 整个结构的斜率效率达到 71%。输出激光波长为 1943 nm, 并且通过调

制光栅可以获得大于 10 nm 的调谐量。Z. Zhang 等^[12]还指出在 10 W 的功率输出下并未受到热效应或受激布里渊散射的影响,输出功率仅仅受限于抽运功率,只要进一步提高抽运功率,还可以获得更大的激光输出。

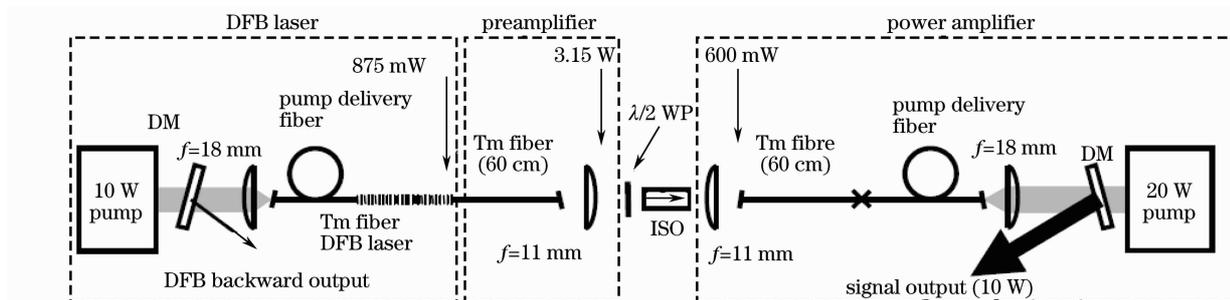


图 6 南安普顿大学的两级放大分布反馈 MOPA 结构

Fig. 6 Two-stage DFB MOPA configuration of University of Southampton

在此基础上,该课题组的 Pearson 等^[14]进一步将 MOPA 结构中的放大级增加为 3 级(图 7),获得了波长 1943 nm 的功率 100 W 的近衍射极限的两个单频线偏振模输出,光束质量因子 $M^2 < 1.25$ 。其中主振荡器为工作于 1943 nm 的掺 Tm 分布反馈光纤激光器,用 10 W 的波长为 1565 nm 的 Er:Yb 光纤激光抽运,最大输出功率为 875 mW。预放级为一段掺 Tm 光纤,利用主振荡器中未被充分吸收的抽运光抽运。经预放的激光的光束质量因子 $M^2 < 1.1$,功率被放大到 3 W。第二放大级亦采用功率为 20 W 波长为 1565 nm 的 Er:Yb 光纤激光作抽运,将激光放大到 10 W。第三放大级则用两个功率为 240 W 波长为 795 nm 的半导体激光器作为抽运源,最终输出功率到达 100 W。该课题组认为输出功率仍然是受限于抽运功率,只要增加放大级的抽运功率完全可以获得更高的功率输出。

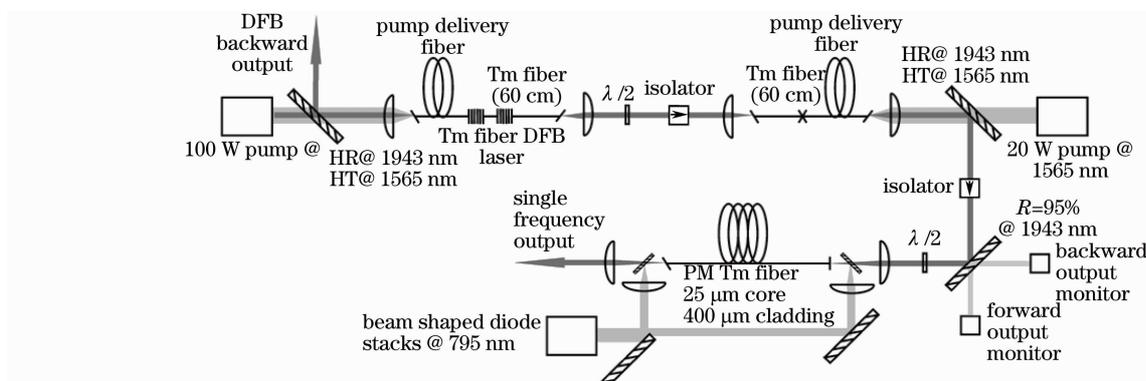


图 7 南安普顿大学的三级 MOPA 结构

Fig. 7 Three-stage MOPA configuration of University of Southampton

2009 年,美国 AdValue 光电子公司采用短腔分布反馈、包层纤芯双重抽运方式,用工作在 1575 nm 的掺 Er 光纤激光作为抽运源,在重掺 Tm 硅光纤中获得了 41 mW 的功率输出,其中心波长位于 1950 nm,线宽小于 3 kHz,这是迄今为止在 2 μm 附近获得的线宽最窄的激光输出^[15],但由于未采用 MOPA 结构,输出的单频激光的功率并不显著。同年,Nufern 公司的 Ehrenreich 等^[16]利用 3 级 MOPA 放大结构获得了 20 W 单频激光输出,中心波长为 2037 nm(图 8)。其中以波长 2037 nm 线宽 100 kHz 功率为 1 mW 的半导体激光作为种子源,在预放级中采用波长 1550 nm 的光纤激光对保偏放大器进行纤芯抽运,得到了 50 mW 的功率输出,第二、三放大级采用波长 790 nm 的高亮度半导体激光进行包层抽运,分别得到了 3 W 和 20 W 的功率输出。由于 Tm 离子的交叉弛豫现象,第三放大级的斜率效率达到 50%~60%。在实验中,单模光纤放大器并没有受到受激布里渊散射的影响。

单频单模光纤放大器发展的里程碑当属 2009 年美国 Northrop Grumman 公司报道的波长 2040 nm,功率 608 W 单横模、单纵模激光输出,其线宽小于 5 MHz,相位噪声中 1 kHz 以上的频率成分很少,其均方根值小于 $\lambda/30$ 。系统结构如图 9 所示^[17]。该系统以波长为 2040 nm 功率为 3 mW 的分布反馈半导体激光作

为种子源,经过3级预放后获得15 W激光,再进入主放大器。主放大器以两个790 nm的半导体激光器作为抽运源,增益光纤是3.1 m长的双包层掺Tm光纤,纤芯直径为25 μm ,内包层直径为400 μm ,输出激光光束质量 $M^2=1.05$ 。这也是目前在所有波长下最高功率的单频单模光纤激光器,甚至超过了以往报道的1 μm 波段的最高输出功率。值得注意的是,这种窄线宽、低相位噪声、近衍射极限的光纤激光非常适于相干合成。

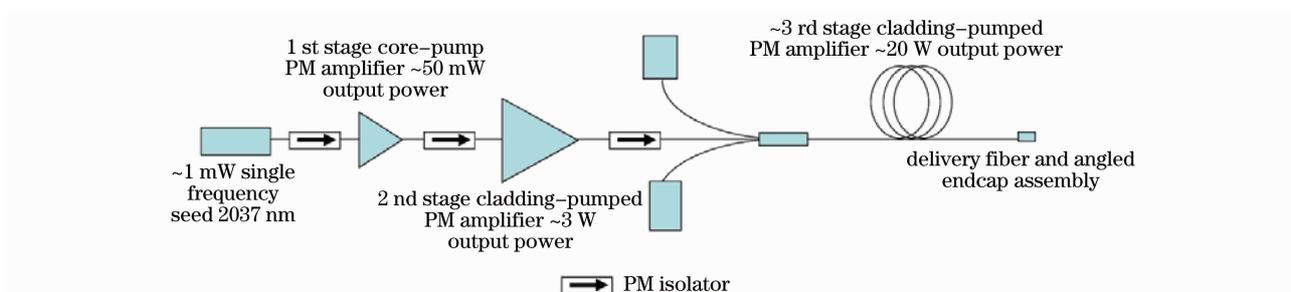


图8 Nufern公司的三级单频保偏光纤放大器结构

Fig. 8 Three-stage single frequency PM-fiber amplifier system of Nufern company

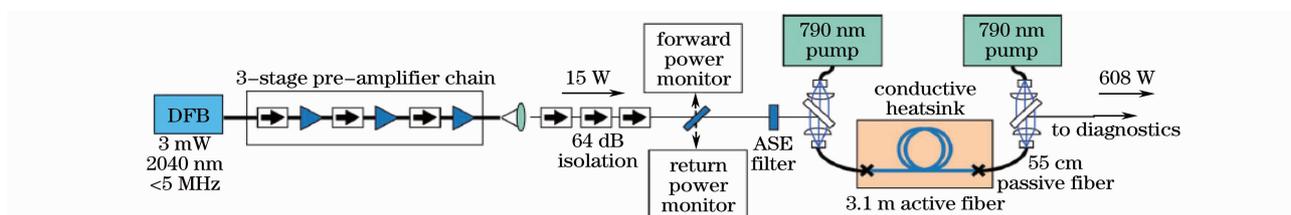


图9 Northrop Grumman公司的四级掺Tm光纤放大器结构

Fig. 9 Four-stage Tm fiber amplifier layout of Northrop Grumman company

2.1.4 可调谐激光

在可调谐掺Tm光纤激光器方面,英国南安普顿大学报道了基于MOPA结构的线偏振输出功率大于100 W^[18],可调谐范围大于190 nm(1820~2010nm)的掺Tm光纤激光器,其结构如图10所示。其中输出功率仅仅受限于抽运功率,而调谐范围仅仅受限于种子光的可调谐范围。

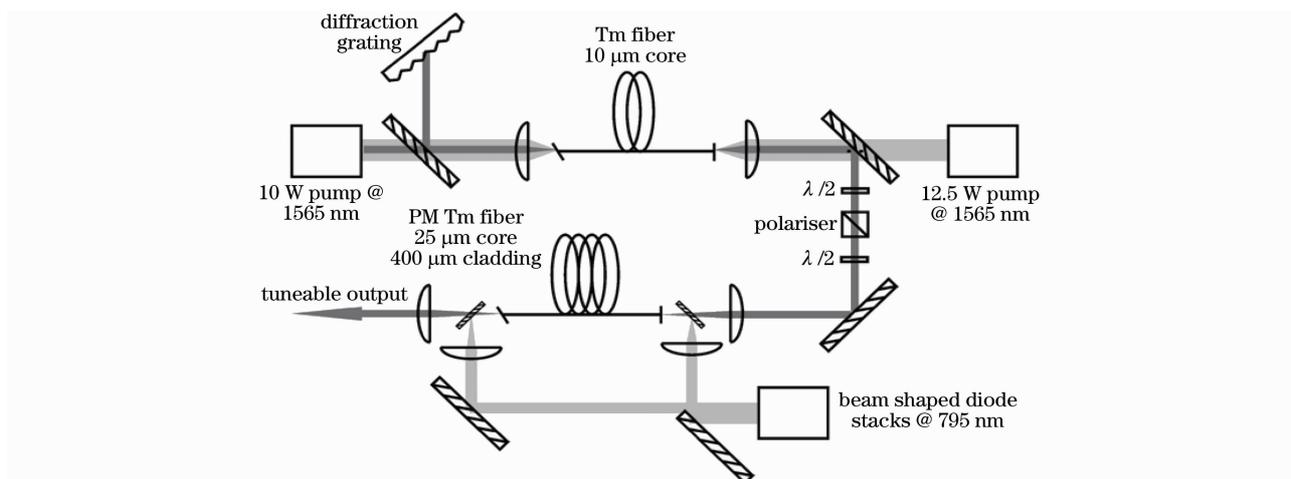


图10 南安普顿大学的高功率可调谐掺Tm光纤激光器结构

Fig. 10 High-power widely-tunable Tm-doped fiber master-oscillator power-amplifier of University of Southampton

2010年,美国中央佛罗里达大学课题组^[19]采用MOPA结构(图11),获得了调谐范围大于100 nm(1974~2082 nm),功率大于200 W的2 μm 波段窄线宽高光束质量激光输出,斜率效率达到63%,并且进行了该光束的大气传输实验。

掺Tm光纤激光的成熟也推动了激光器的产业化、商品化。美国Nufern公司已有50 W全光纤掺Tm

光纤激光器出售;美国 IPG 光子技术公司出售的单模掺 Tm 光纤激光器最大输出功率可达 150 W,线偏输出时最大输出功率可达 50 W,可调谐掺 Tm 光纤激光器最大输出功率可达 20 W^[20,21]。

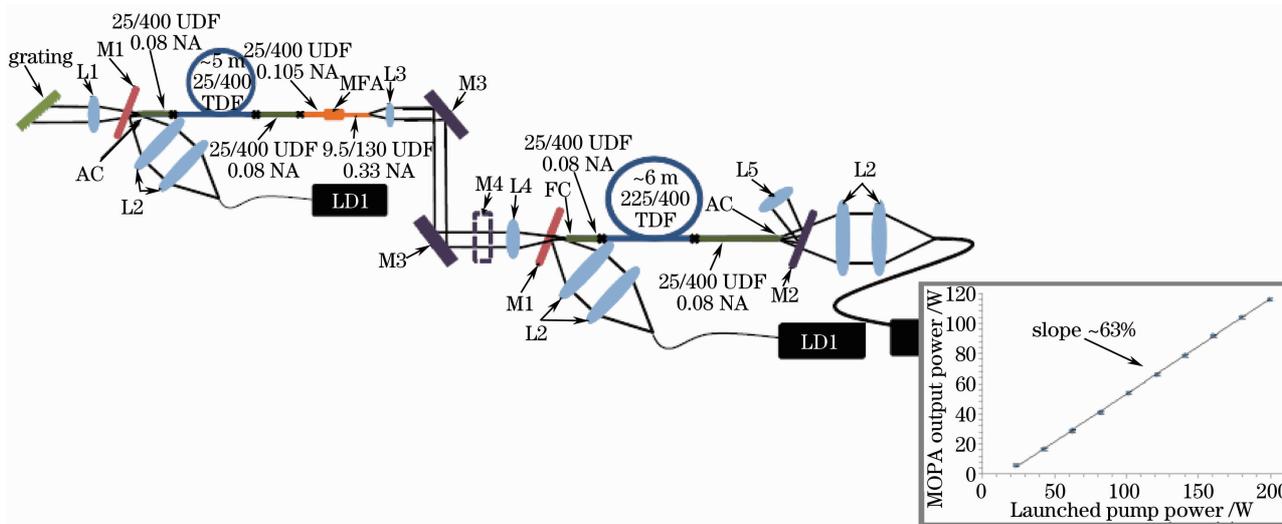


图 11 中央佛罗里达大学的可调谐掺 Tm 光纤激光器

Fig. 11 Tunable Tm-doped fiber laser system of University of Central Florida

2.2 脉冲激光

随着大功率连续波输出掺 Tm 光纤激光器的发展,脉冲输出掺 Tm 光纤激光器的性能也不断提高,调 Q 和锁模两种方式都获得了较好的脉冲激光。

2.2.1 调 Q 脉冲激光器

在声光调 Q 方面,法国、德国和澳大利亚等国的联合研究小组、美国中央佛罗里达大学、Nufern 公司均有研究。2007 年,法国、德国和澳大利亚等国的联合研究小组报道了采用 792 nm 的半导体激光抽运的主动调 Q 掺 Tm 光纤激光器(图 12)^[22],工作波长为 1.98 μm ,平均输出功率达到了 30 W,脉宽 41 ns,重复频率 10~125 kHz,最大单脉冲能量可到 270 μJ 。

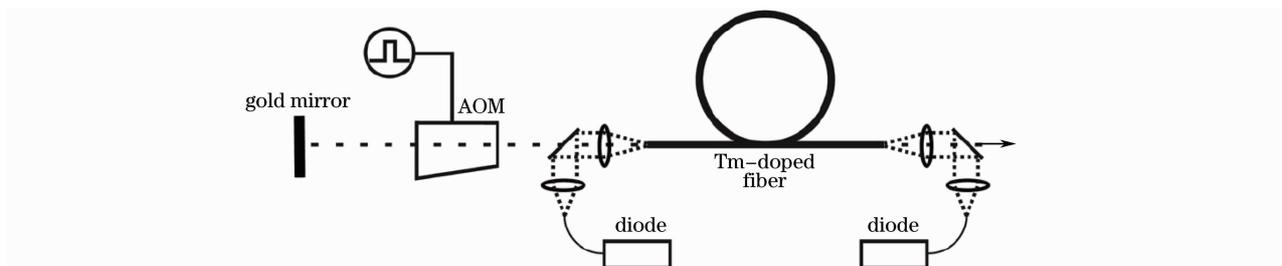


图 12 联合研究小组的高脉冲能量主动调 Q 掺 Tm 光纤激光器

Fig. 12 High-pulse-energy actively Q-switched Tm-doped fiber laser of French-German-Australian Research Institute

2009 年, Nufern 公司研制了一种声光调 Q 的掺 Tm 光纤激光器(图 13)^[23]。该激光器采用声光调 Q 的 Er:Yb 共掺光纤激光器作为抽运源,产生波长为 1.55 μm ,脉宽 100 ns,重复频率 20~100 kHz 的脉冲抽运光,采用纤芯抽运的方式注入到一段 20 cm 长的掺 Tm 光纤中,这段掺 Tm 光纤和两个 1908 nm 的光纤光栅(反射率分别为 99% 和 15%)形成谐振腔。输出的 1908 nm 的脉冲种子光经过隔离器后再注入到 3.5 m 长的保偏掺 Tm 放大器中。其中放大器采用两个 18 W 的 790 nm 的半导体激光器抽运。该掺 Tm 脉冲光纤激光器输出了峰值功率 4.3 kW,单脉冲能量接近毫焦,平均功率约为 6 W 的线偏振光,光束质量接近衍射极限水平。Nufern 公司将产生的脉冲光束衰减后通过 PPLN 晶体观察到较好的倍频现象,得到波长为 954 nm 的倍频光,功率为 1 W,转换效率大于 60%。

2010 年的 Photonics West 会议上,美国中央佛罗里达大学报道了全保偏结构的调 Q 掺 Tm 光纤激光器(图 14)^[24]。当激光器使用高反射镜时,多波长运转,单脉冲能量达到 360 μJ ,重复频率可达 100 kHz,平均

功率达到 28 W。若该激光器采用闪耀光栅或体布拉格光栅作为反馈元件可以将谱宽稳定在亚纳米的水平。当使用反射光栅时,输出激光波长 1992 nm,最大单脉冲能量可到 350 μJ ,谱宽小于 200 pm,脉宽 115 ns,重复频率 20 kHz,激光器斜率效率为 28%;当使用体布拉格光栅时,输出激光波长 2052 nm,最大单脉冲能量可到 225 μJ ,谱宽小于 200 pm,脉宽 200 ns,重复频率 20 kHz,激光器斜率效率为 24%,两种情况下输出激光的消光比都大于 10 dB。

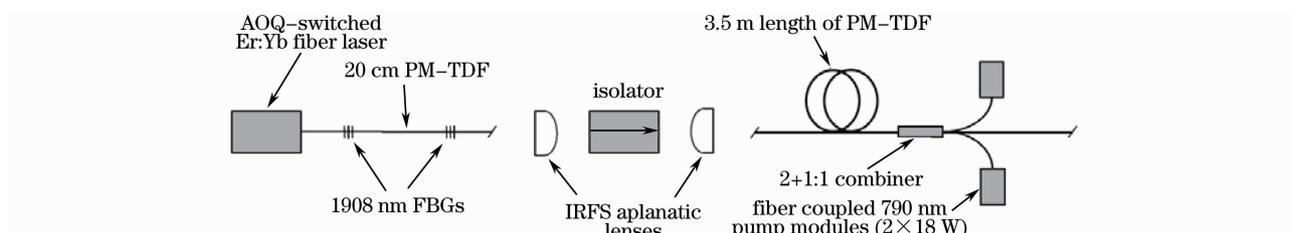


图 13 Nufern 公司的工作于 1908 nm 的掺 Tm 脉冲光纤激光器

Fig. 13 Pulsed laser system based on Tm-doped fiber and operating around 1908 nm of Nufern company

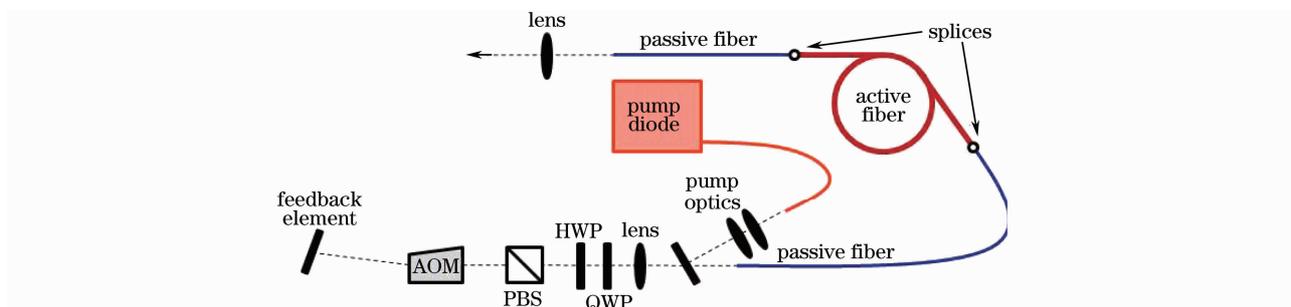


图 14 中央佛罗里达大学的高脉冲能量调 Q 掺 Tm 保偏光纤激光器

Fig. 14 High-energy Q-switched Tm-doped polarization maintaining silica fiber laser of University of Central Florida

采用机械调 Q 的方式,同样实现了脉冲掺 Tm 光纤激光输出。2009 年,美国 AdValue 公司 Jihong Geng 等^[25]报道了单频机械调 Q 掺 Tm 光纤激光器。实验系统结构如图 15 所示^[25],两个光纤布拉格光栅 (FBG) 和一段掺 Tm 光纤形成一个分布布拉格反射腔结构,其中一个高反射率非保偏光纤布拉格光栅作为反射端,另一个保偏窄带光纤布拉格光栅在两个正交的偏振方向上具有不同的反射率,作为输出端,这个谐振腔只能对一个方向上的偏振光形成振荡,对与其正交方向上的偏振光不能形成振荡。当有预应力作用在应力诱导双折射光纤上时,谐振腔处于低 Q 值状态,通过压电陶瓷突然释放掉应力,谐振腔处于高 Q 值状态,这样便实现了应力调 Q。该机械调 Q 掺 Tm 光纤激光器获得了瓦量级的平均功率输出,重复频率在 0.010~100 kHz 可调,输出激光线宽在几十兆赫兹量级。

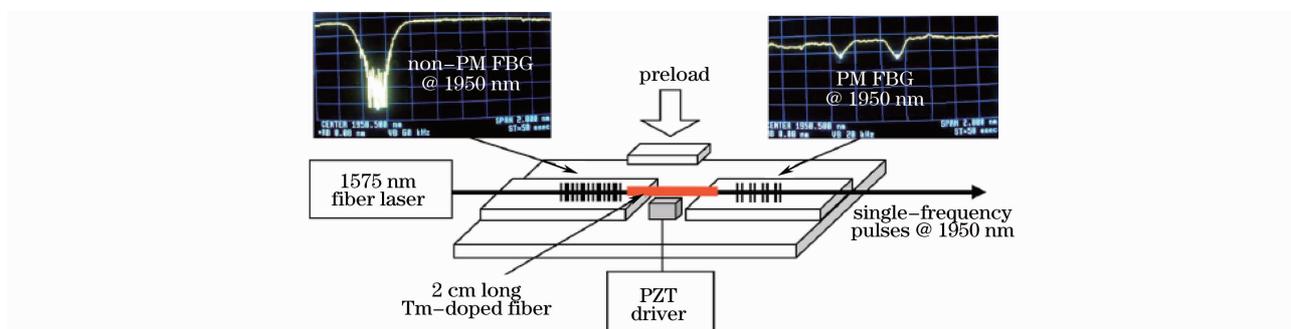


图 15 AdValue 公司的单频调 Q 掺 Tm 光纤激光器

Fig. 15 All-fiber Q-switched single-frequency Tm-doped laser of AdValue company

除了声光(AO)调 Q 和机械调 Q 的方式外,美国 Spectrode 公司、BAE 公司和 OPO 研制了增益调 Q 的掺 Tm 脉冲光纤激光器。2007 年,美国 Spectrode 公司的 Min Jiang 等^[26]报道了增益调节脉冲光纤激光器,如图 16 所示。经过调制的中心波长 1550 nm 的半导体激光经过掺 Er 光纤放大器(EDFA)放大后作为抽运

源,抽运一段掺 Tm 光纤,输出激光脉宽 10 ns,重复频率 500 kHz,最大单脉冲能量可到 12 μ J,峰值功率达 1 kW,激光器最大斜率效率可达 50%。

2008 年,美国 BAE 公司的 Creeden 等^[27]利用两级放大结构,获得了平均功率超过 20 W 的脉冲掺 Tm 光纤激光输出,结构如图 17 所示。该激光器采用 795 nm 的半导体激光抽运,工作波长为 1.995 μ m,光束质量 $M^2 < 1.2$,当重复频率为 50 kHz 时,输出激光脉宽 13 ns,单脉冲能量大于 325 μ J,峰值功率 25.4 kW,斜率效率为 32%;当重复频率为 100 kHz 时,输出激光脉宽 20 ns,单脉冲能量大于 211 μ J,峰值功率 10.5 kW,斜率效率为 43%。

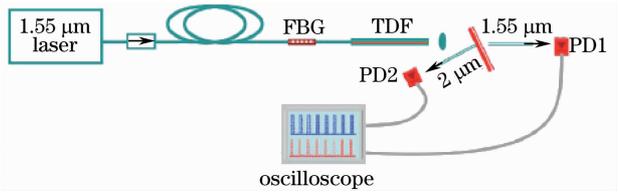


图 16 Spectrode 公司的增益调节掺 Tm 光纤激光器
Fig. 16 Gain-switched Tm-doped fiber laser of Spectrode company

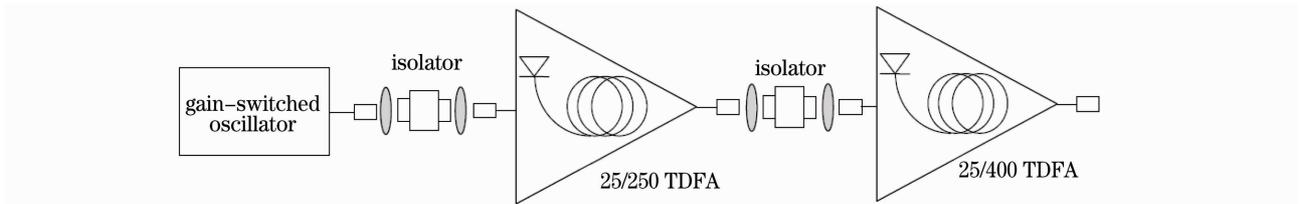


图 17 BAE 公司的两级掺 Tm 光纤激光器

Fig. 17 Dual-stage Tm-doped fiber amplifier system of BAE company

在此基础上,Creeden 等^[28]进一步利用增益调 Q 的掺 Tm 光纤激光实现了瓦级的光学参量振荡(OPO)(图 18)。其中增益调 Q 的掺 Tm 光纤激光部分仍然采用原来的两级放大结构,工作波长为 1.995 μ m,光束质量 $M^2 = 1.1 \pm 0.05$,重复频率 100 kHz,脉宽 30 ns 平均功率 21 W。利用其中 12.7 W 的线偏振光抽运 OPO,获得了 2 W 的中红外输出,其中 1.3 W 为 4.0~4.7 μ m 的空闲光,其余为 3.4~3.9 μ m 的信号光,整个 OPO 的中红外转化效率为 15.7%。迄今为止,这是最高的光纤抽运中红外输出。

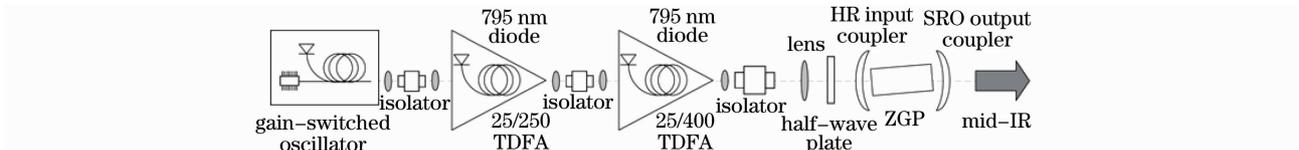


图 18 掺 Tm 光纤放大链和中红外光学参量振荡

Fig. 18 Tm-doped fiber amplifier chain and mid-IR OPO

2.2.2 锁模激光器

在锁模脉冲方面,2008 年俄罗斯科学院 Solodyankin 等^[29]利用碳纳米管可饱和吸收体实现了掺 Tm 光纤激光锁模输出。搭建的环形腔锁模激光器用波长为 1.57 μ m 的掺 Er 光纤激光抽运(图 19),输出激光中心波长为 1.93 μ m,重复频率为 37 MHz,脉宽为 1.32 ps,平均功率为 3.4 mW,峰值功率达到 70 W。

2009 年,美国 AdValue 公司 Wang 等^[30]利用可饱和吸收镜(SESAM)实现掺 Tm 光纤激光锁模输出。该激光器由可饱和吸收镜、波长为 798 nm 的半导体激光抽运源和一段 30 cm 长的高掺 Tm 光纤组成(图 20),斜率效率达到 68.3%,输出激光中心波长为 1.98 μ m,单脉冲能量 0.76 nJ,脉宽为 1.5 ps。该激光器单位长度增益高达 2 dB/cm,并且具有很宽的增益谱,自发辐射谱宽为 92 nm,这是利用短于 1 m 的掺杂光纤实现波长 2 μ m 附近的锁模脉冲输出。

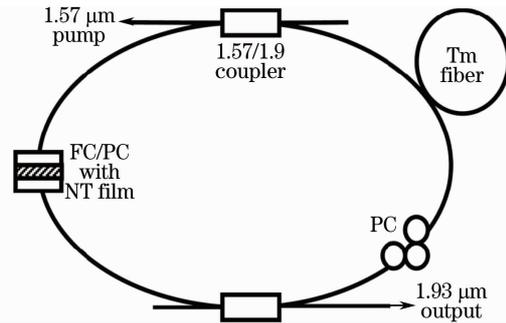


图 19 利用碳纳米管可饱和吸收体实现的环形腔掺 Tm 锁模激光器

Fig. 19 Scheme of the ring-cavity Tm-doped fiber laser mode locked with a carbon nanotube absorber

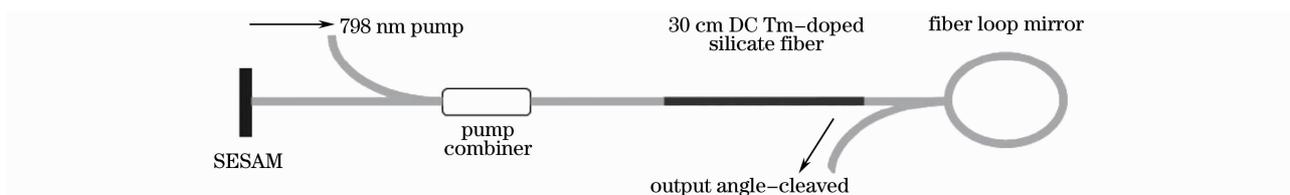


图 20 AdValue 公司的锁模掺 Tm 光纤激光器

Fig. 20 Schematic of mode-locked Tm-doped silicate fiber laser of AdValue

3 国内掺 Tm 光纤激光的研究进展

在我国掺 Tm 光纤激光器的研究工作虽然起步较晚,与国外相比存在不小的差距,但是进展很快。国内主要研究单位有中国科学院上海光学精密机械研究所、哈尔滨工业大学光电子研究所、深圳大学电子科学与技术学院、北京交通大学、复旦大学等^[31~39]。

中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光与应用系统研究室的陈卫标、徐剑秋研究组,成功利用掺 Tm 石英双包层光纤获得了 $2\ \mu\text{m}$ 波段的连续激光输出,输出功率达 $70\ \text{W}$,斜效率达到 60% ,是目前国内报道的 $2\ \mu\text{m}$ 输出功率的最高记录。

哈尔滨工业大学光电子研究所张云军等^[37]实现了全光纤掺 Tm 连续激光 $39.4\ \text{W}$ 输出,中心波长 $1.94\ \mu\text{m}$,谱宽小于 $2\ \text{nm}$,该激光器由一段 $3.2\ \text{m}$ 长的掺 Tm 光纤和光纤布拉格光栅组成,采用半导体激光包层抽运的方式,斜率效率达到 34.2% (图 21)。

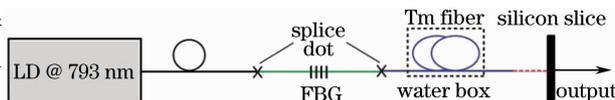


图 21 哈尔滨工业大学的全光纤掺 Tm 连续激光器

Fig. 21 All-fiber Tm-doped CW laser of Harbin Institute of Technology

哈尔滨工业大学光电子研究所还进行了全光纤掺 Tm 连续放大器的研究。激光器采用 MOPA 结构,由一个半导体激光包层抽运的全光纤单模掺 Tm 激光器产生功率为 $2.4\ \text{W}$,谱宽 $0.1\ \text{nm}$ 的种子光,经过放大器后输出功率为 $30.6\ \text{W}$,中心波长 $1947.6\ \text{nm}$,谱宽 $0.2\ \text{nm}$ 的连续激光,斜率效率为 39.1% ^[34]。

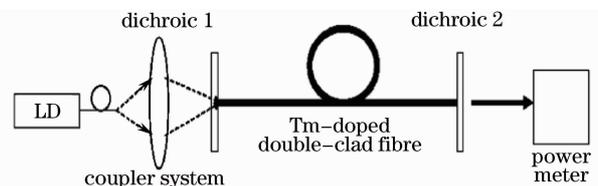


图 22 深圳大学的连续双包层掺 Tm 光纤激光器

Fig. 22 CW Tm-doped silica double-cladding fiber laser of Shenzhen University

深圳大学电子科学与技术学院杜戈果等^[36]在室温下采用双包层掺 Tm 光纤激光实现了连续激光输出(图 22)。激光器采用波长 $791\ \text{nm}$ 的半导体激光进行包层抽运,斜率效率达到 50% ,输出 $6\ \text{W}$ 的连续激光,波长为 $2\ \mu\text{m}$,光束质量 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.26 和 1.32 。

4 总结与展望

掺 Tm 光纤激光相对于传统的掺 Yb,掺 Er,Er:Yb 共掺光纤激光具有许多优势,在遥感、激光雷达、医疗、光束合成、光学参量振荡等领域具有重要的应用。掺 Tm 光纤激光在 $0.8\ \mu\text{m}$ 附近和 $1.6\ \mu\text{m}$ 附近分别有两个抽运带,由于 Tm^{3+} 特殊的交叉弛豫现象,通常使用波长 $0.8\ \mu\text{m}$ 的半导体激光作为抽运源,采用 MOPA 结构获得高功率 $2\ \mu\text{m}$ 的激光输出。掺 Tm 光纤激光器特别是采用 MOPA 结构的激光器的功率水平不断提升,连续掺 Tm 光纤激光已经实现上千瓦的输出,其中单频连续掺 Tm 光纤激光实现了 $608\ \text{W}$ 的输出;采用调 Q 和锁模两种方式已经实现重复频率上千赫兹、单脉冲能量接近毫焦的纳秒脉冲输出。目前普遍认为掺 Tm 光纤激光的功率只是受限于抽运功率。随着工作于 $790\ \text{nm}$ 波段的高功率、高亮度半导体激光抽运源的发展,将会使 $2\ \mu\text{m}$ 连续、脉冲掺 Tm 光纤激光器工作到更高的功率水平。高功率 $2\ \mu\text{m}$ 激光将在遥感、激光雷达、医疗、光束合成、光学参量振荡等领域发挥巨大的作用。另外,随着光栅刻写、抽运源、掺杂光纤的国产化,掺 Tm 光纤激光器一体化、国产化也是一种趋势。

参 考 文 献

- 1 Zhang Yunjun, Wang Yuezhu, Ju Youlun *et al.*. Progress of Tm³⁺-doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(6): 34~43
张云军, 王月珠, 鞠有伦 等. 掺 Tm³⁺ 光纤激光器的进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(6): 34~43
- 2 Liu Peipei, Bai Yang, Ren Zhaoyu *et al.*. Research and progress of 2 μm fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 45~49
刘沛沛, 白 杨, 任兆玉 等. 2 μm 光纤激光器的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(1): 45~49
- 3 Zhou Jun, Dong Shufu, Zhou Yijian *et al.*. Researching progress of 2 μm optical fiber laser[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(3): 1~3
周 俊, 董淑福, 周义建 等. 2 μm 光纤激光器的研究进展[J]. 激光杂志, 2008, **29**(3): 1~3
- 4 Li Dajun, Du Geguo. The recent research progress of Tm³⁺-doped fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(5): 540~543
黎大军, 杜戈果. 掺铥光纤激光器研究进展[J]. 激光技术, 2007, **31**(5): 540~543
- 5 A. Carter, J. Galipeau, B. Samson *et al.*. Recent progress in the development of high power all-fiber lasers and amplifiers [C]. ILOPE, 2009
- 6 Thomas Ehrenreich, Ryan Leveille, Imtiaz Majid *et al.*. 1-kW, all-glass Tm³⁺ fiber laser[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 16
- 7 Evgueni Slobodtchikov, Peter F. Moulton. Efficient, high-power, Tm-doped silica fiber laser[C]. OSA/ASSP, 2007
- 8 Peter F. Moulton, Glen A. Rines, Evgueni V. Slobodtchikov *et al.*. Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 85~92
- 9 Jihong Geng, Jianfeng Wu, Shibin Jiang *et al.*. Efficient operation of diode-pumped single frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 355~357
- 10 M. Meleshkevich, N. Platonov, D. Gapontsev *et al.*. 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format[C]. IEEE Xplore. 2009. 11
- 11 D. Gapontsev. 20 W single-frequency fiber laser operating at 1.93 μm[C]. IEEE Xplore. 2009. 11
- 12 Z. Zhang, D. Y. Shen, A. J. Boyland *et al.*. High-power Tm-doped fiber distributed-feedback laser at 1943 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18): 2059~2061
- 13 Z. Zhang, A. J. Boyland, J. K. Sahu *et al.*. Single-frequency Tm-doped fiber master-oscillator power amplifier with 10 W linearly-polarized output at 1943 nm[C]. OSA/CLEO/IQEC, 2007
- 14 L. Pearson, J. W. Kim, Z. Zhang *et al.*. High-power single-frequency thulium-doped fiber master-oscillator power-amplifier at 1943 nm[C]. OSA/CLEO/IQEC 2009 CThN1. pdf
- 15 Jihong Geng, Qing Wang, Tao Luo *et al.*. Single-frequency narrow-linewidth Tm-doped fiber laser using silicate glass fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(22): 3493~3495
- 16 T. Ehrenreich, V. Khitrov, G. Frith *et al.*. High efficiency 20 W single frequency PM fiber amplifier at 2037 nm[C]. 2009 OSA/ASSP 2009 WB2
- 17 Gregory D. Goodno, Lewis D. Book, Joshua E. Rothenberg. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1204~1206
- 18 L. Pearson, D. Y. Shen, J. K. Sahu *et al.*. High-power widely-tunable thulium-doped fiber master-oscillator power-amplifier around 2 μm[C]. OSA/CLEO/IQEC 2008
- 19 T. S. McComb, L. Shah, R. A. Sims *et al.*. High power, tunable thulium fiber laser system for atmosphere propagation experiments[C]. OSA/CLEO/IQEC 2009
- 20 www.nufern.com
- 21 www.ipgphotonics.com
- 22 Marc Eichhorn, Stuart D. Jackson. High-pulse-energy actively Q-switched Tm³⁺-doped silica 2 μm fiber laser pumped at 792 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(19): 2780~2782
- 23 G. Frith, T. McComb, B. Samson *et al.*. Frequency doubling of Tm-doped fiber lasers for efficient 950 nm generation[C]. 2009 OSA/ASSP 2009 WB5
- 24 L. Shah, C. C. Willis, T. S. McComb *et al.*. High-energy Q-switched Tm³⁺-doped polarization maintaining silica fiber laser[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 758003
- 25 Jihong Geng, Qing Wang, Jake Smith *et al.*. All-fiber Q-switched single-frequency Tm-doped laser near 2 μm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(23): 3713~3715
- 26 Min Jiang, Parviz Tayebati. Stable 10 ns, kilowatt peak-power pulse generation from a gain-switched Tm-doped fiber laser

- [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1797~1799
- 27 Daniel Creedon, Peter Budni, Peter A. Ketteridge *et al.*. High power pulse amplification in Tm-doped fiber[C]. OSA / CLEO/QELS 2008
- 28 Daniel Creedon, Peter A. Ketteridge, Peter Budni *et al.*. Multi-watt Mid-IR fiber-pumped OPO[C]. OSA/CLEO/QELS 2008
- 29 Max A. Solodyankin, Elena D. Obraztsova, Anatoly S. Lobach *et al.*. Mode-locked 1.93 μm thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1336~1338
- 30 Q. Wang, J. Geng, T. Luo *et al.*. Mode-locked 2 μm laser with highly thulium-doped silicate fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(23): 3616~3618
- 31 Chunting Wu, Youlun Yu, Yufeng Li *et al.*. Diode-pumped Tm:LuAG laser at room temperature[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 415~416
- 32 Chunting Wu, Youlun Ju, Yufeng Li *et al.*. Diode-end-pumped composite Tm:YAG rod with undoped ends at room temperature[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 594~596
- 33 Y. J. Zhang, B. Q. Yao, S. F. Song *et al.*. All-fiber Tm-doped double-clad fiber laser with multi-mode FBG as cavity[J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(5): 1006~1008
- 34 Y. Zhang, T. Jing. All-fiber clad-pumped Tm³⁺-doped fiber amplifier using high power fiber combiner[J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(12): 2197~2199
- 35 Y. Zhang, Ch. Song, W. Wang. Multi-peak output Tm-doped silica fiber laser based on femtosecond written multi-mode fiber Bragg grating[J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(8): 1854~1857
- 36 Geguo Du, Dajun Li, Min Zhang *et al.*. LD-pumped 6 W CW Tm³⁺-doped silica double-cladding fibre laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(3): 957~959
- 37 Yunjun Zhang, Shifei Song, Yi Tian *et al.*. LD-clad-pumped all-fiber Tm³⁺-doped silica fiber laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(8): 084211
- 38 Yulong Tang, Yong Yang, Xiaojin Cheng *et al.*. Short Tm³⁺-doped fiber lasers with watt-level output near 2 μm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 44~46
- 39 Wang Fei, Shen Deyuan, Fan Dianyuan *et al.*. Efficient Ho:YLF laser pumped by Tm-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1727~1731
- 王 飞, 沈德元, 范滇元 等. 可调谐掺铥光纤激光器共振抽运的 Ho:YLF 固体激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1727~1731