

高效率掺  $\text{Tm}^{3+}$  双包层光纤及光纤激光器的研制\*

邢颖滨 叶宝圆 蒋作文 戴能利 李进延†

(武汉光电国家实验室(筹), 武汉 430074)

(2013年8月10日收到; 2013年9月17日收到修改稿)

掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器有着广泛的应用前景, 而掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤是其核心与关键. 本文采用改进的化学汽相沉积 (MCVD) 工艺和气相液相复合掺杂技术, 在 MCVD 机车上实现了掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤预制棒的制备, 并制备了掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英双包层光纤 (芯包比为 10/125). 利用上述光纤搭建直腔型全光纤激光器, 在波长为 793 nm 的 LD 抽运下, 获得激光光谱中心波长为 2002 nm, 最大的激光输出功率 30.7 W, 光纤斜率效率为 59.32%.

**关键词:** 掺  $\text{Tm}^{3+}$  双包层光纤, 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器, 斜率效率

**PACS:** 42.81.Bm, 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.81.Cn **DOI:** 10.7498/aps.63.014209

## 1 引言

近年来光纤激光器在军事、工业加工、光通信等应用领域发展非常迅猛, 凭借着其转换效率高、散热性能好、光束质量优良、可调谐范围大、稳定性良好等优点逐渐取代传统固体激光器<sup>[1,2]</sup>. 由于掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器所发射的 2  $\mu\text{m}$  波段激光处于水分子吸收峰且对人眼安全, 再加上掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的抽运源 (793 nm 半导体激光器) 应用已经非常成熟, 所以它在生物医学、医疗手术、工业加工、军事等方向有着广泛的应用前景, 拓宽了光纤激光器的应用范围. 此外大气雷达探测的应用需要可靠的 2  $\mu\text{m}$  波段激光<sup>[3]</sup>, 而且 2  $\mu\text{m}$  激光又是 3—5  $\mu\text{m}$  光参量振荡的有效抽运源<sup>[4,5]</sup>, 因此, 越来越多的注意力被吸引到掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤和掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的研究领域.

最近几年国内外掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器发展很快, 在连续激光和脉冲激光都取得非常大的成果<sup>[6-13]</sup>. 2009 年 Northrop Grumman 公司报道一种低相位噪声、单模、单频 TDF 激光器, 采用 25/400 的双包层 TDF, 输出功率为 608 W, 中心波长 2040 nm, 线宽小于 5 MHz, 激光光束质量

$M^2 < 1.05 \pm 0.03$ , 这是目前最高功率的单模、单频光纤激光器<sup>[7]</sup>. 2010 年 Q-peak 公司 Moulton 等人利用 MOPA 技术, 采用 20/400 的 TDF, 实现了大于 1 kW 的连续单模激光输出, 中心波长为 2045 nm, 斜率效率达到 53.2%, 这是目前报道的 TDF 激光器最高的输出功率<sup>[6]</sup>. 国内 2010 年上海光机所报道了 100 W 级的高功率增益开关 TDF 激光器<sup>[12]</sup>, 西安光机所报道一种高功率可调谐的 2  $\mu\text{m}$  波段光纤激光器, 波长范围为 1821—1930 nm, 连续激光功率输出达 60.8 W, 斜率效率为 46%<sup>[6]</sup>. 2009 年北京交通大学报道一种采用“湿法”(液相) 掺杂方法的国产掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 并获得了工作波长 1947 nm、功率 2.05 W 的激光输出<sup>[10]</sup>. 2012 年哈尔滨工业大学报道一种对双包层大芯径光纤光栅反射率和纤芯折射率调制估算的方法, 制成光纤光栅, 应用到全光纤化掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器, 得到 15.5 W 的 1950.3 nm 激光输出, 斜率效率为 37.9%<sup>[11]</sup>.

国内的光纤激光器的输出功率和斜率效率都不高, 这极大程度上要归结于掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的性能不良. 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤是激光器中最核心的材料, 其制备技术仅掌握在国外少数几家公司手中, 由于涉及到军事领域的应用, 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的制备技术国产化是非常有必要的.

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2013AA031501) 和武汉光电国家实验室主任基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: [lgy@mail.hust.edu.cn](mailto:lgy@mail.hust.edu.cn)

本文利用气相-液相复合掺杂的方法, 制备了掺  $\text{Tm}^{3+}$  双包层光纤的过程, 光纤纤芯直径  $10\ \mu\text{m}$ , 数值孔径 0.14; 内包层直径  $125\ \mu\text{m}$ , 数值孔径 0.46, 横截面为八边形. 并用上述光纤搭建掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器, 利用  $793\text{nm}$  LD 作为抽运源, 进行了光纤长度优化、激光光谱采集、激光输出功率测试等试验. 最后获得  $2002\ \text{nm}$  左右的激光输出, 最大输出功率  $30.7\ \text{W}$ , 光纤斜率效率  $59.32\%$ .

## 2 掺 $\text{Tm}^{3+}$ 双包层光纤的制备

制备掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤预制棒可采用液相掺杂或气相掺杂的方法, 但在传统的稀土离子的掺杂方法中, 由于受到实验室环境和工艺, 存在一些问题, 比如  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂浓度不高, 如果掺杂浓度过大, 容易发生浓度猝灭甚至析晶;  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂浓度不均匀影响光纤的激光性能等等. 此次试验中我们采用气相-液相复合掺杂技术进行  $\text{Tm}^{3+}$  的掺杂. 这种新型的掺杂技术可充分解决传统掺杂技术所存在的各种问题.

掺  $\text{Tm}^{3+}$  纤预制棒制成后, 为了提供高抽运光吸收率, 将预制棒进行打磨加工, 其横截面为正八边形. 最后一步, 将掺  $\text{Tm}^{3+}$  预制棒置于拉丝塔上, 在约  $2100\ ^\circ\text{C}$  下进行拉丝, 拉丝速率在  $10\ \text{m}/\text{min}$  左右, 经过低折射率涂层和高折射率保护层的涂覆, 最终制成掺  $\text{Tm}^{3+}$  双包层光纤, 图 1 为掺  $\text{Tm}^{3+}$  双包层光纤截面图.

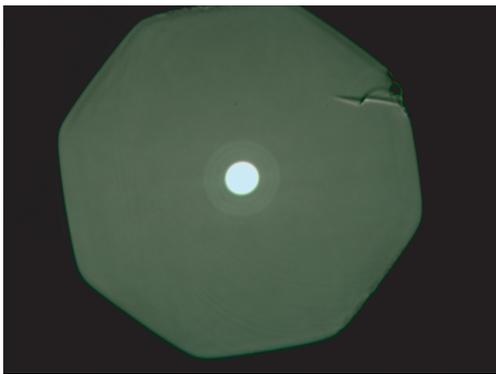


图 1 掺  $\text{Tm}^{3+}$  双包层光纤截面图

实验中利用 PK2600 对这根掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤预制棒进行测试, 折射率剖面图如图 2.

图中横坐标  $\pm 1$  处, 折射率曲线波动很明显, 这是因为在几趟缩棒过程中, 前一趟的缩棒会导致 P 挥发致使折射率下降, 后一趟的缩棒又有新的 P 的

沉积, 折射率回升, 重复此过程, 折射率出现波动的现象.

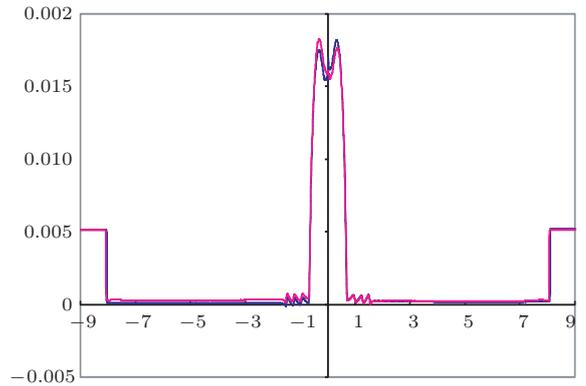


图 2 气相-液相复合掺杂 ( $\text{Tm}^{3+}$ ) 光纤预制棒折射率剖面图

## 3 实验结果与分析

石英基质玻璃中的  $\text{Tm}^{3+}$  在  $600\text{--}1800\ \text{nm}$  波段有四个明显的吸收峰<sup>[14]</sup>, 实验中选取  $793\ \text{nm}$  附近波段的激光作为掺  $\text{Tm}^{3+}$  全光纤激光器的抽运光, 一方面  $793\ \text{nm}$  光源(半导体激光器)的应用技术成熟, 另一方面  $\text{Tm}^{3+}$  对  $793\ \text{nm}$  附近波段有较强的吸收效应, 而且此种抽运会引起交叉弛豫过程, 理论量子效率为  $200\%$ , 大幅度提升激光器斜率效率, 原理分析如下:  $^3\text{H}_6$  能级上的一个  $\text{Tm}^{3+}$  被  $793\ \text{nm}$  抽运光激发到  $^3\text{H}_4$  能级, 然后无辐射跃迁到激光上能级 ( $^3\text{F}_4$ ), 同时它释放的能量被邻近的一个处于基态的  $\text{Tm}^{3+}$  吸收, 跃迁到  $^3\text{F}_4$  能级, 最终两个  $\text{Tm}^{3+}$  都处在激光上能级, 此过程量子效率为 2.

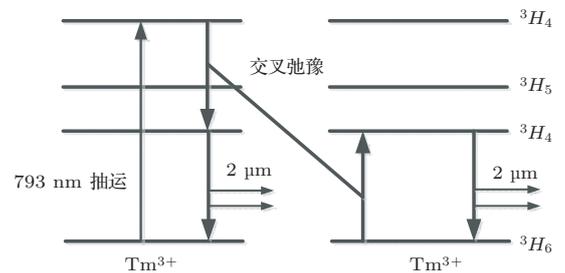


图 3  $\text{Tm}^{3+}$  在硅基光纤中交叉弛豫简化能级图

### 3.1 掺 $\text{Tm}^{3+}$ 全光纤激光器激光实验

作为掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的增益介质, 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的长度存在最佳值, 且处于最佳值时, 斜率效率最大. 搭建激光器之前进行了光纤长

度优化实验,为了减小由于操作或者光纤端面引起的误差,被测试光纤的入光端面固定不,而且优化光纤长度过程中所作光纤端面标准一致.最后测得数据如图4所示.

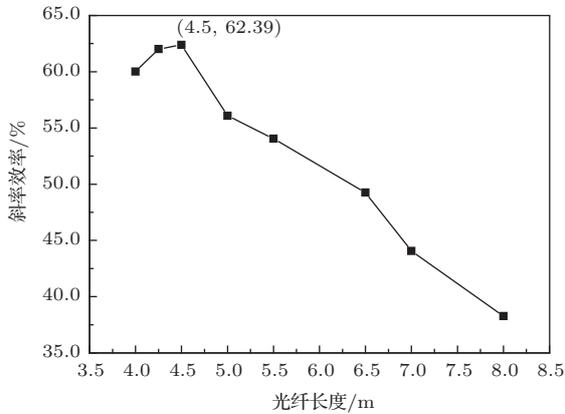


图4 光纤长度和斜率效率关系图

从图4可以看出,4.5 m为光纤的最佳长度.当

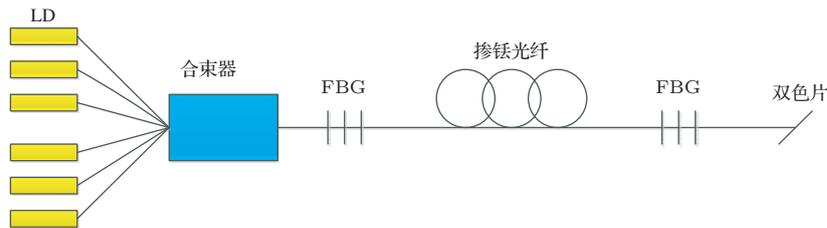


图5 掺Tm<sup>3+</sup>全光纤激光器结构图

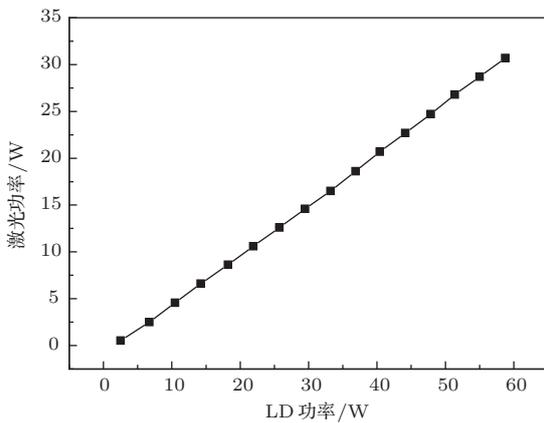


图6 LD功率和激光功率关系图

抽运源:采用商用793 nm半导体激光器,数量6个,单个最大功率输出12 W.合束器:采用7×1合束器.激光器谐振腔:谐振腔由高反FBG、掺铥光纤和低反FBG组成.高反FBG反射中心波长2000.010 nm,带宽2.008 nm,反射率99.926%;

长度小于4.5 m时,抽运光没有被最大限度的吸收,斜率效率没达到最佳.当长度大于4.5 m时,产生激光又会被再度吸收,导致激光输出功率损耗,斜率效率降低.实验中,我们测了三组光谱,对于6.5 m光纤输出波长2004 nm,5 m光纤输出波长2003 nm,4.5 m光纤输出波长2002 nm,发现随着光纤长度的不断缩短,激光的中心波长发生蓝移,这是因为石英光纤中存在的OH<sup>-</sup>离子对2 μm左右的波段的激光强烈吸收作用,1.93 μm为其吸收峰<sup>[15]</sup>,光纤长度越长,对靠近1.93 μm的激光吸收越强烈,因此长波长激光更容易形成激光振荡输出.可见,当激光波长大于1.93 μm时,改变光纤的长度,选择合适参数的FBG(光纤布拉格光栅)可以作为控制掺Tm<sup>3+</sup>激光器输出波长的方法.增加光纤长度,增大相应FBG反射中心波长和透射波长,可得长波长激光,反之得到短波长激光.

取上述4.5 m掺Tm<sup>3+</sup>光纤搭建全光纤激光器,示意图如图5所示.

低反FBG透射中心波长1999.990 nm,带宽1.013 nm,反射率8.799%.

实验结果如图6和图7.

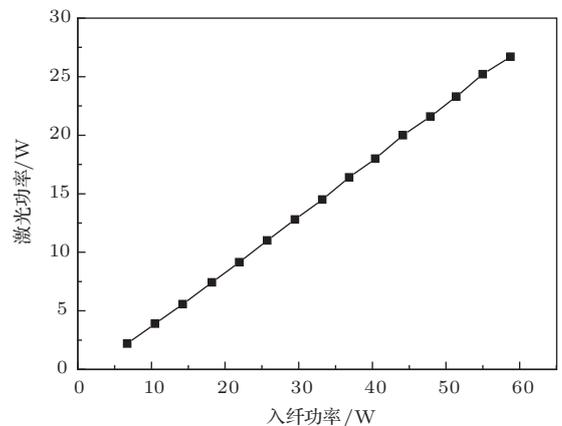


图7 入纤功率和激光功率关系图

得出光纤激光器的斜率效率为47.62%,最大

输出功率为 26.7 W, 实验中为了保护器件, LD 电流最大只升到 2.0 A, 预计 LD 满功率运行时, 功率能到达 38 W 以上.

由图 7 可以看出由两个 FBG 和掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤组成系统的效率为 52.26%, 大于激光器的斜率效率, 可见 LD、合束器和 FBG 插入损耗和光纤熔接损耗较大, 降低插入损耗和熔接损耗是提高整体斜率效率的关键.

实验中, 当 LD 功率为 21.93 W 时进行了激光光谱的采集, 如图 8. 中心波长为 2001.4 nm, 半高宽为 3.682 nm.

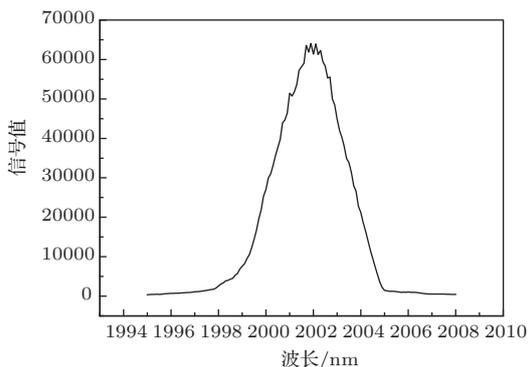


图 8 掺铥光纤激光器激光光谱

### 3.2 最大功率输出和斜率效率探究实验

对于光抽运激光器, 激光器斜率效率记为

$$\eta = \frac{P_L}{P_P}, \quad (1)$$

$P_L$  为激光输出功率,  $P_P$  为光抽运功率. 当抽运功率不变时, 激光器斜率效率正比于激光输出功率.

在光纤激光器中如果谐振腔的后腔镜对激光波长反射率越高, 那么激光在谐振腔内往返的次数就越多, 导致光纤对激光的传输损耗增加, 使得输出激光功率下, 又由上面实验可知 FBG 存在插入损耗, 因此为了探究最大激光功率输出和大功率下光纤的斜率效率, 对上述激光器谐振腔进行改进, 采用由 FBG-掺铥光纤-光纤端面结构, 此激光器的结构仅是去除了第一个激光器的低反光栅, 因此 LD 功率和入纤功率几乎没有变化, 仅激光输出功率发生变化. 实验结果如图 9 和图 10.

激光器斜率效率为 54.02%, 最大激光输出功率 30.7 W (LD 电流 2.0 A), 明显高于第一个激光器的激光功率输出, 预计 LD 满功率运行, 功率可以到达 40 W 以上, 可见低反光 FBG 折射率的选择很

重要, 对于反射率不一定越高或越低就越好, 存在一个最佳反射率使得所需的激光输出最大.

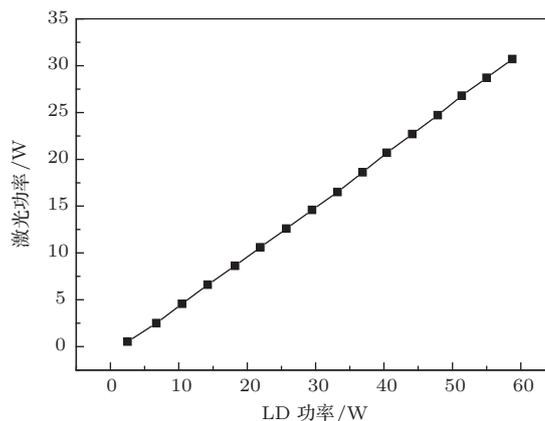


图 9 LD 功率和激光功率关系图

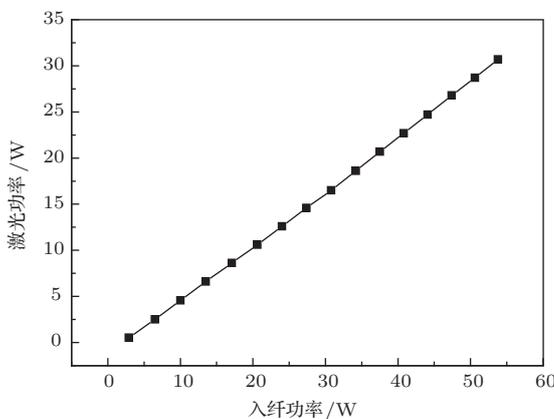


图 10 入纤功率和激光功率关系图

由图 10 可知光纤斜率效率为 59.32%, 这与之前光纤优化实验中测得光纤斜率效率 62.39% 基本一致, 在误差允许范围之内, 由此可见此次采用气相液相复合掺杂工艺制备的掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤可承受大功率激光, 并且性能稳定.

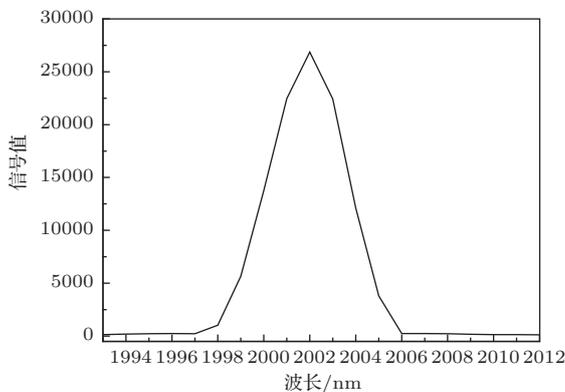


图 11 改进的光纤激光器激光光谱

最后进行了激光光谱的采集, 光谱如图 11. 中心波长 2002 nm, 半高宽 3.926 nm.

## 4 结 论

针对提高掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤和光纤激光器效率的要求, 采用气相-液相复合掺杂技术制备了掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 并进行了搭建激光器和测试激光的实验. 实验表明, 在最佳长度下, 此种光纤斜率效率 62.39%, 在大功率下斜率效率为 59.32%, 是目前所报道的斜率效率最高的国产掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 并达到了国际领先水准, 可见气相-液相复合掺杂技术可大大提高光纤的效率; 掺  $\text{Tm}^{3+}$  全光纤激光器最大输出功率 30.7 W, 中心波 2002 nm, 半高宽 3 nm 左右, 激光器最大斜率效率 54.02%, 为国内领先水平, 谐振器结构改变明显提高激光器输出功率和斜率效率, 但是降低了光束质量. 通过光纤制备工艺的进一步改进和激光器结构的优化有望进一步提高功率输出和斜率效率

## 参考文献

- [1] Zhao G Z, Xiao X S, Meng F, Mei J W, Yang C X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 104205
- [2] Xu S Q, Yang Z M, Dai S X, Yang J H, Dai N L, Lin A X, Hu L L, Jiang Z H 2003 *Chin. Phys. B* **22** 0097-04
- [3] Geng J H, Qing W, Wang J F, Jiang S B, Kevin H 2011 *Opt. Lett.* **36** 3371
- [4] Creeden D, Ketteridge P A, Budni P A, Setzler S D, Young Y E, McCarthy J C, Awilski K, Schunemann P G, Pollak T M, Chicklis E P, Jiang M 2008 *Opt. Lett.* **33** 315
- [5] Norman P B, Brian M W, Donald J R, Russell J D 2009 *Opt. Mater.* **31** 1061
- [6] Zhang M, Liu Q X, Liu W B, Zhong M 2012 *Optical Fiber & Electric Cable and Their Application* **2** 1 (in Chinese) [张茂, 刘全喜, 刘文兵, 钟鸣 2012 光纤与电缆及其应用技术 **2** 1]
- [7] Goodno D G, Book L D, Rothenberg J E 2009 *Opt. Lett.* **34** 1204
- [8] Eihhorn M, Jackson D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2780
- [9] Jiang M, Tayebati P 2007 *Opt. Lett.* **32** 1797
- [10] Yan F P, Wei H, Fu Y J, Wang L, Zheng K, Mao X Q, Liu P, Peng J, Liu L S, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6300 (in Chinese) [延风平, 魏淮, 傅永军, 王琳, 郑凯, 毛向桥, 刘鹏, 彭建, 刘利松, 简水生 2009 物理学报 **58** 6300]
- [11] Zhou R L, Ju Y L, Yang C, Wang W, Wang Y S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244205 (in Chinese) [周仁来, 鞠有伦, 杨超, 王巍, 王月珠 2012 物理学报 **61** 244205]
- [12] Tang Y L, Xu L, Yang Y, Xu J Q 2010 *Opt. Exp.* **18** 22964
- [13] Zhang Y J, Song S F, Tian Y, Wang Y Z, 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 084211
- [14] Jackson S D, King T A 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 948
- [15] Pankratov M M, Perrault D F, Shapshay S M, Pinto J F, Esterowitz D, Aretz H T 1992 *Proc. SPIE1646, Laser-Tissue Interacion III* Los Angeles, CA August 7, 1992 p30

# Development of high efficiency $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber and $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser\*

Xing Ying-Bin Ye Bao-Yuan Jiang Zuo-Wen Dai Neng-Li Li Jin-Yan<sup>†</sup>

(Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

( Received 10 August 2013; revised manuscript received 17 September 2013 )

## Abstract

The  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber is the key of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser, which has broad application prospects. In this paper, the silica-based  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber preform is manufactured by gas-solution co-doping method in MCVD(modified chemical vapour deposition) and the  $\text{Tm}^{3+}$ -doped double-cladding fiber is also achieved, the core and cladding diameters of which are 10  $\mu\text{m}$  and 125  $\mu\text{m}$  respectively. We prepare the  $\text{Tm}^{3+}$  all-fiber laser using the  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber and when the laser is pumped by a 793 nm laser diode, the center wavelength is 2002 nm, maximum output is 31.7 W, and the slope efficiency of the fiber is 59.32%.

**Keywords:**  $\text{Tm}^{3+}$ -doped double-cladding fiber,  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser, slope efficiency

**PACS:** 42.81.Bm, 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.81.Cn

**DOI:** [10.7498/aps.63.014209](https://doi.org/10.7498/aps.63.014209)

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2013AA031501), and the Director Fund of WNLO (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [l jy@mail.hust.edu.cn](mailto:l jy@mail.hust.edu.cn)