

# 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积微结构光纤光谱特性的研究

刘卓群<sup>1</sup>, 周桂耀<sup>1, 2\*</sup>, 夏长明<sup>1</sup>, 侯蓝田<sup>1</sup>

1. 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

2. 华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510006

**摘要** 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积微结构光纤 (micro-structured fibers, MSF) 是作为超大功率光纤激光器的理想介质。本文首先采用非化学气相熔炼法制备出掺 Yb<sup>3+</sup> 石英基玻璃材料, 然后按照设计要求, 通过排布拉制法制备了掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积微结构光纤。分别利用钛宝石飞秒激光器 (波长调至为 975 nm) 和波长为 980 nm LD 激光器作为激励源, 对掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积微结构光纤的荧光光谱进行分析, 实验结果表明: 该光纤在波长为 1 050 nm 处产生强的荧光, 同时该光纤还能有效的抑制合作发光现象 (cooperative luminescence) 的产生。

**关键词** 掺 Yb<sup>3+</sup>; 微结构光纤; 双包层; 光纤激光器

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)09-2525-04

## 引言

光纤激光器作为第三代激光技术的代表, 具有带宽窄、阈值低、稳定高效及技术成熟等优势<sup>[1, 2]</sup>。传统光纤激光器, 因光纤波导结构受限, 其数值孔径小, 耦合效率低, 且维持单模传输的纤芯面积小, 在大功率条件下易产生非线性效应和热光损伤等问题, 输出功率受到很大限制。上世纪 90 年代微结构光纤的诞生, 因其结构灵活多变, 特别是拥有大模场面积和保持无限单模的优越特性, 从而有效地克服了传统光纤激光器的种种缺陷<sup>[3-5]</sup>, 因此人们开始将目光转移至 MSF 激光器<sup>[6-8]</sup>。通过控制 MSF 中稀土掺杂浓度还可实现对泵浦光有较高的吸收和高功率泵浦下的低非线性, 从而可利用较短的 MSF 制造高功率的激光器<sup>[9-11]</sup>。根据 MSF 的灵活设计, 采用多芯双包层结构的 MSF 可实现激光的相干合成<sup>[12, 13]</sup>, 大大提高输出功率密度并使其具有很好的光束质量<sup>[14, 15]</sup>。据此, 多芯双包层掺杂 MSF 必将在光纤激光器的研制中起到重要作用。

本文设计的双包层掺 Yb<sup>3+</sup> MSF 的特点是: 三条方形掺 Yb<sup>3+</sup> 材料玻璃并列放置, 构成偏振态纤芯, 中间用薄壁管隔离; 内包层为四层小占空比的空气微孔点阵结构, 以实现单模传输; 两层外包层空气孔较大, 使内外包层折射率差较大, 因此增大了内包层数值孔径, 从而提高了泵浦光耦合效

率, 同时, 由于没有光辐射到涂覆层上, 因此提高了光纤的耐热性。

本文主要从掺 Yb<sup>3+</sup> MSF 纤芯材料的制备过程入手, 介绍了稀土掺杂工艺、预制棒制作、光纤拉制流程、主要对光谱特性进行检测分析并给出结论, 指出其存在的问题和改进方案。

## 1 稀土掺杂材料制备及光纤拉制

有源光纤掺杂的稀土离子主要有: 钕 (Nd<sup>3+</sup>)、铒 (Er<sup>3+</sup>)、钬 (Ho<sup>3+</sup>)、镱 (Yb<sup>3+</sup>)、铥 (Tm<sup>3+</sup>)、镱 (Yb<sup>3+</sup>) 等。其中 Yb<sup>3+</sup> 的吸收带 (800~1 000 nm) 和发射带 (1 030~1 150 nm) 均较宽, 泵浦源易选择, 对泵浦光和激发光均无受激吸收, 光-光转化率高, 且 Yb<sup>3+</sup> 能级结构简单, 量子数亏损低等, 故本文以 Yb<sup>3+</sup> 作掺杂离子, 并采用适合大激光功率要求的石英基玻璃为基质材料。考虑到稀土离子在石英玻璃中溶解性差, 采用 Al<sup>3+</sup> 共掺的方法提高 Yb<sup>3+</sup> 浓度。综上所述, 最终确定掺杂质量比为: SiO<sub>2</sub> (97.22%), YbCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O (0.724 7%), AlCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O (1.703%) 和 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (0.3%)。

为使材料掺杂得均匀, 本实验采用溶液法配置材料, 具体步骤为: 用电子天平进行精确取料, 配制成溶液, 加热并充分搅拌, 待水分蒸干后置于烘干炉内, 在 150 °C 条件下烘干约 4~5 h, 以保证水分充分除尽。将烘干后的材料置于玛

收稿日期: 2010-12-12, 修订日期: 2011-04-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60637010), 国家 (973 计划) 项目 (2010CB327604) 资助

作者简介: 刘卓群, 1986 年生, 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室硕士研究生

e-mail: harbin999@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: zguyao@163.com

璠研钵内仔细研磨, 由于  $\text{AlCl}_3$  的易吸水特性, 此时须将材料二次烘干并用球磨机继续研磨, 这样可有效的减少材料的吸潮, 最后在  $\text{O}_2$  和  $\text{Cl}_2$  气氛下将混合粉末熔炼成透明的石英玻璃坩, 并将其磨成尺寸为  $4.6 \times 0.9 \times 50(\text{mm})$  的石英棒, 以便拉制 MSF 用。图 1 是采用排布拉制法<sup>[16, 17]</sup>制备的 MSF, 该光纤是由四层内包层和两层外包层组成规则的六边形结构。其中, 中芯区为掺杂区。

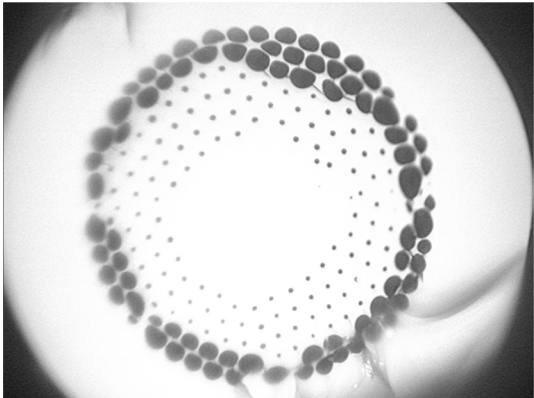


Fig 1 Cross-section of the  $\text{Yb}^{3+}$ -doped MSF

2 光纤测试及检测结果分析

吸收和荧光特性是掺  $\text{Yb}^{3+}$  MSF 的重要参数。我们分别对掺  $\text{Yb}^{3+}$  纤芯玻璃材料及光纤进行了组份分析、吸收谱和荧光谱等测试。将制备的掺  $\text{Yb}^{3+}$  玻璃材料分别用日本理学公司生产的 D-max-2500 型 X 射线衍射仪和美国 Thermo Electron 公司生产的 ADVANTXP-381 型 X 射线荧光光谱仪进行检测, 分析结果见表 1。

Table 1 Analysis of the  $\text{Yb}^{3+}$  doped glass components

| Elements                | Net Intensity /Kcps | Concentration /% | Normalised concentration /% |
|-------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------|
| $\text{SiO}_2$          | 266.681             | 90.2             | 93.0                        |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 15.019              | 5.22             | 5.39                        |
| $\text{Yb}_2\text{O}_3$ | 9.965               | 1.14             | 1.17                        |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 2.400               | 0.360            | 0.372                       |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0.328               | 0.009 6          | 0.009 9                     |
| $\text{SO}_3$           | 0.028               | 0.008 6          | 0.008 9                     |
| $\text{WO}_3$           | 0.066               | 0.004 7          | 0.004 9                     |
| $\text{NiO}$            | 0.018               | 0.000 8          | 0.000 8                     |

由表中可以看出,  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂浓度为 1.14%, 满足设计要求。其中含有微量铁离子, 可能是在烘干过程中因烘干炉被  $\text{HCl}$  腐蚀而混入的, 对光纤性能影响不大。其中  $\text{WO}_3$ ,  $\text{SO}_3$  和  $\text{NiO}$  等物质可能是由玻璃烧制过程中混入的。

采用荷兰 AVANTES B.V 公司的 AvaSpec-2048-USB2 型光谱分析仪对掺  $\text{Yb}^{3+}$  玻璃样品的吸收谱进行测量, 如图 2 所示。从中可以看出, 玻璃样品在 975 nm 处有较强的吸收峰, 在其附近还存在弥散的吸收峰, 这满足掺  $\text{Yb}^{3+}$  硅酸盐玻

璃吸收谱特点, 同时, 在 403 nm 处有  $\text{Yb}^{2+}$  吸收峰, 表明样品中可能有部分  $\text{Yb}^{3+}$  被还原。

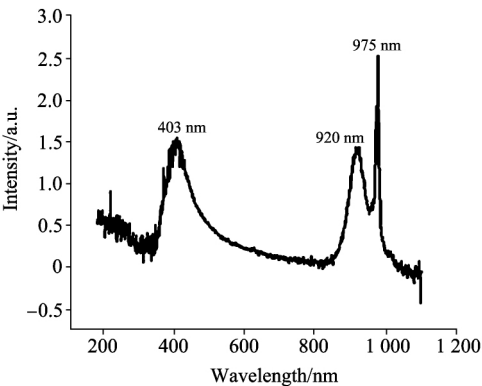


Fig 2 Absorption spectrum of the  $\text{Yb}^{3+}$  doped glass

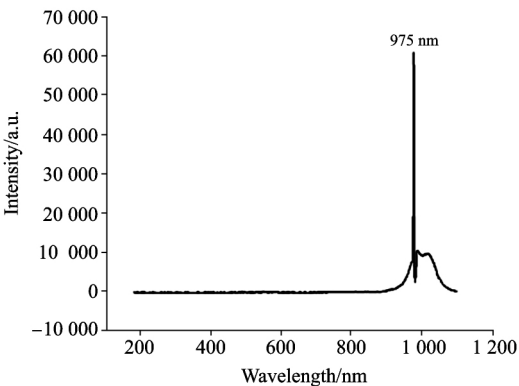


Fig 3 Fluorescence spectrum of the  $\text{Yb}^{3+}$  doped glass

用钛宝石飞秒激光器在 975 nm 处泵浦, 对掺  $\text{Yb}^{3+}$  玻璃样品进行荧光谱测试(见图 3)。由图可见, 掺  $\text{Yb}^{3+}$  玻璃样品在很宽的波长范围内均具有良好的荧光效应, 适合 MSF 的拉制。

对拉好的 MSF 进行荧光检测, 分别用 LD 和钛宝石飞秒激光器泵浦, 结果见图 4 和图 5。

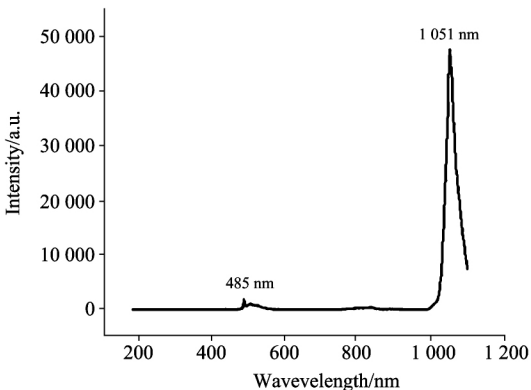


Fig 4 Fluorescence spectrum of the MSF (length of 1.2 m) pumped by LD laser (power of 1 W)

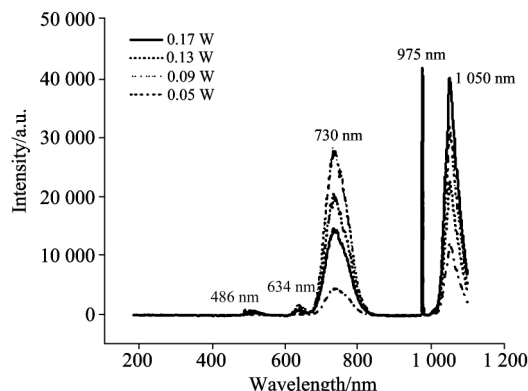


Fig 5 Fluorescence spectrum of the MSF pumped by the Ti:sapphire femtosecond laser pulse with wavelength of 975 nm

由图4可见,功率为1W情况下,980 nm处LD泵浦下MSF的荧光光谱具有 $\text{Yb}^{3+}$ 产生的1 050 nm附近的峰值和泵浦光产生的485 nm附近的倍频光,同时,泵浦光被全部吸收。由图5可见,在975 nm钛宝石飞秒脉冲泵浦下,MSF在634和730 nm附近产生两个峰值。以上现象说明在拉制MSF时,结构可能存在非线性效应,因为飞秒激光脉冲具有极高的峰值功率、很宽的光谱线宽以及激光发射时间极短等特点,所以在介质中传播时会产生很高的非线性效应,其过程与介质本身非线性系数等性质有关,同时,尽管本次MSF内纤芯面积很大,但由于拉制过程中造成的边缘结构不规则性,同样也可以产生局部的高非线性。故当飞秒激光脉冲在该MSF内传输时可产生很高的非线性效应。

由于局部高非线性效应的存在,频率为 $\omega = 2.857 \times 10^{14}$  Hz泵浦光入射到MSF中,由二次非线性效应,将产生频率为 $2\omega = 5.714 \times 10^{14}$  Hz的二阶非线性极化强度,此极化强度将作为激励源而产生频率为 $2\omega = 5.714 \times 10^{14}$  Hz的二次谐波辐射,即485 nm附近的倍频过程。

同样由于高非线性的存在,MSF内将产生受激喇曼散射过程,与上述的二阶参量过程不同,前者光场与介质间无能量交换,只是介质中的光子间的能量和动量的转移;而后者则源于光场与介质振动态(声子)间的相互作用,是光子与声子间的能量和动量的交换。在光谱图中,对应得到或失去一个振动量子能量的情况,即产生斯托克斯线和反斯托克斯线,并对称地分布在瑞利散射线两侧,一般情况下斯托克斯线比反斯托克斯线的强度大,这是因为根据Boltzmann分

布,处于振动基态上的粒子数远大于处于振动激发态上的粒子数。受激喇曼散射过程具有多重谱线特性,而730和634 nm则分别对应为一级反斯托克斯光和二级反斯托克斯光。多级谱线的产生可理解为MSF内多光束耦合的结果,在此过程中,散射分子本征态并未改变。

最后,我们采用截断法测试了MSF对泵浦光吸收效率(见图6)。由图中可看出,光纤在980 nm处的吸收率为 $39 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ,表明该光纤对泵浦光具有很好的吸收。

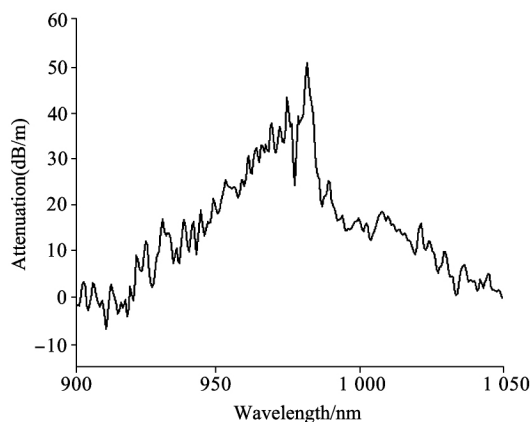


Fig 6 Absorption attenuation of the MSF

### 3 结 论

本文设计并制备了具有双包层和大模场面积的用于制作超大功率集成式多芯微结构光纤激光器的MSF波导纤维,给出了纤芯掺杂和制备流程等关键工艺。对掺 $\text{Yb}^{3+}$ 纤芯材料进行了组分分析和光谱测试,对拉制好的双包层MSF分别用钛宝石飞秒激光器和LD激光器进行了荧光谱分析,并阐述了在730 nm处出现反斯托克斯散射光现象。

本次制备的光纤具有良好的荧光效果,但仍存在损耗大等现象,究其原因有如下几点。

- (1) 配制掺杂材料时不慎引入了杂质。
- (2) 光纤边缘结构不规则而导致的局部高非线性。
- (3) 外包层排列不够紧密导致的光束泄露。此外,三条纤芯玻璃间隔层管壁较厚,影响了倏逝波的耦合。

据此,可以提出改进方法,如在超净室内配料,以控制杂质的引入;预制棒排管时尽量保证结构紧凑稳定;在设计预制棒时换用薄壁管作纤芯隔离层以保证其多芯偏振结构。

### References

- [1] Liu Xueming, Yang Xiufeng, Lu Fuyun, et al. Opt. Exp., 2005, 13(1): 142.
- [2] Fermann M E, Galvanauskas A, Sucha G, et al. Appl. Phys. B, 1997, 65(2): 259.
- [3] Christina B Olsson, Lara Scolari, Lei Wei, et al. Opt. Exp., 2010, 18(8): 8229.
- [4] Manga B J, Knight J C, Birks T A, et al. Electron. Lett., 2000, 36(16): 1358.
- [5] Mafi A, Moloney J V. J. Opt. Soc. Am. B, 2004, 21(5): 897.
- [6] Bonati G, Hennig P, Wolff D, et al. Proc. of SPIE, 2005, 5709: 78.
- [7] Li Kang, Wang Yishan, Zhao Wei, et al. Chinese Optics Letters, 2005, 3(8): 457.

- [8] Li Kang, Wang Yishan, Zhao Wei, et al. Chinese Optics Letters, 2007, 5(6): 347.
- [9] WANG Jian-ming, DUAN Kai-liang, ZHAO Zhen-yu, et al(王健明, 段开棕, 赵振宇, 等). High Power Laser and Particle Beams(强激光与离子束), 2009, 21(1): 11.
- [10] Tang Yulong, Xu Lin, Yang Yi, et al. Opt. Exp., 2010, 18(22): 22964.
- [11] Eichhorn M, Jackson S D. Opt. Lett., 2008, 33(10): 1044.
- [12] Takashi Kurita, Keiichi Sueda, Koji Tsubakimoto, et al. Opt. Exp., 2010, 18(14): 14541.
- [13] Qi Y, Liu C, Zhou J, et al. Appl. Opt., 2009, 48(29): 5514.
- [14] PAN Yu-zhai, ZHANG Jun, HU Gui-jun, et al(潘玉寨, 张 军, 胡贵军, 等). Laser Technology(激光技术), 2004, 28(1): 48.
- [15] LIU Rui, QU Rong-hui, CHEN Chen, et al(刘 锐, 瞿荣辉, 陈 晨, 等). Laser and Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2005, 42(8): 2.
- [16] ZHANG Ya-ni, WANG Li-li, WANG Xue-zhong, et al(张亚妮, 王丽莉, 王学忠, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2006, 35(9): 1349.
- [17] LIU Xiao-dong, YANG Peng, ZHOU Shu-wen, et al(刘笑东, 杨 鹏, 周述文, 等). Optical Communication Technology(光通信技术), 2008, 7: 39.

## Research on Spectral Characteristics of $\text{Yb}^{3+}$ Doped Double-Cladding Large-Mode-Area Micro-Structured Optical Fiber

LIU Zhuo-qun<sup>1</sup>, ZHOU Gui-yao<sup>1,2\*</sup>, XIA Chang-ming<sup>1</sup>, HOU Lan-tian<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Metastable Material Fabrication Technology and Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China
2. School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China

**Abstract**  $\text{Yb}^{3+}$  doped double-cladding large-mode-area micro-structured optical fibers (Micro-structured fibers, MSF) are the ideal medium for the super high-power optical fiber laser applications. In the present paper, the authors fabricated the  $\text{Yb}^{3+}$  doped silica-based glass using the method of non-chemical vapor deposition, and fabricated the  $\text{Yb}^{3+}$  doped double-cladding large-mode-area MSF by stack-drawing method using this glass as the core of MSF, according to the design requirements. Fluorescence spectrum of the MSF was obtained using Ti: sapphire femtosecond laser with the wavelength of 975 nm and LD laser with the wavelength of 980 nm as pumping source. The experimental results show that the optical fiber has strong fluorescence at the wavelength of 1 050 nm, and it can inhibit generation of cooperative luminescence effectively.

**Keywords** Ytterbium doped; Micro-structured optical fiber; Double-cladding; Optical fiber laser

(Received Dec. 12, 2010; accepted Apr. 2, 2011)

\* Corresponding author