

doi:10.3788/gzxb20134205.0552

基于粉末烧结技术制备镱铝共掺大模场 光子晶体光纤

刘建涛¹, 周桂耀^{1,2}, 夏长明^{1a,2}

(1 燕山大学 a. 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室;

b. 国家亚稳材料制备科学与技术重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

(2 华南师范大学 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广州 510006)

摘 要: 采用粉末烧结技术制备出高浓度镱铝共掺石英棒, Yb^{3+} 掺杂浓度为 12 000 ppm(wt). 利用此掺镱石英棒作为纤芯, 拉制出镱铝共掺大模场光子晶体光纤, 光纤模场面积为 $550 \mu\text{m}^2$, 模场直径 $26 \mu\text{m}$. 实验结果表明: 光纤在近红外波段(850~1 033 nm) 出现一个宽的吸收带, 主吸收峰波长位于 976 nm, 在此波长处吸收损耗高于 10 dB/m; 采用波长为 971 nm 的激光泵浦光纤, 在 1 050~1 125 nm 波长范围内产生高斯型的荧光峰, 峰值波长位于 1 088 nm 处, 荧光半宽高 45 nm.

关键词: 粉末烧结法; 镱铝共掺石英棒; 大模场面积; 光子晶体光纤

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)05-0552-3

Fabrication of $\text{Yb}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ Co-doped Large-mode-area Photonic Crystal Fiber Based on Powder Sintering Technology

LIU Jian-tao¹, ZHOU Gui-yao^{1,2}, XIA Chang-ming^{1a,2}

(1 a. *The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province*; b. *State Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*)

(2 *Laboratory of Nano-photonic Functional Materials and Devices of Guangdong Province, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

Abstract: Based on powder sintering technology, $\text{Yb}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ co-doped silica rods are prepared, and the concentration of Yb^{3+} is up to 12 000 ppm (wt). Then, with the $\text{Yb}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ co-doped silica rods as core materials, highly doped Large-mode-area Photonic Crystal Fibers (LMA-PCF) are fabricated by stack-draw method. The mode area can reach $550 \mu\text{m}^2$, and the mode field diameter is $26 \mu\text{m}$. The results indicate that the fiber has a broad absorption band in the near infrared wavelength (850~1 033 nm), and the main peak is at the wavelength of 976 nm where the absorption loss is higher than 10 dB/m; when the fiber is pumped by the laser with a wavelength of 971 nm, there exists a Gaussian fluorescence peak in the wavelength range of 1 150~1 125 nm, with a peak value of 1 088 nm and a half-line width of 45 nm.

Key words: Powder sintering method; $\text{Yb}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ co-doped silica rod; Large mode area; Photonic crystal fibers

0 引言

1996 年, 英国 Knight^[1] 等成功拉制出第一根光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF), 光纤研

究随之进入新的阶段. 光子晶体光纤以独特的制备工艺和灵活的结构设计使其具有许多优异的特性, 如无限单模、高双折射、高非线性、色散可控、大数值孔径、大模场面积 (Large Mode Area, LMA) 等^[2].

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB327604) 资助

第一作者: 刘建涛 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微结构光纤. Email: bzliujiantao@126.com

导师 (通讯作者): 周桂耀 (1973-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微结构光纤. Email: zguyao@163.com

收稿日期: 2012-09-28; 录用日期: 2013-03-04

目前模场面积最大的光纤是 2009 年 Dong^[3] 等报道的新型应力型光纤在 1 030 nm 波长处达 17 400 μm^2 . 在光子晶体光纤方面,2005 年底,德国 Jena 研究所的 Limpert^[4] 等报道了芯径为 60 μm ,模场面积达到 2 000 μm^2 的直棒形^[5] 光子晶体光纤. 2006 年,Brooks^[6] 等报道了类似结构的光纤,纤芯直径达 100 μm ,模场面积为 4 500 μm^2 . 这是迄今为止报道的纤芯直径最大的双包层掺镱光子晶体光纤. 2008 年,Kim P. Hansena^[7] 等报道了一种掺镱保偏光纤,模场直径为 70 μm ,模场面积 2 300 μm^2 . 2009 年,Moritz M. Vogel^[8] 等报道了一种包含 19 个掺镱纤芯单模光子晶体光纤,模场直径约为 25 μm ,模场面积为 465 μm^2 . 在国内,2008 年,衣永青^[9] 等基于改进的化学气相沉积法 (Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD) + 溶液掺杂法,拉制出芯径 30 μm ,模场面积可达 1 256 μm^2 掺镱双包层光纤,其掺镱浓度为 4 000 ppm.

2010 年,韩颖^[10] 等报道了用一种新的溶液掺杂与非化学气相沉积 (Non-chemical Vapor Deposition, NCVD) 熔融相结合的方法制备稀土掺杂石英基玻璃. 本文对该工艺技术进一步改进,并制备出高性能高浓度掺镱大模场光子晶体光纤,这种工艺与 MCVD + 溶液掺杂法、溶胶凝胶法 (SOL-GEL) 或纳米颗粒直接沉积法 (Direct Nanoparticle Deposition, DND)^[11] 等其它制备纤芯材料方法相比,具有掺杂浓度精确控制、工艺简单、均匀性好、材料成形灵活等特点.

1 光子晶体光纤的控制与检测

1.1 光子晶体光纤的制备

根据理论计算结果,选择合适的组份配比 (96.2242 SiO₂-2.4917 Al₂O₃-1.2845 Yb₂O₃, wt%), 运用具有纳米尺寸粉末进行混合,然后将其送入等离子体炉进行熔炼,熔炼温度接近 3000 °C,高温处理后获得透明的高浓度镱铝共掺石英棒,然后将石英棒打磨、抛光处理,作为掺镱光子晶体光纤的纤芯.

采用堆叠一拉丝工艺,利用自主设计的特种光纤拉丝塔,在 1 850 °C 左右高温条件下,通过精确的参量控制,将预制棒拉制成掺镱光子晶体光纤,端面用红宝石切割刀垂直切割,用日本 HIROX 公司 KH-1000 电子显微镜采集光纤端面结构图. 采用有限元法计算出在泵浦波长 971 nm 时,基模的有效模场面积 = 550 μm^2 ,则模场直径约为 26 μm . 如图 1.

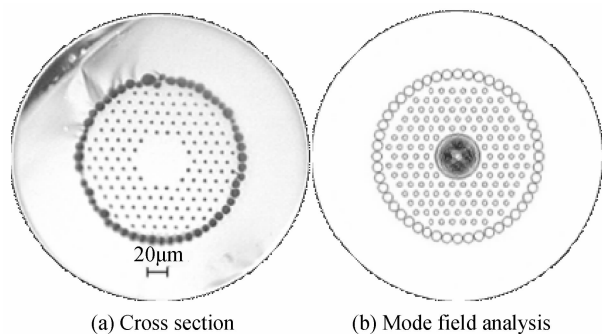


图 1 掺镱光子晶体光纤端面及模场分析
Fig. 1 Cross-section of Yb³⁺-doped PCF and mode field analysis

1.2 实验测试

光纤吸收光谱和荧光光谱测试选用美国 OceanOptics 公司的 Maya 2000PRO 型光谱仪,有效测试范围约为 200~1 100 nm,宽带光源为溴钨灯,泵浦源为 FocusLight 公司的 DSL 32 型半导体激光,其中心波长为 976 ± 5 nm,可调最大功率 20 W,CCD 选用 ARTRAY 型相机. 光谱测试示意图见图 2.

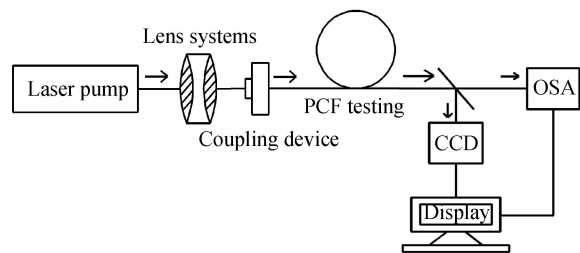


图 2 光谱测试图
Fig. 2 Schematic of spectrum measurement

1.3 结果分析

图 3 为掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤的吸收光谱. 由图 3 可知:在近红外波段出现两个弥散的吸收带,主吸收峰位于 975 nm,次吸收峰 919 nm,这是由 Yb³⁺ 特征吸收所致,总体吸收区在 850~1 033 nm. 由 Yb³⁺ 离子能级图可知,975 nm 附近的吸收主峰对应于基态 ²F_{7/2} 和激发态 ²F_{5/2} 两个能级的最低 Stark 能态之间的跃迁;而 919 nm 的吸收次峰对应于次 Stark 子能级之间的跃迁. 使用半导体激光器 (激发波长 971 nm) 泵浦光纤,在 1 050~1 125 nm 波长范围内产生高斯型的荧光峰,如图 4,荧光峰值波长为 1 088 nm,荧光半宽高达 45 nm,为其在高功率光纤激光器方面的应用创造良好的条件. 图 5 为采用截断法测试光纤损耗,每次约截短 10 cm,一次截断多次测量取平均,以减小测量误差,结果表明,在 860~1 025 nm 波长范围,光纤对泵浦光源的吸收都超过 10 dB/m.

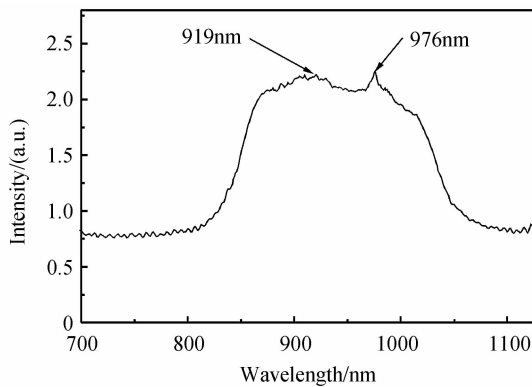


图3 掺镱光子晶体光纤吸收谱

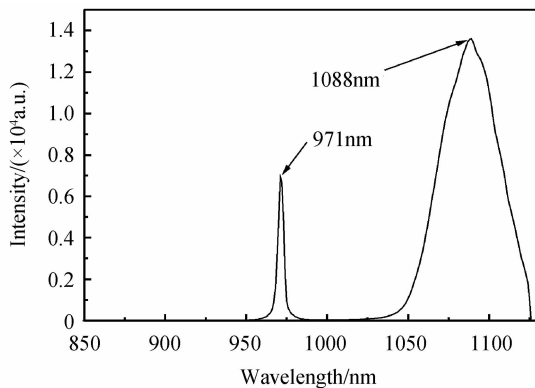
Fig. 3 Absorption Spectrum of Yb^{3+} -doped PCF

图4 掺镱光子晶体光纤荧光谱

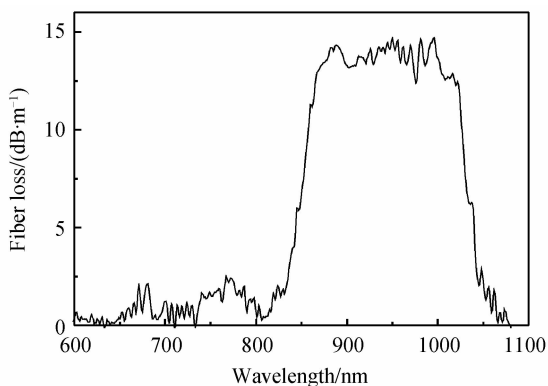
Fig. 4 Fluorescence spectrum of Yb^{3+} -doped PCF

图5 掺镱光子晶体光纤损耗谱图

Fig. 5 Loss spectrum of Yb^{3+} -doped PCF

综合以上实验分析,制备的高浓度掺镱大模场光子晶体光纤满足高功率光纤激光器对增益介质的基本要求,为高功率光子晶体光纤激光器的实现奠定基础.目前,所制备的高浓度掺镱光子晶体光纤的激光性能实验还在进行之中.

2 结论

本文报道了基于粉末烧结技术的镱铝共掺大模场光子晶体光纤的制备及其特性的研究,所制备光纤的纤芯直径高达 $40\ \mu\text{m}$,模场直径 $26\ \mu\text{m}$,有效模场面积为 $550\ \mu\text{m}^2$, Yb^{3+} 掺杂浓度为 $12\ 000\ \text{ppm}$ (wt).在 $1\ 050\sim 1\ 125\ \text{nm}$ 波长范围内产生高斯型的荧光峰,荧光峰值波长在 $1\ 088\ \text{nm}$,荧光半宽高达 $45\ \text{nm}$,为其在高功率光纤激光器方面的应用创造良好的条件.

参考文献

- [1] KNIGHT J, BIRKS T, RUSSELL P S J, *et al.* All-silica single-mode fiber with photonic crystal cladding[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(19): 1547-1549.
- [2] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299** (5605): 358-362.
- [3] FU Li-bin, HUGH A, MCKAY, *et al.* Extremely large mode area optical fibers formed by thermal stress [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(14): 11782-11793.
- [4] LIMPET J, SCHMIDT O, ROTHHARDT J, *et al.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 2717-2720.
- [5] LIAO Su-ying, GONG Ma-li. New progress of large mode area fibers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **43**(3): 455-462.
廖素英, 巩马理. 大模场光纤研究的新进展[J]. *红外与激光工程*, 2011, **43**(3): 455-462.
- [6] BROOKS C D, TEODORO F D. Multi-megawatt peak-power single-transverse-mode operation of a $100\ \mu\text{m}$ core diameter, Yb-doped rod-like photonic crystal amplifier [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(11): 111119.
- [7] BOULLET J, ZOUTER Y, DESLNARECHELIER R, *et al.* High power ytterbium-doped rod-type three level photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(22): 17891-17902.
- [8] VOGEL M M, ABDU-AHMED M, VOSS A, *et al.* Very-large-mode-area, single-mode multicore fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(18): 2876-2875.
- [9] YI Yong-qing, HUANG Bang-cai, NING Ding. Large mode area Yb^{3+} -doped double-clad [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 1928-1931.
衣永青, 黄榜才, 宁鼎. 大模场面积掺镱双包层光纤研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 1928-1931.
- [10] HAN Ying, HOU Lan-tian, XIA Chang-ming, *et al.* Investigation on the fabrication and luminescence characteristics of Yb^{3+} and Al^{3+} Co-doped silicate glasses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(5): 054212-6.
韩颖, 侯蓝田, 夏长明, 等. 镱铝共掺石英玻璃的制备及其发光特性的研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(5): 054212.
- [11] TAMMELA S, SODERLUND M, KOPONEN J, *et al.* The potential of direct nanoparticle deposition for the next generation of optical fibers[C]. *SPIE*, 2006, **6116**: 94-102.