

# Yb<sup>3+</sup> 掺杂微结构光纤研制及对飞秒激光的放大实验

田云云 周桂耀 张 卫 夏长明 王 超 曹 蕾 陈 艳 刘建涛

(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, 广东 广州 510006)

**摘要** 采用高温等离子体非化学气相沉积技术与溶液掺杂相结合的方法制备了 Yb<sup>3+</sup> 掺杂微结构光纤。该光纤在波长 976 nm 处的损耗为 7.5 dB/m, 表明光纤对 976 nm 波长的抽运光具有较好的吸收效率。为测试所制备光纤的激光性能, 分析了该光纤的荧光特性, 并搭建了后端抽运飞秒激光放大系统。采用 3 m 光纤, 以脉宽为 150 fs, 重复频率为 50 MHz, 中心波长为 1030 nm 的飞秒激光作为种子光, 成功将 138 mW 的飞秒激光放大到 605 mW, 且模场呈高斯分布。实验结果验证了该掺杂微结构光纤制备方法的可行性, 并为未来探索掺杂微结构光纤制备的新方法, 探索高功率 Yb<sup>3+</sup> 掺杂微结构光纤飞秒激光放大器和激光器打下了前期基础。

**关键词** 光纤光学; 掺 Yb<sup>3+</sup> 微结构光纤; 非化学气相沉积法; 飞秒激光; 光纤放大器

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s106010

## Preparation of Yb<sup>3+</sup> Doped Microstructure Fiber and Amplification Experiment of Femtosecond Laser

Tian Yunyun Zhou Guiyao Zhang Wei Xia Changming Wang Chao  
Cao Lei Chen Yan Liu Jiantao

(Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract** The Yb<sup>3+</sup> doped microstructure fiber is prepared by the method of high temperature plasma non-chemical vapor deposition combined with the solution doping method. Its loss is 7.5 dB/m at the wavelength of 976 nm which indicates it has good absorption efficiency at this wavelength. In order to test its laser performance, fluorescence properties are measured and a back-end pump laser amplifier system is constructed. Using an optimized 3 m length of the fiber and the seed femtosecond laser with 150 fs pulse width, 50 MHz repetition frequency and 1030 nm central wavelength, the femtosecond laser of 138 mW is successfully amplified to 605 mW, and the mode is in conformity with the Gaussian distribution. The results verify the feasibility of the doped fiber preparation method, make contributions to the exploration of new preparation methods of doped microstructure fiber and lay the foundations for high power Yb<sup>3+</sup> doped femtosecond laser amplifier and high power lasers.

**Key words** fiber optics; Yb<sup>3+</sup> doped microstructure fiber; non-chemical vapor deposition method; femtosecond laser; fiber amplifier

**OCIS codes** 140.3280; 140.4050; 140.3510; 140.7090; 060.2320

## 1 引 言

随着掺镱光纤激光器的应用<sup>[1-2]</sup> 领域越来越

广, 掺镱光纤激光器<sup>[3-10]</sup> 的性能得到了不断的提升, 尤其在功率上取得了重大的突破。为提高铒离

收稿日期: 2014-03-05; 收到修改稿日期: 2014-05-08

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327604)、国家自然科学基金(61377100)、广东省自然科学基金(S2013040015665)、高等学校博士学科点专项科研基金(20134407120014)

作者简介: 田云云(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事掺杂光子晶体光纤方面的研究。E-mail: 15625107883@163.com

导师简介: 周桂耀(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事特种光纤制备及应用方面的研究。E-mail: gyzhou@senu.edu.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

子的浓度与均匀性,进一步提高光纤激光器的输出功率和光-光转化效率。也为了打破技术垄断,国内外的公司和科研工作者不断提出各种纤芯制备方法,如溶液掺杂法、化学气相沉积法(CVD)<sup>[11-12]</sup>、管外气相沉积法(OVD)<sup>[13-14]</sup>、等离子体化学气相沉积法(PCVD)<sup>[15-16]</sup>和改进的化学气相沉积法(MCVD)<sup>[17-18]</sup>等。

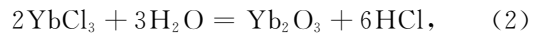
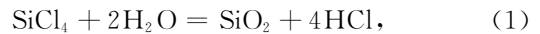
2004年,Jeong等<sup>[18]</sup>利用通过MCVD法和溶液掺杂技术制备出掺镱双包层光纤,搭建的激光器的激光功率为1.36 kW。但是纤芯直径仅为40 μm,数值孔径为0.04。同年,Wang等<sup>[19]</sup>通过OVD技术制备出一种高数值孔径的掺镱双包层光纤,光纤的传输损耗为0.3 dB/km,数值孔径为0.3,激光功率为110 W,转换效率为80%,光束质量约为1.07。2009年,楼祺洪等<sup>[20]</sup>以非CVD技术制备的掺镱双包层光子晶体光纤作为增益介质搭建双端抽运光纤激光器,获得了1.75 kW的连续激光输出,斜率效率高达76%。但纤芯浓度低,均匀性差影响了斜率效率的进一步提高。同年10月,华中科技大学武汉国家光电实验室研究人员采用MCVD法和气相液相混合掺杂技术制备直径约为90 μm大芯径掺镱石英微结构光纤,纤芯数值孔径为0.065,实现了国产掺镱光子晶体光纤高效率102 W的激光输出,斜

率效率为76%<sup>[21]</sup>。由于光纤的芯包层折射率比较低,导致光纤有效面积较低,激光实验中无法得到高的激光转化效率。

高温等离子体非化学气相沉积技术与溶液掺杂相结合的方法是新提出的纤芯制备技术,该方法可实现掺杂芯棒的均匀掺杂,大尺寸芯棒制备,高稀土浓度掺杂,并能精确地控制所需的掺杂浓度。本文采用此法制备了Yb<sup>3+</sup>掺杂双包层大模场面积微结构光纤(LMA-MSF)。分析了光纤的吸收和荧光等特性,并对飞秒激光放大器进行了研究。

## 2 Yb<sup>3+</sup>掺杂微结构光纤的制备

采用SiCl<sub>4</sub>水解法制备出浓度均匀的Yb-Al掺杂粉末,水解反应方程式如下



将经干燥和研磨的掺杂粉末利用高温等离子体非化学气相沉积技术烧制成Yb<sup>3+</sup>掺杂石英棒。石英棒经打磨和抛光后,制成所需尺寸的纤芯材料。制备过程如图1所示。

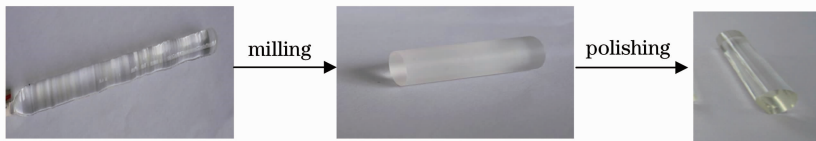


图1 高温等离子体非化学气相沉积技术烧制的Yb<sup>3+</sup>掺杂石英棒

Fig.1 Yb<sup>3+</sup> doped glass rod prepared by the method of high temperature plasma non-chemical vapor deposition

以Yb<sup>3+</sup>掺杂石英棒作为纤芯,采用堆积法制备Yb<sup>3+</sup>掺杂微结构光纤预制棒制,用特种光纤拉丝塔拉制出Yb<sup>3+</sup>掺杂双包层大模场面积微结构体光纤。拉丝温度为1800 ℃,拉丝速度为130 m/min。采用HK-1000型光学显微镜采集并测量光纤端面结构,如图2所示,纤芯直径为37 μm,内包层空气孔直径 $d$ 与空气孔间距 $\Lambda$ 的比值为0.3,光纤直径为200 μm,纤芯数值孔径为0.03。

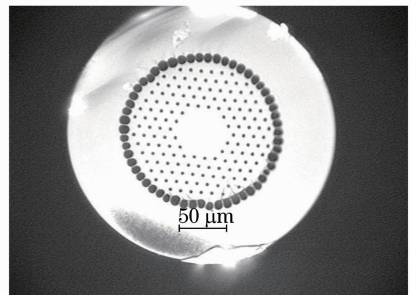


图2 双包层大模场面积掺镱微结构光纤端面图

Fig.2 Cross-section of the double cladding Yb-doped large mode area microstructure fiber

## 3 Yb<sup>3+</sup>掺杂微结构光纤性能分析

采用截断法对光纤的损耗性能进行了分析,其损耗谱如图3所示。图中出现4个明显的损耗峰,它们分别位于920,976,1390,2230 nm。920 nm和976 nm处损耗主要是由Yb<sup>3+</sup>的特征吸收所致,976 nm的损

耗值为7.5 dB/m,表明该掺杂光纤对976 nm抽运源具有较好的吸收效率。1390 nm和2230 nm处的损耗是掺杂石英棒中的残留的羟基吸收所致。光纤在1200 nm波长处存在较低的背景损耗,其值为

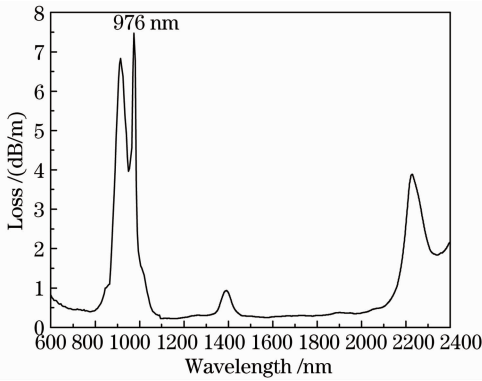


图 3 双包层掺镱微结构光纤的损耗谱  
Fig. 3 Loss spectrum of the double cladding Yb-doped microstructure fiber

0.25 dB/m。

荧光特性是反映材料激光特性的最有力证据，是增益介质出现激光放大的前提。采用 976 nm 半导体激光器作为抽运源，测试了光纤的荧光特性，结果如图 4 所示。在近红外波段，在 1030 nm 波长处出现了宽而强的荧光峰，这是由于镱离子能级简单，仅有<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>基态和<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>两个激发态，能级间隔仅有 10000 cm<sup>-1</sup>，且在可见光区域没有能级，当用 976 nm 的光进行抽运时，处于基态的离子便会跃迁到激发态，由于自发辐射作用离子回到基态，同时产生 1035 nm 的荧光光子。

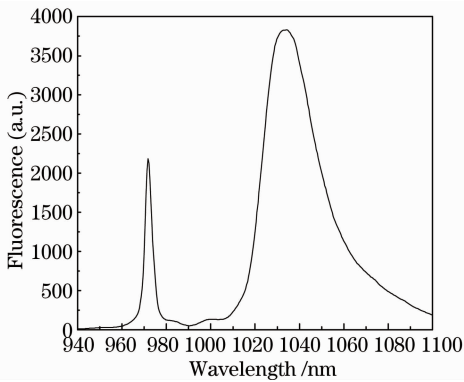


图 4 双包层掺镱微结构光纤荧光图  
Fig. 4 Fluorescence spectrum of the double cladding Yb-doped microstructure fiber

#### 4 飞秒激光放大实验

图 5 为搭建的飞秒激光放大器装置示意图，其中 L 为平凸镜，L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, L<sub>5</sub> 的焦距均为 10 mm，L<sub>4</sub> 焦距为 38.1 mm。DM<sub>1</sub>, DM<sub>2</sub> 均为 980 nm 高透 (HT), 1030 nm 高反 (HR) 的二色镜 (DM)。放大器采用后端抽运，976 nm 的抽运光经过平凸镜 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 准直和聚焦后耦合进增益光纤中，光纤的两端

有微小的角度倾斜，以减小端面反射，并抑制非涅耳反射和自激振荡。1030 nm 的飞秒脉冲信号光经过 L<sub>3</sub> 和 L<sub>5</sub> 的聚焦耦合进光纤中，信号光的耦合效率约为 57.4%。DM<sub>3</sub> 是 980 nm 高反, 1030 nm 高透的二色镜，起隔离器的作用，防止抽运光进入飞秒激光器中。放大后的飞秒激光经 DM<sub>1</sub>, DM<sub>2</sub> 反射后输出，由光谱仪和功率计直接接收。

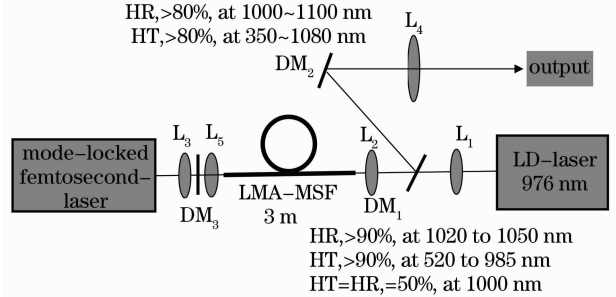


图 5 飞秒脉冲放大系统实验装置图  
Fig. 5 Experimental setup of the femtosecond fiber amplifier

图 6 分析了不同长度的光纤对激光放大效果的影响，信号光功率为 100 mW。由图可知，功率的增长值随着光纤长度的增加呈现出先增大后减小的趋势，当光纤长度约为 3 m 时功率增长值达到最大。本实验选用长度为 3 m 的光纤进行放大实验。

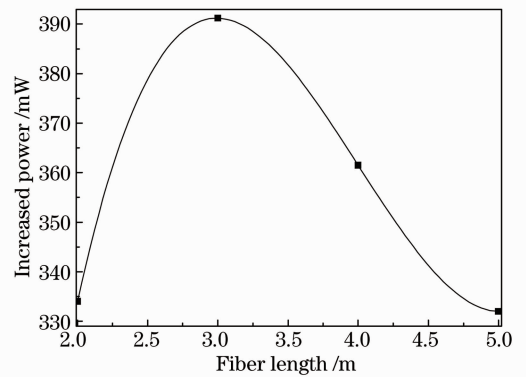


图 6 功率增长与光纤长度的关系  
Fig. 6 Relationship between the increased power and the length of the fiber

图 7 为放大系统输出的平均功率与抽运功率关系图。信号光功率为 138 mW，采用功率为 10 W 的抽运光进行抽运，获得了 605 mW，重复频率为 50 MHz，单脉冲能量为 12.1 nJ 的激光放大输出。

为了进一步验证所制备光纤的性能，采用光束质量分析仪对放大器输出激光的光斑进行了分析，如图 8 所示。图中红色曲线表示标准高斯分布曲线，黄色曲线表示输出的激光能量分布。经测量，X 和 Y 轴上高斯匹配度分别为 95.34% 和 97.09%，说

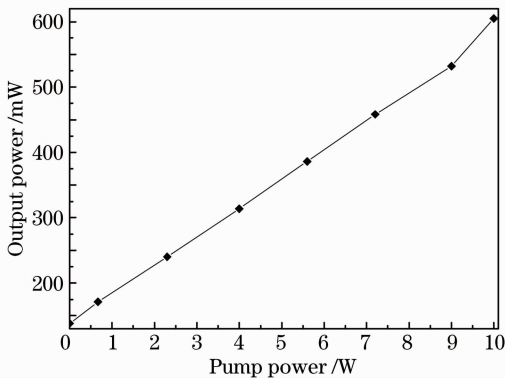


图7 放大器输出的平均功率随抽运功率的变化  
Fig.7 Average output power of amplifier changing with pump power

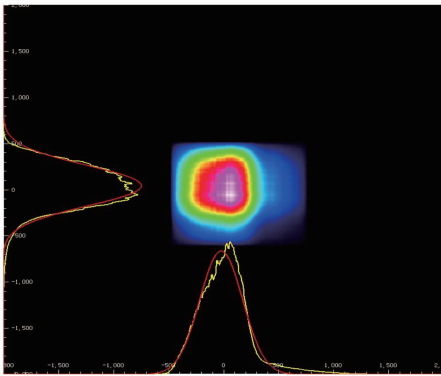


图8 放大后的飞秒激光光束质量图

Fig.8 Beam quality profile of amplified femtosecond laser

明输出激光的能量分布曲线为准高斯分布。结果表明,放大器在对激光进行放大的同时也保证了激光光束质量。

## 5 结 论

采用高温等离子体非化学气相沉积技术与溶液掺杂相结合的方法,成功制备了  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂微结构光纤,采用飞秒激光放大系统,在 1030 nm 波长处获得了功率为 605 mW,重复频率为 50 MHz,单脉冲能量为 12.1 nJ 的高斯能量分布的激光放大输出。激光光-光转化效率低主要有以下原因:1)抽运光的聚焦光斑较大,光纤模场直径较小,另外,光纤端面是采用切割刀手工切割,角度控制不精确,使得耦合效率非常低,飞秒激光的耦合效率也因同样原因使得耦合效率比较低;2)放大系统装置比较简陋,仅是对自制光纤进行放大测试的简易系统,真正要实现对于飞秒激光的放大光路平台仍需要进一步完善。

新技术制备出的掺杂光纤纤芯具有较好的均匀性,相对于 MCVD 法来说,更容易制备出折射率更

加均匀、气泡更少的掺杂芯棒。增益光纤的长度和抽运光功率对放大器的输出有影响很大,甚至影响放大器输出功率的进一步提高。

在今后的实验中,将进一步优化增益光纤长度,采取有效措施来提高抽运光和信号光的耦合效率,完善光纤制备技术和光纤放大系统以期能进一步提高放大器的放大功率激光输出功率,并搭建激光测试平台,测试该光纤的激光性能。

## 参 考 文 献

- 1 L Li. The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4): 231-253.
- 2 Y Hori, I Kuromatsu, Y Sugimura. Photosensitive vaporization of the prostate using high power (80 W) KTP laser: one year follow up of the first 101 patients in Japan [J]. *International Journal of Urology*, 2008, 15(12): 1067-1071.
- 3 Liu Zejin, Xiao Hu, Zhou Pu, *et al.*. 309 W all-fiber structure 1018 nm ytterbium doped fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205001.  
刘泽金,肖虎,周朴,等. 309 W 全光纤结构 1018 nm 掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205001.
- 4 Xie Lu, Chen Gui, Wang Yibo, *et al.*. Ytterbium-doped silica fiber laser at 1018 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0714002.  
谢璐,陈瑰,王一礴,等. 1018 nm 掺镱光纤激光器[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0714002.
- 5 J Limpert, T Schreiber, S Nolte, *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. *Opt Express*, 2003, 11(7): 818-823.
- 6 Wang Junli, Lü Zhiguo, Bo Xiangbao. Recent progress on rare earth doped femtosecond fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100006.  
王军利,吕志国,卜祥宝. 稀土离子掺杂飞秒光纤激光器最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 100006.
- 7 Y J Song, M L Hu, C L Gu, *et al.*. Mode-locked Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser operating in the vicinity of zero cavity dispersion [J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(3): 230-235.
- 8 Li Yanping, Liu Jiang, Shi Hongxing, *et al.*. High power linearly-picosecond pulse ytterbium-doped all-fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102008.  
李燕苹,刘江,师红星,等. 高功率线偏振皮秒脉冲掺镱全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1102008.
- 9 J Liu, J Xu, P Wang. High repetition-rate narrow bandwidth SESAM mode-locked Yb-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(7): 539-541.
- 10 Wei Jingbo, Hu Guijun, Du Yang, *et al.*. High power all-optical gain-clamped amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706012.  
魏敬波,胡贵军,杜洋,等. 全光增益控制高功率光纤放大器[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706012.
- 11 M Dietrich, C H Dustmann, F Schmaderer, *et al.*. CVD Process for the Production of a Superconducting Fiber Bundle; U. S., 4657776 [P]. 1987-4-14.
- 12 D Pavy, M Moisan, S Saada, *et al.*. Fabrication of optical fiber preforms by a new surface-plasma CVD process [C]. *Proceedings of 12th European Conference on Optical Communications*, 1986, 19-22.
- 13 T D Croft, J E Ritter, V A Bhagavatula. Low-loss dispersion-

- shifted single-mode fiber manufactured by the OVD process [J]. *J Lightwave Technol*, 1985, 3(5): 931–934.
- 14 P K Bachmann, D Leers, H Wehr, *et al.*. Dispersion-flattened single-mode fibers prepared with PCVD: performance, limitations, design optimization [J]. *J Lightwave Technol*, 1986, 4(7): 858–863.
- 15 H Lydtin. PCVD: a technique suitable for large-scale fabrication of optical fibers [J]. *J Lightwave Technol*, 1986, 4(8): 1034–1038.
- 16 D L Wood, K L Walker, J B MacChesney, *et al.*. Germanium chemistry in the MCVD process for optical fiber fabrication [J]. *J Lightwave Technol*, 1987, 5(2): 277–285.
- 17 J E Townsend, S B Poole, D N Payne. Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibres [J]. *Electron Lett*, 1987, 23(7): 329–331.
- 18 Y Jeong, J Sahu, D Payne, *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt Express*, 2004, 12(25): 6088–6092.
- 19 J Wang, D T Walton, L A Zenteno. All-glass high NA Yb-doped double-clad laser fibres made by outside-vapour deposition [J]. *Electron Lett*, 2004, 40(10): 590–592.
- 20 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao, *et al.*. 1.75 kW domestic Yb-doped double clad fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(5): 1277.
- 楼祺洪, 何兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1277.
- 21 Chen Gui, Jiang Zuowen, Peng Jinggang, *et al.*. Research on air cladding large mode field area of ytterbium doped photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 144206.
- 陈瑰, 蒋作文, 彭景刚, 等. 空气包层大模场面积掺镱光子晶体光纤研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 144206.

栏目编辑: 王晓玻