

# Er-Yb 共掺双包层光纤的研制\*

黄榜才<sup>1,2</sup>, 衣永青<sup>2</sup>, 段云峰<sup>2</sup>, 张鹏<sup>2</sup>, 刘军号<sup>2</sup>, 庞璐<sup>2</sup>, 宁鼎<sup>2</sup>, 袁树忠<sup>1</sup>, 董孝义<sup>1</sup>

(1 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

(2 中国电子科技集团公司第 46 研究所, 天津 300220)

**摘要:**报道了溶液掺杂法制备 Er-Yb 共掺双包层光纤的技术, 采用改进的化学汽相沉积研制工艺, 制作了  $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-F}$  的光纤阻挡层和  $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$  的疏松芯层, 利用疏松芯层在  $\text{YbCl}_3$ 、 $\text{ErCl}_3$  溶液中的浸泡吸收作用, 成功研制出 Er、Yb 离子浓度比分别为 1:13 和 1:8 两个光纤样品, 其中样品 2 在 976 nm 泵浦波长处的有效吸收系数最大达到 2 dB/m, 分析和讨论了光纤的损耗谱和荧光特性。

**关键词:**双包层光纤; Er-Yb 共掺; MCVD 研制工艺; 荧光特性

**中图分类号:** TN244; TN252

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)02-339-4

## 0 引言

近年来, 高功率 1 550 nm 波段激光器、放大器的研究受到重视, 而作为该波段最早采用的掺 Er 光纤, 目前正受到 Er-Yb 共掺光纤的挑战。研究表明, 相比于传统掺 Er 光纤, Er-Yb 共掺光纤具有多方面的优点, 适合 1 550 nm 波段光源发展趋势的要求。在掺 Er 光纤中, 随着 Er 离子浓度的进一步提高, Er 离子会发生聚集, 引发 Er 离子对的上转换效应, 产生浓度淬灭现象, 直接影响泵浦转换效率和信号增益的提高<sup>[1]</sup>, 采用 Er-Yb 共掺设计, 由于 Yb 离子具有与 Er 离子基本相同的离子半径, 可以明显降低 Er 离子对的形成, 从而提高 Er 离子掺杂浓度的上限<sup>[2]</sup>。Yb 离子<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 的能级和 Er 离子<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级非常接近, 其离子能量很容易从 Yb 的<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 的能级转移到 Er 的<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级上, 利用该能量转换, 可以实现 Yb 离子对 Er 离子的间接泵浦, 从而拓宽泵浦源的选择范围<sup>[3]</sup>。

由于 Yb 离子的掺入, Er-Yb 共掺光纤获得了更宽的泵浦吸收带。研究表明: Yb 离子泵浦范围覆盖 800 nm 到 1 100 nm<sup>[4]</sup>, 在该波段范围内, 商用化的半导体激光器已达到千瓦量级的输出功率, 使得高功率 Er-Yb 共掺光纤光源的研制成为可能<sup>[5-6]</sup>。为了达到多模半导体激光器泵浦光功率的高效耦合, Er-Yb 共掺双包层光纤的研制成为了当前研究的热点, 采用双包层结构设计, 泵浦源输出的泵浦光直接耦合入直径为几十到几百  $\mu\text{m}$  的内包层中, 比传统单包层光纤的耦合面积增加了 2 个数量级, 耦

合效率远远高于传统的单包层光纤。

本文采用改进的化学汽相沉积法 (Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD) 研制工艺结合溶液掺杂法制备 Er-Yb 共掺双包层光纤。深入研究了 Er-Yb 共掺双包层光纤预制棒制作工艺, 研制出国产高性能 Er-Yb 共掺双包层光纤, 测量了光纤的基本参量, 分析并讨论了光纤的损耗吸收和荧光特性。

## 1 光纤研制

20 世纪 80 年代中期, Poole 等人提出以 MCVD 工艺为基础的汽相掺杂<sup>[7]</sup>与液相掺杂技术<sup>[8]</sup>, 随后以外汽相沉积<sup>[9]</sup> (Outer Vapor Deposition, OVD) 和轴外汽相沉积<sup>[10]</sup> (Vapor phase Axial Deposition, VAD) 工艺为基础的汽相掺杂技术相继发明, 丰富了稀土离子光纤研制的技术手段。由于汽相掺杂技术对设备要求高, 成本昂贵, 采用 MCVD 工艺加溶液掺杂法 (即液相掺杂) 工艺路线来研制 Er-Yb 共掺双包层光纤。基本过程是: 利用 MCVD 工艺制作疏松的、未烧结的预制棒, 然后进行溶液掺杂的工艺过程。将预制棒浸入按比例配置好的稀土卤化物水溶液中, 保持一定的时间, 溶液中的稀土离子会扩散到光纤预制棒的芯区中, 由溶液的浓度和浸泡的时间决定掺入光纤预制棒芯区的浓度。取出预制棒, 在一定的温度下通入干燥的高纯氯气 ( $\text{Cl}_2$ )、氧气 ( $\text{O}_2$ ) 或者氦气 ( $\text{He}$ ) 进行脱水、干燥, 在大约 2 000 °C 高温下烧结成为透明的光纤预制棒。最后, 根据设计要求对预制棒进行加套至所需的芯包比后, 对预制棒进行设计加工, 处理成所需的内包层结构, 进而拉制成 Er-Yb 共掺双包层光纤。该工艺流程如图 1。

\*天津市科技攻关计划重点科技攻关项目“高功率光纤激光器”(05YFGZGX02700)资助

Tel: 022-88111648 Email: huangbangcai@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2007-09-23

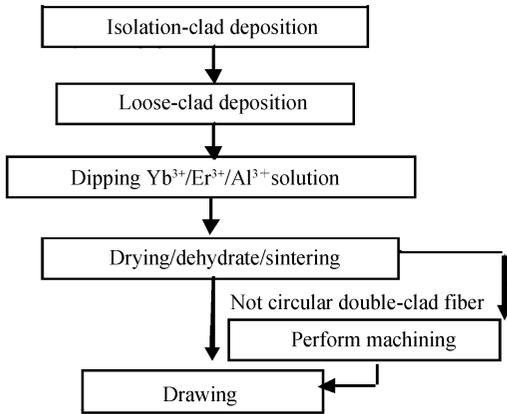
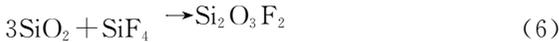
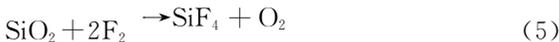
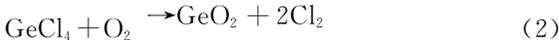


图1 MCVD工艺加溶液掺杂法工艺流程

Fig.1 Basic stages of MCVD and solution doping craftwork

在光纤研制过程中,为了保证石英反应管中残留的氢氧根在高温下不会扩散进入芯区,使光纤的损耗增加,在石英衬管中制作了阻挡层,该过程包含如下的化学反应



根据上述反应结果,光纤阻挡层包含 SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-F,P 的掺入提高了折射率,F 的掺入降低折射率,使得阻挡层最终折射率与石英包层的折射率相互匹配。

光纤疏松芯层的沉积主要包含(1)~(3)三个反应过程,形成了 SiO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的网络结构.在该结构中,Yb 离子和 Er 离子成团的几率仍然较大,不利于稀土离子掺杂浓度的提高.根据有关报道,掺入适量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有助于防止稀土离子对的形成<sup>[11]</sup>.为此,采用了 Er-Yb-Al 多组分的溶液共掺技术.在掺入 Yb 离子、Er 离子的同时掺入 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的掺入,一方面有效解决了离子析晶现象,提高了两种稀土离子的掺杂浓度;另一方面,由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有较低的挥发性,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的掺入使光纤纤芯的折射率凹陷减小,弥补了纤芯折射率的下陷.如图2.

根据文献[12]的有关结论,双包层光纤的泵浦吸收不仅与掺杂浓度、纤芯尺寸(纤芯和内包层面积比)有关,还与内包层的形状有关,圆形内包层由于其完美的对称性,存在大量的螺旋光线,这些光线在内包层中多次反射却永远也不能达到纤芯区域,从而不可能被纤芯吸收,这样即便采用较长的光纤仍有大量的漏光存在,使得转换效率难以提高.为了提

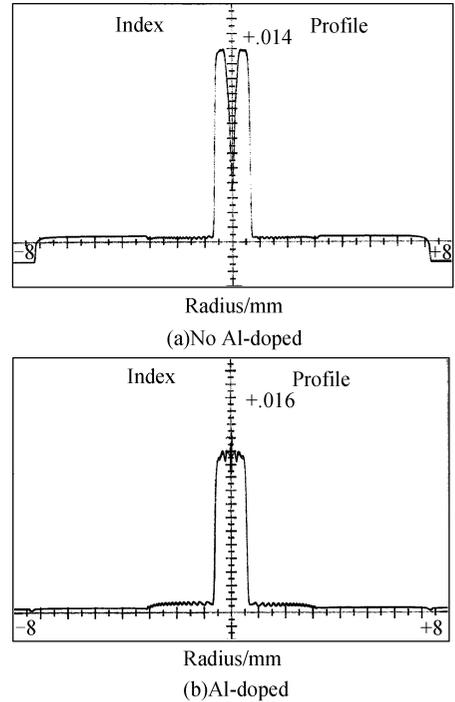


图2 预制棒折射率分布

Fig.2 Refractive-index profile of the fabricated perform 高光纤对泵浦光的吸收效率,在实验中采用了 D 型的内包层设计,将MVCVD工艺所研制的直径为 22 mm 的圆形预制棒进行研磨,沿径向磨掉 2.75 mm,最终形成长直径为 22 mm、短直径为 19.25 mm 的 D 型预制棒,拉成光纤后,内包层尺寸为 350 μm×400 μm,如图3.以 Er、Yb 离子浓度比分别为 1:13 和 1:8 的比例研制了两个光纤样品,样品参量如表1.

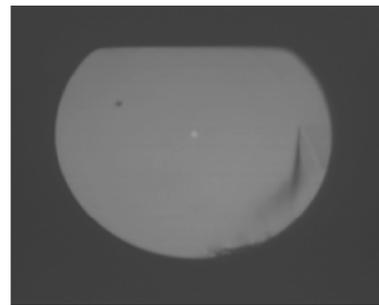


图3 D型双包层光纤横截面

Fig.3 Picture of the double-clad fiber D-cross section

表1 Er-Yb 共掺双包层光纤性能参量

样品	芯径 /μm	内包层尺寸/μm	纤芯/内包层数值孔径(NA)	椭圆度	有效吸收系数@ 976 nm/(dB·m <sup>-1</sup> )
样品1	10.3	350×400	0.10/0.46	0.97	0.34
样品2	20.0	350×400	0.07/0.48	0.98	2.0

## 2 光纤损耗谱和荧光特性

为了分析光纤样品的损耗吸收特性,将1号光纤样品的预制棒采用单包层光纤的拉丝工艺,制作了外径 125 μm 的单包层光纤,采用 PK2500 综合光纤测试仪(英国),测量了光纤损耗谱,结果如图4.由图可见,光纤有四个主要吸收带,即中心波长为

650 nm、820 nm、970 nm 和 1480 nm 的吸收带,其中中心波长为 650 nm、820 nm 和 1480 nm 吸收带为 Er 离子的典型吸收峰;处于 900 nm~970 nm 的吸收带,与 Yb 离子的典型吸收谱线相吻合<sup>[13]</sup>. 由于 Er 离子对 980 nm、1080 nm 附近波长均有一定的吸收,因而最终形成了 900 nm 到 1080 nm 的宽吸收带,这是 Er 离子及 Yb 离子吸收带的交叠造成的.

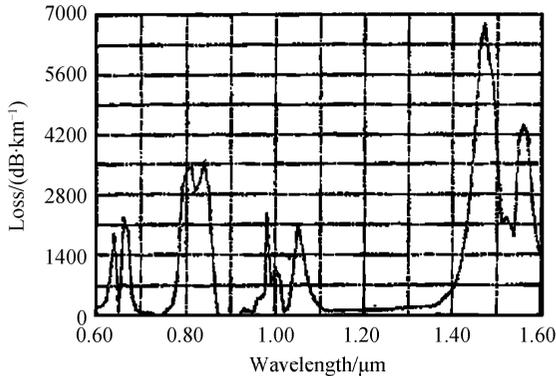


图 4 Er-Yb 共掺光纤吸收损耗光谱

Fig. 4 Attenuation spectral of the Er-Yb co-doped fiber

为了测量光纤的荧光特性,采用了 976 nm 波长的高功率半导体激光器做泵浦源,泵浦 10 m 长的 Er-Yb 共掺双包层光纤样品(样品 2),获得了光纤的荧光输出光谱,如图 5. 可见光纤荧光光谱包括了两个主要荧光辐射带,一个从 1000 nm 到 1200 nm,另一个从 1450 nm 到 1600 nm. 从谱线上看,前者落在 Yb 离子辐射带的范围之内,主要为 Yb 离子荧光光谱,后者为 Er 离子的荧光辐射所形成,前者光强略高于后者. 造成 Yb 离子荧光强度高于 Er 离子荧光强度的原因,分析认为主要有两方面的可能,一是光纤样品内 Er 离子的掺杂浓度偏低,Yb 离子到 Er 离子的能量转换没有充分完成;二是 Yb 离子在所采用的泵浦波长 976 nm 处有较强吸收,形成了 Yb 离子在 1000 nm 到 1200 nm 较强的荧光辐射. 由于本研究主要是利用光纤在 1450 nm 到 1600 nm 的荧光增益来获得激光输出,因此很多报道都采用了其他波长的泵浦源来抑制 Yb 离子的荧光强度<sup>[14-15]</sup>.

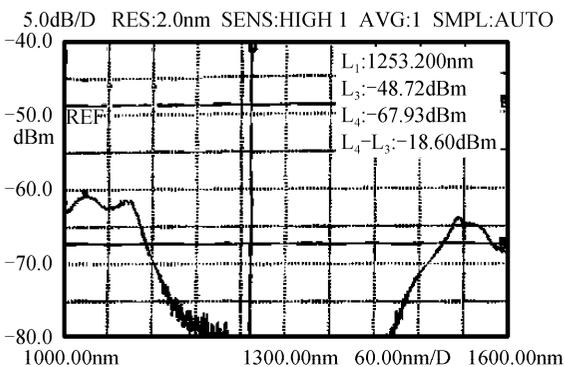


图 5 Er-Yb 共掺光纤荧光辐射谱

Fig. 5 Spectral of ASE of the Er-Yb co-doped fiber

### 3 结论

采用 MCVD 工艺结合溶液掺杂法进行了 Er-Yb 共掺双包层光纤的研制,研制成高性能 Er-Yb 共掺双包层光纤,成功制作了大光纤尺寸、高掺杂吸收的 Er-Yb 共掺双包层光纤. 光纤主要参量为:纤芯直径 20  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.07,内包层尺寸 350  $\times$  400  $\mu\text{m}$ ,椭圆度 0.98. 采用文献[16]中有效吸收系数测量方法,测量了光纤 976 nm 泵浦波长处的有效吸收系数,最大达到 2 dB/m. 所研制光纤样品包含了 650 nm、820 nm、970 nm 和 1480 nm 等吸收带,具有典型的 Er-Yb 共掺吸收特性. 实验表明:MCVD 工艺加溶液掺杂法制备 Er-Yb 共掺双包层光纤的工艺基本可行,继续优化光纤内 Er、Yb 离子的掺杂比例等工艺参量,还可进一步提高光纤的转换效率.

#### 参考文献

- [1] YE C C, MORTEL P R, TAYLOR E R, *et al.* Direct observation of cooperative upconversion mechanisms in erbium-doped fibre amplifiers [C]. *ECOC'93*, Montreux, September, 1993.
- [2] AISO K, TASHIRO Y, SUZUKI T, *et al.* Development of Er/Yb co-doped fiber for high-power optical amplifiers [J]. *Furukawa Review*, 2001, **20**: 41-45.
- [3] BARNES W L, POOLE S B, TOWNSEND J E, *et al.* Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup> doped fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1989, **7**(10): 1461-1465.
- [4] ZHOU X, TORATANI H. Evaluation of spectroscopic properties of Yb<sup>3+</sup>-doped glasses [J]. *Phys Rev B*, 1995, **52**: 15889-15897.
- [5] LIU YAN-ge, ZHANG Chun-shu, SUN Ting-ting, *et al.* Clad-pumped Er/Yb-codoped short pulse fiber laser with high average power output exceeding 2W [J]. *Acta Phys Sin*, 2006, **55**(9): 4679-4685.  
刘艳格,张春书,孙婷婷,等. 输出平均功率大于 2W 的高功率、包层抽运、超短脉冲钕镱共掺光纤激光器 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4679-4685.
- [6] WANG Yi-shan, ZHEN Yao-lei, SHEN Hua, *et al.* High efficiency generation of cladding pumped Erbium-ytterbium co-doped double clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1025-1026.  
王屹山,郑瑶雷,沈华,等. 包层泵浦的钕镱共掺光纤激光器高效产生的实验研究 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1025-1026.
- [7] POOLE S B, PAYNE D N, MEARS R J, *et al.* Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1985, **LT-4**(7): 870-876.
- [8] TOWNSEND J E, POOLE S B, PAYNE D N, *et al.* Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibers [J]. *Electron Lett*, 1987, **23**(7): 329-331.
- [9] BOCKO P L. Optical fiber Communication Conference (Optical Society of America, Washington, DC, 1989), paper TUG2.

- [10] AINSLIE B J. A review of the fabrication and properties of erbium-doped fibers for optical amplifiers[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1991, **9**(2):220-227.
- [11] FEDERIGHI M, PASQUALE F D. The effect of pair-induced energy transfer on the performance of silica waveguide amplifiers with high  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  concentrations [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, **7**(3):303-305.
- [12] BEDO S, LUTHY W, WEBER H P. The effective absorption coefficient in double-clad fibers [J]. *Opt Commun*, 1993, **99**(5-6):331-335.
- [13] HANNA D C, PERCIVAL R W, PERRY I R, *et al.* An ytterbium doped monomode fiber laser; broadly tunable operation from 1.010  $\mu\text{m}$  to 1.162  $\mu\text{m}$  and three-level operation at 974 nm[J]. *J of Mod Opt*, 1990, **37**(4):517-525.
- [14] LI Jun, GOU Yu-bin, WANG Tian-shu, *et al.* An all-fiber type  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, **1**(9):503-505.
- [15] GROBB S G, HUMER W F, CANNON R S, *et al.* +21 dBm erbium power amplifier pumped by a diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992, **4**(6):553-555.
- [16] HUANG Bang-cai, NING Ding, HAN Jun, *et al.* Study of Ytterbium-doped double-clad fiber absorption characteristics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(11):1473-1477.  
黄榜才, 宁鼎, 韩军, 等. 掺镱双包层光纤吸收特性的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1473-1477.

## Fabrication of Er-Yb Co-doped Double-clad Fiber

HUANG Bang-cai<sup>1,2</sup>, YI Yong-qing<sup>2</sup>, DUAN Yun-feng<sup>2</sup>, LIU Jun-hao<sup>2</sup>, PANG Lu<sup>2</sup>,  
ZHANG Peng<sup>2</sup>, NING Ding<sup>2</sup>, YUAN Shu-zhong<sup>1</sup>, DONG Xiao-yi<sup>1</sup>

(1 Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(2 Research Institute 46 of Chinese Electronic Technology Group Company, Tianjin 300220, China)

Received date: 2007-09-23

**Abstract:** The MCVD and solution-doping technology for the Er-Yb co-doped double-clad fiber was reported. Using the MCVD manufacture technics, the fiber isolation layers ( $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-F}$ ) and the porous frits ( $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ ) were deposited. The porous frits were soaked in the solutions of  $\text{YbCl}_3$  and  $\text{ErCl}_3$ . Two fiber samples with 1:13 and 1:8 of Molar ratio Er/Yb were fabricated respectively. The maximum effective absorption coefficient of the sample 2 at the pump wavelength 976 nm is 2 dB/m. The attenuation spectral and fluorescence characteristic were discussed.

**Key words:** Double-clad fiber; Er-Yb co-doped; MCVD manufacture technics; Fluorescence characteristic



**HUANG Bang-cai** was born in 1976. He obtained the B. S. and M. S. degrees in 1999 and 2002, respectively. Since 2002, he has worked at Research Institute 46 of Chinese Electronic Technology Group Company and studied for the Ph. D. degree at Institute of Modern Optics, Nankai University, and his research interests focus on the special fiber and the photoelectron components.