

文章编号: 0253-2239(2010)s100209

# 一种新型的大模场高浓度石英基掺铒光纤

刘利松 彭 健 张晨芳 郑晶晶 刘志明 郑斯文 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要** 采用环形石墨炉加热的改进化学汽相沉积(MCVD)车床制作出了多包层铋镓铝共掺的石英基高浓度掺铒光纤,并对其几何参数和吸收谱进行测试和分析。结果表明,利用多包层结构有效提高了掺铒光纤的模场直径和吸收系数。制作的多包层掺铒光纤在 1530 nm 波长下的吸收可达 84 dB/m;在 1550 nm 处的模场直径可达 11.6  $\mu\text{m}$ ;而基底损耗约为 1.5 dB/m。利用所研制的掺铒光纤制作了掺铒光纤放大器并对其长度进行了优化,最终得到了长度为 1.95 m 的 C 波段掺铒光纤放大器,其小信号增益达到了 23 dB。

**关键词** 光通信;高浓度掺铒光纤;多包层;模场直径

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100209

## A Novel High Concentration Silica Erbium-Doped Fiber with Large Mode Field Diameter

Liu Lisong Peng Jian Zhang Chenfang Zheng Jingjing

Liu Zhiming Zheng Siwen Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** A sample of multi-cladding high concentration silica host erbium doped fiber with bismuth-gallium-aluminum co-doped is fabricated by MCVD process with a type of annular graphite heater furnace. Its geometric parameters and absorption spectrum are measured and analyzed. It is presented that the mode field diameter and absorption coefficient of the erbium-doped fiber are both increased efficiently by using multi-cladding structure. The absorption reaches to 84 dB/m at 1530 nm and the mode field diameter is 11.6  $\mu\text{m}$  at 1550 nm, but the background loss is 1.5 dB/m. An erbium-doped fiber amplifier is established and the best length of fiber is experimentally found. As a result, a 1.95 m C-band erbium-doped fiber amplifier is presented with small signal gain of 23 dB.

**Key words** optical communications; high concentration erbium-doped fiber; multi-cladding; mode field diameter

**OCIS codes** 060.0060; 060.2280; 060.2320

## 1 引 言

掺铒光纤主要用来制作掺铒光纤放大器(EDFA)、掺铒光纤光源(EDFS)和掺铒光纤激光器(EDFL)<sup>[1~3]</sup>。随着光纤通信技术的迅速发展,对掺铒光纤的需求也在日益增大。从 20 世纪 80 年代起,国内外就开始对掺铒光纤进行研究,但由于国内在一些关键技术问题未取得突破,与国外的差距较大。目

前,国内大部分掺铒光纤研究单位均采用液相掺杂工艺。近年来,国内在掺铒光纤制作方面也取得了一些进展。中国电子科技集团第 46 研究所研制的掺铒光纤在 980 nm 吸收达到 6.05 dB/m<sup>[4]</sup>;北京交通大学光波所自 2004 年以来对掺铒光纤的研制进行了大量研究工作,试制出的铋镓铝共掺石英基掺铒光纤在 1530 nm 处的吸收可达 66.3 dB/m<sup>[5]</sup>。为了提高铒

**收稿日期**: 2010-05-11; **收到修改稿日期**: 2010-07-04

**基金项目**: 国家 973 项目(2010CB328206)、国家 863 项目(2008AA01Z215)、国家自然科学基金重点项目(60837002)和教育部重大项目(308002)资助课题。

**作者简介**: 刘利松(1983—),男,博士研究生,主要从事特种掺杂光纤制作方面的研究。

E-mail: \* 05111020@bjtu.edu.cn

**导师简介**: 简水生(1929—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事光纤通信方面的研究。

E-mail: shuishengjian@bjtu.edu.cn

离子在石英基中的溶解度,可以在石英基光纤中掺入一些金属元素,从而改变铒离子周围的近邻结构,以此来实现石英基光纤中铒离子的高掺杂<sup>[6]</sup>。但掺杂离子会导致石英基光纤纤芯折射率明显提高,从而使得高浓度掺铒光纤的模场直径受到限制,文献[4]中报道的掺铒光纤在 1550 nm 的模场直径为 6.3  $\mu\text{m}$ ,而国内普通商用掺铒光纤在 1550 nm 的模场直径一般在 4.5~6.5  $\mu\text{m}$  之间。小模场直径会限制大功率抽运的应用,使得放大器和激光器的输出功率受限。针对上述问题,本文提出一种新型多包层结构<sup>[7]</sup>掺铒光纤(MCEDF)并利用环形石墨炉加热的改进化学汽相沉积(MCVD)工艺成功试制出光纤样品,通过对所研制光纤进行的测试和分析发现,多包层掺铒光纤不但具有较高的吸收系数,而且具有大模场直径的优点。利用此种光纤制作的 C 波段掺铒光纤放大器也具有好的放大性能。

## 2 MCEDF 样品的制备与测试

实验中采用环形石墨炉加热 MCVD 工艺来制作光纤,有利于提高光纤预制棒的纵向均匀性并减少羟基<sup>[8]</sup>。首先,将高纯石英玻璃管架到 MCVD 车床进行抛光处理后,沉积数层掺氟阻挡层;然后分别沉积掺锗外包层和掺氟内包层;最后沉积芯层,通过浸泡法掺杂铒离子后进行脱水、熔化和缩棒制成光纤预制棒。将预制棒按照要拉制的参数进行套棒后拉丝制成实验样品 EDF1。为了便于比较,同时采用相同工艺制作了普通掺铒光纤样品 EDF2。

### 2.1 预制棒折射率分布

利用英国 YORK 公司的 P104 预制棒分析仪分别测试了样品 EDF1 和 EDF2 的预制棒折射率分布图,如图 1 所示。

由于 EDF1 掺氟内包层的氟向芯区扩散,导致 EDF1 的芯子相对折射率约为  $4.5 \times 10^{-3}$ ,低于 EDF2

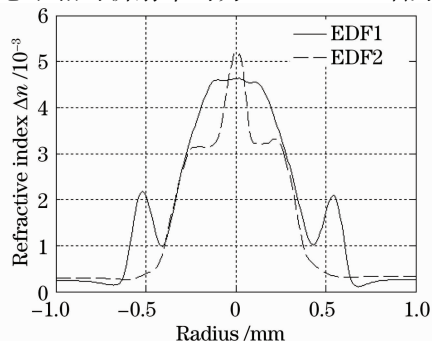


图 1 两种光纤预制棒的折射率分布

Fig. 1 Refractive index of two kinds of fiber sample

的芯子折射率。EDF1 中未掺杂外包层的折射率明显低于掺铒芯层。由于掺杂区离子扩散造成掺氟内包层的折射率提高到了  $1 \times 10^{-3}$ 。根据预制棒折射率分布图可以设计出合适的套棒尺寸进行套棒。

### 2.2 光纤几何参数及吸收系数的测量

通过套棒后拉丝得到的光纤成品,其中样品 EDF1 的外径为 140  $\mu\text{m}$ ;样品 EDF2 的外径为 120  $\mu\text{m}$ 。利用 Photon Kinetic 公司的 PK2210 谱损耗分析仪测量了两光纤样品的截止波长、模场直径和吸收系数。经过测量得知两光纤的截止波长分别为 1315 nm 和 1234 nm;表 1 给出了不同波长下两种光纤的模场直径大小,可以看出多包层掺铒光纤的模场直径明显大于普通掺铒光纤,在 1550 nm 的模场直径达到了 11.6  $\mu\text{m}$ 。

表 1 不同波长下,EDF1 和 EDF2 的模场直径  
Table 1 Mode field diameters of EDF1 and EDF2 at different wavelengths

Wavelength /nm	Diameter of EDF1 / $\mu\text{m}$	Diameter of EDF2 / $\mu\text{m}$
1300	10.2828	4.3863
1550	11.6942	6.5693
1570	12.0674	6.9278
1590	12.1679	7.1145
1600	12.2415	7.2104

图 2 为两个光纤样品的吸收谱。EDF1 在波长 980 nm 处吸收为 36 dB/m,在波长 1530 nm 处吸收为 84 dB/m,而 EDF2 在这两处波长的吸收系数仅为 EDF1 的二分之一。多包层结构在一定程度上扩大了有源区面积,使得铒离子掺杂量得到有效提高。同时测试 EDF1 和 EDF2 的背景损耗分别为 1.5 dB/m 和 0.8 dB/m。已知光纤的吸收系数与铒离子浓度有如下关系<sup>[9]</sup>

$$\alpha(\lambda) = \sigma_a(\lambda)\Gamma(\lambda)n_i,$$

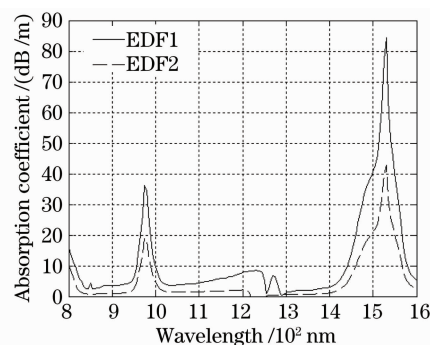


图 2 两种光纤样品的吸收谱线

Fig. 2 Absorption spectra of two kinds of fiber samples

式中  $\alpha(\lambda)$  为吸收系数,  $\sigma_a(\lambda)$  为吸收截面,  $\Gamma(\lambda)$  是模式与铒离子的重叠积分因子,  $n_t$  是铒离子的浓度。本文取重叠积分因子  $\Gamma = 0.6$ , 吸收截面近似为有源区面积。通过计算得出 EDF1 的铒离子浓度约为  $2.7 \times 10^{19}$  ions/cm<sup>3</sup>; EDF2 的铒离子浓度约为  $2.1 \times 10^{19}$  ions/cm<sup>3</sup>。

### 3 C 波段掺铒光纤放大器(EDFA)

掺铒光纤放大器的结构如图 3 所示, 信号光和抽运光通过波分复用器(WDM)耦合注入到 EDF 中, 在抽运光的作用下, 信号光得到放大后输出。系统中 1550 nm 隔离器(ISO)的作用是防止反射光损害光器件。实验中使用 980 nm 抽运源, 其最高输出功率为 260 mW; 信号源由 ANDO 公司的 AQ4321D 可调谐激光器提供; 输出结果通过 ANDO 公司的 AQ6317 光谱仪来测量。

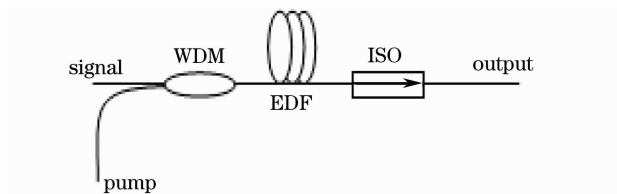


图 3 掺铒光纤放大器的结构示意图  
Fig. 3 Structure of EDFA

在抽运功率一定的情况下, EDFA 中掺铒光纤的长度存在一个最佳值<sup>[10]</sup>。为了得到光纤最优化长度, 需要对光纤的放大自发辐射谱(ASE)进行测试。首先选取 4.5, 4 和 3.8 m 长度的 EDF1, 在抽运功率 260 mW 下的荧光输出如图 4 所示, 其输出波长范围接近 L 波段。这说明在此抽运功率下, 光纤长度过长。为了得到最佳光纤长度, 以 5 cm 为单位对光纤进行截短, 并测试每个光纤长度下的荧光输出。

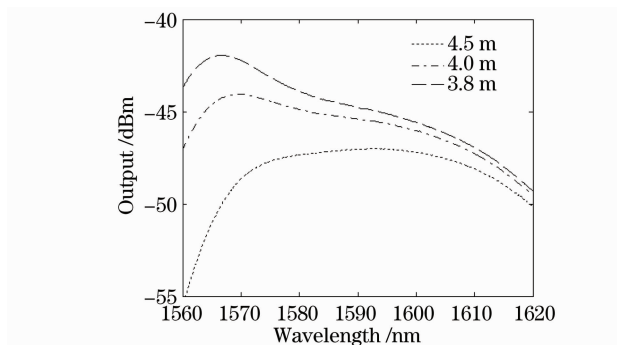


图 4 长度较长情况下, EDF1 的放大自发辐射谱  
Fig. 4 ASE of EDF1 with long lengths

当光纤长度为 2.8 m 时, 荧光输出波长位移到了 C 波段, 进一步截短光纤长度, 荧光功率不断增大, 如图 5 所示。当光纤长度为 1.95 m 时, ASE 的输出功率达到最大值, 约为 -22 dBm。当继续缩短光纤长度时, 输出功率反而会下降。由此可以确定此 EDFA 的最佳光纤长度为 1.95 m。

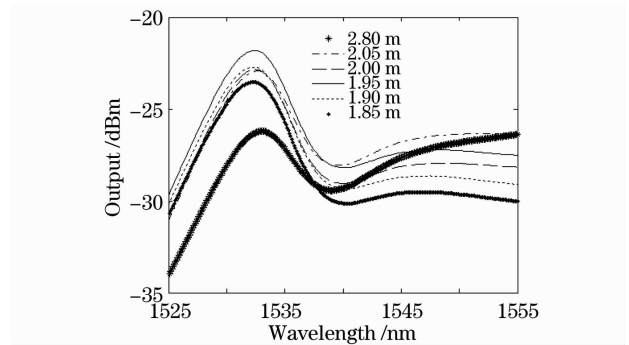


图 5 不同光纤长度下, EDF1 在 C 波段的 ASE 谱线  
Fig. 5 C-band ASE of EDF1 with different fiber lengths

利用 AQ4321D 可调谐激光器可以得到波长范围是 1525~1560 nm, 输出功率为 -30 dBm 的小信号。将小信号注入到 EDFA 系统中, 在 260 mW 的抽运功率下测试输出功率。通过对比输出功率与输入功率的差值发现, 由 EDF1 搭建的 EDFA 可以提供约 23 dB 的小信号增益。采取相同的实验方法得到 EDF2 用于 EDFA 系统的最佳长度为 3 m, 其小信号增益达到了 30 dB。

### 4 结 论

利用环形石墨炉加热 MCVD 法制作的多包层结构掺铒光纤不但具有较大的模场直径, 而且具有高吸收系数。通过对比发现, 多包层掺铒光纤的模场直径和吸收系数较普通掺铒光纤提高了近一倍, 铒离子浓度得以进一步增大。在 260 mW 抽运功率下, EDFA 所需多包层掺铒光纤长度仅为 1.95 m, 而需要普通掺铒光纤长度为 3 m。由于实验中所使用的抽运最高输出功率的局限, 限制了多包层掺铒光纤的增益特性, 所以其小信号增益要低于普通掺铒光纤。尽管如此, 采用多包层掺铒光纤搭建的 EDFA 系统的小信号增益仍达到了 23 dB。由此可见, 多包层掺铒光纤作为一种新型结构的掺铒光纤, 具有良好的增益性能, 可以有效缩短掺铒光纤放大器的长度从而节约成本, 具有极大的实用价值。

### 参 考 文 献

1 Fu Yongjun, Jian Wei, Zheng Kai *et al.*. Bismuth-gallium-aluminum Co-doped high concentration erbium doped fiber and

- amplifier[J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, **27**(1): 17~19  
 傅永军, 简伟, 郑凯等. 铋镓铝共掺的高浓度掺铟光纤及放大器[J]. 光电子技术, 2007, **27**(1): 17~19
- 2 Wang Xiulin, Huang Wencai, Huang Xiaojing *et al.*. A novel mean wavelength stability and high efficiency L-band superfluorescent fiber source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 647~652  
 王秀琳, 黄文财, 黄晓菁等. 新型中心波长稳定的高功率L波段掺铟光纤超荧光光源[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 647~652
- 3 Li Jian, Liu Peng, Wang Jing *et al.*. Experiment study on a tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1047~1050  
 李坚, 刘鹏, 王静等. 以环行器和光纤光栅为腔镜的可调谐窄线宽激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1047~1050
- 4 Gao Yaming, Feng Guang, Liu Yongjian *et al.*. Manufacture of Erbium-doped optical fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 515~519  
 高亚明, 冯光, 刘永建等. 掺铒光纤的研制[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(3): 515~519
- 5 Fu Yongjun, Zheng Kai, Chang Deyuan *et al.*. Short cavity and high concentration erbium doped fiber ring lasers [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11): 46~49  
 傅永军, 郑凯, 常德远等. 短腔的高浓度掺铒光纤激光器[J]. 光电工程, 2007, **34**(11): 46~49
- 6 Chang Deyuan, Zheng Kai, Wei Yan *et al.*. Experimental research on the degree of clustering in  $\text{Bi}^{3+}$ - $\text{Ga}^{3+}$  Co-doped high concentration  $\text{Er}^{3+}$ -doped silica-based fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 556~560  
 常德远, 郑凯, 卫延等. 铋镓共掺的高浓度掺铒石英基光纤中铒离子团簇率的实验研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(1): 556~560
- 7 Gao Yangsheng. Fabrication of Single Mode Fiber with Long Wavelength and Low Dispersion [D]. Beijing: Institute of Light Wave Technology of Beijing Jiaotong University, 1991  
 高阳生. 长波长色散平坦单模光纤的研制[D]. 北京:北京交通大学光波技术研究所, 1991
- 8 Li Jian, Zheng Kai, Chang Deyuan *et al.*. Study on pure silica core optical fibers[J]. *Science in China(Series E: Technological Sciences)*, 2007, **37**(9): 1170~1174  
 李坚, 郑凯, 常德远等. 纯硅芯石英光纤的研制[J]. 中国科学(E辑:技术科学), 2007, **37**(9): 1170~1174
- 9 Giles C. Randy, Emmanuel Desurvire. Modeling Erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~282
- 10 Tong Zhi, Wei Huai, Li Tangjun *et al.*. Study on optimization of high quality EDFAs[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(9): 879~882  
 童治, 魏淮, 李唐军等. 高性能掺铒光纤放大器的优化研究[J]. 光电子激光, 2001, **12**(9): 879~882