

双芯掺铒光纤的研制及其增益均衡特性的研究

刘利松 任文华 陈卫国 彭 健 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 报道了双芯掺铒光纤(TC-EDF)的研制工艺,采用改进化学气相沉积(MCVD)和光子晶体堆积工艺成功试制出单芯掺杂型双芯掺铒光纤。利用耦合模理论和速率方程数值模拟了信号功率在双芯掺铒光纤中的传输并分析了双芯掺铒光纤的增益均衡特性;同时制作了双芯掺铒光纤放大器(EDFA)并进行实验测试。结果表明,双芯掺铒光纤具有良好的增益均衡特性。

关键词 光通信;双芯;掺铒光纤;改进化学气相沉积;光子晶体

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0805001

Research on Fabrication and Characteristic of Twin-Core Erbium-Doped Fiber

Liu Lisong Ren Wenhua Chen Weiguo Peng Jian Jian Shuisheng

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

Abstract The fabrication of a twin-core erbium-doped fiber (TC-EDF) is reported. The twin-core erbium-doped fiber with single core doped is fabricated by modified chemical vapor deposition (MCVD) and photonic crystal technology. The characteristics of the twin-core erbium-doped fiber are numerically simulated by using coupled mode theory and rate equations. Meanwhile, a twin-core erbium-doped amplifier is established and measured experimentally. It is presented that this type of twin-core erbium-doped fiber is well fit for gain equalization.

Key words optical communications; twin-core; erbium-doped fiber; modified chemical vapor deposition; photonic crystal

OCIS codes 060.0060; 060.2280; 060.2300; 060.2320

1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)增益平坦化是密集波分复用(DWDM)系统中的重要问题。由于 EDFA 增益不平坦并且带有小波纹,当多级 EDFA 连接使用时就会出现一些波长的功率远高于其他波长,从而限制了能够使用的 EDFA 数量。所以,关于 EDFA 的增益均衡问题一直被密切关注。EDFA 的增益均衡技术有很多,包括光纤光栅滤波器^[1]、光子晶体光纤滤波器^[2]和双芯掺铒光纤(TC-EDF)滤波器^[3~5]等。其中采用双芯掺铒光纤实现增益均衡的方法在器件集成和节约成本方面具有更大的潜在优

势。自 2005 年以来,北京交通大学光波技术研究所 在掺铒光纤和光子晶体光纤制作方面进行了大量研究工作,本文在此工作基础上成功试制了一种单芯掺杂型双芯掺铒光纤。

2 双芯掺铒光纤的制作

考虑到掺铒光纤的制作较普通单模光纤的制作要复杂得多,而且制作成本也高,所以在制作双芯掺铒光纤时,可以采取单芯掺杂的方案来有效降低制作难度和成本。如何有效解决双芯光纤与单模光纤的连接问题,一直是关系双芯光纤是否能够实用化

收稿日期: 2011-01-13; **收到修改稿日期**: 2011-03-10

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328206)、国家 863 计划(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,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: shuishengjian@bjtu.edu.cn

的关键问题。文献[6]中提出一种熔接拉锥法,但此方法操作复杂,难于掌握,很难在实际中广泛应用;而文献[7]中提出的通过采取合理的双芯光纤结构来解决熔接问题有一定的实用性。因此,本文采用了如图 1 所示的双芯掺铒光纤结构。

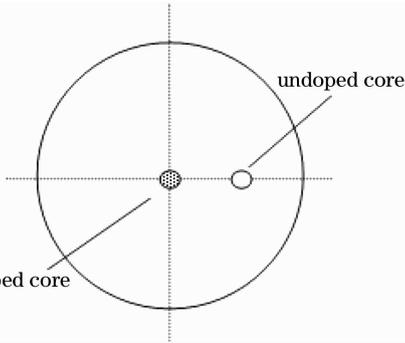


图 1 双芯掺铒光纤的结构示意图

Fig. 1 Structure of twin-core erbium-doped fiber

双芯掺铒光纤的研制具体可以分为以下几个步骤:预制棒的制备、双芯掺铒光纤结构参数设计、双芯掺铒光纤堆积和拉丝。首先采用化学气相沉积(MCVD)法制作高浓度普通掺铒光纤预制棒并测量其折射率剖面图。将部分掺铒光纤预制棒拉丝得到掺铒光纤并测试其吸收系数(图 2)以便计算铒离子浓度。以所测试的掺铒光纤折射率剖面图为参考制作普通单模光纤预制棒,要求两个预制棒的芯径和折射率尽可能相同。实际制作的两个预制棒外径均为 10 mm,而内芯直径均为 1 mm。图 3 为两个预制棒的折射率剖面对比。

双芯掺铒光纤采用如图 4 的结构进行堆积。实验中,外层管为 Hearuse 公司生产的纯石英管,其外径为 18 mm,内径为 15 mm。为了保证掺铒芯位于包层中心,对掺铒预制棒进行套棒处理使其外径达到 14 mm。实验中设计两芯间距为 5 倍芯径。然后对两根预制棒进行研磨加工,其中掺铒光纤预

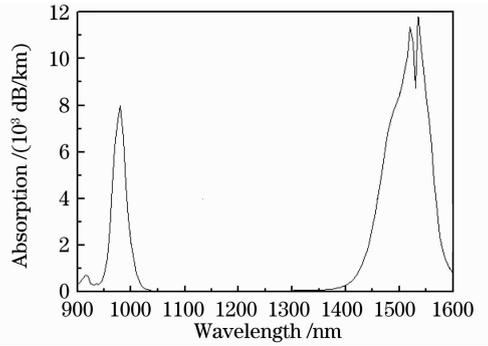


图 2 掺铒光纤的吸收损耗谱线

Fig. 2 Loss and absorption of erbium-doped fiber

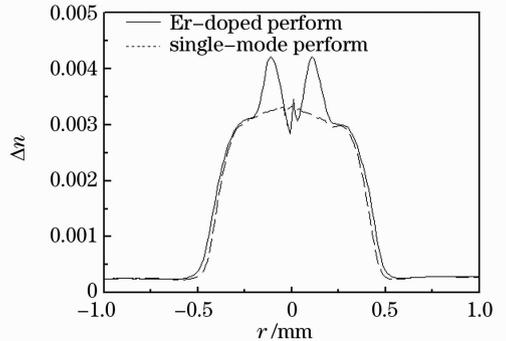


图 3 两个预制棒的折射率剖面图

Fig. 3 Refractive index of two fiber performs

制棒被加工为 D 型而单模光纤预制棒被加工为扁平形。然后按照图 4 所示的结构进行堆积,剩余空隙全部用实心玻璃棒堆实。最后,把预制棒架到拉丝塔上进行拉丝。拉丝过程中进行抽真空处理,以避免光纤内产生气泡。采用上述的工艺方法制作了双芯掺铒光纤样品。

实验控制的双芯掺铒光纤外径为 125 μm,纤芯直径约为 7 μm,芯间距离为 35 μm。通过电子显微镜得到双芯掺铒光纤的截面图如图 5 所示,光纤在横截面保持良好的形状,基本符合了设计要求。但光纤在纵向上存在轻微的不均匀性。

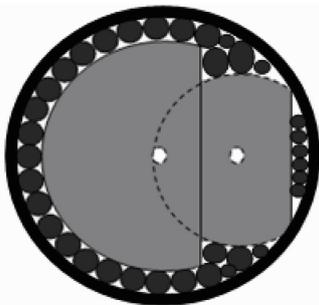


图 4 双芯掺铒光纤的堆积示意图

Fig. 4 Pileup of twin-core erbium-doped fiber perform

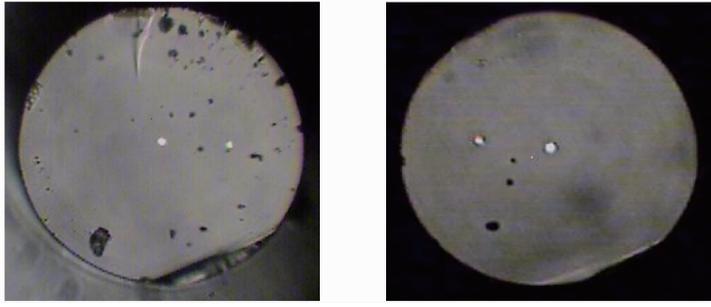


图5 双芯掺铒光纤截面图

Fig. 5 Cross section of twin-core erbium-doped fiber

3 双芯掺铒光纤的数值分析

在EDFA中,信号与抽运光在双芯掺铒光纤中的演化与交叉耦合可以通过耦合模理论^[8]来描述;而增益沿光纤方向的变化则由线性掺铒光纤放大器的速率方程理论描述。对于单芯掺杂型双芯掺铒光纤,其放大器耦合形式的传播方程可以写为

$$\frac{dP_1(\lambda, z)}{dz} = 2C \sqrt{P_1 P_2} \sin \phi, \quad (1)$$

$$\frac{dP_2(\lambda, z)}{dz} = \alpha P_2 + s - 2C \sqrt{P_1 P_2} \sin \phi, \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dz} = \frac{P_2 - P_1}{\sqrt{P_1 P_2}} C \cos \phi + (\gamma_1 P_1 - \gamma_2 P_2), \quad (3)$$

式中 $P_j(\lambda, z)$ ($j = 1, 2$) 为纤芯 1, 2 中的传输光功率; α 表征掺铒芯的增益系数, s 为放大自发辐射 (ASE) 噪声项, γ_1 和 γ_2 分别为两纤芯的非线性系数, C 为线性耦合系数, ϕ 表示相位差。

线性耦合系数 C 的表达式为

$$C(\lambda) = \frac{d_{NA}}{n_1 r} \frac{U^2}{V^2} \frac{K_0(Wd/r)}{K_1^2(W)}, \quad (4)$$

式中 d_{NA} 为光纤数值孔径, n_1, r, d 分别为纤芯折射率、半径及芯间距, U, W, V 为光纤归一化参量, 满足 $U^2 + W^2 = V^2$ 且 $V = \frac{2\pi}{\lambda} r d_{NA}$, 对于阶跃折射率单模光纤, $W = 1.1428V - 0.996, 1.5 < V < 2.4$ 。 K_0, K_1 为第二类变型贝塞尔函数^[9]。

根据 Giles 模型^[10], α 和 s 分别定义为

$$\alpha(\lambda) = \Gamma(\lambda) [\sigma_e(\lambda) N_2 - \sigma_a(\lambda) N_1], \quad (5)$$

$$s(\lambda) = \Gamma(\lambda) \sigma_e(\lambda) N_2 m h \nu \Delta \nu, \quad (6)$$

式中 $\Gamma(\lambda)$ 为信号或抽运光场与铒离子掺杂部分的重叠积分; $\sigma_e(\lambda), \sigma_a(\lambda)$ 分别为铒纤的受激辐射、受激吸收截面; N_2, N_1 分别为铒离子上、下能级单位体积内的粒子数。通常 $m = 2$, 表示光纤支持最低阶模的两个极化态。 h 为普朗克常数, $\nu = c/\lambda$ 表示光频率, $\Delta \nu$ 为放大自发辐射噪声带宽。

数值计算中用到的各项参数见表 1, 其中的几何参数和铒离子浓度均由实验结果计算得出。由于输入信号功率较低且光纤长度不长, 所以计算中忽略掉损耗和非线性的影响。首先利用理论模型计算了光功率在双芯掺铒光纤中的传输情况, 如图 6 所示。可以看出在整个传输过程中, 两芯功率一直发生耦合。信号光功率随着传输距离的不断增加而不断被放大。

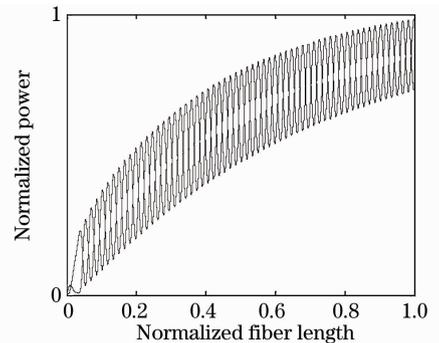


图6 光功率在双芯掺铒光纤中的传输

Fig. 6 Signal transmission in TC-EDF

表 1 数值计算中所使用的各项参数

Tabel 1 Parameters used in numerical calculation

$d_{NA} = 0.27$	$\sigma_e(\lambda_p) = 0.17 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
$\Gamma(\lambda) = 0.6$	$\sigma_a(\lambda_p) = 2.2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
$d = 35 \text{ } \mu\text{m}$	$\sigma_e(\lambda_s) = 5.1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
$r = 3.5 \text{ } \mu\text{m}$	$\sigma_a(\lambda_s) = 2.4 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
$N_0 = 2.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$	$\Delta \nu = 10 \text{ GHz}$

定义信号增益为 $G = 10 \lg(P_{out}/P_{in})$, 其中 $P_{in} = P_1^{in}(0) + P_2^{in}(0)$, $P_{out} = P_1^{out}(L) + P_2^{out}(L)$, L 为光纤长度。图 7 给出在抽运功率 50 mW 下两路输入信号在单芯掺杂型双芯掺铒光纤中的放大情况。两路信号的波长和功率分别为 1550 nm (-5 dBm) 和 1551 nm (-10 dBm)。在经过 30 m 的传输放大之后, 小功率信号 1551 nm (-10 dBm) 得到了约 23 dB 的增益; 大功率信号 1550 nm (-5 dBm) 得到了约

20 dB的增益。两路信号的增益差 Δ_{gain} 值约为 3 dB。

4 双芯掺铒光纤放大器的实验设计

利用所研制的双芯掺铒光纤制作了双芯掺铒光纤放大器,如图 8 所示。抽运源为 980 nm 半导体激光器,最高输出功率 100 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 AQ4317 光谱仪进行测试。双芯掺铒光纤前端采用普通单模熔接方式以保证单芯输入,其熔接损耗为 0.91 dB;而后端则采用文献[6]中提到的熔融拉锥法以保证光功率完全输出,其熔接损耗为 1.88 dB。

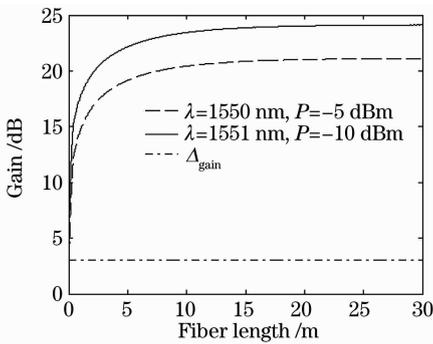


图 7 两路信号在单芯掺杂 TC-EDFA 中的放大

Fig. 7 Gains of two signals in the single-core-doped TC-EDFA

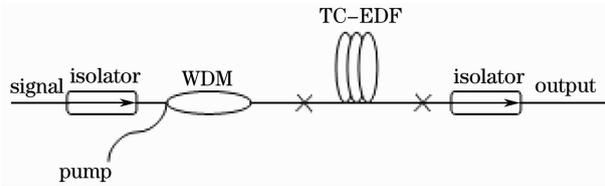


图 8 双芯掺铒光纤放大器的基本结构

Fig. 8 Structure of twin-core erbium-doped fiber amplifier

通过实验优化得到最佳光纤长度为 0.7 m。然后测试其 ASE 谱线并与普通掺铒光纤进行比较,普通掺铒光纤各项参数与双芯掺铒光纤中的掺铒芯完全相同。图 9 为不同抽运功率下,两个放大器的 ASE 谱线。可以看出双芯掺铒光纤放大器的 ASE 谱线在 1530~1580 nm 波段的不平坦度得到了一定程度的改善。进一步研究表明,双芯掺铒光纤放大器的 ASE 谱线不平坦度随抽运功率的增加而增加,但在最高抽运功率 100 mW 的情况下,其不平坦度也不超过 3 dB。

利用可调谐激光器得到一系列不同波长不同功率的离散信号光,其波长范围为 1530~1560 nm,波

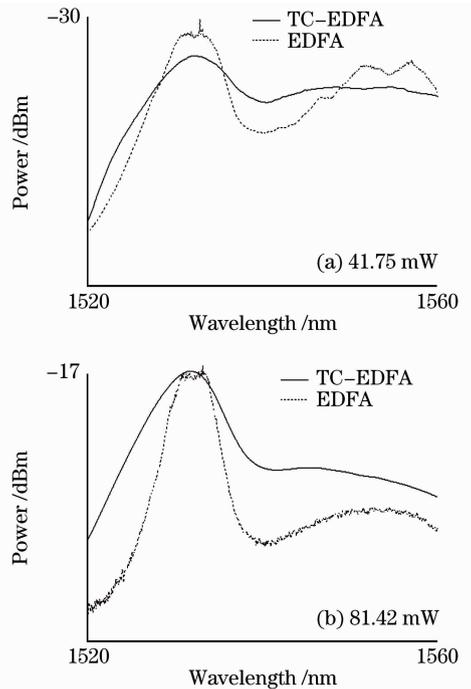


图 9 双芯掺铒光纤与普通掺铒光纤的 ASE 谱比较

Fig. 9 Comparing of ASE between twin-core erbium-doped fiber and simple erbium-doped fiber

长间隔 2 nm,最大不平坦度 5 dB。信号光通过 WDM 耦合到双芯掺铒光纤内,在固定抽运功率为 81.42 mW 的情况下测试其输出。图 10 给出了输入信号、输出信号和增益的功率曲线。结果表明,输入信号的不平坦度减小了近 2 dB,最高信号增益达到 25 dB。由于在光纤制作过程中会不可避免地造成光纤结构缺陷而使其增益均衡性会受到一定影响,故实验测试数据明显劣于理论计算值。

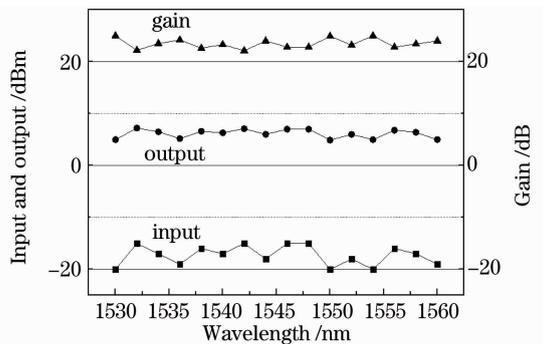


图 10 双芯掺铒光纤放大器的增益均衡测试

Fig. 10 Measured result of twin-core erbium-doped fiber amplifier

5 结 论

对双芯掺铒光纤几何结构进行了优化,并利用 MCVD 和光子晶体堆积技术试制的单芯掺杂型双

芯掺铒光纤,其在横向和纵向上保持了良好的均匀性。采用耦合模理论和速率方程建立了双芯掺铒光纤放大器模型,通过数值模拟得出单芯掺杂型双芯掺铒光纤具有良好的增益均衡性能。实验研制了长度 0.7 m 的双芯掺铒光纤放大器。经测试,该放大器具有明显的增益均衡性能。

参 考 文 献

- 1 Huang Liqun, Wang Li, Wang Zhi *et al.*. Design on gain-flattening filters of L-band EDFAs[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 829~832
黄力群, 王 里, 王 智 等. L 波段掺铒光纤放大器的增益平坦滤波器设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 829~832
- 2 Li Zhiqun, Kang Lili, Su Fengyan *et al.*. Design on photonic crystal gain flatness filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 710~712
李志全, 康莉莉, 苏凤燕 等. 光子晶体增益平坦滤波器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 710~712
- 3 R. I. Laming, J. D. Minelly, L. Dong *et al.*. Twin core erbium-doped fiber equalization with passive spectral gain equalization[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(3): 509~510
- 4 Yin Bin Lu, P. L. Chu. Gain flattening by using dual-core fiber in erbium-doped fiber amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1616~1617
- 5 Yin Bin Lu, P. L. Chu. A gain-flattened L-band dual-core erbium-doped fibre amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **220**(2): 303~308
- 6 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo, Liu Zhihai *et al.*. Coupling approach and mechanism of single-core and twin-core fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 913~917
朱晓亮, 苑立波, 刘志海 等. 单芯光纤与双芯光纤的耦合方法与耦合机制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 913~917
- 7 P. Peterka, I. Kasik, J. Kanka *et al.*. Twin-core fiber design and preparation for easy splicing[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1656~1658
- 8 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jian Dongfang Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 318~322
G. P. 阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 318~322
- 9 Chen Genxiang. *An Introduction to Lightwave Technology*[M]. Beijing: China Railway Publishing House. 2004. 30~42
陈根祥. 光波技术基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. 30~42
- 10 C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~282