

文章编号: 0258-7025(2010)03-0752-05

对称双芯光纤的研制及其耦合特性研究

刘利松 彭 健 姚 磊 郑 凯 魏 淮 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 利用耦合模理论分析了双芯光纤(TCF)的耦合特性与其结构参数的关系。结果表明,不同结构双芯光纤可能具有相同的耦合特性,从而可以根据实际应用对双芯光纤参数进行优化。同时提出一种改进型的双芯光纤制作工艺,采用化学气相沉积(MCVD)和光子晶体堆积工艺制作出均匀性良好的双芯光纤并对其参数进行了测量。

关键词 光通信;双芯光纤;耦合系数;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/CJL20103703.0752

Research on the Fabrication and Coupling Characteristic of Symmetrical Twin-Core Fiber

Liu Lisong Peng Jian Yao Lei Zheng Kai Wei Huai Jian Shuisheng

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

Abstract The relation between coupling characteristic and numerical parameter of twin-core fiber (TCF) was analyzed with coupling mode theory. It's proposed that the coupling characteristic of two different twin-core fibers can be the same so that the parameter of twin-core fibers can be optimized according to their application. Meanwhile, an improved fabrication method of twin-core fiber was presented. Twin-core fiber was fabricated by modified chemical vapor deposition (MCVD) and photonic crystal technology. Then, its numerical parameter was measured.

Key words optical communication; twin-core fiber; coupling coefficient; modified chemical vapor deposition; photonic crystal

1 引 言

双芯光纤(TCF)作为一种特殊结构的光纤有很多方面的应用,如多信道放大的增益均衡^[1,2]和分插复用^[3]等;另外它还可以用于光纤激光器稳定的窄带滤波器^[4]、可变衰减器^[5]和利用耦合器非线性效应的全光开关^[6],由此可见双芯光纤在全光通信中有广泛的应用前景。一直以来,国内关于双芯光纤的理论分析很多^[7~9],但制作工艺方面的报道却很少。自 2000 年以来,北京交通大学光波技术研究所所在光纤制作和光子晶体制作方面进行了大量研究工作,在此工作基础上对双芯光纤的制作工艺进行了研究改进并制作出均匀性良好的双芯光纤样品;同时根据耦合模理论从耦合系数的角度研究了双芯

光纤的结构参数对其耦合特性的影响。

2 理论计算与分析

图 1 为本文涉及的双芯光纤结构图。光纤两个芯子具有相同的半径 a 和相对折射率差 Δ ;其中一个芯子在包层中心,另一个为偏心位置,这样有利于与标准单模光纤熔接^[10];纤芯中心距离为 d 。以上均为双芯光纤的结构参数,而耦合系数是表征双芯光纤耦合特性的重要参数,在很大程度上决定了双芯光纤的应用方向,所以研究耦合系数与光纤结构参数之间的关系非常有意义。

根据耦合模理论,在双芯光纤两芯子参数完全相同也即理想对称的情况下,其耦合系数 κ 的经验

收稿日期:2009-04-21;收到修改稿日期:2009-05-25

基金项目:国家自然科学基金(60807013)资助项目。

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和应用方面的研究。

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

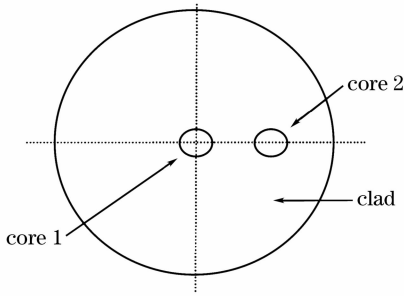


图 1 双芯光纤的横截面图

Fig.1 Cross section of twin-core fiber

表达式为^[11]

$$\kappa = \frac{\rho V}{2k_0 n_0 a^2} \exp[-(c_0 + c_1 \bar{d} + c_2 \bar{d}^2)], \quad (1)$$

式中 V 为光纤的归一化频率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, a 为纤芯半径, $\bar{d} \equiv d/a$ 为两纤芯间的中心到中心的标准化距离 ($\bar{d} > 2$)。常数 c_0, c_1 和 c_2 依赖于 V

$$c_0 = 5.2789 - 3.663V + 0.3841V^2, \quad (2)$$

$$c_1 = -0.7769 + 1.2252V - 0.0152V^2, \quad (3)$$

$$c_2 = -0.075 - 0.0064V - 0.0009V^2, \quad (4)$$

在 $1.5 \leq V \leq 2.5$ 和 $2 \leq \bar{d} \leq 4.5$ 的情况下, 通过(1)式求得的耦合系数 κ 的精度可以达到 1%, 且此公式适用于本文提到的双芯光纤结构。

光纤归一化频率 V 的表达式为

$$V = k_0 a n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (5)$$

式中 $\Delta \approx (n_1 - n_2)/n_1$ 定义为光纤的相对折射率差。

通过(1)~(5)式可以看出耦合系数 κ 为波长 λ , 纤芯半径 a , 纤芯距离 d 和光纤相对折射率差 Δ 的函数。因此, 可以通过计算来研究光纤各结构参数与耦合系数之间的关系。

2.1 波长对耦合系数的影响

首先计算了在 3 种不同结构参数的双芯光纤(表 1)中, 耦合系数随波长的变化规律。由图 2 的计算结果可以看出, 在特定双芯光纤中, 耦合系数随波长的增大而增大且变化幅度依赖于光纤结构。这是由于波长增大使归一化频率变小, 渗透到包层的功率增强, 导模间的相互渗透更加容易。

表 1 3 种双芯光纤的结构参数

Table 1 Numerical parameters of TCF1, TCF2, TCF3

| | $a / \mu\text{m}$ | $d / \mu\text{m}$ | $\Delta / \%$ |
|------|-------------------|-------------------|---------------|
| TCF1 | 4 | 12 | 0.8 |
| TCF2 | 5 | 18 | 1.0 |
| TCF3 | 4 | 16 | 1.2 |

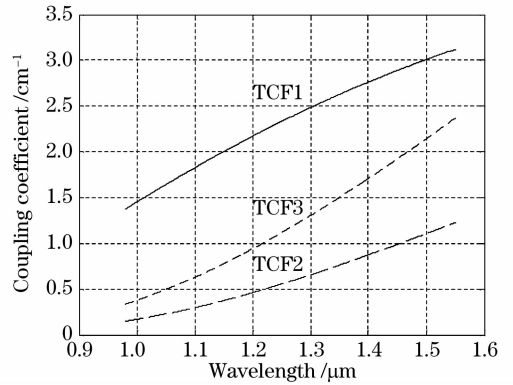


图 2 耦合系数与波长的关系

Fig.2 Relation between coupling coefficient and wavelength

2.2 纤芯半径和纤芯距离对耦合系数的影响

为了降低与标准单模光纤的熔接难度, 双芯光纤的模场直径应尽量与单模光纤模场直径匹配。对于阶跃型折射率分布光纤, 模场直径的匹配可近似为芯径匹配^[12], 因此确定双芯光纤纤芯半径范围在 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 。图 3(a) 给出了在保持其他结构参数不变和固定波长下耦合系数与纤芯半径的关系。在纤芯半径由小变大过程中, 耦合系数先逐渐减小, 后又慢慢增大。

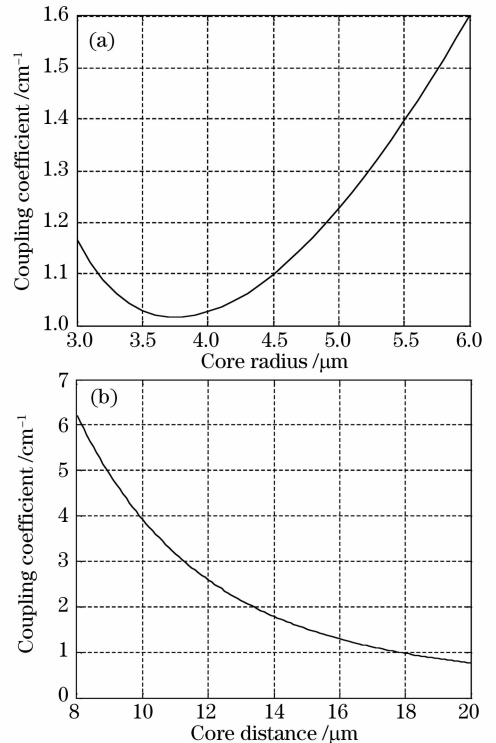


图 3 耦合系数与芯径(a)及芯间距离(b)的关系
Fig.3 Relation between coupling coefficient and core radius (a), core distance (b)

一方面在纤芯半径逐渐变大过程中,光功率更多地被束缚在纤芯,导模间的渗透变得困难;另一方面,随着纤芯继续增大,两纤芯标准化距离变小,导模渗透变得明显,反而使得耦合变得更加容易。因此可以推断,在给定其他结构参数并在固定波长的情况下,耦合系数会随着纤芯距离的增大而减小,图3(b)验证了这个结论。

2.3 相对折射率差对耦合系数的影响

在波长、纤芯半径和纤芯距离一定的情况下计算了相对折射率差对耦合系数的影响,如图4所示。由于相对折射率差与归一化频率是正比关系,且与两纤芯标准化距离不相关,所以耦合系数会随着相对折射率差的增大而减小。

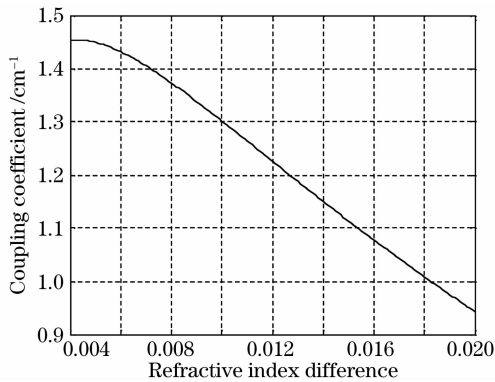


图4 耦合系数与相对折射率差的关系

Fig. 4 Relation between coupling coefficient and refractive index difference

2.4 双芯光纤结构参数的优化

通过计算和分析得出,实际影响耦合系数的因素为波长、纤芯标准化距离和光纤相对折射率差。通过研究这3个因素之间的共同作用,就可以为设计双芯光纤提供参考。图5计算了波长分别为980,1310和1550 nm的耦合系数曲线。可以看出,不同结构的双芯光纤可能具有相同的耦合系数,所以在实际应用中可以合理选择光纤参数从而达到最优化的目的。

3 双芯光纤的制作和测量

3.1 双芯光纤的制作

双芯光纤的制作具体可以分为几个步骤:普通单模预制棒的制备、双芯光纤结构参数设计、双芯光纤堆积和拉丝。首先,在适当规格的 Heareus 管两端接适当长度的普通玻璃管作为试验管,然后用 HF 酸对试验管进行清洗并吹干后架到改进型化学气相沉积(MCVD)车床上;然后在1700 °C下用 SF₆

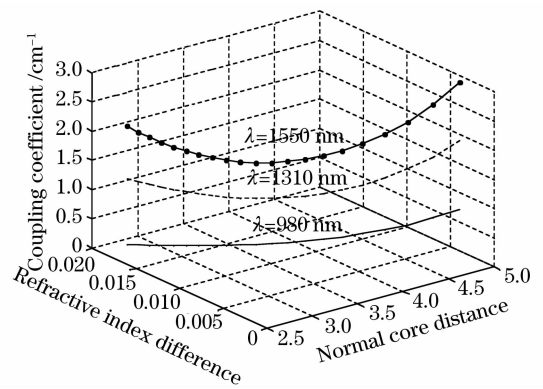


图5 不同波长下的耦合系数曲线

Fig. 5 Coupling coefficient line with different wavelengths

和 O₂ 气体对其内壁进行抛光处理;接着沉积3层纯硅阻挡层后沉积掺锗的芯层,掺锗量可以根据折射率需要来调整;最后缩棒制成单模预制棒。

利用光纤预制棒分析仪测得该预制棒的折射率剖面图,然后根据实际应用利用测得的相对折射率差对双芯光纤的其他几何参数进行计算。为了保证单芯入射,双芯光纤的堆积采用与文献[10]中方案(c)类似的方法,外层管采用相同规格 Heareus 管来保证折射率的一致性。首先把单模预制棒从中间截开分为两段,如图6(a)所示。由于 Heareus 管内径为15 cm而预制棒只有10 cm,无法达到方案中的尺寸要求,所以要对其其中一段预制棒进行一次套棒处理,这样就得到了外径分别为10和14 cm的两段预制棒,其中14 cm预制棒被加工为D型而10 cm预制棒被加工为等腰梯形。然后按照图6(b)所示的结构进行堆积,剩余空隙全部用实心玻璃棒堆实。所有的加工尺寸可以由理论计算和堆积截面几何结构精确给出。与文献[7]中不同的是,在堆积过程中选择两个截面靠在一起,因为截面具有很好的对称性从而保证了横截面纤芯的对称性和纵向的均匀性。最后,把预制棒架到拉丝塔上进行拉丝。采用上述的工艺方法,分别利用两根不同的单模预制棒制作了两种不同结构的双芯光纤 TCF1 和 TCF2 并对其进行了测量。

3.2 双芯光纤的测量

首先利用电子显微镜观察了双芯光纤的截面图,选择光纤上两个不同的位置观察并同文献[10]中的结果做了比较,如图7所示。可以看出,双芯光纤 TCF1 和 TCF2 不但在截面上基本保持了堆积时的形状,而且在纵向上有很好的均匀性,较文献[10]中的结果有了很大改善。

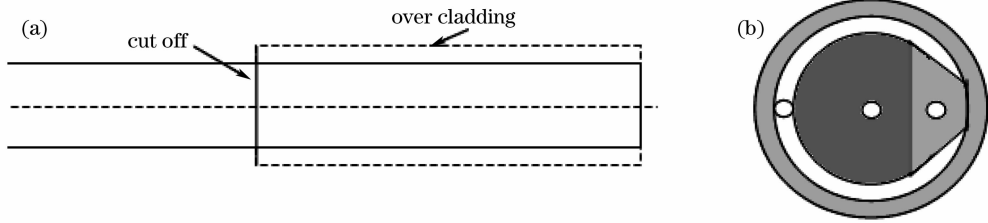


图 6 单模预制棒的处理和双芯光纤的堆积

Fig. 6 Dealing with SMF bar and pileup of twin-core fiber

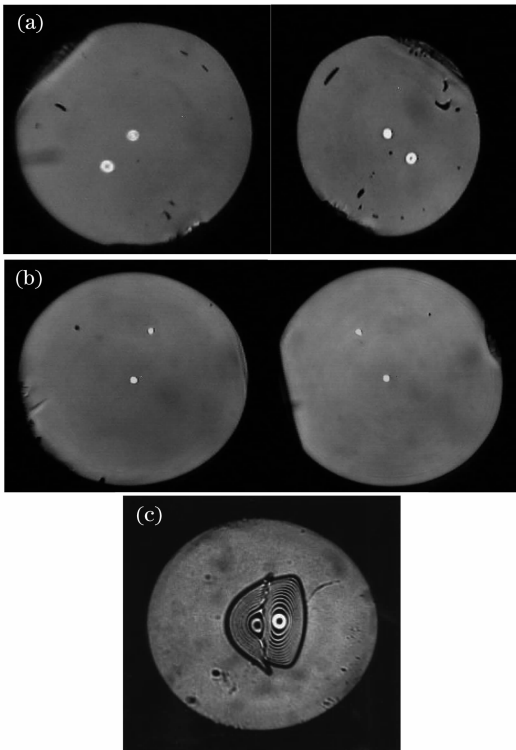


图 7 双芯光纤的截面图。(a) TCF1; (b) TCF2; (c) 文献[10]中的 TCF

Fig. 7 Cross section of TCF. (a) TCF1; (b) TCF2; (c) TCF in Ref. [10]

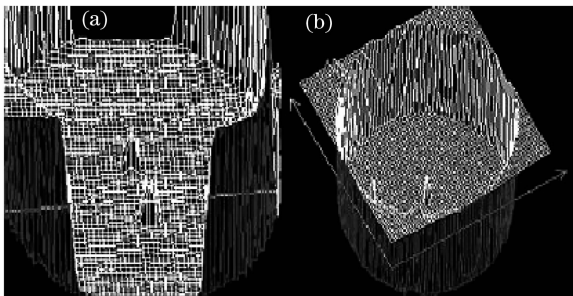


图 8 双芯光纤的三维折射率分布图 (a) TCF1; (b) TCF2

Fig. 8 There dimensional refractive index distribution of TCF. (a) TCF1; (b) TCF2

三维折射率分布图(如图 8),测试波长为647 nm。经过测量得知,TCF1 的纤芯直径为 $8.2 \mu\text{m}$,纤芯中心距离为 $24 \mu\text{m}$,外径为 $146 \mu\text{m}$,相对折射率差为 0.5% ;TCF2 的纤芯直径为 $5 \mu\text{m}$,纤芯中心距离为 $33 \mu\text{m}$,外径为 $150 \mu\text{m}$,相对折射率差为 1.6% 。

同时进行了双芯光纤与标准单模光纤(SMF)的熔接试验,熔接过程中保证双芯光纤的中心芯子与单模光纤对齐。单模光纤外径为 $125 \mu\text{m}$,芯径为 $8 \mu\text{m}$ 。经过多次熔接测量,由熔接机测得的接头损耗均在 0.6 dB 以内,说明制作的双芯光纤具有实际应用价值。

4 结 论

通过理论计算得知,双芯光纤的耦合系数随波长增大而增大,随标准化纤芯距离增大而变小,随折射率差的减小而变大,因此可以合理设计双芯光纤参数来优化双芯光纤性能。利用 MCVD 和光子晶体工艺,可以对光纤参数进行精确控制,并且改善了双芯光纤横向和纵向均匀性,从而制作出符合实际应用的高质量双芯光纤。

参 考 文 献

- 1 R. I. Laming, J. D. Minelly, L. Dong *et al.*. Twin core erbium-doped fibre amplifier with passive spectral gain equalization [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(6):509~510
- 2 Chen Haijuan, Yang Xianglin. Equalizing characteristic of twin-core fiber amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2):216~220
陈海涓,杨祥林. 双芯光纤放大器的研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(2):216~220
- 3 Sun Kai, An Honglin, Xu Wanjin *et al.*. Theoretical analysis and device design for the twin-core fiber add/drop multiplexer [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(11):1099~1103
孙 锴,安宏林,徐万劲 等. 双芯光纤光分插复用器的理论分析和设计[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(11):1099~1103
- 4 P. Pavel, J. Kanka. Erbium-doped twin-core fibre narrow-band filter for fibre lasers [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2001, **33**:571~581
- 5 D. Gauden, D. Mechin, C. Vaudry *et al.*. Variable optical attenuator based on thermally tuned Mach-Zehnder interferometer within a twin core fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**:213~216

然后,利用 EXFO 公司的 NR9200 的折射率测试仪测量了双芯光纤 TCF1 和 TCF2 的结构参数和

- 6 Pedro M. Ramos, Carlos R. Paiva. All-optical pulse switching in twin-core fiber couplers with intermodal dispersion [J]. *J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(6):983~989
- 7 Fu Yongjun, Jian Wei, Zheng Kai *et al.*. The birefringence characteristics of high numerical aperture twin-core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3):297~301
傅永军, 简伟, 郑凯等. 高数值孔径双芯光纤的双折射研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3):297~301
- 8 Wang Honghua, Xue Wenrui, Zhang Wenmei. Negative dispersion properties of photonic crystal fiber with dual core and composite lattice [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):27~30
王红华, 薛文瑞, 张文梅. 双芯复合格点光子晶体光纤的负色散特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):27~30
- 9 Mingyang Chen, Yongkang Zhang, Yuanfeng Zhu *et al.*. Broadband directional coupler based on asymmetric dual-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3):635~639
- 10 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
- 11 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia 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
- 12 Chen Genxiang. *An Introduction to Lightwave Technology* [M]. Beijing: China Railway House, 2004. 54~56
陈根祥. *光波技术基础*[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. 54~56