

熔嵌式多芯中空光纤制备方法及其双折射特性

赵恩铭 苑立波 田凤军* 杨元元

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 设计并制造了一种熔嵌式多芯高双折射中空光纤。由于该结构光纤中纤芯和包层的几何非对称性,因而具有高双折射的特性,可用于克服纤内集成干涉仪的偏振衰落问题。利用有限元法分析了不同尺寸下模式双折射的变化情况,得出了增加纤芯长轴长度或减小内包层厚度可有效提高双折射的结论,并在 1310 nm 波长处得到 1.42×10^{-4} 的模式双折射。实验及分析结果表明,熔嵌式多芯高双折射中空光纤在纤内集成干涉仪的消偏振衰落方面具有一定的应用潜力,可用于制作具有保偏功能的纤内集成干涉仪。

关键词 光纤光学;保偏光纤;多椭圆芯;偏振衰落;干涉仪

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0206006

Preparation and Birefringence Properties of the Embedded Multi-Core Hollow Fiber

Zhao Enming Yuan Libo Tian Fengjun Yang Yuanyuan

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract An embedded multi-core hollow high birefringence fiber is designed and fabricated. Since the structure of the optical fiber core and the cladding is geometric asymmetric, it has high birefringence characteristic which can be used to overcome the problems of the polarization-induced fading of the fiber integrated interferometer. Using the finite element method to analyze the mode birefringence changes in different sizes, it can be concluded that increasing the length of the major axis of the core, or reducing the thickness of the inner cladding can effectively improve the birefringence. And the mode birefringence of 1.42×10^{-4} at 1310 nm is obtained. Experimental and analytical results show that the embedded multi-core hollow high birefringence fiber has a certain potential in in-fiber integrated interferometers for reducing polarization-induced fading and can be used to manufacture in-fiber integrated interferometer with polarization-maintaining function.

Key words fiber optics; polarization maintaining fiber; multi elliptical cores; polarization-induced fading; interferometer

OCIS codes 060.2280; 060.2370; 060.2400; 060.2420

1 引 言

光纤干涉仪由于具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强等优点已被广泛应用于各式传感器中^[1~4],但随着应用领域的不断扩展,需要体积更小、集成度更高的光纤干涉仪传感器。为解决光纤干涉仪传感器微型化、集成化的问题,研究者提出了一些将光纤干涉仪微缩集成到一根多芯光纤中用以构成纤内集成干涉仪的新技术^[5~7],例如双芯椭圆中空光

纤^[8~10]和基于中空光纤的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构^[11],促进了纤内集成干涉仪的快速发展。此外,基于多芯光纤的纤内集成干涉仪由于具有尺寸小、应用灵活和热稳定性好的优点,受到研究者广泛关注,在环境传感等方面已经得到了大量的研究应用^[12~14]。

由于光纤干涉仪传感器通常由低双折射光纤及组件构成,干涉光束中偏振态随机扰动易造成干涉

收稿日期: 2012-08-29; **收到修改稿日期:** 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(61007053, 60927008, 61205027, 61077062, 61077062)、中央高校基础研究基金(HEUCF20111105)和教育部博士点基金(20092304120022)资助课题。

作者简介: 赵恩铭(1977—),男,博士,讲师,主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: zhaoenming@hrbeu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: tianfengjun0424@yahoo.com.cn

信号衰退现象^[15],从而影响光纤干涉仪传感器的性能。为减小偏振衰退对纤内集成干涉仪性能的影响,利用“悬挂芯”方法^[16]设计并制造了一种熔嵌式多芯高双折射中空光纤(MCHF)。其中,椭圆状的纤芯与包层具有几何非对称性结构,从而使得该MCHF具有高双折射特性。利用设计制造的MCHF构建了纤内集成干涉仪,验证了其应用在纤内集成干涉仪的可行性,并进行了实验和有限元分析。结果表明,MCHF在减小纤内集成干涉仪偏振衰退方面具有一定应用前景。

2 熔嵌式多芯高双折射中空光纤的设计与制造

研究过程中设计制造的熔嵌式MCHF主要有双芯、三芯、四芯3种不同纤芯数目的熔嵌式高双折射中空光纤。以双芯熔嵌式高双折射中空光纤为例说明熔嵌式MCHF的结构。图1为双芯MCHF的结构示意图,它由一个直径为 r 的中心空气孔、两个 $2a/2b$ ($2a$ 为长轴长度, $2b$ 为短轴长度)的椭圆纤芯、一个厚度为 d 的石英内包层及一个直径为 R 的外包层四部分构成,其中中心空气孔和外包层的直径分别为 $60\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$ 。双芯MCHF中纤芯、包层和中心空气孔的折射率分别为 n_c 、 n_d 、 n_a ,且 $n_c > n_d > n_a = 1$ 。由于纤芯、包层和中心空气孔的折射率分布的非对称性,双芯MCHF具有高双折射特性。由于结构的类似性,三芯、四芯MCHF同样具有高双折射特性。该特性有利于克服光纤干涉仪中的偏振态衰退现象,因此可利用MCHF制作具有保偏功能的纤内集成干涉仪。

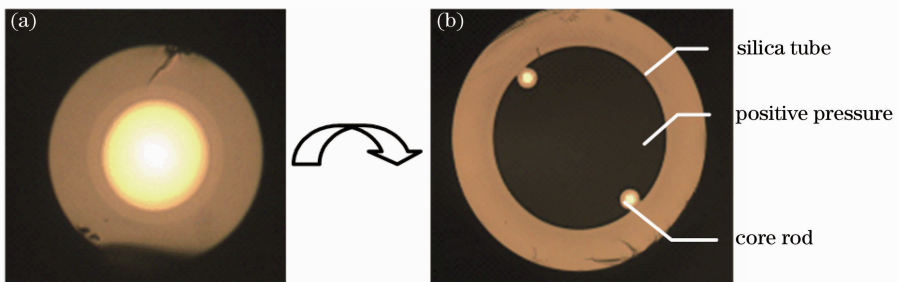


图2 MCHF预置棒端面图。(a)芯棒端面图;(b)具有悬挂双芯的石英管端面图
Fig. 2 Cross section of MCHF preform. (a) Cross section of core rod; (b) end view of silica tube with suspended twin-core rods

在制备完成熔嵌式MCHF的光纤预制棒后,采用具有压力控制功能的光纤拉丝塔对光纤预制棒进行光纤拉制。在光纤拉制过程中,为保证熔嵌式

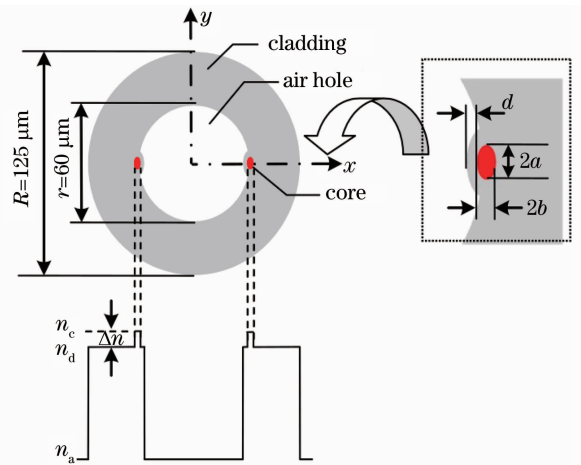


图1 双芯熔嵌式高双折射中空光纤的结构示意图
Fig. 1 Schematic of the hollow high birefringence fiber with two embedded elliptical cores

熔嵌式MCHF的制造过程主要分为光纤预制棒制备和光纤拉制两个步骤。光纤预制棒由芯棒和石英管两部分构成,其端面如图2所示。其中光纤预制棒中所使用的芯棒利用改良化学气相沉积法(MCVD)^[17,18]和腐蚀方法制备而成,其端面如图2(a)所示。为实现熔嵌式MCHF的结构设计,本文采用“悬挂芯”方法制备熔嵌式MCHF预制棒,其具体制备方法为:1)将石英管水平放置,并将芯棒插入到石英管中。由于自身重力作用,芯棒与石英管轴向自然平行。2)利用氢氧焰加热并水平移动芯棒与石英管,使芯棒固定在石英管的内壁上,并彼此熔接在一起,如图2(b)所示。3)由于光纤预制棒为中空结构,为避免在光纤拉丝过程中引入炭粉尘或其他杂质,需将光纤预制棒两端头烧结成实心并做密封处理。利用以上3个步骤完成熔嵌式MCHF的光纤预制棒的制备。

MCHF具有高双折射特性,需严格控制纤芯形状。在高温状态下,熔融石英表面张力作用于圆形芯棒使其变成椭圆形状并熔嵌到石英管内壁中。此外正

压能够避免石英管在高温时塌缩,提高了纤芯椭圆度,降低了石英管壁厚。因此石英管中的压力和拉丝温度是影响纤芯形状的两个重要因素,需对其进行严格控制。经过多次光纤控制实验测试,最终在+100 Pa 和 2000 °C 的条件下分别拉制了长度为 800 m 的不同纤芯数目的 MCHF。双芯、三芯和四芯 MCHF 的端面分别如图 3(a)~(c) 所示。采用光纤折射率分析仪 (Type-S14, PK Technology) 对

双芯 MCHF 进行了折射率分析,分析结果如图 3(d) 所示。在测试过程中将折射率匹配液充满双芯 MCHF 的中心空气孔,从图 3(d) 可知折射率匹配液、包层和纤芯的折射率分别为 $n_m = 1.454$, $n_d = 1.462$, $n_c = 1.466$, 其中纤芯与包层折射率差 $\Delta n = 0.004$ 。分析结果表明,拉制的双芯 MCHF 的折射率性能与图 1 中的结构设计很好地吻合,熔嵌式 MCHF 拉制成功。

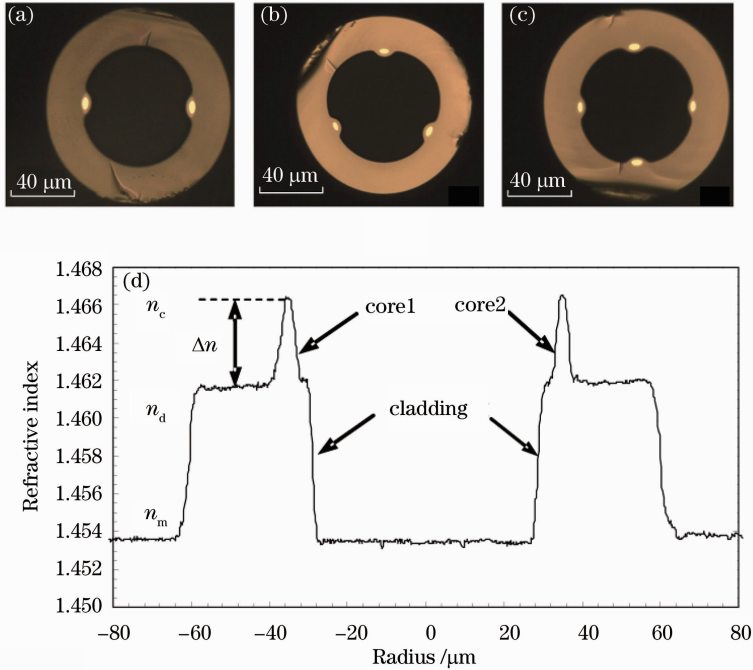


图 3 (a) 双芯 MCHF 端面图; (b) 三芯 MCHF 端面图; (c) 四芯 MCHF 端面图; (d) 双芯 MCHF 的折射率分布

Fig. 3 (a) Cross section of two-core MCHF; (b) cross section of three-core MCHF; (c) cross section of four-core MCHF; (d) refractive index profile of MCHF with twin cores

3 熔嵌式多芯高双折射中空光纤的双折射特性研究

利用有限元方法对 MCHF 的模式双折射特性进行分析研究。由于 MCHF 中没有附加的应力区,因此其模式双折射只包括几何双折射和自应力双折射,其中纤芯和包层的几何非对称性结构引起几何双折射;光纤拉制过程中,光纤芯层和包层热膨胀系数的差异在光纤内部产生非对称分布的残余应力,引起自应力双折射。根据光纤实际尺寸构建有限元分析模型,模型中各结构参数的数值如表 1 所示。

利用有限元法计算 MCHF 中内应力分布,可得椭圆纤芯自应力双折射 ($n_y - n_x$) 分布,如图 4(c) 所示。由图 4(c) 可知纤芯自应力双折射分布并不均匀,最大值和最小值分别为 5.580×10^{-5} 和 3.849×10^{-5} , 且 $n_y > n_x$ 。此外偏振基模 HE_{11} 包括两个正交

方向的偏振模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y , 其电场分布如图 4(a), (b) 所示,其中箭头方向表示电场的矢量方向。由图 4(a), (b) 可知能量被限制在纤芯中,并且 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 在 1310 nm 波长处的有效折射率分别为 $n_{\text{eff},x} = 1.448024$ 和 $n_{\text{eff},y} = 1.448092$, 因此 MCHF 的模式双折射 $B_m = n_{\text{eff},x} - n_{\text{eff},y} = -0.68 \times 10^{-4}$ 。

纤芯椭圆度 ($2a/2b$) 和内包层厚度 d 是决定 MCHF 模式双折射的两个重要因素。改变纤芯椭圆度和内包层厚度时, MCHF 模式双折射随波长的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知,减小 d 或增大椭圆芯长轴 $2a$ 可有效提高 MCHF 模式双折射 B_m 。当 $2a = 12 \mu\text{m}$ 和 $d = 0.5 \mu\text{m}$ 时,模式双折射 B_m 在 1310 nm 波长处可以达到 -1.42×10^{-4} 。该数值结果表明 MCHF 属于高双折射光纤,有利于克服纤内集成干涉仪中的偏振衰退现象。

表 1 熔嵌式多芯高双折射中空光纤模型参数表

Table 1 Variables used in the model of embedded multi-core hollow fiber

Parameter type	Symbol	Value
Long axis of elliptical core	$2a$	$8 \mu\text{m}$
Short axis of elliptical core	$2b$	$4 \mu\text{m}$
Thickness of inner cladding layer	d	$2 \mu\text{m}$
First-order elasto-optical coefficient of quartz material	C_1	$-4.18775 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
Second-order elasto-optical coefficient of quartz material	C_2	$-0.7572448 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
Coefficient of thermal expansion of fiber core	α_{core}	$0.94 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Coefficient of thermal expansion of quartz cladding	α_{clad}	$0.54 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Young's modulus of fiber core	E_{core}	78 GPa
Poisson's ratio of fiber core	ν_{core}	0.186
Young's modulus of quartz cladding	E_{clad}	78 GPa
Poisson's ratio of quartz cladding	ν_{clad}	0.186

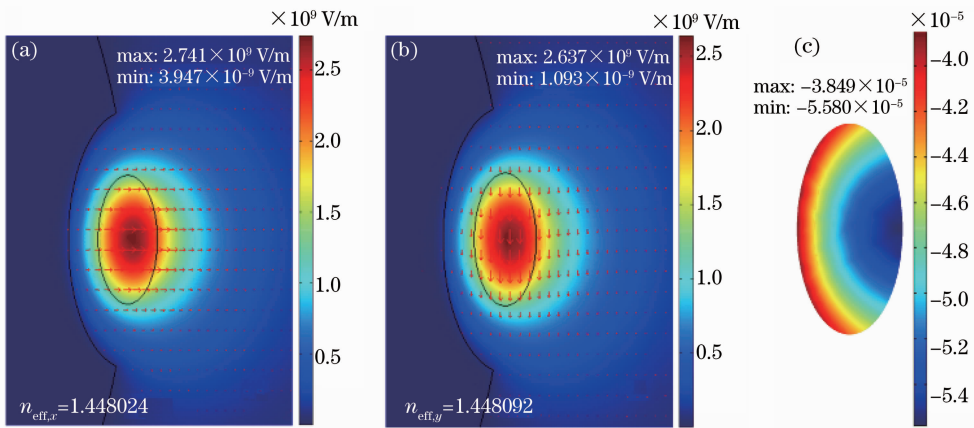


图 4 1310 nm 波长处双折射数值模拟结果。(a) HE_{11} 电场分布；(b) HE_{11} 电场分布；(c) 自应力双折射分布

Fig. 4 Numerical simulation results of birefringence at $\lambda=1310 \text{ nm}$. (a) Electric field distribution of HE_{11} ; (b) electric field distribution of HE_{11} ; (c) distribution of self-stress birefringence

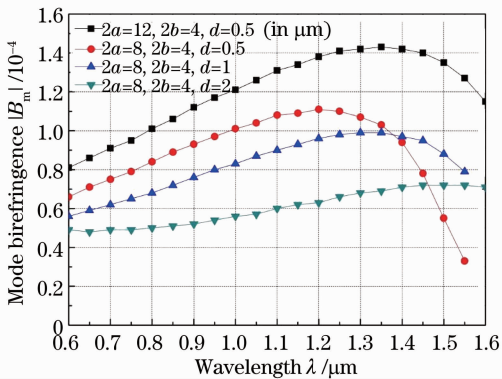


图 5 不同几何尺寸下模式双折射随波长的变化情况

Fig. 5 Mode birefringence versus wavelength under different geometric sizes

4 结 论

设计并制造了一种熔嵌式 MCHF。由于该结构光纤中纤芯、包层和中心空气孔折射率分布的非

对称性以及内部残余应力的存在，因而具有高双折射的特性，可用于克服纤内集成干涉仪的偏振衰退问题。利用有限元方法分析了 MCHF 的双折射特性。分析结果表明，减小内包层厚度或增大椭圆芯长轴长度可有效提高模式双折射。实验及分析结果表明，熔嵌式 MCHF 在纤内集成干涉仪消偏振衰退方面具有很大的应用潜力，可利用 MCHF 制作具有保偏功能的纤内集成干涉仪。

参 考 文 献

- 1 D. A. Jackson. Monomode optical fibre interferometers for precision measurement [J]. *Phys. E: Sci. Instrum.*, 1985, **12**(18): 981~1001
- 2 Zhang Xiaokang, Ye Xiaojing, Chen Zhidong. Doubly cladding single-mode optical fiber sensors and its application in temperature and humidity sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0606004
- 3 张小康, 叶晓靖, 陈志东. 双包层单模光纤传感器及其在温度/湿度传感方面的应用[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0606004
- 3 Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. Transverse pressure

- sensor based on the polarization properties of fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405004
- 汪弋平, 王 鸣, 黄晓琴. 基于光纤光栅偏振特性的横向压力传感器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405004
- 4 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205001
- 孙 浩, 忽满利, 乔学光 等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0205001
- 5 L. Yuan, J. Yang, Z. Liu *et al.*. In-fiber integrated Michelson interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2692~2694
- 6 L. B. Yuan, X. Wang. Four-beam single fiber optic interferometer and its sensing characteristics [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **138**(1): 9~15
- 7 L. B. Yuan. Recent progress of multi-core fiber based integrated interferometers[C]. *SPIE*, 2009, **7508**: 750802
- 8 Y. Jung, S. R. Han, Soan Kim *et al.*. Versatile control of geometric birefringence in elliptical hollow optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2681~2683
- 9 I. K. Hwang, Y. H. Lee, K. Oh *et al.*. High birefringence in elliptical hollow optical fiber[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(9): 1916~1923
- 10 Luca Schenato, Minkyu Park, Luca Palmieri *et al.*. Characterization of a novel dual-core elliptical hollow optical fiber with wavelength decreasing differential group delay [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(19): 20344~20349
- 11 K. Oh, S. Choi, Y. Jung *et al.*. Novel hollow optical fibers and their applications in photonic devices for optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2): 524~532
- 12 J. W. Arkwright, S. J. Hewlett, G. R. Atkins *et al.*. High-isolation demultiplexing in bend-tuned twin-core fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(7): 1740~1745
- 13 L. Yuan, J. Yang, Z. Liu. A compact fiber-optic flow velocity sensor based on a twin-core fiber Michelson interferometer [J]. *IEEE Sens. J.*, 2008, **7**(8): 1114~1117
- 14 O. Frazao, S. F. O. Silva, J. Viegas *et al.*. All fiber Mach-Zehnder interferometer based on suspended twin-core fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(17): 1300~1302
- 15 A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge. Observation of input-polarization-induced phase noise in interferometric fiber-optic sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(10): 847~849
- 16 T. Miyashita, T. Eda, S. Takahashi *et al.*. Eccentric-core glass optical waveguide [J]. *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**(2): 808~809
- 17 Wu Jindong, Li Qingguo, Wu Wenwen *et al.*. Study of novel fabrication process for non-zero dispersion-shifted fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806008
- 吴金东, 李庆国, 吴雯雯 等. 非零色散位移光纤的制造新工艺研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806008
- 18 Wu Jindong, Chen Danping, Lu Weimin *et al.*. Fabrication of Bi-doped silica fibers with near infrared broadband emission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406003
- 吴金东, 陈丹平, 卢卫民 等. 近红外宽带发光掺铋石英光纤的研制 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406003

栏目编辑: 王晓琰