

文章编号:1004-4213(2010)02-0251-4

全玻璃实心保偏光子晶体光纤的研制*

邹快盛¹, 魏德亮^{1,2}, 陆敏¹, 侯超奇¹, 马晶³, 叶腾³

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 长春理工大学 材料学院, 长春 130022)

摘要:设计并采用棒管法结合毛细管堆积技术制备了一种全玻璃材料的实心保偏光子晶体光纤, 光纤端面测试结果表明, 这种结构设计有效克服了传统光子晶体光纤制造过程中空气孔易于塌陷的困难, 光纤微结构保持良好. 采用剪断法测得在 1 550 nm 波长下光纤的传输损耗为 6.84 dB/m. 测试了输出光的偏振度, 结果表明该光纤具有较好的保偏特性, 说明采用此方法研制具有高保偏性能且制作工艺简单的光子晶体光纤是可行的.

关键词:保偏光纤; 光子晶体光纤; 全玻璃光纤; 偏振度测试

中图分类号: TN252

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0251

0 引言

自从 1996 年 J. C. Knight 等人成功研制出第一根光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 以来^[1], 由于 PCF 具有诸多传统光纤无可比拟的优越特性, 使其很快成为国内外学者的研究热点. 保偏 PCF 作为其中的一个重要分支, 也取得了长足的发展, 在诸如高精度光纤陀螺以及光纤偏振器、光纤传感器、光波分复用器等相干检测器件方面将有重要应用意义.

与传统保偏光纤相比, 光子晶体保偏光纤具有诸多优点: 1) 单模工作波长范围大; 2) 高双折射主要是由几何双折射引起的, 受温度影响较小; 3) 双折射参量 B 比传统光纤大 1 到 2 个量级; 4) 设计自由度大, 可以通过调整多个参量来调节双折射值. 最早报道高双折射保偏光子晶体光纤的是英国的 Bath 大学^[2], 2000 年, 他们研制的高双折射光纤在 1.54 μm 处, 测得双折射值 $B=3.7 \times 10^{-3}$; 2001 年, 日本 NTT 公司研制出了低损耗型高双折射光子晶体光纤, 测得其模式双折射 $B > 10^{-3}$, 且在 1.0~1.7 μm 保持单模运转^[3]. 随后, 许多不同结构的高双折射 PCF 相继提出, 诸如采用椭圆孔代替圆孔的结构以及等效椭圆芯结构等^[4-6].

制造空气孔结构的 PCF 存在的最大难点在于保证空气孔的均匀性、完整性, 拉制的 PCF 中的空气孔直径通常是微米量级, 很容易塌陷, 因而在拉制

过程中必须采用充气等手段来保证空气孔. 这种技术比较难控制, 据所查资料, 许多国内的研究只是进行了仿真模拟的数值分析^[4-5,7]. 制造中的难点是制约光子晶体光纤更好地实现商用化的关键. 因此, 本文采用全固体结构设计了一种保偏 PCF, 即在原有空气孔的部分填充低折射率材料, 这种方法能有效保证光子晶体光纤结构, 并降低制造难度. 据文献 [8] 报道, 采用硼硅酸盐玻璃为基质材料 (1.55 μm 处折射率为 1.76), 用低折射率 (1.55 μm 处折射率为 1.53) 的 KF 玻璃作为孔的填充料, 拉制成功了外径分别为 440 μm 和 220 μm 的全固体 PCF, 结果证明光纤的微结构保持良好, 且具有高非线性. 又有文献 [9] 采用两种折射率 (折射率分别为 1.79 和 1.54) 与文献 [8] 中材料的折射率几乎相同的硅酸盐玻璃, 制成了光子带隙型 PCF, 光纤微结构保持良好. 此外, 本文采用多组分玻璃材料来制作光纤, 与石英材料相比具有玻璃材料折射率易于调整; 软化温度低、粘度-温度曲线变化缓慢有利于光纤的拉制工艺; 预制棒制作的重复性好等优点.

1 保偏 PCF 设计

1.1 材料选择

要实现高双折射, 需要孔的填充材料与基底材料的折射率差要尽可能的大; 同时考虑到光纤的制备工艺, 要求所选材料有匹配的热性能. 本文采用自主研发的钨钨共掺铅硅酸盐玻璃 EP-6 作为纤芯材料, 制备与之热性能相匹配的 WT58 硅酸盐玻璃作为 PCF 的基底材料. 综合考虑, 成都光明光电股份有限公司的 H-K9L 光学玻璃与所制备材料的热性

* 国家自然科学基金 (60808023) 资助

Tel: 029-88887622

Email: zksh@opt.ac.cn

收稿日期: 2009-04-09

修回日期: 2009-06-19

能较为匹配,且其为常用的光学玻璃,购买方便价格较低,因此选其作为 PCF 的孔填充材料.所选材料的参量对比如表 1.其中, α 为材料的热膨胀系数.材料在红外波段 1 550 nm 处的折射率是根据 Sellmeier 公式,由已知的材料可见光波段六个波长下的折射率,外推拟合出折射率随波长的变化曲线而得到的.

表 1 保偏 PCF 材料参量比较

Table 1 The characteristics of glasses employed by PM PCF

Glasses	Refractive index n @1 550 nm	$\alpha_{20\sim 120\text{C}} /$ ($10^{-7} \cdot \text{K}^{-1}$)
H-K9L	1.506 32	83
WT58	1.569 99	85
EP-6	1.570 28	83

1.2 理论模拟

全矢量有限元法是一种基于全矢量 Maxwell 方程组的非常有效且具有很高精度的数值分析方法^[10-11],可以用来分析光子晶体光纤有效折射率、损耗以及偏振等各种特性^[12-13].

本文采用这种方法来模拟分析实心保偏 PCF 的模式传播情况和包层有效折射率.结合所选材料,并考虑到实际加工预制棒过程中,加工小孔厚壁管的困难,选择小孔直径与孔间距比为 $d/\Lambda=0.37$,大

孔直径与孔间距比为 $D/\Lambda=0.80$,孔间距 $\Lambda=4\ \mu\text{m}$.其结果如图 1,图中表明为功率流、平均时间和 z 分量.

从模拟结果可以看出,所设计结构在波长 $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ 时, x 偏振的有效折射率为 1.564 227, y 偏振的有效折射率为 1.564 288,则可得双折射值为 $B=n_{\text{yeff}}-n_{\text{xeff}}=6.1\times 10^{-5}$,且能保证单模传输.

2 实验

2.1 光纤制备

采用切割、磨圆和抛光工艺将 H-K9L 玻璃加工成 $\Phi 12\ \text{mm}\times 180\ \text{mm}$ 规格的圆棒,侧面抛光;将材料 WT58 分别加工成对边为 32.4 mm 和 15 mm、长度均为 180 mm 的正六边形管料,侧表面精磨,其中心孔直径均为 12 mm;将 EP-6 玻璃材料加工成对边为 28 mm 的正六边形柱状料,侧表面精磨.

采用棒管法将 H-K9L 与两种规格的 WT58 管料组合,均拉制成对边为 0.85 mm 的一次单丝;将 EP-6 材料也拉制成对边为 0.85 mm 单丝,此期间拉丝温度均为 850 $^{\circ}\text{C}$.按所设计结构将单丝进行组束,然后将组束丝拉制成复丝,其结构如图 2.最后将复丝加外套管拉制成外径为 $\Phi 250\ \mu\text{m}$ 、 $\Phi 280\ \mu\text{m}$ 以及 $\Phi 320\ \mu\text{m}$ 的光纤,此期间拉丝温度为 860 $^{\circ}\text{C}$.

2.2 光纤测试

光纤端面测试采用显微镜观察,用数码相机拍照记录下端面结构图片.

光纤损耗及偏振度测试装置如图 2.光源采用 EXFO 公司的 FLS-2600B 型宽带可调谐激光器,中心波长为 1 550 nm,最小波长调节间隔为 0.001 nm.考虑到该激光器输出光功率较小,采用光讯科技公司的掺铒光纤放大器(EDFA)对激光进行放大.起偏器和检偏器均采用格兰棱镜,光纤输入端和输出端耦合均采用 10 倍显微物镜实现.

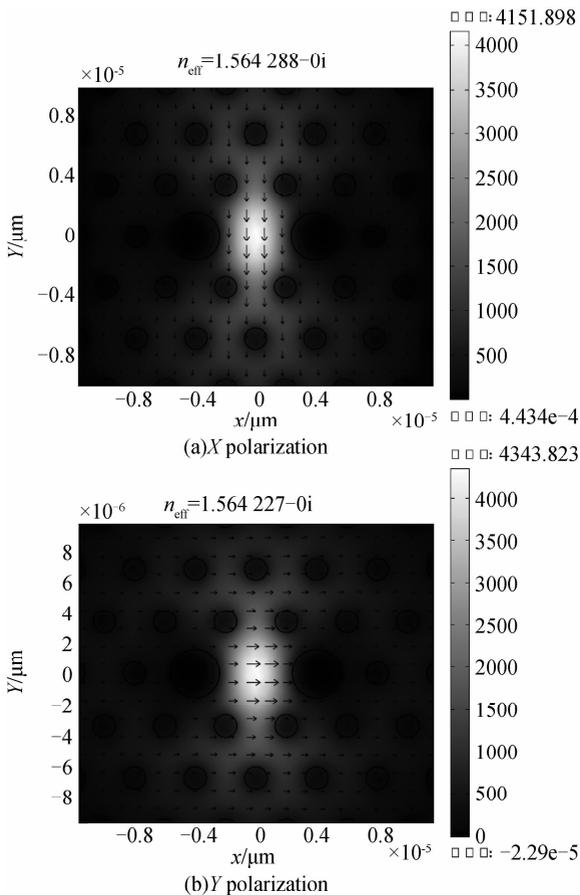


图 1 波长 1550 nm 处偏振模拟结果

Fig. 1 The simulated results of X polarization and Y polarization at $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$

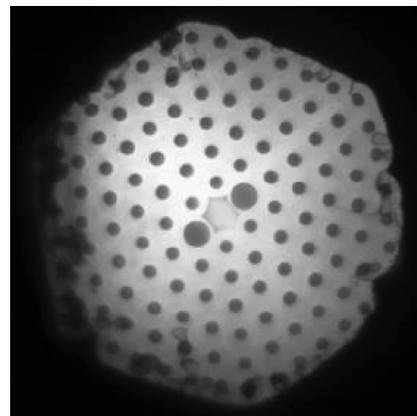


图 2 复丝端面图

Fig. 2 The end profile of stacked-capillaries

采用剪断法测试光纤的损耗. 测试损耗时去掉图 3 中所示的检偏器, 直接用功率计记录输出光功

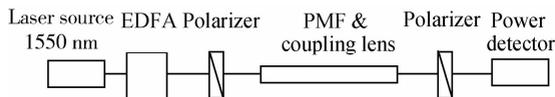


图 3 实验装置

Fig. 3 Schematic experimental setup

率. 损耗计算公式为^[14]

$$\alpha_{dB} = \frac{10}{L_1 - L_2} \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

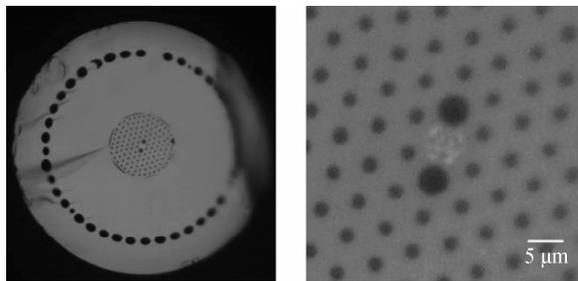
旋转起偏器, 使入射线偏振光以不同偏振方位角耦合进保偏光纤, 在光纤输出端调整检偏器, 用功率计记录下最强和最弱值. 根据式(2)计算出偏振度, 从而得到偏振度与入射偏振方位角的关系图.

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 光纤端面测试结果

光纤端面测试结果如图 4, 光纤外径 $324 \mu\text{m}$ 纤芯直径约为 $7.5 \mu\text{m}$. 从图中可以看出, 实心保偏 PCF 的微结构保持良好. 这充分说明, 此种实心保偏光纤制备的工艺过程简单有效, 光纤制备实验较为成功. 实验中显微镜观察时采用透射光照明方式, 从图 4(b) 中可以明显看到纤芯部分发亮, 说明此种微结构下, 纤芯可以实现有效的光传输.



(a) Whole area

(b) Centre area

图 4 光纤端面图

Fig. 4 The end profile of the PM-PCF

3.2 光纤的损耗和偏振度测试结果

全玻璃实心保偏 PCF 的损耗测试结果如表 2.

表 2 保偏 PCF 损耗测试

Table 2 The loss measurements of drawn PM PCF

Fiber length/mm	Power/ μW	Loss/(dB \cdot m ⁻¹)
474	343	-
520	318	7.15
570	292	7.41
618	279	4.12
668	263	5.13
716	237	9.42
824	195	7.84

选取长度为 824 mm 的光纤作为样品, 采用剪断法根据公式(1)计算出光纤损耗. 当传输光波长为 1 550 nm 时, 所制备光纤的平均损耗为 6.84 dB/m. 损耗较大可能和周期填充孔区与包层间存在的缺陷有关. 造成缺陷的原因在于, 六边形组束丝外套圆管组合控制光纤时, 期间存在空气缝隙, 拉制过程中未能完全消除. 初步考虑可采用抽真空的方法消除.

选取 717 mm 长的光纤作为样品, 按图 2 所示装置进行实验. 测得所制备光纤的偏振度 P 与入射偏振方位角 θ 的关系如图 4.

从图 5 中可以看出, 所制备的光纤具有一定的保偏能力, 当入射线偏振光偏振方向与保偏光纤主轴方向一致时, 输出光偏振度达到 0.81. 由此说明本文采用全玻璃材料制作实心保偏光子晶体光纤的尝试较为成功.

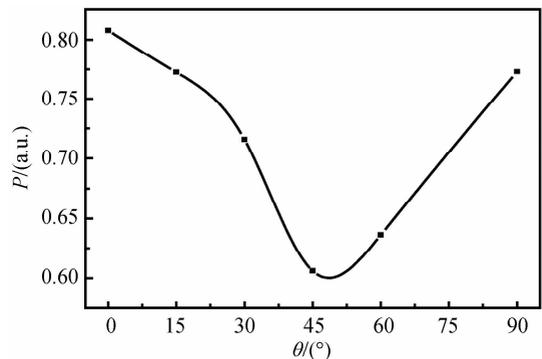


图 5 偏振度 P 与入射偏振角 θ 的关系曲线

Fig. 5 The relation curve of the degree of polarization P changing with the incident polarization angle θ

4 结论

本文采用全玻璃材料设计并制造了一种实心结构的保偏光子晶体光纤, 结果证实了这种结构的 PCF 制作工艺简单有效, 光纤微结构保持良好, 克服了以往 PCF 制备过程中空气孔易于塌陷和变形所带来的困难. 采用剪断法测试了光纤的损耗为 6.84 dB/m. 损耗较大可能和周期填充孔区与包层间存在的缺陷有关. 测试了所制备光纤在 1 550 nm 光波下的偏振度 P 与入射偏振方位角 θ 的关系曲线, 当入射线偏振光偏振方向与保偏光纤主轴方向一致时, 输出光偏振度为 0.81, 证明了所制备光纤具有保偏特性. 由此可知采用全玻璃实心结构来制作保偏 PCF 是可行的, 随着日后的深入研究, 有希望实现保偏性能更好并且制作工艺简单的光子晶体结构的保偏光纤.

参考文献

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P S J, *et al.* Pure silica single-mode fiber with hexagonal photonic crystal cladding [J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(19): 1547-1549.

- [2] ORTIGOSA-BLANCH A, KNIGHT J C, WADSWORTH W J, *et al.* Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(18):1325-1327.
- [3] SUZUKI K, KUBOTA H, KAWANISHI S, *et al.* Optical properties of a low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber [J]. *Opt Express*, 2001, **9**(13):676-680.
- [4] YUE Y, KAI G, WANG Z, *et al.* Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with two big circular air holes adjacent to the core [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, **18**(24):2638-2640.
- [5] CHEN D, SHEN L. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fibers with double defect [J]. *J Lightw Technol*, 2007, **25**(9):2700-2705.
- [6] HANSEN T P, BROENG J, LIBORI E B, *et al.* Highly birefringent index-guiding photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon. Tech Lett*, 2001, **13**(6):588-590.
- [7] LOU Shu-qin, REN Guo-bin, YAN Feng-ping, *et al.* Optical properties of near elliptical core polarization maintaining photonic crystal fiber [C]. *SPIE*, 2005, **5623**:840-849.
- [8] FENG X, MONRO T, PETROPOULOS P, *et al.* Solid microstructured optical fiber [J]. *Opt Express*, 2003, **11**(18):2225-2230.
- [9] LUAN F, GEORGE A K, HEDLEY T D, *et al.* All-solid photonic bandgap fiber [J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(20):2369-2371.
- [10] KOSHIBA M, SAITOH K. Numerical verification of degeneracy in hexagonal photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2001, **13**(12):1313-1315.
- [11] ZHANG Fang-di, LIU Xiao-yi, ZHANG Min, *et al.* A full-Vector FEM model and its application to optical waveguides and photonic crystal fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2):209-214.
张方迪, 刘小毅, 张民, 等. 全矢量有限元模型及其在光波导和光子晶体光纤中的应用[J]. 光子学报, 2007, **36**(2):209-214.
- [12] CUCINOTTA A, SELLERI S, VINCETTI L, *et al.* Perturbation analysis of dispersion properties in photonic crystal fibers through the finite element method [J]. *J Lightwave Tech*, 2002, **20**(8):1433-1442.
- [13] ZHANG Ming-ming, MA Xiu-rong, CAO Ye, *et al.* Study on high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1126-1129.
张明明, 马秀荣, 曹晔, 等. 高双折射光子晶体光纤研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(6):1126-1129.
- [14] WANG J, REEKIE L, BROCKLESBY W S, *et al.* Fabrication, spectroscopy and laser performance of Nd³⁺-doped lead-silicate glass fibers [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, **180**:210.

Fabrication of All-glass Polarization Maintaining Photonic Crystal Fiber

ZOU Kuai-sheng¹, WEI De-liang^{1,2}, LU Min¹, HOU Chao-qi¹, MA Jing³, YE Teng³

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Materials Academy, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A kind of all-glass polarization maintaining PCF is designed and fabricated using rod-in-tube method and capillary-stacking technique. The microscopic end profile of the fiber exhibits an excellent maintenance in the fine structure of the PCF. Thus, this design has effectively overcome the defect of air-holes collapse in traditional PCF fabrication process. Measurement of the fiber attenuation with the cutback method is 6.84 dB/m at 1550 nm. The polarization measurement indicates that the fiber has a good capability to maintain polarization. Therefore it is feasible to achieve the fiber that can effectively maintain polarization and is easy to be fabricated by this all-glass design.

Key words: Polarization maintaining; Photonic crystal fiber; All-glass fiber; Polarization measurement



ZOU Kuai-sheng was born in 1976. He is pursuing his Ph. D. degree, his interests focus on the active components for optical communication, the theory and applications of optical glass materials, specialty fiber.