

零双折射温度敏感系数保偏光子晶体光纤研究

陆 林¹ 杨远洪^{1,2} 李红颖¹

¹北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191

²北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191

摘要 分析了影响保偏光子晶体光纤(PM-PCF)双折射温度敏感性的因素,利用有限元法仿真研究了热光效应和热膨胀效应对典型的实心结构PM-PCF双折射温度敏感系数的影响。结果表明在-150℃~+150℃的工作温度范围内,热光效应对双折射的影响可以忽略。得到了这种PM-PCF双折射温度敏感系数与相邻空气小孔圆心距离 Λ 的多项式模型,在 $\Lambda=5.24\ \mu\text{m}$ 时,双折射的温度敏感系数为零。制作了5根不同 Λ 的PM-PCF样品,采用基于混合Sagnac干涉仪的测量技术分别测试了样品光纤双折射值随温度的变化,在 $\Lambda=5.16\ \mu\text{m}$ 时,双折射的温度敏感系数为零,与仿真结果吻合。

关键词 光纤光学; 保偏光子晶体光纤; 双折射; 温度敏感系数

中图分类号 TB133 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1006006

Study of Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fibers with Zero Birefringent Temperature Sensitive Coefficient

Lu Lin¹ Yang Yuanhong^{1,2} Li Hongying¹

¹Key Laboratory on Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China

²National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The factors that affect the temperature sensitivity of typical polarization-maintaining photonic crystal fibers (PM-PCF) are analyzed. By using the finite elements method, the influence of temperature on the birefringence of the typical solid core PM-PCF is studied, which mainly includes thermo-optic effects and thermal expansion. The results show that the thermo-optic effects can be neglected and the temperature sensitivity of birefringence can be represented only by a polynomial function of the center distance of adjacent air holes Λ under the working temperature from -150℃ to 150℃. The birefringence increases with Λ and becomes zero at $\Lambda=5.16\ \mu\text{m}$. The compact hybrid Sagnac interferometer is used to measure the birefringence of five PM-PCF samples with different Λ under different temperatures. The experimental results conform well to the simulation.

Key words fiber optics; polarization-maintaining photonic crystal fibers; birefringence; temperature sensitive coefficient

OCIS codes 060.5295; 060.2420; 060.2300

1 引 言

光子晶体光纤由于具有材料单一、纤芯及包层空气孔设计灵活等制作特点,可实现高双折射、无限单模传输、色散可调等,在传感和通信领域都有重要的价值^[1-2]。近年来,许多光学仪器和器件都使用了光子晶体

收稿日期: 2015-05-19; 收到修改稿日期: 2015-06-09

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介: 陆 林(1992—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: Rising_Air@163.com

导师简介: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn

光纤,如飞秒光子晶体激光器^[3]、光子晶体光栅^[4]和光子晶体分束器^[5]等。通过在实心纤芯两边对称设置大孔结构或施加预应力可以分别获得形状双折射^[6]和应力双折射^[7],进而形成形状型或应力型保偏光子晶体光纤(PM-PCF),形状型PM-PCF具有更低的双折射温度敏感系数。

在多种结构的PM-PCF中,包层空气孔呈六边形分布、纤芯两边对称设置大孔结构的典型PM-PCF,由于其制作工艺成熟、温度敏感度低等优点,具有更为广泛的应用价值,如光子晶体光纤陀螺^[8]、光纤氢气传感^[9]和光纤压力传感^[10]等。然而,在温度变化大的环境或需要高精度测量的场合,需要保偏光纤双折射温度敏感系数为零。Szpulak和Martynkien的小组对3种特定几何结构的保偏光子晶体光纤在不同波长下的温度敏感系数进行了研究,发现PM-PCF在传输特定波长光时,能实现温度不敏感^[11-12]。

本文以典型的实心PM-PCF为对象,对其双折射温度敏感系数的主要影响因素进行了分析。基于有限单元法进行仿真并建立了PM-PCF双折射温度敏感系数的数学模型,并进行了相应的实验研究。理论仿真和实验研究表明,在工作温度范围内,热光效应对双折射的影响可以忽略。通过结构和参数优化,在1550 nm波段,可以获得双折射温度敏感系数为零的PM-PCF。这对于实现温度不相关的PM-PCF传感器具有重要的价值。

2 数学建模与仿真

2.1 保偏光子晶体光纤双折射温度敏感系数模型

在大多数基于双折射效应的传感器中,都是用两偏振模式间相位变化作为传感信号,可表示为

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} BL, \quad (1)$$

式中 B 是保偏光纤双折射值, L 是保偏光纤长度, λ 是工作波长。在这类传感器中,若温度不是被传感量,它将引入较大的误差相位,是主要的交叉干扰。一般用相位温度敏感度来表示由温度引起的相位变化的误差,其表达式为

$$\frac{d\phi}{dT} = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(\frac{dB}{dT} + B \frac{dL}{LdT} \right) = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(\frac{dB}{dT} + B\alpha \right), \quad (2)$$

式中 dB/dT 为双折射温度敏感系数,表示双折射值随温度的变化率; α 是热膨胀系数,描述了由温度引起的光纤长度的变化。(2)式中第1项和第2项分别表示温度作用下双折射变化和光纤长度变化引起的相位变化。

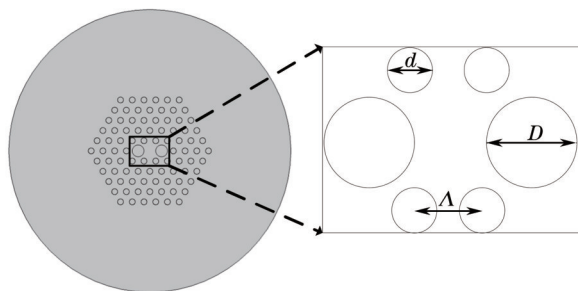


图1 典型PM-PCF的端面图

Fig.1 End image of a typical PM-PCF

图1为包层直径是125 μm 的典型PM-PCF的横截面图,其中 d 是空气小孔的直径, Λ 是相邻空气小孔圆心的距离, D 是纤芯附近对称设置的2个空气大孔的直径,通过在光纤纤芯两侧对称设置大空气孔实现形状双折射。PM-PCF由单一的纯石英制成,可不考虑应力作用,能引起双折射变化的主要机理为热光效应和热膨胀效应。PM-PCF双折射温度敏感系数可以描述为^[13]

$$\frac{dB}{dT} = \frac{\partial B}{\partial n_s} \sigma_s + \frac{\partial B}{\partial n_a} \sigma_a + \frac{\partial B}{\partial \Lambda} \Lambda \alpha_s, \quad (3)$$

式中, n_s 和 n_a 分别为二氧化硅和空气的折射率, $\sigma_s = dn_s/dT = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $\sigma_a = dn_a/dT = -0.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,分别表示二氧化硅和空气的热光效应系数, $\alpha_s = (\partial \Lambda / \Lambda) / dT = 5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 是二氧化硅的热膨胀系数。

2.2 保偏光子晶体光纤双折射温度敏感系数仿真

为简化仿真复杂度和更接近实际情况,选取目前PM-PCF产品的典型结构尺寸,即 $\Lambda = D = 2d$,因此在仿真

时,只需计算不同条件下 Λ 值,便可获得 D 和 d 的值。由(3)式可知,双折射温度敏感系数主要由 n_s, n_a 及 Λ 决定。在绝大多数情况下,基于光纤双折射的传感器的工作温度范围为 $-150\text{ }^\circ\text{C} \sim +150\text{ }^\circ\text{C}$,因此在仿真过程中,选择3个典型温度点($-150\text{ }^\circ\text{C}, 25\text{ }^\circ\text{C}, 150\text{ }^\circ\text{C}$)进行仿真。在每个温度点,通过改变 Λ 的值来考察不同端面结构尺寸条件下,孔间距 Λ 、热光效应和热膨胀效应对双折射值的影响。依据热光系数可确定在这3个温度点的石英和空气的折射率值, Λ 在 $4.0 \sim 6.0\text{ }\mu\text{m}$ 间等间隔取值,并作为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的初始值。其他温度点的结构参数通过热膨胀方程计算。具体的仿真参数如表1所列,工作波长取为 1550 nm 。

表1 仿真数据

Table 1 Simulation data

| Temperature / $^\circ\text{C}$ | $\Lambda / \mu\text{m}$ | Interval / μm | n_s | n_a |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|-----------|
| -150 | -- | -- | 1.442145 | 1.0001575 |
| 25 | 4.00-6.00 | 0.2 | 1.444000 | 1.0000000 |
| 150 | -- | -- | 1.445325 | 0.9998875 |

仿真过程中,先分别计算TM和TE模的折射率,取这2个本征偏振模式折射率差为PM-PCF的双折射 B 。图2仿真得到不同温度的 B 随 Λ 的变化曲线,显示为非线性关系,并且3个温度点的拟合曲线重合,表明在仿真工作温度范围内 n_s 和 n_a 对双折射的影响可以忽略。拟合得到 B 随 Λ 变化的多项式如下:

$$B = (2206.02 - 1600.46\Lambda + 438.69\Lambda^2 - 53.69\Lambda^3 + 2.48\Lambda^4) \times 10^{-4}. \quad (4)$$

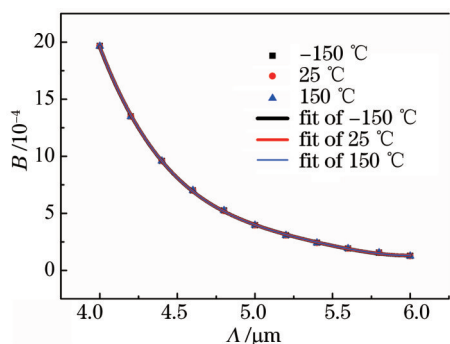


图2 双折射随 Λ 变化情况

Fig.2 Dependence of B on Λ

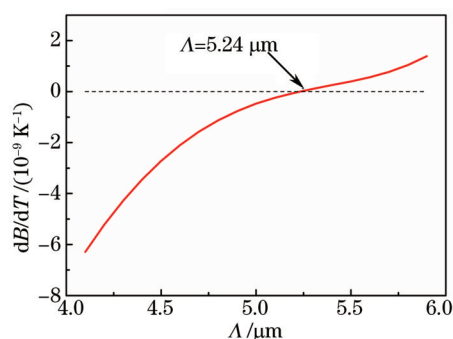


图3 双折射温度敏感系数与 Λ 的关系

Fig.3 Dependence of dB/dT on Λ

由图2可知,在 Λ 的仿真取值范围,随 Λ 的增大, B 单调减小。并且 B 的变化较大,约为 1.83×10^{-3} 。结合(3)式和(4)式可得到双折射的温度敏感系数为

$$\frac{\partial B}{\partial T} = (-880.25\Lambda + 482.56\Lambda^2 - 88.59\Lambda^3 + 5.45\Lambda^4) \times 10^{-10}. \quad (5)$$

上述研究模型表明,典型结构PM-PCF的双折射的温度敏感系数 dB/dT 可由 Λ 的多项式函数确定,通过计算,可得到 dB/dT 值随 Λ 的变化曲线,如图3所示,符号由负变正,当 $\Lambda=5.24\text{ }\mu\text{m}$ 时,双折射随温度的变化率率为零。表明PM-PCF结构参数设计为 $\Lambda=D=2d=5.24\text{ }\mu\text{m}$ 时,它的双折射不随温度变化,即获得零双折射敏感系数。对于其他填充比,光纤设计完成后, d, D 和 Λ 间的关系将是确定的,也能得到与(4)式相同的表达式,但系数会不同,因此也存在一个 Λ 值,使其双折射温度敏感系数为零。

3 实验研究

3.1 测试样品制备

为了验证仿真结果,设计制作了多根不同 Λ 的PM-PCF光纤样品。在制作预制棒时,精确保证 $D=2d=\Lambda$,通过调节拉丝速度,获得了5根不同 Λ 的PM-PCF。表2为其主要参数,表中 L_B 为PM-PCF的拍长。图4为其典型的端面结构,由于空气孔的层数较多,尽管不同 Λ 的PM-PCF光纤样品的外径(D_e)不同,但其导光特性基本一致。

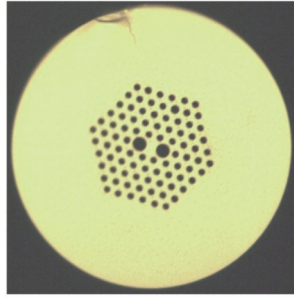


图4 实验用PM-PCF横截面

Fig.4 Cross section of experimental PM-PCF

表2 PM-PCF样品主要参数

Table 2 Main parameters of the PM-PCF samples

| Number | $\Lambda/\mu\text{m}$ | $D_c/\mu\text{m}$ | L_B/mm |
|--------|-----------------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 4.4 | 105.8 | 3.12 |
| 2 | 4.9 | 117.8 | 3.21 |
| 3 | 5.0 | 120.2 | 4.4 |
| 4 | 5.3 | 127.4 | 5.33 |
| 5 | 5.6 | 134.6 | 6.31 |

3.2 双折射的测量方法及装置

采用文献[14]提出的基于混合 Sagnac 干涉仪的测量方法对 PM-PCF 的双折射进行测量,测量装置如图 5 所示。该装置由集成内置光源和光谱探测模块的高精度光纤光栅解调仪(Micron Optics Sm125-500)、单模光纤耦合器(DC)和长度为 L 的保偏光子晶体光纤组成。为确保测试光纤处于稳定的温度环境中,待测 PM-PCF 被放置在水浴中,并用高精度的数字温度计测量温度。

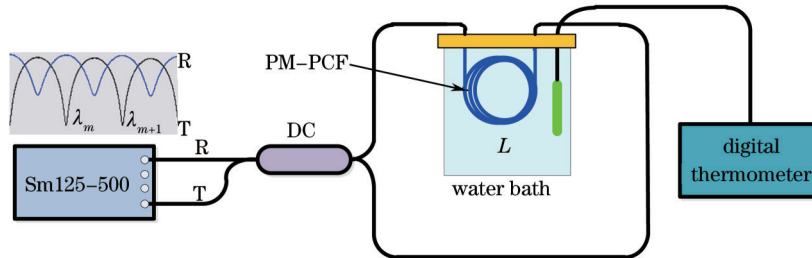


图5 实验用测量装置图

Fig.5 Experimental setup configuration

解调仪中扫描光源发出的光经过 DC 分成 2 束分别沿顺时针和逆时针进入光纤环,在光纤环中传输 1 周并发生干涉,所形成的透射谱(T)和反射谱(R)分别经透射端口和反射端口由解调仪探测并在笔记本电脑上显示和记录。双折射值 B 可表示为

$$B = \frac{\bar{\lambda}^2}{L \cdot S}, \quad (6)$$

式中 $\bar{\lambda}^2 = \lambda_m \cdot \lambda_{m+1}$, $S = \lambda_{m+1} - \lambda_m$, λ_{m+1} 和 λ_m 为透射谱中相邻的光谱谷值(如图 5 所示)。设 L_B 是待测 PM-PCF 的拍长, e_l 为光纤长度的测量精度, e_λ 为解调仪扫描波长的精度,存在最佳待测光纤长度使得 B 的测量精度最高。最佳长度可表示为^[14]

$$L = \sqrt{\bar{\lambda} \cdot L_B \cdot e_l / e_\lambda}, \quad (7)$$

式中 e_l 和 e_λ 的值可分别取 0.1 mm 和 1 pm, L_B 为任取 PM-PCF 长度时粗略测得的光纤拍长。基于该测试方法和最优测试原则可以实现 10^{-10} 的双折射测量分辨率^[11], 满足本文的研究需求。

3.3 实验及结果

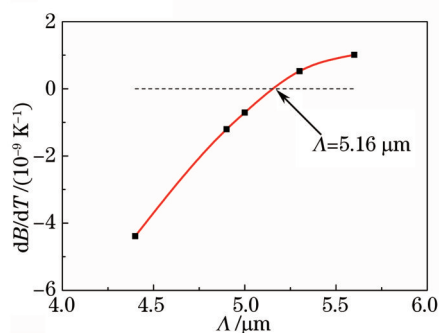
依据 3.2 节的最优测试原则,计算并选取最佳测试光纤长度进行测量。在 30 °C~80 °C 的(10 °C 为间隔)温

度范围内对所选样品双折射进行了测量,计算得到不同 Λ 值PM-PCF双折射温度敏感系数,测试光纤长度和双折射温度敏感系数如表3所示。图6为以实测数据为样本得到的拟合曲线。实验结果表明,双折射的温度敏感系数随 Λ 的增大而增大,其符号由负变正,在 Λ 为 $5.16\ \mu\text{m}$ 时,可实现零双折射温度敏感系数。测试结果与仿真结果吻合。

表3 实验结果

Table 3 Experimental results

| Number | L/mm | $\text{dB}/\text{dT}/(10^{-9}\ \text{K}^{-1})$ |
|--------|---------------|--|
| 1 | 696 | -4.390 |
| 2 | 806 | -1.206 |
| 3 | 833 | -0.707 |
| 4 | 909 | 0.525 |
| 5 | 988 | 1.010 |

图6 实测不同 Λ 下的双折射温度敏感系数Fig.6 Birefringence temperature sensitivity under different Λ

4 结 论

分析了影响典型PM-PCF双折射温度特性的因素,并利用有限元法进行了仿真研究。仿真结果表明,在 $-150\ \text{℃} \sim +150\ \text{℃}$ 温度范围内,由热光效应引起的双折射变化可以忽略。建立了双折射温度敏感系数随孔间距 Λ 变化的模型,发现在 $\Lambda=5.24\ \mu\text{m}$ 时双折射的温度敏感系数为零。实验制作了PM-PCF样品,搭建了高精度的双折射测试系统,依据最佳测试原则测量了5种不同 Λ 值的保偏光子晶体光纤样品,发现在 $\Lambda=5.16\ \mu\text{m}$ 时双折射的温度敏感系数为零,实验测量与仿真结果相吻合。

参 考 文 献

- Russell P. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.
- Wang Wei, Hou Lantian. The review and development of photonic crystal fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(2): 43-58.
王 伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(2): 43-58.
- Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0101001.
柴 路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0101001.
- Huang Tubin, Shi Jielong, Pu Junhui, *et al.*. Long period gratings fabrication by arc discharge in photonic crystal fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0605002.
黄图斌, 施解龙, 浦珺慧, 等. 电弧法刻写长周期光子晶体光纤光栅的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0605002.
- Cao Ye, Cui Danning, Tong Zhengrong, *et al.*. Dual-core photonic crystal fiber polarization splitter based on tellurite glass[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0605007.
曹 晔, 崔丹宁, 童峥嵘, 等. 基于碲酸盐玻璃的新型双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605007.
- Libori S E B, Broeng J, Knudsen E, *et al.*. High-birefringent photonic crystal fiber[C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2001.

- 7 Chu P L, Sammut R A. Analytical method for calculation of stresses and material birefringence in polarization-maintaining optical fiber[J]. *J Lightwave Technol*, 1984, 2(5): 650-662.
- 8 Wu Changxin, Yang Mingwei, Yang Yuanhong, *et al.*. Effect of fiber bend on interferometric fiber optical gyroscopes performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0306005.
吴长莘, 杨明伟, 杨远洪, 等. 光纤弯曲对干涉式光纤陀螺性能的影响[J]. *光学学报*, 2014 34(3): 0306005.
- 9 Yang Yuanhong, Yang Fuling, Wang Huan, *et al.*. Optical fiber hydrogen sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fiber[C]. *SPIE*, 2014, 9157: 91578Q.
- 10 Yang Y, Zhang X, Jin W, *et al.*. Embedded pressure sensor based on birefringent photonic crystal fiber[J]. *SPIE*, 2012, 8421: 842132.
- 11 Szpula M, Martynkien T, Urbanczyk W, *et al.*. Influence of temperature on birefringence and polarization mode dispersion in photonic crystal holey fiber[C]. *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2002, 2: 89-92.
- 12 Martynkien T, Szpula M, Urbanczyk W. Modeling and measurement of temperature sensitivity in birefringent photonic crystal holey fibers[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(36): 7780-7788.
- 13 Martynkien T, Szpula M, Urbanczyk W. Temperature insensitive birefringent holey fiber[C]. *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2005, (1): 111-114.
- 14 Yang Yuanhong, Duan Weiqian, Ye Miao. High precision measurement technology for beat length of birefringence optical fiber[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(2): 025201.

栏目编辑: 王晓琰