

引用格式: ZHAO Lijuan, WU Yujing, XU Zhiniu, et al. Modelling Study of a High Sensitivity Sagnac Temperature Sensor Based on Photonic Crystal Fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0206004

赵丽娟, 吴雨静, 徐志钮, 等. 一种基于光子晶体光纤的高灵敏度 Sagnac 型温度传感器建模研究[J]. 光子学报, 2023, 52(2): 0206004

一种基于光子晶体光纤的高灵敏度 Sagnac 型 温度传感器建模研究

赵丽娟^{1,2,3}, 吴雨静¹, 徐志钮¹, 刘琪¹

(1 华北电力大学 电气与工程学院, 保定 071003)

(2 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室, 保定 071003)

(3 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 保定 071003)

摘要:为提高 Sagnac 型温度传感器的测温范围和灵敏度, 提供了一种具有高双折射高温度灵敏度特性的光子晶体光纤设计方法。通过在光纤空气孔内填充温敏液体材料, 使光纤具有良好的温敏特性。在 COMSOL 中建立该光子晶体光纤的电磁场模型并对光纤特性进行分析计算, 利用有限元法分析结构参数对双折射和光纤双折射温度灵敏度的影响, 并在所确定结构基础上研究了温敏液体的填充方式和填充液体类型对光纤温敏特性的影响。确定了最优的结构和液体填充方式, 最优情况下该光纤的双折射温度灵敏度能够达到 $2.0507 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 在 1550 nm 处可获得 5.96×10^{-2} 的双折射。将 2 mm 光子晶体光纤应用于 Sagnac 型温度传感器中并进行传感性能仿真分析, 利用多项式拟合的方法对结果数据进行拟合以分析传感器的温度灵敏度, 提高拟合准确性、减小测量误差。结果表明在 0~75 $^{\circ}\text{C}$ 范围内传感器平均灵敏度可达 11.28 nm/ $^{\circ}\text{C}$, 与现有典型 Sagnac 型温度传感器相比, 本文 Sagnac 型温度传感器在尽量减小光纤长度的基础上获得了较高的温度灵敏度, 并且测温范围更大、准确性更高。因此, 该传感器在温度测量领域有一定的应用前景。

关键词:光子晶体光纤; Sagnac 型温度传感器; 双折射; 温度灵敏度; 乙醇填充

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235202.0206004

0 引言

干涉型温度传感器通过不同结构的干涉仪将两束或多束光汇合发生干涉, 利用光纤中光相位随光纤所处环境温度的变化而变化实现传感。常见的干涉仪包括迈克尔逊干涉仪、法布里-波罗干涉仪、马赫-曾德干涉仪以及光纤 Sagnac 干涉仪^[1-2]。光纤 Sagnac 干涉仪最初被用来制作光纤陀螺仪^[3-4], 随后基于 Sagnac 干涉仪的温度传感器因其灵敏度高、制作简易被广泛应用在传感领域^[5]。通常在 Sagnac 型温度传感器中插入一段特殊光纤作为传感部分, 当外界温度变化时, 分别在光纤两个偏振态传输的两束光相位差会因光纤双折射的变化而发生变化, 分析因两束光相位差变化引起的光谱偏移, 即可实现传感测量^[6-7]。

2013 年, QI Fei 等^[8]提出了一种基于乙醇灌注边孔光纤 (Side-hole Fiber, SHF) 的 Sagnac 型温度传感器, 利用乙醇的折射率随温度变化, 改变光纤的双折射系数, 进而导致输出谱的波长漂移, 在 20~80 $^{\circ}\text{C}$ 范围内实现 86.8 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 的灵敏度, 与普通光纤布拉格光栅传感器相比灵敏度得到大幅提高。为了提高灵敏度, 2017 年, RUAN Juan 等^[9]将薄芯光纤 (Thin-core Fiber, TCF) 结合熊猫型保偏光纤应用于 Sagnac 型温度传

基金项目:国家自然科学基金 (Nos. 62171185, 62273146), 河北省自然科学基金 (Nos. E2019502177, E2020502010), 河北省省级科技计划 (No. SZX2020034), 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. 2021MS072), 2022 年大学生科技创新培育专项 (No. 9101522005)

第一作者:赵丽娟, hdzlj@126.com

通讯作者:徐志钮, wzcjxx@163.com

收稿日期:2022-09-19; **录用日期:**2022-11-29

<http://www.photon.ac.cn>

感器中,Sagnac环中传感光纤为55 cm,得到1.54 nm/°C的温度灵敏度,虽然灵敏度得到了提高,但其传感器内部使用的光纤较长,不利于传感器的小型化。由于普通光纤的双折射有限,干涉光谱跟踪响应的解调比较困难,Sagnac环中传感光纤通常很长,在实际应用中不方便。而且在低双折射光纤两个偏振方向传播的光信号易因外界干扰发生耦合^[10],对传感器性能产生不利影响。光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)灵活的结构设计性为实现高双折射提供了条件,并且通过在PCF空气孔中填充温敏液体能够实现较高的温度灵敏度^[11-12],将高双折射光子晶体光纤应用于Sagnac型温度传感器中成为一大研究热点。2012年,CUI Ying等^[13]将11.7 cm长的选择性填充光子晶体光纤应用于Sagnac温度传感器中,实现2.58 nm/°C的灵敏度。2017年,LI Xuegang等^[14]使用一种长20 cm的乙醇填充PCF制成全光纤型Sagnac温度传感器,在25~33 °C内温度灵敏度为1.65 nm/°C,测温范围较小。同年,WU Jianjun等^[15]设计了一种掺硼的光子晶体光纤,将其用于Sagnac干涉温度传感实验,在20~100 °C范围内实现测温,虽然测温范围得到了提高,但测量灵敏度仅为1.10 nm/°C。现有基于PCF的Sagnac型温度传感器性能尚待进一步提升。

为了实现Sagnac型温度传感器性能的提升,本文提供了一种具有高双折射高温灵敏度特性的光子晶体光纤设计方法。通过有限元分析方法^[16]对该光纤的传播特性进行分析,研究了光纤结构参数对光纤双折射系数和双折射温度灵敏度的影响以及温敏液体的填充方式、填充液体类型对光纤双折射温度灵敏度的影响。最后将设计的光子晶体光纤应用于Sagnac型温度传感器中,并通过仿真对传感器的性能进行研究。结果表明,在1 550 nm处,该光纤的双折射系数高达 5.96×10^{-2} ,光纤的双折射温度灵敏度能够达到 10^{-5} /°C量级。基于此光子晶体光纤的Sagnac型温度传感器在0~75 °C范围内平均灵敏度达11.28 nm/°C,最高灵敏度达15.94 nm/°C,且所使用PCF长度仅为2 mm,在实际使用中较方便。与现有传感器相比,此传感器在尽量减小光纤长度的基础上获得了较高的温度灵敏度,传感范围也得到了一定的扩大,同时提出采用二次多项式拟合波长与温度的关系,提高了温度测量的准确性。具有结构简便、测温范围广、灵敏度高等优势,为小型化大测量范围高灵敏度温度传感的实现和应用提供了一种有效的设计方案。

1 理论分析及结构设计

1.1 传感原理与系统结构

光纤的双折射系数会随温度的变化而变化,利用这一特性可制作温度传感器^[17]。光子晶体光纤对温度的灵敏度有限,利用温敏液体对光纤进行填充,能够有效提高光纤的双折射温度灵敏度。通常,温敏液体的热敏系数可表示为^[18]

$$n = n_0 - \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

式中, T 为工作温度, α 为液体的热敏系数, T_0 为某已知温度, n_0 为该已知温度下液体的折射率, n 为液体在工作温度 T 时的折射率。乙醇的热敏系数为 $3.94 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,20 °C时折射率为1.360 48;甲苯的热敏系数为 $5.273 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,20 °C时折射率为1.477 00;聚甘油的热敏系数为 $2.6 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,20 °C时折射率为1.462 00。分别采用乙醇、甲苯和聚甘油对光子晶体光纤进行填充。

基于Sagnac干涉仪的温度传感器,其原理性结构示意图如图1,由光源、3 dB耦合器、液体填充的高双折射光子晶体光纤、偏振控制器(Polarization Controller, PC)以及光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)构成。

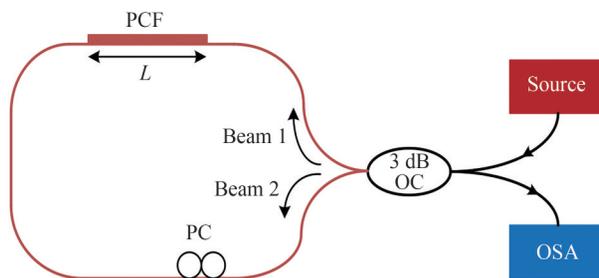


图1 Sagnac干涉仪型温度传感器原理

Fig.1 Schematic of the Sagnac interferometer temperature sensor

光源发出的光经过 3 dB 耦合器后分成两束相同强度的光,一束沿顺时针方向传输,另一束沿相反方向传输。经过环路的传播,当两光束再次进入耦合器时,耦合成一个光束输出至光谱分析仪。由于光子晶体光纤的双折射特性,返回耦合器的两束光会产生一定的相位差 $\Delta\varphi$,表示为^[19]

$$\Delta\varphi = (\beta_x - \beta_y)L = \frac{2\pi BL}{\lambda} \quad (2)$$

式中, β 为传播常数, L 为光子晶体光纤的长度, λ 为工作波长, B 为光纤的双折射系数,可表示为^[20]

$$B = |\operatorname{Re}(n_{\text{eff}}^x) - \operatorname{Re}(n_{\text{eff}}^y)| \quad (3)$$

式中, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别为 x 偏振态和 y 偏振态的有效模式折射率。

Sagnac 型传感器的透射谱可表示为^[21]

$$H = \frac{1 - \cos(\Delta\varphi)}{2} = \frac{1 - \cos(2\pi BL/\lambda)}{2} \quad (4)$$

其透射谱凹点对应波长 λ_{dip} 满足关系式

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi BL}{\lambda_{\text{dip}}} = (2k + 1)\pi \quad (5)$$

式中, k 为常数,进而可得

$$\lambda_{\text{dip}} = \frac{2BL}{2k + 1} \quad (6)$$

当外界环境温度发生变化时, λ_{dip} 会由于光纤长度和双折射变化而发生偏移,长度和双折射变化量分别为 ΔL 和 ΔB 。波长偏移量 $\Delta\lambda_{\text{dip}}$ 可表示为

$$\Delta\lambda_{\text{dip}} = \frac{2L\Delta B + 2B\Delta L}{2k + 1} \quad (7)$$

由于石英和乙醇的热膨胀系数分别为 $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $1.09 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,均非常小。可以忽略光纤因热膨胀导致的长度变化,因此, λ_{dip} 的偏移量可以表示为

$$\Delta\lambda_{\text{dip}} \approx \frac{2L\Delta B}{2k + 1} \quad (8)$$

基于 Sagnac 干涉仪的温度传感器,其灵敏度 S 可以由式(9)得到

$$S = \frac{\Delta\lambda_{\text{dip}}}{\Delta T} \quad (9)$$

式中, $\Delta\lambda_{\text{dip}}$ 是凹点偏移量, ΔT 是温度变化量。因此,在一定温度变化范围内,传感器的温度灵敏度随 λ_{dip} 偏移量的增大而增加。由式(8)可知,在传感器中光纤长度保持不变的情况下,一定温度变化范围内光纤双折射变化量越大, $\Delta\lambda_{\text{dip}}$ 就越大。分析光纤的双折射温度灵敏度,即可反映传感器的灵敏度。光纤的双折射温度灵敏度 σ 可通过光纤双折射变化量 ΔB 与温度变化量 ΔT 的比值来分析^[22],即

$$\sigma = \frac{\Delta B}{\Delta T} \quad (10)$$

1.2 光纤设计

光纤双折射系数随光纤结构在 x 、 y 偏振轴之间不对称性的增加而增大。温度变化对光纤双折射系数的影响越大,光纤的双折射温度灵敏度越高,基于此光纤的 Sagnac 型温度传感器的灵敏度就越高。综合考虑此因素和光纤制造难度,本文设计的光子晶体光纤横截面结构如图 2。

光子晶体光纤包层区域由五层空气孔按照六边形排列,其中圆形空气孔与椭圆形空气孔交错排列,整体呈现轴对称分布。最内层由四个椭圆空气孔构成,基底材料为纯石英,折射率为 1.45。纤芯由中心空气孔缺失形成,最内层空气孔的分布增加了光纤结构的不对称性,有利于改善光纤特性。经过系统的光纤性能分析,确定了结构参数。其中,圆形空气孔的直径 $d=0.775 \mu\text{m}$,小椭圆空气孔长轴 $a_1=0.775 \mu\text{m}$,短轴长为 b_1 ,孔间距为 d_1 。大椭圆空气孔长轴 $a_2=1.328 \mu\text{m}$,最内层椭圆空气孔长轴 $a_3=1.594 \mu\text{m}$,短轴长为 $b_3=0.57 \mu\text{m}$ 。

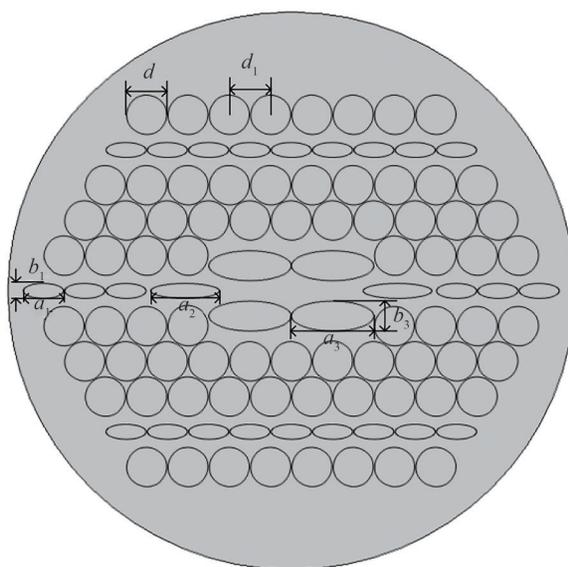


图2 光纤横截面

Fig.2 Cross section of optical fiber

2 建模与结果分析

利用COMSOL有限元分析软件建立了光子晶体光纤的电磁场模型,采用较细化网格进行剖分,并在光纤外层添加完美匹配层。根据光纤结构参数对双折射系数和光纤双折射温度灵敏度的影响进行光纤结构优化。在此结构基础上,从温敏液体的填充方式、温敏液体的类型两方面研究了对光纤双折射温度灵敏度的影响。最后将此光子晶体光纤应用于Sagnac型温度传感器并进行传感器性能仿真分析。

2.1 结构对双折射和光纤双折射温度灵敏度的影响

建模基于如图2所示的光纤结构参数,图3为 $b_1=0.30\ \mu\text{m}$, $d_1=0.80\ \mu\text{m}$ 时在波长 $1\ 550\ \text{nm}$ 处光纤 x 偏振态和 y 偏振态的模式场分布。从分布图中可以看出,能量很好地集中在纤芯中,能够保证光信号的传输。且 x 、 y 偏振态模式场分布所呈现的形状不同,这导致了该光纤双折射现象的产生。

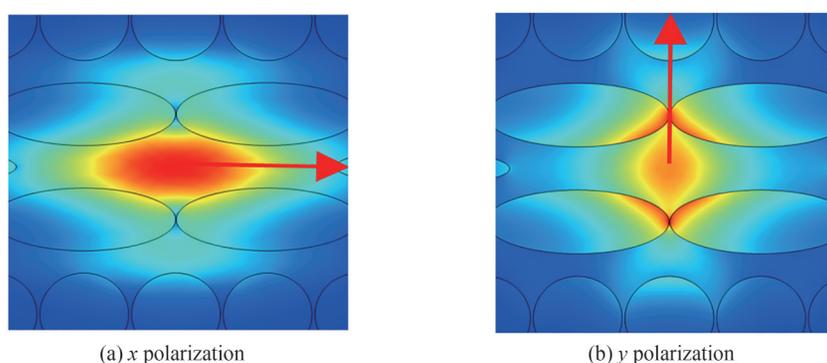


图3 PCF模式场分布

Fig.3 PCF mode field distribution

光纤包层椭圆短轴 b_1 和孔间距 d_1 会对光纤的结构不对称性产生较大影响,故对其进行调整并分析对光纤双折射系数和双折射温度灵敏度的影响。由于光纤本身对温度的灵敏度有限,故采用温敏液体乙醇对光纤最内层四个椭圆空气孔进行填充以提高光纤温度灵敏度。考虑到光纤结构参数值太小会加大光纤制造难度,同时受到光纤结构的限制,参数值也不能太大。综合考虑光纤结构限制、制造难度和光纤性能,选择 b_1 的取值范围为 $0.30\sim 0.59\ \mu\text{m}$, d_1 的取值范围为 $0.80\sim 0.85\ \mu\text{m}$ 进行数值计算。

2.1.1 b_1 对双折射和温度灵敏度的影响

研究包层椭圆率对双折射和光纤双折射温度灵敏度的影响,设置光纤包层椭圆短轴 b_1 分别为三个典型值 $0.30\ \mu\text{m}$ 、 $0.44\ \mu\text{m}$ 、 $0.59\ \mu\text{m}$,其他结构参数保持不变。图4(a)为 $d_1=0.80\ \mu\text{m}$ 时有效折射率随波长的变化关系,可通过 x 、 y 偏振态对应有效折射率计算光纤的双折射系数。图4(b)为 $d_1=0.80\ \mu\text{m}$ 时 b_1 对双折射的影响,可知,光纤双折射系数均在 10^{-2} 量级上,且随波长的增大呈减小的趋势。原因是光子晶体光纤在短波长区间对光波能量的限制能力比较强,而随着波长的增大,纤芯中的能量会有部分泄露进包层中,从而导致了双折射系数的减小。在 $1400\sim 2500\ \text{nm}$ 范围内,同一波长下,光纤的双折射系数随着 b_1 的减小而增大,这可归因于 b_1 的减小使得光纤 x 偏振轴和 y 偏振轴之间的结构不对称性增加。

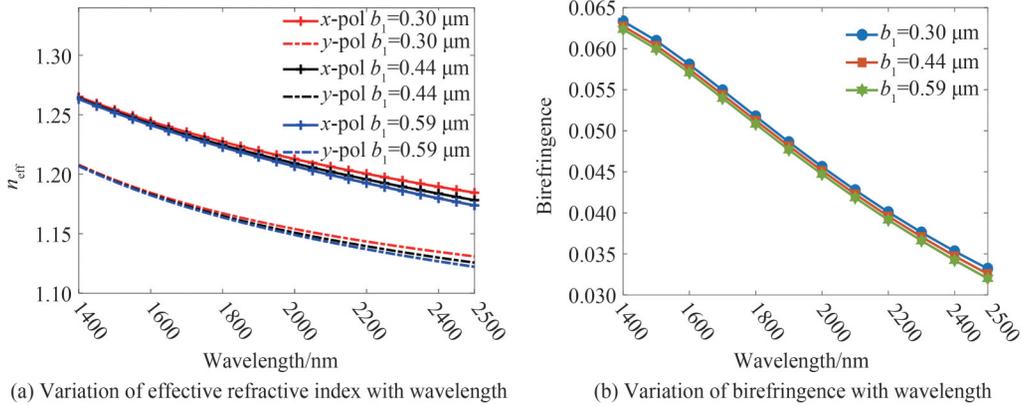


图4 b_1 对有效折射率和双折射的影响

Fig.4 Effect of b_1 on effective refractive index and birefringence

图5为不同 b_1 条件下填充温敏液体乙醇后的光子晶体光纤双折射随温度的变化,可知光纤双折射系数随温度增加近似为线性增大,经线性拟合后的表达式见图5,图中 B 表示光纤的双折射系数, T 表示环境温度,曲线斜率代表光纤的温度灵敏度。结果表明,在 $0\sim 75\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内,减小 b_1 能够增大光纤的温度灵敏度。综上,光纤的双折射系数和双折射温度灵敏度均随 b_1 的减小而增大,但 b_1 的减小也增加了光纤制造难度。综合考虑光纤的性能和制造难度,选择 b_1 为 $0.30\ \mu\text{m}$ 。

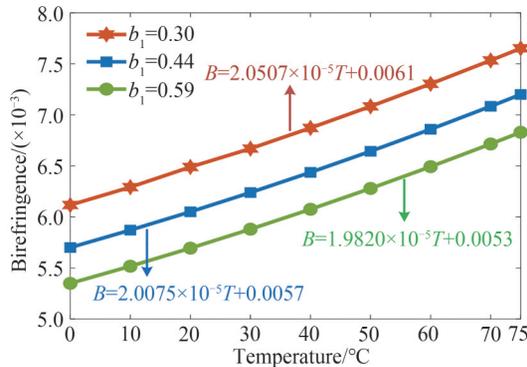


图5 双折射随温度的变化

Fig.5 Variation of birefringence with temperature

2.1.2 d_1 对双折射和温度灵敏度的影响

受光纤半径的限制,孔间距 d_1 要满足 $d_1 \leq 0.85\ \mu\text{m}$,本节对孔间距 d_1 分别为典型值 $0.80\ \mu\text{m}$ 、 $0.83\ \mu\text{m}$ 、 $0.85\ \mu\text{m}$ 时的光纤性能进行分析。由2.1.1节可知, b_1 为 $0.30\ \mu\text{m}$ 是最优选择,因此,本节在 $b_1=0.30\ \mu\text{m}$ 的情况下,对其他结构参数保持不变时 d_1 对光纤性能的影响进行分析。图6(a)为在 $1400\sim 2500\ \text{nm}$ 波长范围,不同 d_1 对应光纤双折射系数随波长的变化。可知,同一波长下,光纤双折射系数随孔间距 d_1 的减小呈增大的趋势,这可归因于孔间距的减小使得包层中靠近纤芯的空气孔与纤芯模场之间的相互作用增大。图6(b)

为填充了乙醇的光子晶体光纤在不同 d_1 时对应双折射随温度的变化,该曲线的斜率代表其温度灵敏度,比较曲线斜率可知减小孔间距能够增大光纤的双折射温度灵敏度。

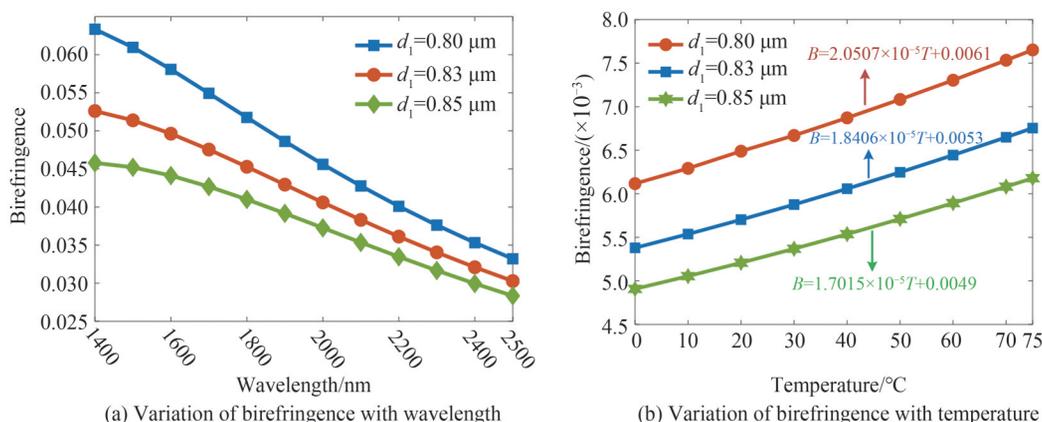


图6 d_1 对双折射和光纤双折射温度灵敏度的影响
Fig.6 Effect of d_1 on birefringence and fiber birefringence temperature sensitivity

综上,减小孔间距 d_1 能够增大光纤的双折射系数和双折射温度灵敏度,但随着孔间距的减小,包层中各层空气孔之间的距离减小,增大了光纤的制造难度。综合考虑光纤的制造难度和性能,选择孔间距 d_1 为 $0.80 \mu\text{m}$ 。

在提出的光纤结构中,从光子晶体光纤的双折射系数和填充后的光纤双折射温度灵敏度两个方面对 b_1 、 d_1 带来的影响进行系统分析。最终选择 $b_1 = 0.30 \mu\text{m}$ 、 $d_1 = 0.80 \mu\text{m}$,此时光纤的双折射系数在 1550 nm 处能够达到 5.96×10^{-2} ,双折射温度灵敏度能够达到 $2.0507 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 填充材料对光纤双折射温度灵敏度的影响

从温敏液体的填充方式、温敏液体的类型两个方面,分析对光子晶体光纤的双折射温度灵敏度的影响。

2.2.1 填充方式对温度灵敏度的影响

光子晶体光纤一般由纯石英材料构成包层部分,包层中周期性排列空气孔,对温度不敏感。可以通过在空气孔中填充温敏液体来提高光子晶体光纤的灵敏度。二氧化硅的热光系数与乙醇等温敏液体相比差了两个数量级,因此在一定的温度变化范围内,光纤双折射的变化可认为由温敏液体的折射率随温度变化而导致的。图7为在光纤空气孔内填充乙醇前后得到的双折射随波长的变化,可以看出光纤在填充乙醇后,双折射系数有所降低,但仍能达到 10^{-3} 量级。

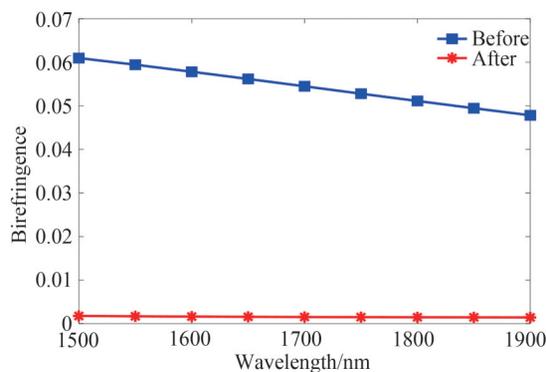


图7 填充乙醇前后双折射随波长变化
Fig.7 Variation of birefringence with wavelength before and after filling with ethanol

填充方式会影响光子晶体光纤的双折射温度灵敏度,本节分析了在上述确定的光纤结构基础上不同填充方式对应的光纤温敏特性。不同的填充方式如图8,其中蓝色孔表示在空气孔中填充了乙醇液体,方式I为选择性填充,对光纤最内层四个椭圆空气孔进行填充,方式II为全填充。在工作波长为 1550 nm ,环境温度从 0°C 到 75°C 变化的条件下,分析这两种填充方式对应的光纤双折射温度灵敏度。

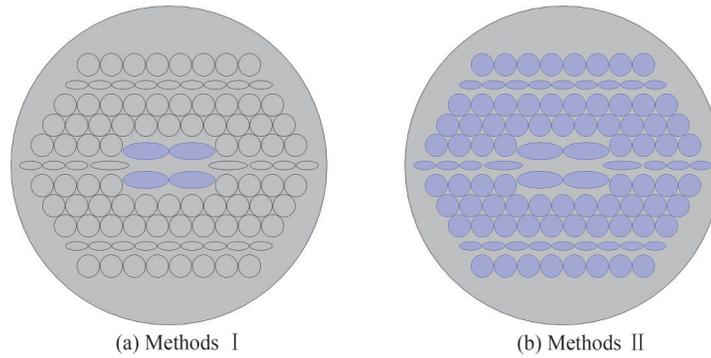


图8 液体填充方式
Fig.8 Liquid filling method

图9为分别在两种不同填充方式条件下光纤双折射系数随温度的变化,可以看出,光纤双折射系数随温度增加近似为线性增大。方式II较方式I得到的光纤双折射系数有明显的降低,原因是乙醇的全填充造成光纤纤芯和包层之间的折射率差降低,从而使得光纤的双折射系数降低。采用方式I进行填充的光纤双折射温度灵敏度高于方式II,为 $2.0507 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,因此采用选择性填充方式得到的光子晶体光纤双折射温度灵敏度优于全填充方式。

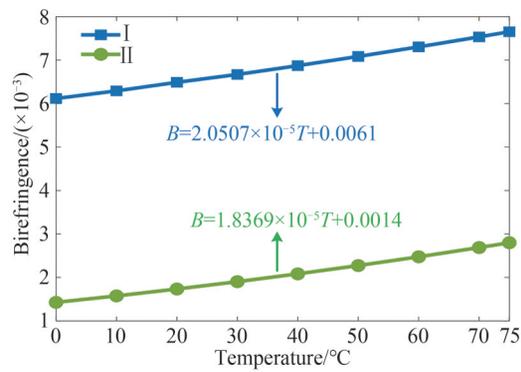


图9 不同填充方式对应双折射随温度变化
Fig.9 Variation of birefringence with temperature corresponding to different filling methods

2.2.2 填充液体类型对温度灵敏度的影响

填充温敏液体的类型也会对光纤双折射温度灵敏度产生一定的影响。由2.2.1节可知采用方式I进行填充得到的光纤灵敏度最高,因此分别用乙醇、甲苯和聚甘油以方式I对光纤进行填充,对比不同类型液体填充条件下光纤双折射系数随温度的变化。图10为分别采用三种液体进行填充时光纤双折射随温度的变

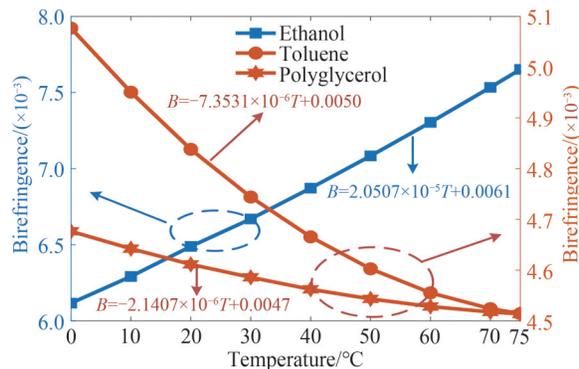


图10 填充不同温敏液体对应双折射随温度变化
Fig.10 Variation of birefringence corresponding to filling different temperature sensitive liquids with temperature

化,对应的光纤双折射温度灵敏度如表1。可知采用乙醇进行填充时,光纤双折射系数随温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围基本呈现线性变化。采用甲苯和聚甘油进行填充时,双折射系数与温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内的线性相关度不如乙醇理想,且此时光纤的双折射温度灵敏度远低于采用乙醇填充时的灵敏度。综合考虑双折射与温度变化曲线的线性度以及光纤的双折射温度灵敏度,乙醇是更适合进行光纤填充的温敏液体。

表1 不同温敏液体对应灵敏度和拟合度

Temperature sensitive liquids	Sensitivity/ $(\times 10^{-5}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	R^2
Ethanol	2.050 7	0.987 4
Toluene	0.735 3	0.951 2
Polyglycerol	0.214 1	0.965 4

2.3 最优结构及填充方式的验证

考虑到多因素对光纤双折射系数和双折射温度灵敏度的影响,为了验证2.1节和2.2节确定的结构参数和填充方式,在 b_1 分别为 $0.30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.44\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.59\text{ }\mu\text{m}$, d_1 分别为 $0.80\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.83\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 组成的9种结构参数组合中,进行双折射系数和光纤双折射温度灵敏度数值分析,组合方式及其对应的结构参数如表2。图11为9种结构参数组合所对应光纤在 1550 nm 处的双折射值,可以看出第一种结构参数组合,即 $b_1=0.30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_1=0.80\text{ }\mu\text{m}$ 时光纤的双折射系数最大。

表2 组合方式及其对应光纤双折射温度灵敏度

Combinations	Structural parameters	Method I/ $(\times 10^{-5}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	Method II/ $(\times 10^{-5}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
1	$d_1=0.80\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.30\text{ }\mu\text{m}$	2.050 7	1.836 9
2	$d_1=0.80\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.44\text{ }\mu\text{m}$	2.007 5	1.803 7
3	$d_1=0.80\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.59\text{ }\mu\text{m}$	1.982 0	1.790 8
4	$d_1=0.83\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.30\text{ }\mu\text{m}$	1.840 6	1.614 5
5	$d_1=0.83\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.44\text{ }\mu\text{m}$	1.799 7	1.578 4
6	$d_1=0.83\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.59\text{ }\mu\text{m}$	1.778 1	1.595 6
7	$d_1=0.85\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.30\text{ }\mu\text{m}$	1.701 5	1.641 1
8	$d_1=0.85\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.44\text{ }\mu\text{m}$	1.664 9	1.508 2
9	$d_1=0.85\text{ }\mu\text{m}$, $b_1=0.59\text{ }\mu\text{m}$	1.645 9	1.640 5

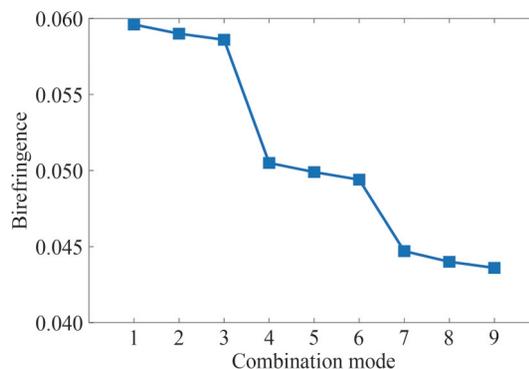


图11 不同结构参数组合对应双折射

Fig. 11 Different combinations of structural parameters correspond to birefringence

图12为采用乙醇分别以方式I、II对9种结构参数组合光纤进行填充时双折射随温度的变化情况,图中1~9表示不同的光纤结构参数组合。

表2为9种结构参数组合及其在对应液体填充方式下的光纤双折射温度灵敏度,能够看出在第一种结构参数组合即 $b_1=0.30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_1=0.80\text{ }\mu\text{m}$ 基础上,将乙醇以方式I进行填充能够获得最大温度灵敏度。综

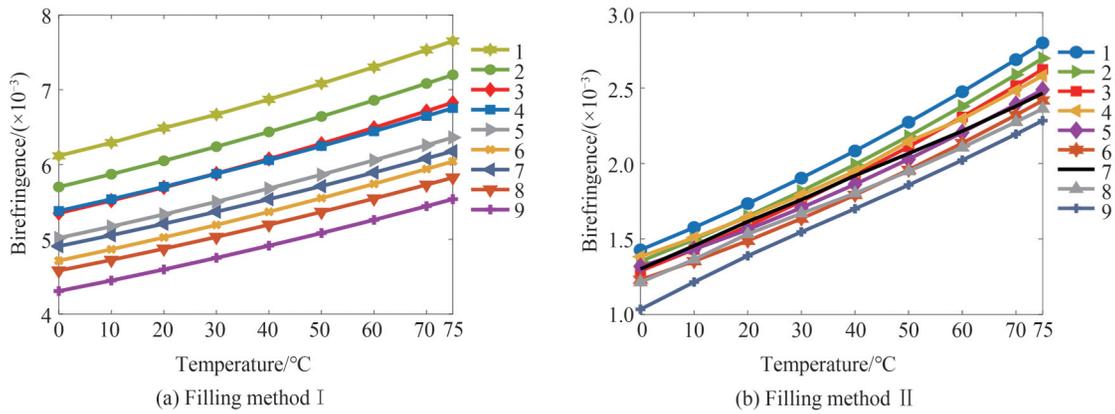


图 12 不同填充方式下不同结构参数光纤对应双折射随温度变化

Fig. 12 Variation of birefringence with temperature for fibers with different structural parameters under different filling methods

上,当 $b_1=0.30 \mu\text{m}$ 、 $d_1=0.80 \mu\text{m}$ 时能够获得最大双折射系数和光纤双折射温度灵敏度,与 2.1 节和 2.2 节的结论吻合。

2.4 Sagnac 型温度传感器性能分析

根据本文提供的光纤设计方法能够设计出具有良好温敏特性的光子晶体光纤,所以 Sagnac 型温度传感器采用所提出的新型结构光子晶体光纤。通过仿真对该传感器的性能进行分析,传感器原理如图 1。由式(2)可知,传感器中光子晶体光纤越长、双折射值越大,沿相反方向传输的两束光再次回到耦合器时彼此的相位差越大,干涉光谱跟踪响应的解调就越容易。但过长的光纤不利于提高传感器的实用性。本文所提供设计方法中光纤双折射值较大,使用较短光纤也能实现传感器的解调。综合考虑传感器的性能和实际应用,光子晶体光纤长度选择为 2 mm。将 PCF 作为 Sagnac 型温度传感器的传感元件,利用光纤双折射随温度变化进而导致透射谱的偏移实现传感。根据式(4)计算得到的传感器透射光谱如图 13,仿真结果表明,温度变化时输出透射谱会发生一定程度的偏移。以凹点为参考点,温度升高导致光纤的双折射值增大,进而由式(7)可知这将导致凹点向长波长方向移动,如图 13 所示,温度从 0°C 变化至 75°C 过程中凹点发生红移。

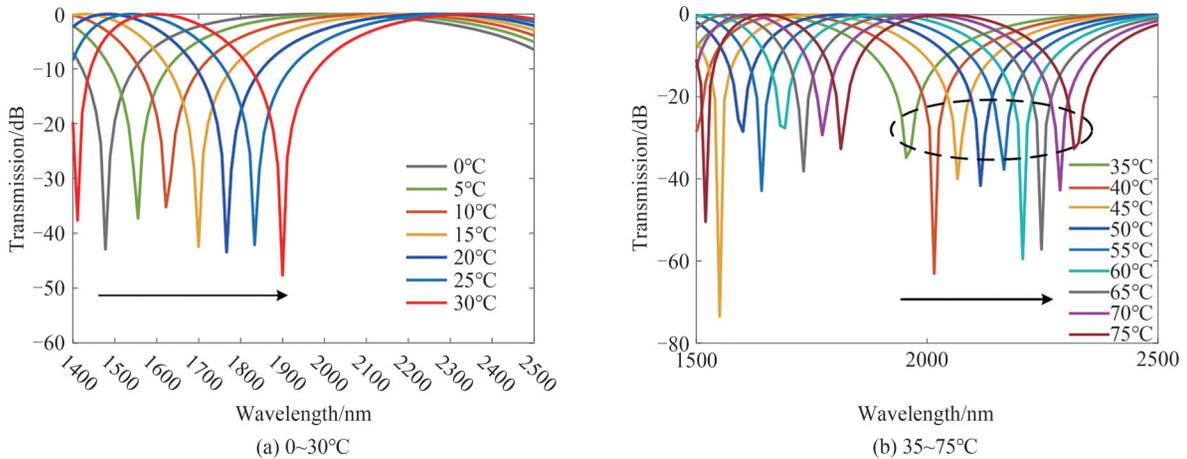


图 13 不同温度下透射谱

Fig 13 The transmission spectrum with different temperature

乙醇的沸点为 78.3 °C,在实际应用中随着环境温度不断升高至接近乙醇的沸点,乙醇的蒸发在沸点附近变得剧烈,使光子晶体光纤的温度灵敏度受到影响,降低了波长偏移对温度的敏感性。综合考虑乙醇的沸点及工程应用需求,选择 0~75 °C 作为传感区域对传感器的灵敏度进行分析,图 14 为温度在 0~75 °C 范围内凹点对应波长 λ_{dip} 随温度 T 的变化。图 14(a) 为采用线性方程对温度与波长的关系进行拟合的结果, R^2 为 0.987 4。由线性拟合后的表达式可知此温度传感器的灵敏度为 11.28 nm/°C,平均测温误差为 2.256 5 °C。

图14(b)为采用二次多项式对温度与波长关系拟合的结果,曲线在某点处的斜率代表该温度下传感器的灵敏度, R^2 可达0.999 9,拟合一致性较好。根据拟合方程可知0~75 °C范围内传感器灵敏度在6.62~15.94 nm/°C,0 °C时灵敏度最大,为15.94 nm/°C,平均温度灵敏度为11.28 nm/°C,平均测温误差为0.126 9 °C。由上述数据可看出,在0~75 °C范围内波长随温度增加近似为二项式规律变化,采用二次拟合较之线性拟合 R^2 从0.987 4增加到0.999 9,平均测温误差由2.256 5 °C降低到0.126 9 °C。综上,将所设计的高双折射高温度灵敏度光子晶体光纤应用于Sagnac温度传感器中,能够在较大的测量范围内实现较高的温度灵敏度。

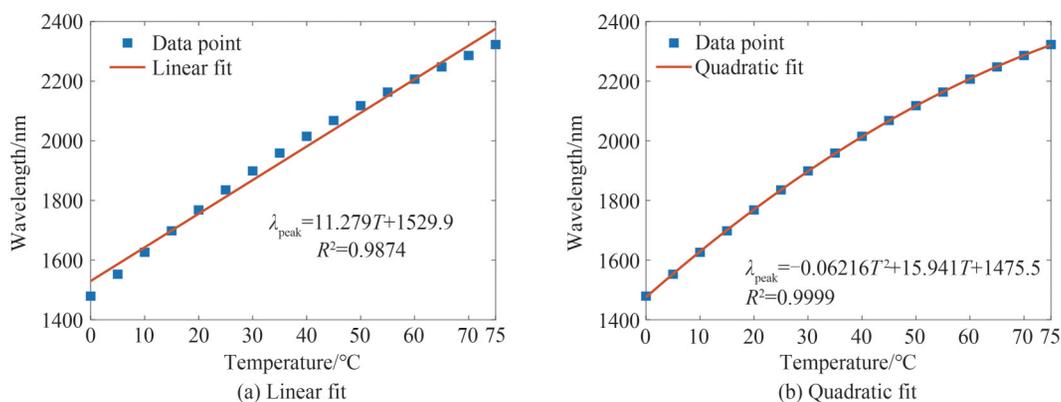


图14 凹点波长与温度的关系

Fig. 14 Relationship between concave point wavelength and temperature

2.5 与现有 Sagnac 型温度传感器的比较

表3为本文 Sagnac 型温度传感器与典型 Sagnac 型温度传感器在平均温度灵敏度、测量范围、传感器尺寸和拟合准确性方面的比较。可知,本文 Sagnac 型温度传感器显示出更高的温度灵敏度,测量范围也得到了不同程度的扩大,且所使用的传感光纤较短,拟合准确性更高。本文温度传感器具有结构简便、测温范围广、灵敏度高的优势,为小型化大测量范围高灵敏度温度传感的实现和应用提供了一种有效的设计方案。

表3 与现有典型 Sagnac 型温度传感器比较

Table 3 Comparison with existing typical Sagnac temperature sensor

Sensor	Sensitivity/(nm·°C ⁻¹)	Range/°C	L/cm	R ²
Ref.[23]	0.068	20~70	25.4	—
Ref.[24]	7.54	25~85	6	0.982 1
Ref.[25]	5.42	20~70	20	—
Ref.[26]	-5.77, 8.49	25~85	0.15	0.957 4, 0.976 8
Proposed	11.28	0~75	0.20	0.999 9

3 光纤的可加工性

随着光纤制造技术的发展,各种光纤制造方法已比较成熟,常用的方法包括堆拉法、3D 打印法、熔融刻蚀法以及溶胶-凝胶法^[27-30]等。其中,2012年 EI HAMZA OUIH 等^[30]提出的溶胶-凝胶法能够灵活地改变光纤空气孔的形状、尺寸以及孔间距,通过这种方法可制造任意一种光子晶体光纤结构,因此得到广泛应用。本文设计的光子晶体光纤空气孔均为圆形和椭圆形,排列方式对称且有规则,圆形空气孔的制备已较为常见,虽然椭圆空气孔的制备有一定难度,但包含椭圆空气孔的光纤早在2004年就被成功制造,ISSA N A 等^[31]展示一种克服光纤拉伸过程中表面张力、粘性应力、加热和压力效应作用的方法,解决了椭圆空气孔的塌陷敏感性。光子晶体光纤的填充包括选择性填充和完全填充,主要的选择性填充方法包括多次截断填充法、错位溶解填充法、飞秒激光辅助填充法、电弧放电填充法和直接选择填充法^[32-36]等。实现光子晶体光纤的选择性填充已有制造实例,2002年, KERBAGE C 等^[32]利用聚合物对光子晶体光纤进行选择性填充以获得高双折射特性,2004年, HUANG Yanyi 等^[37]利用多次截断法实现对光纤纤芯大孔的选择性填充。在进行本文所设计 Sagnac 型温度传感器的光纤制备时,首先可通过溶胶-凝胶法制备光纤及其空气孔,通过溶胶-

凝胶法合成柱形棒,然后利用叠加和拉伸工艺,将得到的柱形棒集成在 PCF 结构中,一种在光纤拉制过程中的孔变形技术可被用于制造具有均匀定向椭圆孔的 PCF^[29],最后利用四乙基硅酸盐制备多孔光纤。其次可通过直接选择填充法进行光纤选择性填充,这种填充方法能够实现对任意空气孔的填充,不受空气孔尺寸、位置的影响。因此,在现有技术条件及制备方法下,可以完成本文所设计 PCF 结构的制备和选择性填充。

4 结论

本文提供了一种基于光子晶体光纤的 Sagnac 型温度传感器设计方法,通过对传感器中光子晶体光纤的分析和优化,实现传感器性能的提升。利用有限元法研究了光纤的结构参数对双折射系数和双折射温度灵敏度的影响,分析了不同填充方式、填充液体类型对光纤温敏特性的影响。结果表明,在工作波长为 1 550 nm 时,光纤的双折射能够达到 5.96×10^{-2} ,温度灵敏度能够达到 $2.0507 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。由仿真结果可知,基于该光子晶体光纤的 Sagnac 型温度传感器在 0~75 $^{\circ}\text{C}$ 温度灵敏度范围为 6.62~15.94 nm/ $^{\circ}\text{C}$,利用二次多项式拟合方法对透射谱凹点波长和温度变化曲线进行拟合,该方式可使平均测温误差由 2.256 5 $^{\circ}\text{C}$ 降低到 0.126 9 $^{\circ}\text{C}$ 。且所使用光子晶体光纤长度较短,实用性强,有利于光纤温度传感器的小型化,同时提升其测量范围和灵敏度。

参考文献

- [1] YU Haihu, WANG Ying, MA Jian, et al. Fabry-perot interferometric high-temperature sensing up to 1 200 $^{\circ}\text{C}$ based on a silica glass photonic crystal fiber[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 273-281.
- [2] HOU Maoxiang, ZHU Feng, WANG Ying, et al. Antiresonant reflecting guidance mechanism in hollow-core fiber for gas pressure sensing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27890-27898.
- [3] MITANI S, NIGO K, KARASAWA S, et al. Interferometric fiber-optic gyroscope using multi-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(21): 5525-5530.
- [4] HOTATE K, HARUMOTO M. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(3): 466-473.
- [5] LIU Qiang, LI Shuguang, CHEN Hailiang. Enhanced sensitivity of temperature sensor by a PCF with a defect core based on Sagnac interferometer[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 254: 636-641.
- [6] ZHAO Jincheng, ZHAO Yong, BAI Lu, et al. Sagnac interferometer temperature sensor based on microstructured optical fiber filled with glycerin[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 314: 112245.
- [7] RABBI F, RAHMAN M T, KHALEQUE A, et al. Theoretical analysis of Sagnac interferometer based highly sensitive temperature sensor on photonic crystal fiber[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2021, 31: 100396.
- [8] QI Fei, XIN Yi, DONG Xinyong, et al. Sagnac interferometer based temperature sensor with alcohol-filled side-hole fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010601.
蔡菲, 辛奕, 董新永, 等. 基于乙醇灌注边孔光纤的 Sagnac 干涉型温度传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010601.
- [9] RUAN Juan, HU Lirui, LU Anshan, et al. Temperature sensor employed TCF-PMF fiber structure-based Sagnac interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(16): 1364-1366.
- [10] LIU Zhaolun, SUI Yanru, GUO Xiaojie, et al. A spiral photonic crystal fiber capable of transmitting orbital angular momentum[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(2): 347-352, 388.
刘兆伦, 隋艳茹, 郭晓洁, 等. 一种可传输轨道角动量的螺旋光子晶体光纤[J]. *半导体光电*, 2022, 43(2): 347-352, 388.
- [11] LV Liangliang, LIU Qiang, XUE Pingsheng. The sensing characteristics of microstructure-core photonic crystal fiber filled with liquid based on Sagnac interferometer[J]. *Results in Physics*, 2020, 18: 103198.
- [12] WANG Xu, HAO Xiangying, WU Shun. Simulation of highly sensitive temperature sensing based on a selectively ethanol-filled twin-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Communications*, 2022, 508: 127769.
- [13] CUI Ying, SHUM P P, HU D J J, et al. Temperature sensor by using selectively filled photonic crystal fiber Sagnac interferometer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1801-1808.
- [14] LI Xuegang, ZHAO Yong, ZHOU Xue, et al. High sensitivity all-fiber Sagnac interferometer temperature sensor using a selective ethanol-filled photonic crystal fiber[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2018, 46(3): 253-264.
- [15] WU Jianjun. The study of photonic crystal fiber sensor based on Sagnac interferometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017: 33-34.
吴剑军. 基于 Sagnac 干涉型光子晶体光纤传感器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 33-34.
- [16] LIU Lei, CHEN Hui, ZHANG Yanjun. Refractive index sensing simulation analysis of four-pole suspended core fiber

- based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Optical Sinica*, 2022, 42(8): 0806003.
刘磊, 陈辉, 张彦军. 基于表面等离子体共振的4杆悬浮芯光纤折射率传感仿真分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 0806003.
- [17] PANG M, XIAO Limin, JIN Wen, et al. Birefringence of hybrid PCF and its sensitivity to strain and temperature[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(10): 1422-1432.
- [18] MENG Fanlong, WANG Hong, FANG Di. Research on D-shape open-loop PCF temperature refractive index sensor based on SPR effect[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(3): 1-5.
- [19] WU Tiesheng, WANG Li, WANG Zhe, et al. A photonic crystal fiber temperature sensor based on Sagnac interferometer structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1114002.
伍铁生, 王丽, 王哲, 等. 一种Sagnac干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1114002.
- [20] XU Jiacheng, YU Fei, XU Bingsheng, et al. Research on influence of drawing tension and heat treatment on the birefringence of panda-type polarization-maintaining fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1106002.
徐嘉程, 于飞, 徐炳生, 等. 牵引张力和热处理对熊猫型保偏光纤双折射影响研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1106002.
- [21] HAN Tiantian, LIU Yange, WANG Zhi, et al. Control and design of fiber birefringence characteristics based on selective-filled hybrid photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15002-15016.
- [22] BOUFENAR R, BOUAMAR M, HOCINI A. Simulation and numerical analysis of highly birefringent photonic crystal fiber for temperature sensing application[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2017, 24: 47-52.
- [23] ZHOU Minghao. A novel highly birefringent PCF based on lattice structure of elliptic layer [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016: 35-41.
周铭皓. 椭圆高双折射光子晶体光纤的双折射及损耗研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016: 35-41.
- [24] LIU Qiang, LI Shuguang, SHI Min. Fiber Sagnac interferometer based on a liquid-filled photonic crystal fiber for temperature sensing[J]. *Optics Communications*, 2016, 381: 1-6.
- [25] LI Xuegang, ZHAO Yong, ZHOU Xue, et al. High sensitivity all-fiber Sagnac interferometer temperature sensor using a selective ethanol-filled photonic crystal fiber[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2018, 46(3): 253-264.
- [26] HOSSAIN M S, FAISAL M. Theoretical investigation of mid infrared temperature sensor based on Sagnac interferometer using chloroform filled photonic crystal fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(21): 24157-24165.
- [27] GHAZANFARI A, LI Wenbing, LEU M C, et al. A novel freeform extrusion fabrication process for producing solid ceramic components with uniform layered radiation drying[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 15: 102-112.
- [28] CUBILLAS A M, UNTERKOFER S, EUSER T G, et al. Photonic crystal fibers for chemical sensing and photochemistry[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(22): 8629-864.
- [29] EBENDORFF-HEIDPRIEM H, SCHUPPICH J, DOWLER A, et al. 3D-printed extrusion dies: a versatile approach to optical material processing[J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(8): 1494-1504.
- [30] EI HAMZA OUI H, OUERDANE Y, BIGOT L, et al. Sol-gel derived ionic copper-doped microstructured optical fiber: a potential selective ultraviolet radiation dosimeter[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29751-29760.
- [31] ISSA N A, VAN EIJKELBORG M A, FELLEW M, et al. Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(12): 1336-1338.
- [32] KERBAGE C, STEINVURZEL P, REYES P, et al. Highly tunable birefringent microstructured optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(10): 842-844.
- [33] QIAN Wenwen, ZHAO Chunliu, WANG Yunpeng, et al. Partially liquid-filled hollow-core photonic crystal fiber polarizer[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3296-3298.
- [34] WANG Yiping, TAN Xiaoling, JIN Wen, et al. Improved bending property of half-filled photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12197-12202.
- [35] XIAO Limin, JIN Wen, DEMOKAN M, et al. Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 9014-9022.
- [36] JU Jian, XUAN Haifeng, JIN Wen, et al. Selective opening of airholes in photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 3886-3888.
- [37] HUANG Yanyi, XU Yong, YARIV A. Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(22): 5182-5184.

Modelling Study of a High Sensitivity Sagnac Temperature Sensor Based on Photonic Crystal Fiber

ZHAO Lijuan^{1,2,3}, WU Yujing¹, XU Zhiniu¹, LIU Qi¹

(1 School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(2 Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(3 Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Optical fiber sensors are widely valued by scholars for their simplicity of manufacture, resistance to electromagnetic interference, chemical resistance and ease of distributed measurement. Interferometric fiber optic temperature sensors use the phase change of light to achieve sensing. Sagnac interferometer based temperature sensors are widely used in the sensing field due to their high sensitivity and ease of production. The change in the phase difference can lead to a shift in the interference spectrum, which can be analyzed as a function of temperature. It is an important research direction to design special fibers in Sagnac ring to improve the sensing performance of Sagnac-type temperature sensors. The flexible structural design and air-hole fill ability of photonic crystal fibers offer the possibility to achieve excellent properties of optical fibers. In order to improve the temperature range and sensitivity of Sagnac-type temperature sensors, a photonic crystal fiber design method with high birefringence and high temperature sensitivity properties is provided. The high birefringence of the fiber facilitates the demodulation of Sagnac-type temperature sensors and the high temperature sensitivity of the fiber facilitates the sensing sensitivity of Sagnac-type temperature sensors. As the optical fiber itself has limited sensitivity to temperature, it can be made to have good temperature sensitivity by filling the air holes of the fiber with temperature sensitive liquid material. The electromagnetic field model of this photonic crystal fiber is developed in COMSOL and the fiber properties are analyzed and calculated. The effect of structure parameters on the birefringence and the temperature sensitivity of the fiber is analyzed using the finite element method, and the effect of the filling method and the type of filling liquid on the temperature sensitivity of the fiber is investigated on the basis of the determined structure. The optimal structure and filling method are determined. The results show that selective filling can achieve higher temperature sensitivity than full filling, and ethanol is the most suitable filling fluid compared to other temperature sensitive liquids. Under optimal conditions, the fiber achieves a temperature sensitivity of $2.0507 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ and a birefringence of 5.96×10^{-2} at 1550 nm. The 2 mm length of this fiber is used in a Sagnac type temperature sensor to analyze the sensing characteristics by simulation, increasing in temperature from 0 °C to 75 °C in steps of 5 °C and using the trough of the transmission spectrum as a reference point to analyze the variation of the transmission spectrum with temperature. A polynomial fitting method is used to fit the wavelength and temperature in order to analyze the temperature sensitivity of the sensor, improve the accuracy of the fit and reduce the measurement error. The results show that the average sensitivity of the sensor can reach 11.28 nm/°C and the maximum sensitivity is 15.94 nm/°C in the range of 0~75 °C, with an average temperature measurement error of 0.126 °C. Compared to existing typical Sagnac temperature sensors, the Sagnac temperature sensor in this paper achieves a higher temperature sensitivity with a minimized fiber length, a larger temperature range and higher measurement accuracy. Therefore, the sensor has a promising application in the field of temperature measurement.

Key words: Photonic crystal fiber; Sagnac temperature sensor; Birefringence; Temperature sensitivity; Ethanol filling

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2400

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 62171185, 62273146), Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Nos. E2019502177, E2020502010), Science & Technology Program of Hebei (No. SZX2020034), Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (No. 2021MS072), 2022 Undergraduate Science and Technology Innovation Cultivation Project (No. 9101522005)