

基于布里渊动态光栅的横向压力传感器设计

赵丽娟^{1,2,3}, 尹丽星¹, 徐志钮^{1*}

1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 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, 河北 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, 河北 保定 071003)

摘要: 设计了一种新型多层次结构的光子晶体光纤, 其纤芯区域由大、小两种椭圆空气孔包围而成, 而所有空气孔是沿 y 轴堆叠排布且关于 x 轴对称的。利用有限元法对该光纤的二维模型进行数值分析, 在施加 0~40 MPa 的横向压力的情况下将温度的研究范围扩大到 -100~100 °C, 在低温高压力的情况下计算不同温度和压力下的双折射频移以研究其温度和压力传感特性。研究表明, 该光子晶体光纤的压力灵敏度可以达到 1.021 GHz/MPa, 其温度灵敏度为 0.554 3 MHz/°C, 与目前最优的具有“三明治”结构的光子晶体光纤设计的灵敏度为 692 MHz/MPa 的横向压力传感系统相比提高了 328 MHz/MPa, 适用于海底、土木等恶劣环境的高精度监测。

关键词: 光子晶体光纤; 布里渊动态光栅; 有限元法; 横向压力传感

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230137

0 引言

光纤不仅可以用于信号传输, 而且可以用于传感应用^[1]。光纤传感器具备灵敏度高、柔韧性好、可移植性强、耐腐蚀、抗电磁干扰等优良特性。光纤传感器根据传感原理可以分为光纤分布式传感器、光纤干涉仪传感器、光纤光栅传感器以及多种不同类型传感器协同智能化光纤传感系统^[2]。20 世纪 80 年代末提出了基于布里渊散射的分布式光纤传感技术, 因其在温度和应变测量方面的优势, 如高精度、大测量范围和高空间分辨率等^[3], 而被广泛应用于大坝、桥梁、公路和医疗等领域中^[4]。

但传统的分布式布里渊光纤传感仅能测量温度和应变, 测量精度不高, 并且存在交叉敏感等问题^[5-6]。基于布里渊动态光栅 (Brillouin Dynamic Grating, BDG) 的光纤传感于 2008 年由韩国学者 Song 等^[7]首次提出, BDG 能有效地将泵浦光、探测光及反射光分离, 提高测量精度、空间分辨率的同时实现温度与应变的

同时传感等。BDG 技术弥补了传统分布式布里渊光纤传感技术的不足, 自提出以来便受到人们的广泛关注。2016 年, Teng 等人^[8]首次利用细芯径保偏光子晶体光纤设计了灵敏度为 199 MHz/MPa 的流体静压强分布式传感系统。同年, Kim 等^[9]通过实验测量得保偏光子晶体光纤的压力灵敏度为 -245 MHz/MPa。2017 年, 董永康课题组引入保偏光纤的双折射频移, 与布里渊频移结合, 进行温度和应变同时解调, 实现温度和应变的同时测量^[10]。

环境温度和压力变化都会导致光纤双折射系数的变化, 而这又会改变基于 BDG 的双折射频移。传统保偏光纤利于激发受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 效应产生 BDG^[11], 但其双折射系数较低, 两个偏振方向的光信号易受干扰而耦合, 传感性能也因此受限, 不适用于如今长距离光纤传感的需求。光子晶体光纤作为一种特殊的保偏光纤, 不仅有利于 SBS 效应的激发, 还具有结构多样、低色散、高双折射和高非线性等特性。光子晶体光纤

收稿日期: 2023-03-13; 修订日期: 2023-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62171185, 62273146); 河北省自然科学基金项目 (E2020502010); 河北省省级科技计划项目 (SZX2020034)

作者简介: 赵丽娟, 女, 教授, 博士, 主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究。

通讯作者: 徐志钮, 男, 教授, 博士, 主要从事分布式光纤传感及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用方面的研究。

的结构对双折射系数的影响较大,可以通过设计空气孔的形状和排列实现力学、热学以及光学性能的优化。2015年, Dong 团队^[12]提出了一种分布式横向压力传感器并进行了实验验证,利用 BDG 技术测量椭圆芯保偏光纤中的双折射变化实现横向压力的测量,该传感器能够达到 $6.28 \text{ GHz/N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的灵敏度,其灵敏度较低;而 2021 年,文献^[13]设计出灵敏度为 692 MHz/MPa 的“三明治”结构光子晶体光纤,压力灵敏度相对较高,但测温范围较小。

为了提高压力灵敏度,文中设计了一种新型多层次结构的光子晶体光纤,其纤芯区域由大、小两种椭圆空气孔包围而成,而所有空气孔是沿 y 轴堆叠排布且关于 x 轴对称的。该光子晶体光纤基底材料为纯二氧化硅,没有掺杂任何应力材料。利用平面应变假设将三维模型简化为二维模型,通过有限元分析方法对其 BDG 传感特性进行了数值模拟,数值分析结果表明,在 $0\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 内测量压力范围为 $0\sim 40 \text{ MPa}$ 时, x 轴方向上的压力灵敏度约为 -1.004 GHz/MPa , y 轴方向上的压力灵敏度约为 1.021 GHz/MPa ;在 $0\sim 40 \text{ MPa}$ 内测量温度范围为 $-100\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,温度灵敏度约为 $0.5543 \text{ MHz/}^\circ\text{C}$ 。文献^[13]利用 1 m 具有“三明治”结构的光子晶体光纤设计的横向压力传感系统灵敏度为 692 MHz/MPa ,与其相比,灵敏度提高了 328 MHz/MPa ,适用于海底、土木等环境的监测。

1 布里渊动态光栅及光纤设计

1.1 布里渊动态光栅理论

BDG 可以看作是由 SBS 效应激发的声波对光纤介质进行调制,从而产生的沿着光纤轴向移动的折射率光栅。BDG 的激发过程如图 1 所示^[14]。具有相同偏振态的泵浦光 Pump1 (频率为 ν_{Pump1}) 和 Pump2 (频率为 ν_{Pump2}), ν_{Pump1} 与 ν_{Pump2} 之差满足布里渊频移条件下,从光纤两端同时注入,通过 SBS 效应激发出相干声波场,即形成 BDG^[15]。然后沿着光纤的 y 轴注入探测光 Probe (频率为 ν_{Probe}), ν_{Probe} 与 ν_{Pump2} 之差落在双折射频移 $\Delta\nu_{\text{Bire}}$ 附近。当 ν_{Pump1} 和 ν_{Pump2} 的差等于布里渊频移 ν_{B} 时,产生的 BDG 强度达到最大;当 ν_{Probe} 与 ν_{Pump2} 之差等于双折射频移 $\Delta\nu_{\text{Bire}}$ 时,得到最强的探测光 Probe 反射。故通过分析反射信号可以研

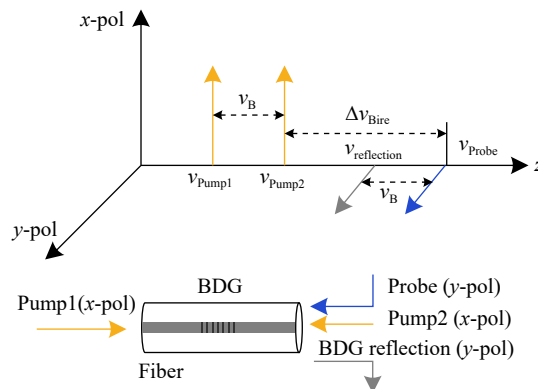


图 1 BDG 的激发过程

Fig.1 Excitation process of BDG

究 BDG 相关的特性。

双折射频移的计算公式为:

$$\Delta\nu_{\text{Bire}} = \frac{\Delta n}{n_{\text{eff}}^y} \nu_{\text{Pump2}} \quad (1)$$

式中: $\Delta n = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|$ 为双折射系数; n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别为 x 、 y 偏振态的有效折射率; $\nu_{\text{Pump2}} = c/\lambda$, c 为光速; λ 为 Pump2 的波长。通过优化光子晶体光纤结构可以提高 $\Delta\nu_{\text{Bire}}$ 对压力的灵敏度和减少对温度的灵敏度^[16]。

压力作用使传感光纤产生形变,这种形变是会引起弹光效应的弹性形变,而弹光效应使得光纤的双折射系数发生改变^[17]。环境温度变化时传感光纤也会产生形变,形变受到约束时会产生热应力,光纤的双折射系数同样也会发生变化。双折射系数变化进而导致双折射频移发生变化。温度和压力引起的双折射频移的变化量可以表示为

$$\Delta\nu_{\text{Bire}} = C_{\text{Bire}}^p \Delta P + C_{\text{Bire}}^T \Delta T \quad (2)$$

式中: C_{Bire}^T 为温度传感系数; C_{Bire}^p 为压力传感系数; ΔT 为温度变化量; ΔP 为压力变化量。若已知光纤传感系数,测量得到双折射频移变化量,结合公式(2)便可得光纤所处环境温度或者施加到光纤上压力的变化量,达到温度和压力传感的目的。

在弱探测光的条件下,假设 Pump1、Pump2、探测光 Probe 和反射光的波矢分别为 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 。BDG 反射率的表达式为:

$$R = \frac{\sinh^2(gL)}{\cosh^2(gL) - \Delta k^2 / (4K_1 K_2)} \quad (3)$$

式中: $g^2 = K_1 K_2 - (\Delta k)^2$, Δk 是相位失谐量,且满足 $\Delta k = (K_4 + K_3) - (K_1 + K_2)$; L 为光纤长度。

1.2 光纤设计

二氧化硅温度稳定性较高,其折射率随温度的变化很小。文中设计的光子晶体光纤由纯二氧化硅制成,则光纤产生的双折射效应主要为几何双折射而不是应力双折射,其折射率的分布由空气孔的大小、形状、排列和位置决定,得到的光子晶体光纤温度稳定性高^[18-19]。

在不同压力条件下光子晶体光纤的结构不同,由公式(1)可知,当压力对光纤双折射系数的影响越大,压力灵敏度就越高。图2为文中所设计的光子晶体光纤的结构,图2(a)为光子晶体光纤的三维结构,图2(b)为光子晶体光纤的横截面结构,其中横向排布的大空气孔可以进一步提高灵敏度,而密集排布的小空气孔可以更好地限制光能量聚集在纤芯处。

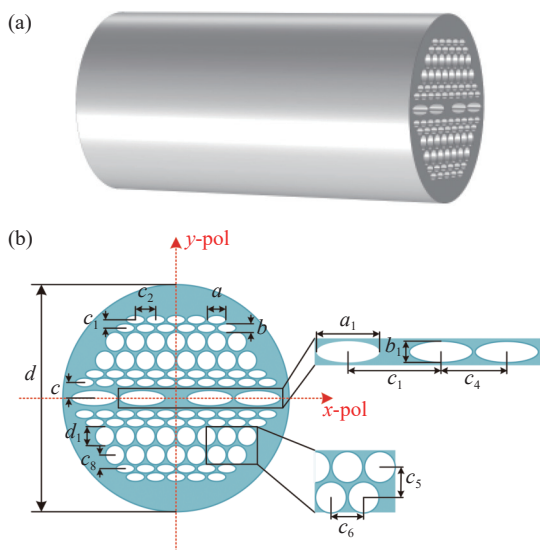


图2 (a) 光子晶体光纤三维示意图; (b) 光子晶体光纤横截面示意图
Fig.2 (a) Three-dimensional schematic of this photonic crystal fiber;
(b) Cross-section schematic of this photonic crystal fiber

光子晶体光纤的横截面呈多层次结构,纤芯区域由大、小两种椭圆空气孔包围,上下部分均是2层椭圆空气孔、2层圆形空气孔再2层椭圆空气孔依次沿y轴排列。通过一系列不同参数的仿真研究发现,当空气孔尽可能大的时候双折射频移的压力系数最大化、温度系数最小,而过大的空气孔将会导致光纤过薄降低实际应用价值且不利于加工,最终得到了一组最佳参数如下:光子晶体光纤直径d为10 μm,圆形空气孔直径d₁为0.8 μm,纤芯左右两侧的大椭圆空气孔

的长轴a₁与短轴b₁分别为2、0.6 μm,所有小椭圆空气孔的长轴a与短轴b分别为0.8、0.4 μm;小椭圆空气孔之间的纵向孔间距c₁和横向孔间距c₂分别为0.9、0.4 μm,纤芯左右两侧的大椭圆空气孔间距c₃为3 μm,纤芯同侧大椭圆空气孔之间的孔间距c₄为2.1 μm,圆形空气孔之间的纵向孔间距c₅和横向孔间距c₆分别为0.8、0.9 μm,小椭圆空气孔和大椭圆空气孔的孔间距c₇为0.7 μm,小椭圆空气孔和圆形空气孔的孔间距c₈为0.6 μm。虚箭头所指方向分别为光纤的y轴(y-pol)和x轴(x-pol)方向。

文中所设计的光子晶体光纤的空气孔为椭圆空气孔和圆形空气孔,排列对称且有规则。圆形空气孔的设计及制备都较为常见,尽管椭圆空气孔的制备有一定难度,但早在2004年Issa N A等^[20]成功制作了包含椭圆空气孔的光子晶体光纤。文中所设计的光子晶体光纤可以通过Hamzaoui H E等^[21]在2012年提出的“溶胶-凝胶”方法制造。该方法首先通过溶胶-凝胶路线合成圆柱形棒,然后利用叠加和拉伸工艺,将得到的棒集成在二氧化硅光子晶体光纤结构中,再利用四乙基硅酸盐制备多孔光纤。

2 传感器建模

利用有限元法对光子晶体光纤进行数值模拟。按照图2中的光纤结构构建光子晶体光纤的几何模型,设置光纤长度为1 m,然后基于波动光学模块与固体力学模块进行仿真。为了提高仿真结果的可靠性,在光纤外部添加一层完美匹配层(PML)用于模拟边界吸收条件,降低了材料折射率的误差,并采用超细化的精确度进行网格划分。

椭圆形空气孔的引入破坏了光子晶体光纤原本的对称结构,使其在x轴与y轴方向上的结构呈现差异,从而产生双折射效应 $\Delta n = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|$,其中n_{eff}^x为x偏振态的有效折射率,n_{eff}^y为y偏振态的有效折射率。基模的电场分布如图3所示,可知x偏振轴和y偏振轴的电场分布不同,一个呈矩形分布,一个呈圆形分布。这两个电场分布的不同使得该光子晶体光纤产生高双折射系数。在传感器特性分析部分,考虑了如图4所示的两种情况,即沿光纤的x轴和y轴方向施加压力。

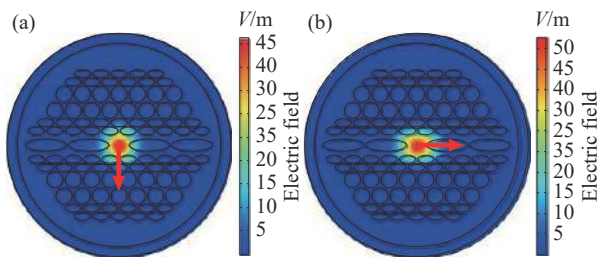


图 3 (a) y 偏振轴电场分布; (b) x 偏振轴电场分布

Fig.3 (a) Electric field distribution in the y polarization axis; (b) Electric field distribution in the x polarization axis

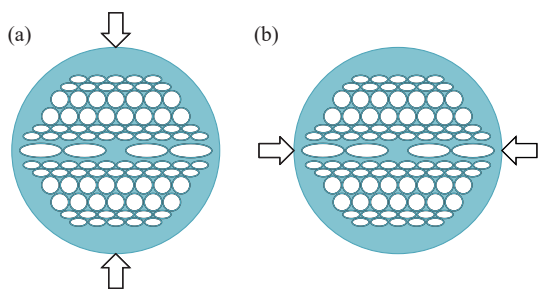


图 4 (a) 沿 y 轴施加压力; (b) 沿 x 轴施加压力

Fig.4 (a) Pressure applied along the y-axis; (b) Pressure applied along the x-axis

3 传感器特性分析

3.1 压力传感特性

建立好光纤模型之后, 利用固体力学模块模拟 0 °C、20 °C、40 °C、60 °C、80 °C 和 100 °C 工作温度, 按图 4 所示向光纤施加压力后进行计算, 如图 5 所示为在 1 MPa 压力下光纤横截面的变化。

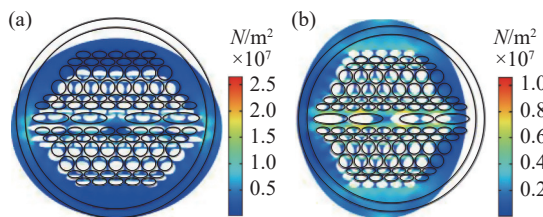


图 5 (a) 沿光纤 y 轴施力时的横截面变化; (b) 沿光纤 x 轴施力时的横截面变化

Fig.5 (a) Cross-sectional variation when force is applied along the y-axis of this fiber; (b) Cross-sectional variation when force is applied along the x-axis of this fiber

光子晶体光纤受到压力发生形变导致光纤的双折射系数发生改变。当体积参考温度 $T_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 工作温度 $T_1=0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光纤不施加压力时, n_{eff}^x 、 n_{eff}^y 分别为

1.294 891 935 063 30 和 1.276 288 805 901 13, 得 $\Delta n=|n_{\text{eff}}^x-n_{\text{eff}}^y|$ 为 0.018 603 129 162 170。进一步得到外界温度 $T_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 沿 x 轴施加压力和沿 y 轴施加压力时双折射系数随压力变化曲线, 即图 6~7。由图 6 可以看出, 沿光纤 x 轴施加压力时, 双折射系数随压力的增大而线性减小; 由图 7 可以看出, 沿光纤 y 轴施加压力时, 双折射系数随压力的增大而线性增大。其原因是压力改变了光纤横截面进而改变双折射系数。

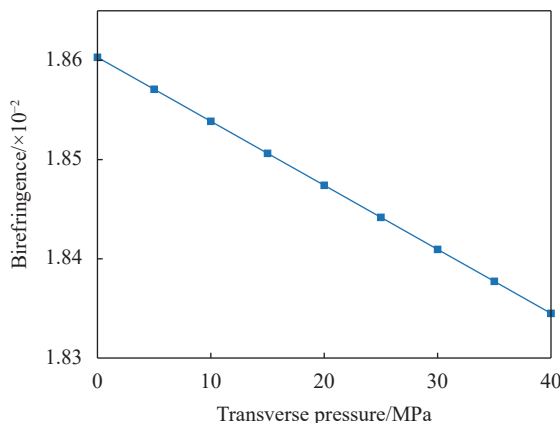


图 6 沿 x 轴施加压力时, 双折射系数随压力变化情况

Fig.6 Variation of birefringence with pressure when pressure is applied along the x-axis of this fiber

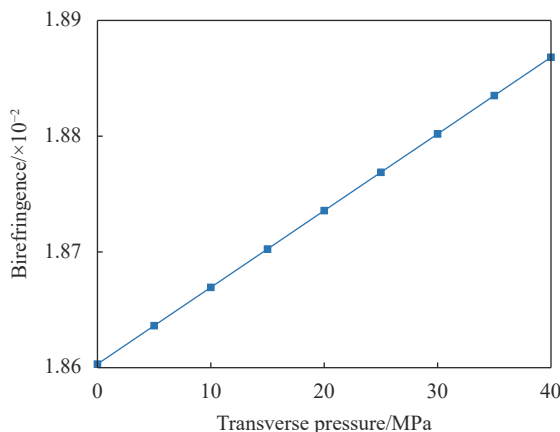


图 7 沿 y 轴施加压力时, 双折射系数随压力变化情况

Fig.7 Variation of birefringence with pressure when pressure is applied along the y-axis of this fiber

结合得到的双折射系数, 计算公式 (1) 便可以确定双折射频移。当体积参考温度 $T_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 工作温度 $T_1=0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光纤不施加压力时, 双折射系数 Δn 为

0.018 603 129 162 170, λ 为 1 550 nm, 计算可得双折射频移为 2 821 152 726 281.84 Hz。工作温度为 20 °C 时, 沿 x 轴施加压力和沿 y 轴施加压力时双折射频移变化情况分别如图 8、9 所示。

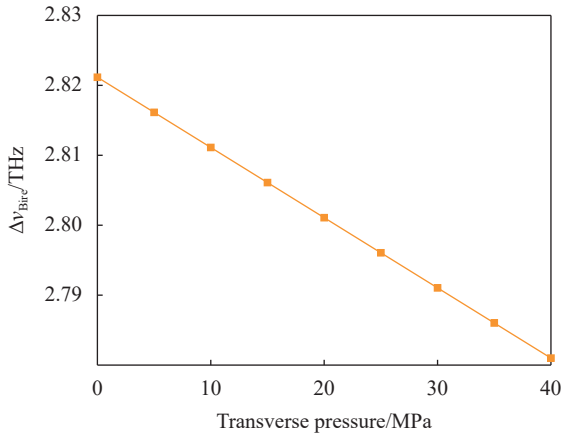


图 8 沿 x 轴施加压力时双折射频移变化情况

Fig.8 Variation of birefringence frequency shift when pressure is applied along the x -axis of this fiber

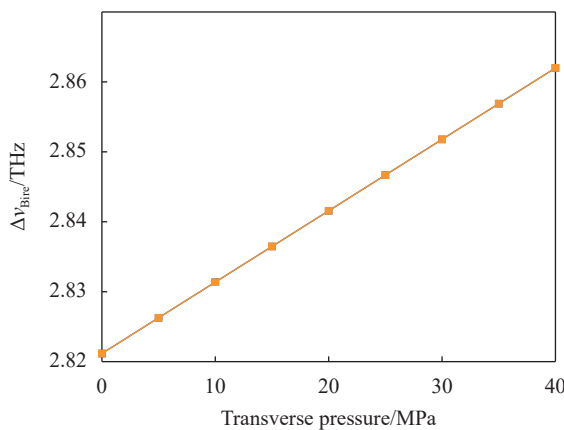


图 9 沿 y 轴施加压力时双折射频移变化情况

Fig.9 Variation of birefringence frequency shift when pressure is applied along the y -axis of this fiber

由图 8 可知, 当工作温度固定时, 双折射频移与沿光纤 x 轴施加压力呈线性关系, x 轴施加压力每增大 10 MPa, 双折射频移减小 10.04 GHz。经线性拟合, 当温度为 20 °C 时, 双折射频移随 x 轴施加压力变化的灵敏度为 -1.004 GHz/MPa。一般通过 BDG 反射谱测量的双折射频移误差大约为 5 MHz^[22], 因此光纤 x 轴方向压力传感测量精度可达 0.005 MPa。从图 9 可以看到, 工作温度固定时, 双折射频移与沿光纤

y 轴施加压力同样呈线性关系, y 轴施加压力每增大 10 MPa, 双折射频移增大 10.21 GHz。经线性拟合, 当温度为 20 °C 时, 双折射频移随 y 轴施加压力变化的灵敏度为 1.021 GHz/MPa。经计算, 光纤 y 轴方向压力传感测量精度可达 0.004 9 MPa。相比于普通保偏光子晶体光纤^[12]提高了 822 MHz/MPa, 与文献 [13] “三明治”结构的光子晶体光纤相比, 灵敏度提高了 328 MHz/MPa。

由公式 (3) 计算可得 20 °C 时的 BDG 反射谱, 即图 10、11。BDG 反射谱的中心频率即为公式 (1) 中的双折射频移。图 10 为 20 °C 时, 沿 x 轴施加压力时 BDG 反射谱变化情况, 可知随着施加压力的增大, BDG 反射谱逐渐左移, 即双折射频移逐渐减小, 这与图 8 中的双折射频移变化情况一致。图 11 为 20 °C 时沿 y 轴施加压力时 BDG 反射谱变化情况, 可知随着施加压力的增大, BDG 反射谱逐渐右移, 即双折射频移逐

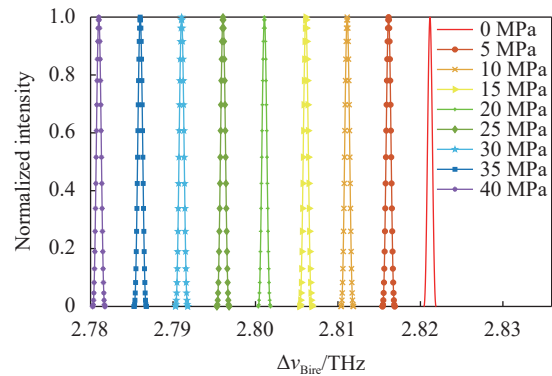


图 10 沿 x 轴施加压力时 BDG 变化情况

Fig.10 Variation of BDG when pressure is applied along the x -axis

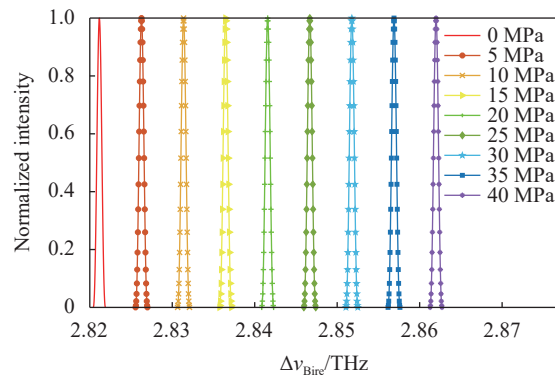


图 11 沿 y 轴施加压力时 BDG 反射谱变化情况

Fig.11 Variation of BDG when pressure is applied along the y -axis

渐增大,这与图 9 中的双折射频移变化情况一致。

3.2 温度传感特性

温度传感特性分析与压力传感特性分析过程类似。改变光纤模型的工作温度,以 10 °C 为步长,从 -100 °C 逐渐增加到 100 °C,设置体积参考温度为 0 °C。对该光纤施加 0 MPa 压力时,不同温度下双折射系数变化曲线如图 12 所示。外界温度升高,光纤双折射系数随之增大,但变化量较小。

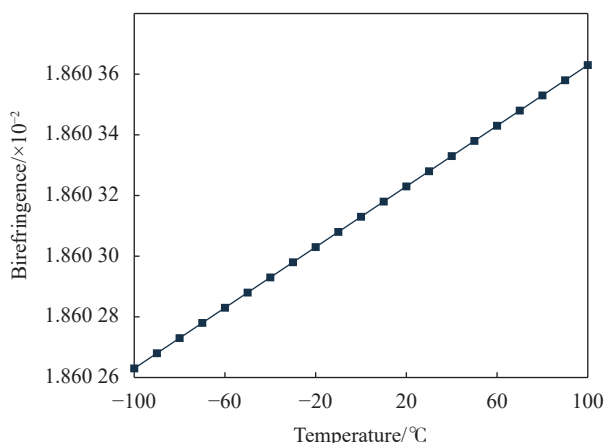


图 12 光纤双折射系数随温度变化情况

Fig.12 Variation of fiber birefringence coefficient with temperature

除了光纤施加 0 MPa 压力的情况,还分别对光纤 x 轴和 y 轴方向施加 10、20、30、40 MPa 压力的情况进行了研究,得到双折射频移随温度变化曲线和不同

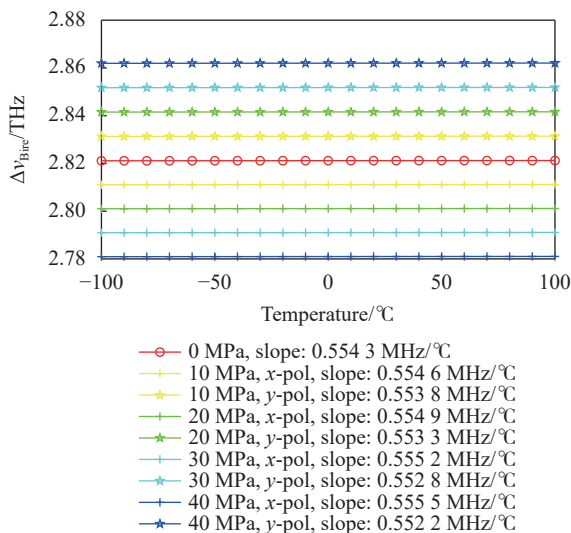


图 13 不同压力下双折射频移随温度变化情况

Fig.13 Variation of birefringence frequency shift with temperature at different pressures

温度下 BDG 频移变化图分别如图 13、14 所示。由图 13 可见,当压力固定时,双折射频移与温度保持良好的线性关系。图 14 为 0 MPa 时,不同温度下的 BDG 反射谱变化情况,当环境温度越升越高,BDG 反射谱慢慢从左向右移,即双折射频移逐渐增大,这与图 13 中的双折射频移变化情况一致。

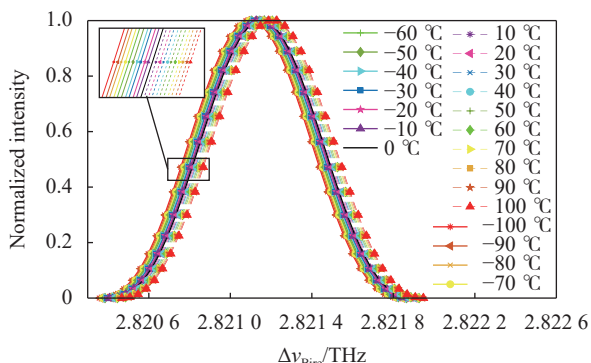


图 14 不同温度下 BDG 频移变化情况

Fig.14 Variation of BDG frequency shift at different temperatures

对图 13 中的曲线拟合得到光纤施加不同压力时双折射频移随温度变化的灵敏度。光纤施加 0 MPa 压力时,双折射频移随温度变化的灵敏度仅为 0.554 3 MHz/°C,并且在较大的压力变化范围内拟合所得该光纤的温度灵敏度变化都较小,其温度传感特性稳定。温度每变化 184.2 °C (光纤不受力)引起的双折射频移变化仅相当于 0.1 MPa 压力引起的双折射频移变化,因此,该光子晶体光纤具有温度不敏感的特性,可忽略温度带来的误差,避免了温度补偿单元。

3.3 横向压力方向灵敏度分析

光子晶体光纤对于施力方向也较为敏感。除了光纤的 x 轴和 y 轴方向,还对光纤的其他方向上的压力传感特性进行了研究。设置体积参考温度为 0 °C,设置光纤模型的工作温度为 0 °C,改变施力方向(施力方向与 x 轴正方向所成夹角 $\theta=0^\circ、10^\circ、20^\circ、30^\circ、40^\circ、45^\circ、50^\circ、60^\circ、70^\circ、80^\circ$ 和 90°)。图 15 所示为施力角度示意图。

施加大小一样的压力时,不同压力方向对光纤双折射频移的影响反映在图 16 中。当施力角度 $\theta \leq 45^\circ$ 时,其压力灵敏度为负数;当施力角度 $\theta > 45^\circ$ 时,其压力灵敏度为正数。

压力灵敏度随施力角度变化情况如图 17 所示,

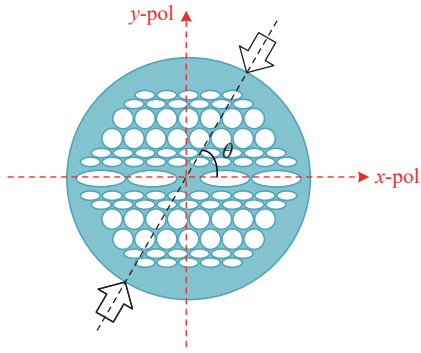


图 15 施力角度示意图

Fig.15 Schematic diagram of force application angle

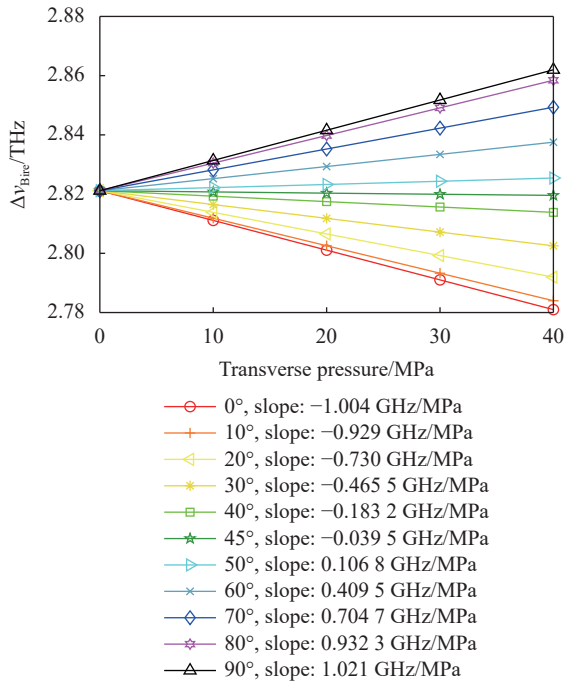


图 16 双折射频移随施力角度变化情况

Fig.16 Variation of birefringence frequency shift with the angle of force application

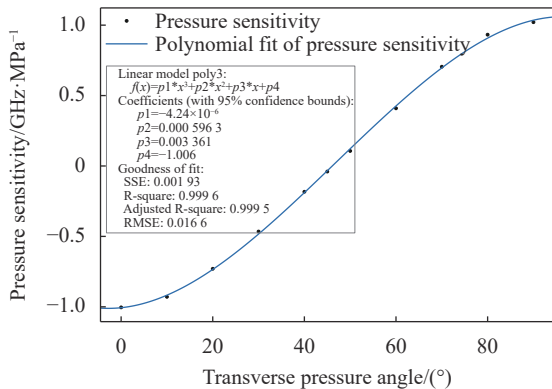


图 17 压力灵敏度随施力角度变化以及拟合曲线

Fig.17 Variation of pressure sensitivity with angle of application and fitted curves

插图中一并给出了多项式拟合结果,该拟合的校正 R-square 为 0.9996,表明其具有较好的拟合一致性。施力角度每变化 10°,文中所设计的光子晶体光纤的压力灵敏度变化量 ≥ 75 MHz/MPa,对于施力角度较敏感,并且文中设计的光纤能保持对压力的高灵敏度。假若压力值大致已知,通过实际情况中压力灵敏度结合角度与压力灵敏度的关系,通过插值即可确定压力的角度。

4 结 论

文中提出一种具有多层次结构的新型光子晶体光纤,材料选用纯二氧化硅,其纤芯区域由大、小两种椭圆空气孔包围而成,而所有空气孔是沿 y 轴堆叠排布且关于 x 轴对称的。利用有限元法对该光纤的二维模型进行数值分析,在低温高压力的情况下研究其温度和压力传感特性。结论如下:在 0~100 °C 内测量压力范围为 0~40 MPa 时,x 轴方向上的压力灵敏度约为 -1.004 GHz/MPa,y 轴方向上的压力灵敏度约为 1.021 GHz/MPa;在 0~40 MPa 内测量温度范围为 -100~100 °C 时,温度灵敏度约为 0.554 3 MHz/°C,具有温度不敏感特性。文中提出的新型光子晶体光纤适用于海底、土木等高温高压环境下的高灵敏度监测。

参考文献:

- [1] Zhou Dengwang. High speed and high spatial resolution distributed Brillouin optical fiber sensing technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [2] Teng Lei. Distributed hydrostatic pressure and salinity measurement technology based on optical fiber Brillouin dynamic grating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] Zhu Jing, Tu Xiaobo, Yao Qiong, et al. Brillouin dynamic grating and its applications in distributed sensing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 62-68. (in Chinese)
- [4] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. A technique to measure distributed strain in optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, 2(5): 352-354.
- [5] Zhang Zhijuan, Chen Feifei, Xu Zhiniu, et al. Research status and development trends of Brillouin dynamic grating in distributed optical fiber sensing [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 39(4): 455-461. (in Chinese)
- [6] Dong Y K. High-performance distributed Brillouin optical fiber

- sensing [J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 69-90.
- [7] Song K Y, Zou W, He Z, et al. All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(9): 926-930.
- [8] Teng L, Zhang H Y, Dong Y K, et al. Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4413-4416.
- [9] Kim Y H, Kwon H, Kim J, et al. Distributed measurement of hydrostatic pressure based on Brillouin dynamic grating in polarization maintaining fibers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21399-21406.
- [10] Zhang H Y, Yuan Z J, Liu Z Y, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using a polarization-maintaining photonic crystal fiber with stimulated Brillouin scattering [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(1): 012501.
- [11] Wu Xingliang, Song Yingying, Zhang Xiaocheng, et al. Review of Brillouin dynamic grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0700004. (in Chinese)
- [12] Dong Y K, Teng L, Tong P, et al. High-sensitivity distributed transverse load sensor with an elliptical-core fiber based on Brillouin dynamic gratings [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5003-5006.
- [13] Zhao Lijuan, Liang Ruoyu, Xu Zhiniu. Brillouin dynamic grating sensor based on novel photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0706001. (in Chinese)
- [14] Jiang T F, Zhou D W, Xia M, et al. Distributed birefringence measurement of a polarization-maintaining fiber with an extended range based on an enhanced Brillouin dynamic grating [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 7102607.
- [15] Lai Junchi, Hou Shanglin, Lei Jingli, et al. Characteristics of reflection spectrum of Brillouin dynamic grating in single mode fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0706005. (in Chinese)
- [16] Zhao Ruiyue. Study of high resolution distributed optical fiber sensing based on Brillouin scattering[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] Hu Xuemeng. Research on key technologies of distributed optical fiber transverse load sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] Li Xiaoyan. Investigation of high birefringence photonic crystal fibers[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)
- [19] Huo Wenhui. Dual-parameter sensing and performance analysis based on polarization-maintaining photonic crystal fiber Bragg grating[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [20] Issa N A, Eijkelenborg M, Fellow M, et al. Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(12): 1336-1338.
- [21] Hamzaoui H E, 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.
- [22] Dong Yongkang, Zhou Dengwang, Teng Lei, et al. Principle of Brillouin dynamic grating and its applications in optical fiber sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 237-249. (in Chinese)

Design of transverse pressure sensor based on Brillouin dynamic grating

Zhao Lijuan^{1,2,3}, Yin Lixing¹, Xu Zhiniu^{1*}

(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:

Objective Brillouin dynamic grating (BDG) based fiber optic sensing was first proposed in 2008. BDG can effectively separate the pump light, detection light and reflected light to improve the measurement accuracy and spatial resolution while achieving simultaneous sensing of temperature and strain, etc. Both ambient temperature

and pressure changes can lead to changes in the birefringence coefficient of the fiber, which in turn can change the birefringence frequency shift of BDG. Therefore, temperature and pressure sensing can be achieved based on the birefringence frequency shift of BDG. The structure of the photonic crystal fiber has a large impact on the birefringence coefficient. And its mechanics, thermal, and optical properties can be optimized by designing the shape and arrangement of the air holes. The existing distributed transverse pressure sensors have problems such as low sensitivity and small temperature measurement range. Therefore, a new multilevel structure of photonic crystal fiber is designed in this paper.

Methods The core area of the designed new multilevel structure photonic crystal fiber is surrounded by two types of elliptical air holes, and all air holes are stacked along the y -axis and symmetric about the x -axis (Fig.2). The geometric model of the photonic crystal fiber is constructed according to the fiber structure, and the fiber length is set to 1 m. Then, the two-dimensional model of the fiber is numerically analyzed by the finite element method, and the temperature study range is extended to -100 - 100 °C with the applied transverse pressure of 0-40 MPa. The birefringence frequency shift at different temperatures and pressures is calculated at low temperatures and high pressures to study its temperature and pressure sensing characteristics. To improve the reliability of the results, we added a perfect matching layer (PML) outside the fiber for simulating the boundary absorption conditions, and then used extra fine accuracy for meshing. Finally, the model is solved.

Results and Discussions The results show that in the temperature range of 0-100 °C and pressure range of 0-40 MPa, the pressure sensitivity in the x -axis direction of the photonic crystal fiber is about -1.004 GHz/MPa, and the pressure sensitivity in the y -axis direction of the photonic crystal fiber is about 1.021 GHz/MPa. The temperature sensitivity is about 0.5543 MHz/°C when the applied temperature ranges from -100 °C to 100 °C and applied pressure ranges from 0 MPa to 40 MPa, and it has temperature insensitive characteristics. For every 10° change in force application angle, the change in pressure sensitivity is greater than or equal to 75 MHz/MPa, which is sensitive to the force application angle.

Conclusions A new type of photonic crystal fiber with multilevel structure is proposed, which is made of pure silica, and the core area is surrounded by two types of elliptical air holes, all of which are stacked along the y -axis and symmetric about the x -axis. The two-dimensional model of the fiber is numerically analyzed using the finite element method to study its temperature and pressure sensing characteristics at low temperatures and high pressures. It is concluded that the pressure sensitivity in the x -axis direction of the photonic crystal fiber is about -1.004 GHz/MPa, and the pressure sensitivity in the y -axis direction of the photonic crystal fiber is about 1.021 GHz/MPa for pressures ranging from 0 MPa to 40 MPa and temperature ranging from 0 °C to 100 °C. The temperature sensitivity is about 0.5543 MHz/°C when the applied temperature ranges from -100 °C to 100 °C and applied pressure ranges from 0 MPa to 40 MPa, and it has temperature insensitive characteristics. The new photonic crystal fiber proposed in this paper is suitable for high-sensitivity monitoring in high-temperature and high-pressure environments such as subsea and civil engineering.

Key words: photonic crystal fiber; Brillouin dynamic grating; finite element method; transverse pressure sensing

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62171185, 62273146); Hebei Provincial Natural Science Foundation Grant (E2020502010); Hebei Provincial Science and Technology Program Grant (SZX2020034)