

一种新型光子晶体光纤的布里渊动态光栅传感

赵丽娟^{1,2,3}, 梁若愚¹, 徐志钮^{1*}¹华北电力大学电子与通信工程系, 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 为了提高光纤横向压强传感器传感系数,降低温度对压强传感的影响,提出一种具有“三明治”结构的光子晶体光纤,并利用有限元法对其布里渊动态光栅传感特性进行数值模拟。研究了不同压强和温度条件下光子晶体光纤双折射频移的变化,分析了光子晶体光纤结构对其传感特性的影响,结果表明:设计的光子晶体光纤具有高传感精度,0~40 °C下光子晶体光纤慢轴方向上双折射频移的压强传感系数约为 692 MHz/MPa,光纤快轴方向上压强传感系数约为-404 MHz/MPa,0~40 MPa下温度系数仅为 0.18 MHz/°C;与利用普通保偏光子晶体光纤设计的传感系数为 199 MHz/MPa的压强传感系统相比,灵敏度提高了 493 MHz/MPa。设计的光子晶体光纤提高了横向压强传感器传感系数且不易受温度的影响,适用于高精度静水压强传感领域。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 布里渊动态光栅; 光纤传感; 横向压强传感

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0706001

Brillouin Dynamic Grating Sensor Based on Novel Photonic Crystal Fiber

Zhao Lijuan^{1,2,3}, Liang Ruoyu¹, Xu Zhiniu^{1*}

¹Department of Electronic & Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China;

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

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

Abstract In this paper, we proposed a photonic crystal fiber (PCF) with a sandwiched structure to improve the sensitivity of the transverse pressure sensors and decrease the interference caused by temperature. In addition, we used a finite element method (FEM) to simulate the sensing characteristics of its Brillouin dynamic grating. Furthermore, we investigated the birefringence-induced frequency shift of the proposed PCF at different pressures and temperatures and analyzed the influence of the PCF structure on its sensing characteristics. The results show that the designed PCF has high sensing precision. At 0~40 °C, the pressure sensitivity on the slow and fast axes was about 692 MHz/MPa and -404 MHz/MPa, respectively; the temperature sensitivity was only 0.18 MHz/°C at 0~40 MPa. In comparison with the pressure sensing system designed with a conventional polarization-maintaining PCF, with a sensitivity of 199 MHz/MPa, the sensitivity of our PCF was increased by 493 MHz/MPa. In conclusion, the PCF proposed in this work improves the sensitivity of the transverse pressure sensors and eliminates the interference of temperature, having potential applications in high-precision transverse pressure sensing.

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-09-29; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(51607066, 61775057)、河北省自然科学基金资助项目(E2019502177)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019MS085)

* E-mail: wcnjxx@sohu.com

Key words fiber optics; photonic crystal fibers; Brillouin dynamic grating; optical fiber sensors; transverse pressure sensing

OCIS codes 060.5295; 060.2370; 060.2420; 290.5830

1 引言

分布式光纤传感技术^[1-2]是采用独特的分布式光纤探测技术,对沿光纤传输路径随空间和时间变化的信息进行测量或监控的传感技术。目前,光纤分布式传感技术主要围绕拉曼散射、瑞利散射和布里渊散射三种技术进行研究,其中布里渊散射技术受到广泛关注。分布式布里渊传感技术的提出最初是为了发展一种新型的光时域反射计用于光纤损耗的测量^[3-4],随后研究者发现布里渊散射对温度和应变都很敏感^[5],于是将此种技术应用于传感方面,结果发现其在天然气管道的变形监测、海底电缆的温度与应变监测等方面发挥了重要的作用^[6-8]。

由于传统的分布式布里渊光纤传感技术在温度与应变的测量精度方面有一定的局限性,2008年,Song等^[9]提出了一种基于布里渊动态光栅(BDG)的光纤分布式传感技术,因外界的温度和压力变化都会导致光纤双折射系数的变化,进而导致布里渊动态光栅双折射频移发生变化,故通过测量保偏光纤中双折射频移的变化实现对温度和压力的监测,此种技术的测量精度与空间分辨率有明显提高,打破了传统传感技术的限制。2010年,Dong等^[10]利用熊猫型保偏光纤基于布里渊动态光栅技术实现对外界温度和应变的传感,得到了一54.38 MHz/°C的温度系数以及1.13 MHz/ $\mu\epsilon$ 的应变系数。2015年,该团队用椭圆芯保偏光纤基于布里渊动态光栅技术设计了分布式横向压力传感器^[11],此传感器沿快轴方向的压力灵敏度为一6.217 GHz/(N·mm⁻¹),沿慢轴方向的压力灵敏度为6.28 GHz/(N·mm⁻¹)。2016年,Kim等^[12]设计的基于BDG的分布式静水压强传感器的传感系数达到了123 MHz/MPa。

然而传统保偏光纤的双折射系数较低,细微的外界干扰便会导致两个偏振方向的光信号发生耦合,传感性能会因此受到限制而难以进一步提高,不适用于如今长距离光纤传感的需求。光子晶体光纤^[13-15]具有灵活的可设计性,其空气孔的形状和排列方式对双折射系数的影响较大,因此,高双折射光子晶体光纤对压强及应变具有较高的敏感性。

为了克服传统保偏光纤在布里渊动态光栅压强

传感方面传感灵敏度不足以及因双折射系数较低而易受外界干扰的缺点,本文提出了一种适用于压强传感的具有“三明治”结构的光子晶体光纤。在不同压强条件下,此新型光子晶体光纤空气孔的形状以及孔间距的改变对光纤双折射系数和双折射频移的影响较大,因此可以提高双折射频移的压强传感系数。利用有限元分析方法对其布里渊动态光栅传感特性进行了数值模拟,数值分析结果表明,在0~40 °C下,慢轴方向上双折射频移的压强系数约为692 MHz/MPa,快轴方向上约为一404 MHz/MPa,0~40 MPa下温度系数约为0.18 MHz/°C。与2016年Teng等^[16]利用15 cm的普通保偏光子晶体光纤设计的传感系数为199 MHz/MPa的压强传感系统相比,灵敏度约提高了493 MHz/MPa,适用于高精度光纤静水压强传感领域。

2 光纤模型与理论分析

2.1 光纤设计

在不同压强条件下光子晶体光纤的结构不同,压强对光纤双折射系数的影响越大,其双折射频移变化越大,压强传感灵敏度就越高。考虑该因素,同时考虑制造难度,设计的光子晶体光纤二维横截面结构如图1所示。

如图1所示,光子晶体光纤横截面呈“三明治”结构,光纤半径为 r ,中心一层为直径为 d 的圆形空气孔,其余均为大小相等的椭圆空气孔;椭圆空气孔的短轴与长轴分别用 a 和 b 表示;椭圆空气孔之间的孔间距为 Λ_1 ,圆形空气孔之间的孔间距为 Λ_2 ,纤芯两端的圆形空气孔间距为 $2\Lambda_1$ 。虚箭头所指方向分别为光纤的快轴(y -pol)和慢轴(x -pol)方向。为使布里渊动态光栅双折射频移的压强系数最大化、温度系数最小化,同时考虑可加工性,通过不断调整结构进行

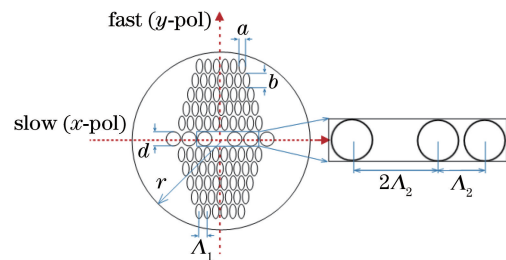


图1 光纤横截面示意图

Fig. 1 Cross section of the proposed photonic crystal fiber

仿真分析,最终确定的光纤结构参数如表 1 所示。

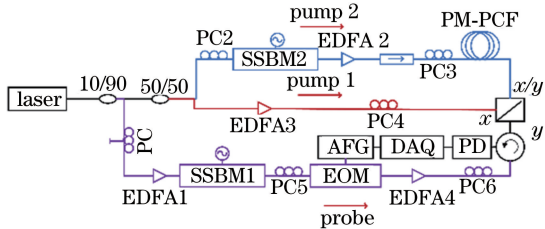
表 1 光纤参数

Table 1 Parameters of fiber structure unit: μm

r	d	a	b	Δ_1	Δ_2
5	0.8	0.4	0.8	0.5	0.9

2.2 布里渊动态光栅的理论分析

布里渊动态光栅通常是在高双折射保偏光纤中进行产生与读取,其产生与读取原理如图 2 所示^[17]。



PC: polarization controller; SSBM: single sideband modulator; EOM: electrooptic modulator; PD: photoelectric detector; DAQ: data acquisition; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; FBG: fibre Bragg grating; AFG: analogue function generator; PM-PCF: polarization maintaining photonic crystal fiber

图 2 BDG 产生与读取原理图

Fig. 2 Schematic diagram of BDG generation and reading

激光器输出的光经过 90:10 耦合器分为两路,耦合器上臂分出的光又被 50:50 的耦合器分为上路和下路两部分,上路光经过单边带调制(SSBM)与下路光相差一个保偏光子晶体光纤(PM-PCF)的布里渊频移。此光与下路光一起被掺铒光纤放大器(EDFA)放大,作为泵浦光(Pump)对向注入到保偏光纤的一个主轴内,由于两束光的频差满足光纤的布里渊频移,故两束光会在光纤中发生受激布里渊散射,产生声波场,此声波场便是布里渊动态光栅(BDG)。从 90:10 耦合器下臂发出的光作为探测光(Probe),此光先经过微波源控制的电光调制器(EOM),之后被调制成脉冲光注入到光纤的另一个主轴中去探测之前产生的声波场。当探测光和泵浦 1 之间的频差满足光纤双折射频移时,可获得最大的光反射。

泵浦光与探测光之间的频率关系如图 3^[18]所示,图中 ν 为泵浦光频率, ν_B 为布里渊频移, ν_{Bire} 为双折射频移。双折射频移的计算公式为

$$\nu_{\text{Bire}} = \frac{\Delta n}{n_g} \nu, \quad (1)$$

其中 Δn 为双折射系数, n_g 为群折射率。本文的目的是提高 $\Delta\nu_{\text{Bire}}$ 对压强的灵敏度,减少对温度的灵敏度,这通过优化光子晶体光纤结构即可实现。

温度和压强引起的双折射频移的变化可以表

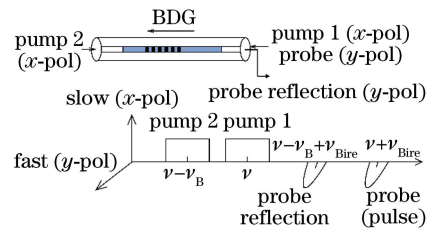


图 3 四波之间频率关系

Fig. 3 Frequency relation of the four waves

示为

$$\nu_{\text{Bire}}(P, T) = \nu_{\text{Bire}}(P_0, T_0) + C_{\text{Bire}}^P \Delta P + C_{\text{Bire}}^T \Delta T, \quad (2)$$

式中: $\nu_{\text{Bire}}(P, T)$ 是当前压强和温度条件下的双折射频移; $\nu_{\text{Bire}}(P_0, T_0)$ 是初始压强和温度条件下的双折射频移; C_{Bire}^T 和 C_{Bire}^P 分别为温度和压强系数; ΔT 是温度的改变量; ΔP 是压强的改变量。传感过程中,在双折射频移的变化量和传感系数已知的情况下,利用(2)式可以得到温度或者压强的变化量,从而实现温度和压强的传感。

在弱探测光的条件下,假设泵浦光 1、泵浦光 2、探测光和反射光的波矢分别为 \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 、 \mathbf{K}_3 、 \mathbf{K}_4 。布里渊动态光栅反射率的表达式为

$$R = \frac{\sinh^2(gL)}{\cosh^2(gL) - \Delta k^2 / (4\mathbf{K}_1\mathbf{K}_2)}, \quad (3)$$

式中: $g^2 = \mathbf{K}_1\mathbf{K}_2 - (\Delta k^2)/4$, 其中 Δk 是相位失谐量,且满足 $\Delta k = (\mathbf{K}_4 + \mathbf{K}_3) - (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2)$; L 为光纤长度^[17]。

3 仿真结果

3.1 压强和温度对双折射系数的影响

基于 COMSOL5.4 利用有限元(FEM)方法对光子晶体光纤进行数值模拟。基于波动光学模块与固体力学模块进行仿真,并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。光子晶体光纤包含了椭圆结构,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。光子晶体光纤两个偏振方向上的电场分布如图 4 所示。

从图 4 可以看出, x 偏振轴电场分布呈矩形, y 偏振轴的电场分布呈圆形,正是此种差异导致了光子晶体光纤的高双折射,减少了光信号在传输过程中的能量耦合,保证了布里渊动态光栅传感中泵浦光和探测光的输入以及反射光的输出。在入射光波长为 1550 nm 时,分别沿光纤的快轴和慢轴方向施加横向压力,施力方向如图 5 中箭头所示。

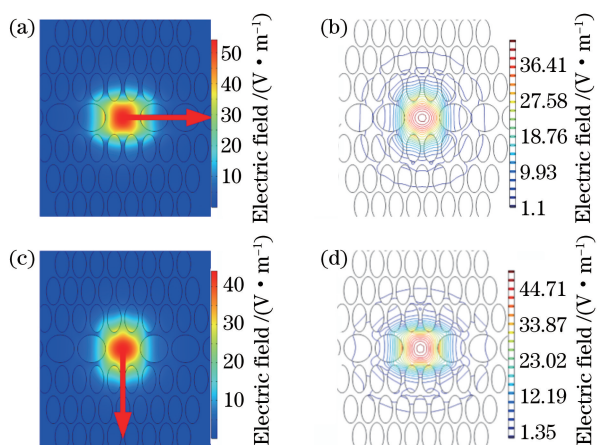


图 4 电场分布和能量轮廓。(a)(b) x 偏振;
(c)(d) y 偏振

Fig. 4 Electric field distribution and energy contour.
(a)(b) x polarization; (c)(d) y polarization

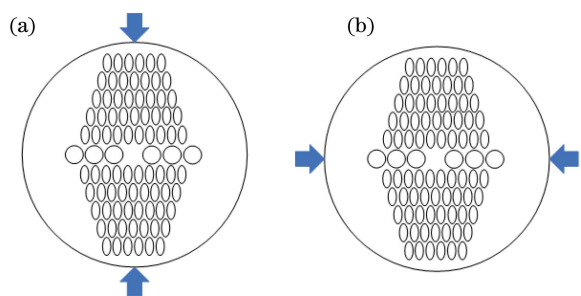


图 5 光子晶体光纤受力示意图。(a)沿快轴
施加横向压力;(b)沿慢轴施加横向压力

Fig. 5 Direction of pressure. (a) Transverse pressure
applied along y -polarization axis; (b) transverse
pressure applied along x -polarization axis

在设置好边界条件之后,在固体力学模块内按图 5 所示向光纤施加压力(产生的压强为 1 MPa),并进行计算,光纤横截面的变化如图 6(a)和图 6(b)所示。

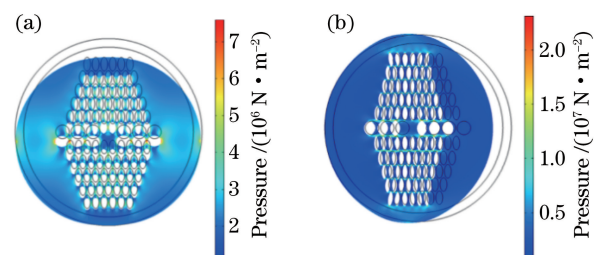
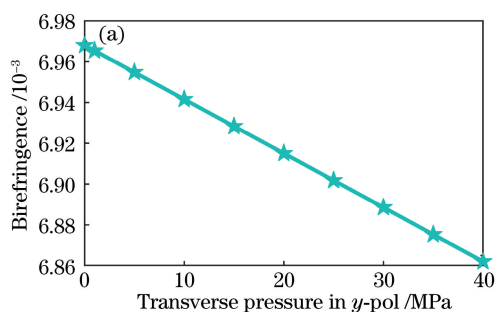


图 6 光纤受力形变图。(a)沿快轴施力;(b)沿慢轴施力
Fig. 6 Deformation of fiber. (a) Pressure applied along
 y -polarization axis; (b) pressure applied along x -
polarization axis

当光子晶体光纤受到压力时会发生形变,空气孔之间的间距被压缩,空气孔的形状也会发生改变。如图 6(a)中沿光纤快轴施加压力后,中心一层的圆形空气孔形状发生变化,变成椭圆;包层中的椭圆空气孔的长轴 b 和短轴 a 的大小也都发生改变,使其椭圆率发生了变化;空气孔之间的间距 Δ_1 受到影响。这些变化导致光子晶体光纤横截面结构发生改变,使得光纤 x 偏振轴和 y 偏振轴的折射率发生变化,进而使光纤的双折射系数发生改变。得到如图 6 所示的力学计算结果之后,利用波动光学模块计算光纤的有效折射率,进而求得发生形变后光纤的双折射系数。根据(1)式可知,光子晶体光纤的双折射频移会受到光纤双折射系数的影响,故当双折射系数 Δn 发生变化时,双折射频移也会发生相应地改变。而当压强的大小发生变化,光纤横截面的改变程度不同时,双折射系数和双折射频移的改变程度也会不同。根据以上建模方法计算获得光子晶体光纤双折射系数在不同压强条件下的变化如图 7(a)和图 7(b)所示,光纤的双折射系数随光纤快轴施加压力的增大而线性减小,随光纤慢轴施加压力的增大而线性增大。

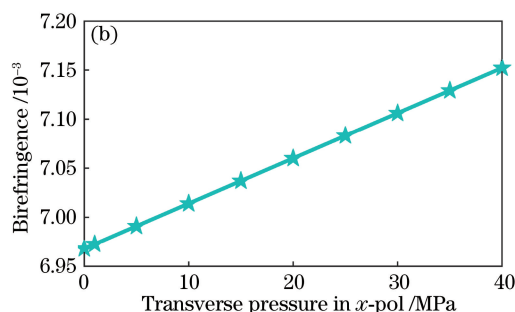


图 7 光子晶体光纤双折射系数随压强变化。(a)沿快轴施加压力;(b)沿慢轴施加压力

Fig. 7 Birefringence of the PCF as a function of pressure. (a) Pressure applied along y -polarization axis;
(b) pressure applied along x -polarization axis

除压强之外,外界环境温度同样会对双折射频移有一定的影响。本文设计的光子晶体光纤材料为纯二氧化硅,二氧化硅温度稳定性较高,其折射率随温度的变化很小,光纤折射率的分布由空气孔的大小和排列方式决定,因此产生的双折射效应主要为几何双折射而不是由温度变化产生的内应力而导致的应力双折射,所以光子晶体光纤的温度稳定性较高^[19]。本文计算了不同环境温度下的光纤双折射系数,计算方式可参考文献[20]。在 COMSOL5.4 中的全局定义窗口设置好体积参考温度之后,在固体力学模块中选择热膨胀属性,改变光纤模型的工作温度。与压强传感部分计算步骤类似,先利用固体力学模块得到一定温度下光纤的形状,再利用波动光学模块计算光纤有效折射率。图 8 为不同温度下双折射系数的变化情况,由图可知,光纤双折射系数随外界温度升高而逐渐增大,但变化量较小。

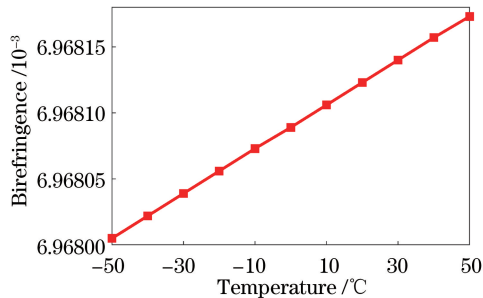


图 8 光子晶体光纤双折射系数随温度的变化曲线

Fig. 8 Birefringence of the PCF as a function of temperature

3.2 压强和温度对双折射频移的影响

利用 3.1 节计算获得不同压强和温度下的双折射系数后利用(1)式可以得到对应双折射频移的变化。下面将对双折射频移的变化规律进行分析。

进行压强仿真工作时,设定光纤长度为 1 m,温度环境为 0 °C、20 °C 和 40 °C,对光纤沿快轴方向均匀地施加横向压力。20 °C 下双折射频移随压强的变化曲线如图 9 所示,由图可知,温度固定时双折射频移与压强具有很好的线性关系。经过线性拟合,得到 20 °C 下双折射频移随压强变化灵敏度为 -403.9 MHz/MPa。即对应(2)式中的压强系数为 -403.9 MHz/MPa。压强传感器的测量误差主要由双折射频移误差和传感系数误差共同导致,考虑到标定时通常会通过提高双折射频移测量的准确性等措施将传感系数的准确性提升得足够高,因此传感器误差主要由双折射频移误差导致。压强传感的精度、准确性和分辨率将与双折射频移测量的精度、准确性和分辨率直接相关。一般通过 BDG 反射谱

测量的双折射频移误差约为 5 MHz^[21],结合传感器的灵敏度可知,在光纤快轴方向对于压强的测量误差为 0.01 MPa。实际上,双折射频移误差与布里渊动态光栅反射谱的信噪比、扫频范围、扫频点数和反射谱频谱线宽有很大关系^[22],因此更加准确的误差需要在实际应用中具体分析。另外,在 0 °C 和 40 °C 下双折射频移与压强也具有很好的线性关系,其压强系数分别为 -403.7 MHz/MPa 和 -403.6 MHz/MPa。对应地,根据(3)式计算了 20 °C 下布里渊动态光栅反射谱的变化情况。

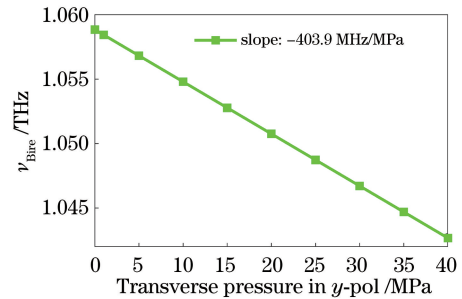


图 9 沿快轴施加不同压力时双折射频移变化曲线

Fig. 9 Birefringence-induced frequency shift of the PCF as a function of pressure applied along y-polarization axis

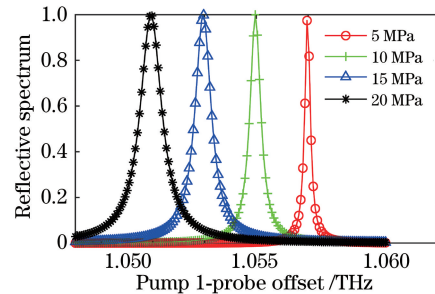


图 10 布里渊动态光栅反射谱随快轴压强的变化

Fig. 10 Reflective spectra with different pressures applied along y-polarization axis for BDG

如图 10 所示,在沿光纤快轴施加横向压力时(见图 5),布里渊动态光栅反射谱峰值处对应的频率也会发生变化,随着压强的增大,峰值处对应的频率逐渐减小,与图 9 中的双折射频移变化趋势相同。

同样地,对光纤沿慢轴方向均匀地施加横向压力,20 °C 下双折射频移随压强的变化情况如图 11 所示。

从图 11 可以看出,双折射频移与压强具有很好的线性关系。经过线性拟合,得到双折射频移随压强变化灵敏度为 691.8 MHz/MPa,即对应(2)式中的压强系数为 691.8 MHz/MPa。同理,光纤慢轴方向传感测量误差为 0.007 MPa。另外,在 0 °C 和

40 °C 下双折射频移与压强也具有很好的线性关系, 其压强系数分别为 691. 4 MHz/MPa 和 691. 5 MHz/MPa。对应地, 根据(3)式计算了 20 °C 下布里渊动态光栅反射谱的变化情况。

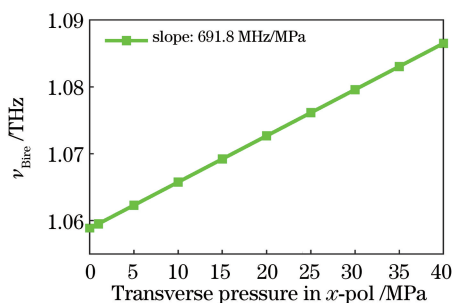


图 11 沿慢轴施加不同压力时双折射频移变化曲线

Fig. 11 Birefringence-induced frequency shift of the PCF as a function of pressure applied along *x*-polarization axis

如图 12 所示, 随着压强增大, 动态光栅反射谱峰值所对应的频率也逐渐增大, 这与图 11 中对应的双折射频移的变化趋势相同。

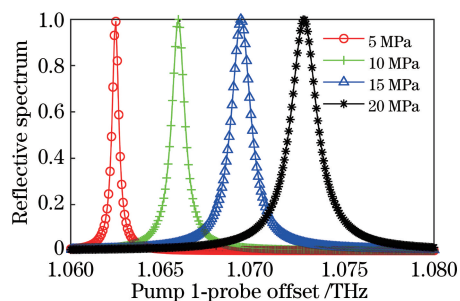


图 12 布里渊动态光栅反射谱随慢轴压强变化情况

Fig. 12 Reflective spectra with different pressures applied along *x*-polarization axis for BDG

为了更加准确地表示温度对光纤双折射频移的影响, 计算了在快轴和慢轴方向压强分别为 0 MPa、20 MPa、40 MPa 下, 长度为 1 m 的光纤双折射频移随温度的变化情况, 其变化如图 13 所示, 由图可知压强固定时双折射频移与温度具有很好的线性关系。经过线性拟合, 得到 0 MPa 下双折射频移随温度变化灵敏度为 0. 1785 MHz/°C; 在光纤快轴和慢轴压强为 20 MPa 时, 灵敏度分别为 0. 1715 MHz/°C 和 0. 1774 MHz/°C; 在光纤快轴和慢轴压强为 40 MPa 时, 灵敏度分别为 0. 1797 MHz/°C 和 0. 1688 MHz/°C。因此, 该光子晶体光纤具有温度不敏感的特性。

图 14 给出了压强为 0 MPa 时布里渊动态光栅反射谱与温度的关系, 随着温度增加, 动态光栅反射谱峰值所对应的频率也逐渐增大, 这与图 13 中对应的双折射频移的变化趋势相同。

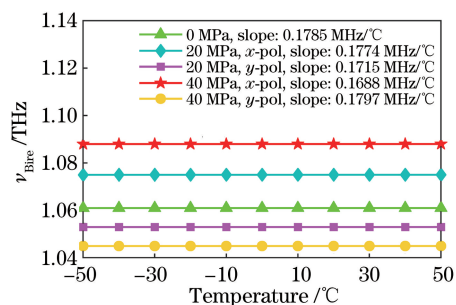


图 13 不同压强下双折射频移随温度的变化曲线

Fig. 13 Birefringence-induced frequency shift of the PCF as a function of temperature with different pressures

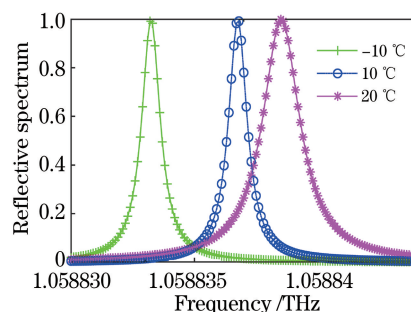


图 14 不同温度下的布里渊动态光栅反射谱

Fig. 14 Reflective spectra with different temperatures

在双折射频移的变化量以及传感系数已知的前提下, 可以根据(2)式计算出压强和温度的变化量, 从而实现传感。而光子晶体光纤的温度不敏感特性使得温度对压强传感中产生的干扰可以忽略不计, 因此, 本文设计的光子晶体光纤可以实现压强的高精度传感。与文献[16]中利用普通保偏光子晶体光纤基于布里渊动态光栅设计的压强传感器相比, 本文提出的基于新型光子晶体光纤的布里渊动态光栅双折射频移传感系数从 199 MHz/MPa 提高到了 691. 8 MHz/MPa, 测量误差为 0. 007 MPa, 准确度较高, 因此更适用于高精度传感领域。

上述工作主要针对光纤慢轴和快轴方向上压强和温度的传感进行了研究, 但是光子晶体光纤对于施力方向也较为敏感。为了观察在不同压力方向同等压强大小对光纤双折射频移以及布里渊动态光栅反射谱的影响, 仿真并计算了 20 °C 下, 施力角度不同时(与快轴正方向的角度 $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$), 双折射频移与压强的关系, 其结果如图 15 所示。由图可知, 施力角度对传感系数有显著影响, 在施力角度偏向光纤的快轴方向 ($\theta \leq 45^\circ$) 时, 其传感系数为负数, 在施力角度偏向光纤的慢轴方向 ($\theta > 45^\circ$) 时, 其传感系数为正数。施

力角度未知时施力角度会给压强的准确测量带来干扰。当然,在压强值大致已知的情况下,利用此特性可以大致判断压力的方向。后续可以探索与压力角度有关的布里渊动态光栅反射谱新特征量,尝试联合双折射频移实现对不同施力方向下压强值的准确测量。

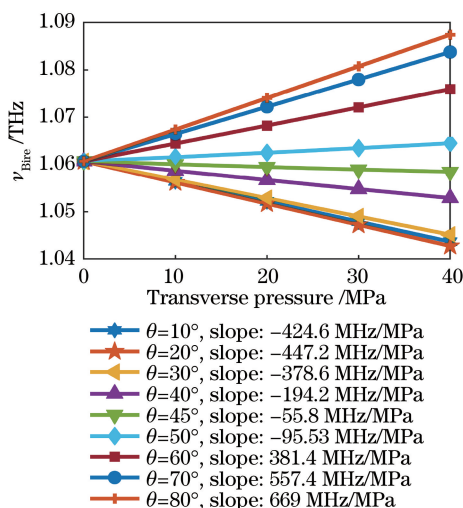


图 15 不同施力角度下双折射频移随压强的变化曲线
Fig. 15 Birefringence-induced frequency shift of the PCF as a function of pressure with different angles

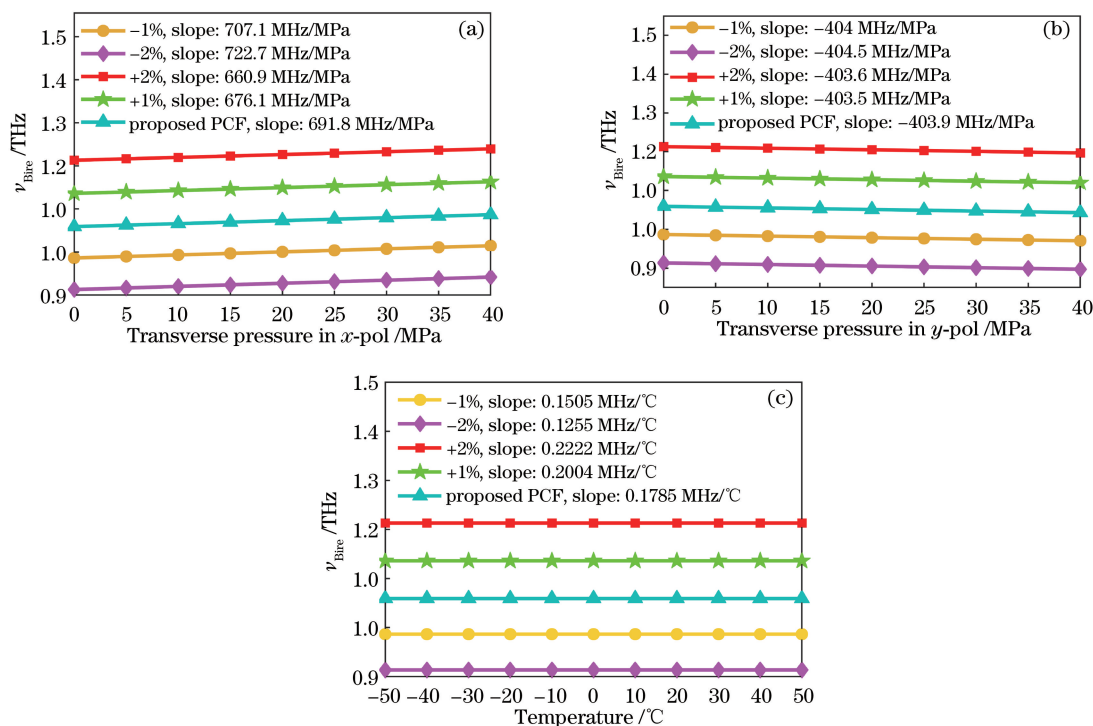


图 16 在圆气孔直径存在 1%~2% 的误差下双折射频移随压强和温度的变化。(a)沿慢轴施力;(b)沿快轴施力;(c)温度
Fig. 16 Birefringence-induced frequency shift as a function of pressure and temperature with 1%~2% variations of circular air holes diameter. (a) Pressure applied along x -polarization axis; (b) pressure applied along y -polarization axis; (c) temperature

4 结构灵敏度分析

目前在光子晶体光纤的制造方法中溶胶凝胶铸造^[23-24]是一种比较新颖的方法,它可以灵活地改变包层中气孔的形状、尺寸和间距而不产生空洞,越来越受到人们的欢迎。该方法通过将熔融石英挤压到预先根据包层结构设计的模具中,得到纤维预成型件,然后将预成型件放入纤维拉丝器具中进行拉丝^[13]。这个方法为我们提出的结构制造提供了可行性。但在拉制过程中,圆气孔直径仍不可避免地会有 1%~2% 的误差,在考虑到偏差之后,传感过程中双折射频移随压强的变化情况如图 16 所示。

从图 16 可以看出,在圆形空气孔误差范围为 1%~2% 时,对 x 偏振方向压强系数的影响为 15.3~30.9 MHz/MPa;对 y 偏振方向压强系数的影响为 0.1~0.5 MHz/MPa;对温度系数的影响为 0.0245~0.0504 MHz/°C。由上述数据可以看出,拉制过程中产生的误差对本文设计的光子晶体光纤传感系数的影响很小,此时本文设计的光纤仍能保持对压强的高灵敏度和对温度的低灵敏度。因此大大降低了对制造精度的要求,提高了制造的可行性。

5 结 论

本文提出一种具有“三明治”结构的新型光子晶体光纤,利用有限元分析方法针对此光纤的布里渊动态光栅传感特性进行了数值分析,研究了在不同压强和温度下双折射频移的变化情况。结论如下:在 $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,慢轴方向上双折射频移的压强系数约为 692 MHz/MPa ,快轴方向上约为 -404 MHz/MPa ;与前人设计的横向压强传感器相比,本文提出的横向压强传感系数从 199 MHz/MPa 提高到了 692 MHz/MPa ;在 $0\sim 40\text{ MPa}$ 下温度系数约为 $0.18\text{ MHz/}^{\circ}\text{C}$,该光子晶体光纤具有温度不敏感特性。本文提出的新型光子晶体光纤适用于海底监测、静水压强监测以及其他高精度传感领域。

参 考 文 献

- [1] Song M P, Bao C, Qiu C, et al. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 650-654.
宋牟平, 鲍翀, 裘超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 650-654.
- [2] Xu Z N, Zhao L J. Investigation of Brillouin frequency shift error estimated by quadratic fitting and the improved algorithm [J/OL]. *Optik*, 2021 [2020-07-01]. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166456>.
- [3] Horiguchi T, Tateda M. Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(8): 408-410.
- [4] Jiang P, Yan L S, Zhou Y, et al. Effect and elimination of polarization random noise in Golog-coded Brillouin optical time domain analysis fiber sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0706002.
蒋朋, 闫连山, 周银, 等. 格雷编码布里渊光时域分析传感器中偏振随机噪声影响及其抑制方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0706002.
- [5] 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.
- [6] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0410001.
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0410001.
- [7] Stajanca P, Chruscicki S, Homann T, et al. Detection of leak-induced pipeline vibrations using fiber-optic distributed acoustic sensing [J]. *Sensors*, 2018, 18(9): E2841.
- [8] Xu Z N, Hu Y H, Zhao L J, et al. Rapid temperature and strain measurement method for optic-electric composite submarine cable based on slope-assisted method [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(5): 202-208.
徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法 [J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(5): 202-208.
- [9] 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): 926-928.
- [10] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using Brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(18): 1364-1366.
- [11] Dong Y K, Teng L, Tong P L, 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.
- [12] 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.
- [13] Sun C Y, Wang W C, Jia H Z. A squeezed photonic crystal fiber for residual dispersion compensation with high birefringence over S + C + L + U wavelength bands [J]. *Optics Communications*, 2020, 458: 124757.
- [14] Zhang X J, Zhao J L, Cui L. Analysis of mode properties of photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1379-1383.
张晓娟, 赵建林, 崔莉. 一种高双折射光子晶体光纤的模式特性分析 [J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1379-1383.
- [15] Zhao L J, Zhao H Y, Xu Z N. Design of high-sensitivity hydrostatic pressure sensor based on Brillouin dynamic grating [J]. *Acta Photonica Sinica*,

- 2021, 50(2): 0206001.
- 赵丽娟, 赵海英, 徐志钮. 基于布里渊动态光栅的高灵敏度静压力传感器设计[J]. 光子学报, 2021, 50(2): 0206001.
- [16] 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.
- [17] Zhang S P. Investigation of sensing based on the Brillouin dynamic grating in a polarization maintaining photonic crystal fiber [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016: 14-15.
- 张绍鹏. 基于保偏光子晶体光纤中布里渊动态光栅的传感研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016: 14-15.
- [18] Teng L. High-sensitive distributed transverse load sensor based on Brillouin dynamic gratings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 17-19.
- 滕雷. 基于布里渊动态光栅的高精度分布式横向压力传感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 17-19.
- [19] Cao Y, Li R M, Tong Z R, et al. Research progresses of highly birefringence photonic crystal fiber[J]. Optical Communication Technology, 2012, 36(2): 1-3.
- 曹晔, 李荣敏, 童峥嵘, 等. 高双折射光子晶体光纤及其传感研究进展[J]. 光通信技术, 2012, 36(2): 1-3.
- [20] Huo W H. Dual-parameter sensing and performance analysis based on polarization-maintaining photonic crystal fiber Bragg grating [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 27-36.
- 霍文荟. 基于保偏光子晶体光纤光栅的双参量传感及性能分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 27-36.
- [21] Dong Y K, Zhou D W, Teng L, et al. Principle of Brillouin dynamic grating and its applications in optical fiber sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 075201.
- 董永康, 周登望, 滕雷, 等. 布里渊动态光栅原理及其在光纤传感中的应用[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 075201.
- [22] Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005.
- 王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.
- [23] 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.
- [24] Wang M, Wang F, Yu C L, et al. Ultra-low core numerical aperture large mode area photonic crystal fiber with 1 MW peak power output[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0536001.
- 王孟, 王璠, 于春雷, 等. 兆瓦峰值功率输出的超低纤芯数值孔径大模场光子晶体光纤[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0536001.