

具有温度自补偿的保偏光纤布拉格光栅 多参量传感器的设计与制备*

李建宇¹⁾ 董忠级²⁾ 张吉宏²⁾ 史雯慧¹⁾ 郑加金^{1)3)†} 韦玮^{1)3)‡}

1) (南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

2) (中国有色金属工业西安勘察设计研究院, 西安 710051)

3) (江苏省特种光纤材料与器件制备及应用工程研究中心, 南京 210023)

(2023年3月28日收到; 2023年5月5日收到修改稿)

多参量的动态检测对于隧道、桥梁和管道等结构疲劳损伤的预测具有重要意义, 开发一种高灵敏度、环境友好、低成本和易于操作的多参量动态检测技术一直是业界追求的目标. 为了克服目前基于光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 的多参量传感器结构和原理复杂、制作成本高等问题, 本文基于保偏光纤布拉格光栅 (PM-FBG) 设计并制作了一种结构简单且高灵敏度, 单点可同时测量多个参量的新型传感器. 该传感器通过传感臂可以同时测量某一点在两个垂直方向上的位移和扭转变化, 并具有温度自补偿功能. 实验结果表明: 该传感器的快轴和慢轴对于温度的响应不同, 其线性灵敏度分别为 11.4 pm/°C 和 10.6 pm/°C, 温度补偿系数为 0.8 pm/°C, 平均扭转灵敏度为 0.20 dB/(°); 该传感器的快轴和慢轴对位移/弯曲的响应相同, 线性灵敏度为 31.5 pm/mm. 当改变传感器周围的温度场, 其位移和扭转传感性能不受影响, 可实现 3 个参量的同时测量. 本文研制的 PM-FBG 新型多参量传感器可以保证高精度的温度、位移和扭转测量, 同时具有较低的制作成本, 有望为多参量动态检测提供一种新的手段.

关键词: 光纤传感器, 保偏光纤布拉格光栅, 温度补偿, 多参量传感**PACS:** 42.81.-I, 42.81.Gs, 42.81.Pa**DOI:** 10.7498/aps.72.20230478

1 引言

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 传感器具有体积小、重量轻、抗电磁干扰、灵敏度高和耐久性好等优点, 已经广泛用于岩土工程、航空航天、医疗研究等领域^[1-4]. 由于 FBG 对应变和温度同时敏感, 并且常用的 FBG 传感器只能测量一种物理参量^[5], 所以在实际应用中往往需要设置多个 FBG 传感器分别测量温度、应变和位移等物理参量, 既增加了成本预算, 又可能达不到理想效

果. 因此, 多个物理参量同时测量在理论研究和工程应用中具有重要意义^[6-8], 设计一种具有温度自补偿功能的多参量传感器可以简化监测流程, 大大降低检测成本.

保偏光纤布拉格光栅 (polarization-maintaining fiber Bragg grating, PM-FBG) 是利用紫外曝光在高双折射保偏光纤中写入 FBG, 从而形成纤芯的折射率周期性分布的一种新型传感结构. 由于 PM-FBG 支持两种不同的偏振本征模式和有效折射率, 因此, PM-FBG 以两种布拉格波长 (对应于 PM-FBG 的快轴和慢轴) 耦合沿两个主轴偏振的光, 使得

* 国家自然科学基金 (批准号: 62075100) 和江苏省研究生科研与实践创新计划 (批准号: KYCX21_0704) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhengjj@njupt.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: weiwei@njupt.edu.cn

PM-FBG 的两个波峰对环境变化产生不同的响应. 基于以上原理, PM-FBG 可以克服 FBG 传感器的交叉灵敏度问题, 实现温度、纵向应变、横向应变或扭转的同时测量^[9–12].

近年来, 许多专家学者基于 FBG 设计了各种类型的多参量传感器和多参量传感系统. 2019 年, Huang 等^[13] 利用 FBG 传感器阵列实现了应变、温度和压力的同时测量, 并将其应用于管道系统的实时状态监测; 同年, Leal-Junior 等^[14] 基于 8 个 FBG 传感器实现了扭矩和位移的双参量测量; 2020 年, Xu 等^[15] 基于一个 FBG 传感器设计了一种可以同时测量倾斜和加速度的传感器; 2022 年, Lu 等^[16] 基于 PM-FBG 设计了一种多参量传感器, 该传感器可以同时测量温度、应变和周围有效折射率. 然而, 目前基于 FBG 的多参量传感器普遍存在传感器的结构和原理复杂, 未对 FBG 进行有效封装, 传感器力学性能差以及制作成本高等问题.

鉴于此, 本文利用 3D 打印技术, 设计并制作了一种可以同时测量位移、扭转和温度的新型 PM-FBG 多参量传感器. 该传感器的结构主要由传感腔、传感臂和位移控制腔组成. 由于 PM-FBG 的两种布拉格波长对扭转和弯曲的响应不同, 所设计的 PM-FBG 传感器可以分别将传感臂的位移和旋转转变为嵌入传感腔内的 PM-FBG 的弯曲和扭转, 从而可以检测特定位置上两个垂直方向上的位移和扭转的变化. 同时, 该传感器可以在测量其他参量的同时检测温度的变化, 消除外界温度场变化对传感器输出结果的影响, 从而实现温度的自补偿. 此外, PM-FBG 栅区的两端分别与支撑臂和传感臂直接连接, 其变化趋势与传感臂相同, 使得 PM-FBG 传感器的灵敏度和准确度较高. 本文所提出的 PM-FBG 具有结构简单、灵敏度高、力学性能好和制作成本低等优势, 有望为多参量动态检测提供一种新的方法.

2 PM-FBG 传感原理及实验

2.1 PM-FBG 传感原理

由于实际的单模光纤纤芯的圆对称性无法达到理想标准, 导致光波的两种偏振模式在纤芯内传播的速度不同, 从而产生偏振模式色散. 保偏光纤 (polarization-maintaining fiber, PMF) 在光纤纤芯周围掺入硼硅酸盐, 所产生的应力诱导可以消除偏振模式色散. 如图 1 所示, 由于 PMF 在两个偏振方向上的有效折射率不同, 光波在 PMF 中传输的速度不同形成了快轴与慢轴, 在 PMF 上写入 FBG 相当于在快轴和慢轴的相同位置上分别写入了 FBG, 因此, PM-FBG 具有两个波峰^[17–19]. PM-FBG 中心波长的计算公式为

$$\lambda_F = 2\Lambda n_F, \quad (1)$$

$$\lambda_S = 2\Lambda n_S, \quad (2)$$

式中, λ_F 为 PM-FBG 快轴的中心波长, λ_S 为 PM-FBG 慢轴的中心波长, Λ 为光栅的周期, n_F 为 PM-FBG 快轴的有效折射率, n_S 为 PM-FBG 慢轴的有效折射率.

根据 PM-FBG 两个波峰对温度和应变的响应规律^[20], 其快轴和慢轴的波长漂移量 $\Delta\lambda_{FB}$ 和 $\Delta\lambda_{SB}$ 与温度和位移的关系可以表示为

$$\Delta\lambda_{FB} = K_{FT} \times \Delta T + K_D \times \Delta D, \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_{SB} = K_{ST} \times \Delta T + K_D \times \Delta D, \quad (4)$$

式中, ΔT 和 ΔD 分别为外界温度变化量和位移量, K_{FT} 和 K_{ST} 分别为 PM-FBG 快轴和慢轴的温度灵敏度系数, K_D 为 PM-FBG 的位移灵敏度系数.

当线性偏振光输入 PM-FBG 时, PMF 的慢轴和快轴分别产生两种不同的偏振模式, 这两种模式的 E (电磁) 场场强对扭转的响应不同, 具体表现为 PM-FBG 的快轴和慢轴对扭转的响应不同^[6].

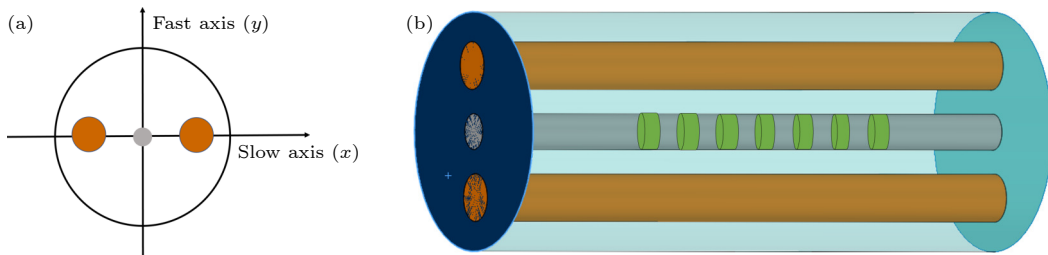


图 1 (a) PMF 截面示意图; (b) PM-FBG 结构示意图

Fig. 1. (a) Schematic cross-section of PMF; (b) schematic structure of PM-FBG.

PM-FBG 沿顺时针扭转角度 ΔA 与快轴和慢轴的峰值强度之间的关系可以表示为

$$R_F = R_{F0} - K_A \cdot \Delta A, \quad (5)$$

$$R_S = R_{S0} - K_A \cdot \Delta A, \quad (6)$$

式中, R_F 和 R_S 分别为 PM-FBG 快轴和慢轴的峰值强度, R_{F0} 和 R_{S0} 分别为快轴和慢轴的初始峰值强度, K_A 为 PM-FBG 的平均扭转灵敏度, ΔA 代表 PM-FBG 的扭转角度. 当 PM-FBG 沿逆时针扭转时, 式中符号取反.

2.2 PM-FBG 传感器制备及实验

使用 248 nm 的 KrF 准分子激光器和相位掩模法在载氢后的保偏光纤 (熊猫型保偏光纤, 模场直径为 $6.7\text{--}7.1\text{ }\mu\text{m}@980\text{ nm}$, 包层直径为 $125\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) 写入 PM-FBG (栅区长度为 6 mm); 然后通过熔融沉积 3D 打印技术 (fused deposition modeling, FDM) 将 FBG 嵌入图 2 所示的结构中. 其中, 所制作的 PM-FBG 传感器外壳的材料为聚乳酸, 熔化温度、拉伸模量和拉伸强度分别为 $173\text{--}178\text{ }^\circ\text{C}$, $2.7\text{--}16\text{ GPa}$ 和 50 MPa , 3D 打印机的层分辨率、细丝直径和喷嘴直径分别为 $0.1, 1.75\text{ mm}$ 和 0.44 mm , 传感腔体积为 $150\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$.

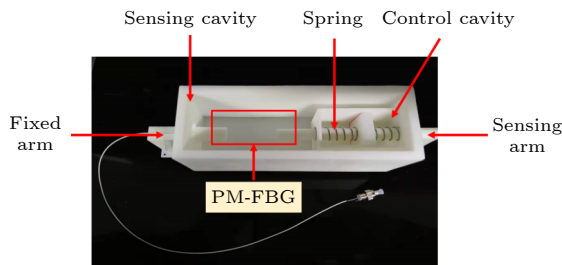


图 2 本文设计的 PM-FBG 传感器实物图

Fig. 2. The physical image of the PM-FBG sensor designed in this paper.

如图 2 所示, 设计的 PM-FBG 传感器主要包括传感腔、控制腔、支撑臂和传感臂. 其中, PM-FBG 位于传感腔中, 并分别与传感臂和支撑臂连接, PM-FBG 与传感臂具有相同的运动趋势. 控制腔中的弹簧控制传感臂的位移范围, 可以防止 PM-FBG 因传感臂位移量过大而损坏. 传感臂分别将环境位移和扭转转变为 PM-FBG 的弯曲和扭转, 从而实现位移和扭转的同时测量.

本文采用的 PM-FBG 和铜合金弹簧的热膨胀系数常温下分别为 $8 \times 10^{-6}\text{--}13 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $7 \times$

$10^{-6}\text{--}9 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 理论上, 材料的热膨胀系数越小, 其热性能越稳定. 若弹簧发生热胀冷缩, 其变形将小于 PM-FBG, 弹簧表面微小的形变对 PM-FBG 产生的轴向应力非常小, 可以忽略. 此外, 在整个传感器模块中, PM-FBG 一端固定于支撑臂, 另一端与弹簧连接, 中间悬空. 由于 PM-FBG 没有直接与 PLA 基底接触, 其热胀冷缩对于 PM-FBG 影响较小.

图 3 所示为 PM-FBG 传感器性能测试系统, 该系统主要包括 PM-FBG 传感器、宽带光源 (ASE, Hoyatek)、偏振控制器、环形器、光谱分析仪 (OSA, AQ6375B, Yokogawa) 和计算机数据处理模块. 其中, ASE 宽带光源发出的偏振光依次通过单模光纤 (SMF-G.652)、偏振控制器和环形器后传输至 PM-FBG 传感器, 光谱分析仪接收来自 PM-FBG 传感器的反射光并输出反射光谱. 通过调节偏振控制器可以调整光的输出偏振状态, PM-FBG 传感器的扭转和位移变化由传感臂控制.

本文通过以下流程完成传感器的初始对准: 首先将刻写有 PM-FBG 的 PMF 与 SMF 熔接; 然后使光纤保持平直状态, 旋转偏振控制器设置 PM-FBG 快轴的反射峰趋近于 0 时的扭转角度为 0° ; 最后, 将光纤固定于传感器模块内, 此时, 传感臂的旋转角度默认为 0° .

3 实验结果与分析

分别将 PM-FBG 裸栅和传感器模块置于恒温水浴锅中, 温度范围为 $20\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$. 结果显示, 两者的测试结果基本相同, 且在升温至 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 弹簧和传感器模块均未发生明显形变. 因此, 本文不考虑传感器模块本身热胀冷缩引起的应变对测量结果的影响.

对 PM-FBG 传感器进行升温测试, 期间传感器模块的传感臂保持初始状态 (旋转角度为 0° , 位移量为 0 mm), 图 4 所示为 PM-FBG 传感器温度传感性能测试结果. 从图 4(a) 可以看出, 升温过程中, 传感器的快轴和慢轴所对应的波峰的相对强度保持不变, 而中心波长发生红移; 对图 4(a) 中的 PM-FBG 的中心波长与温度的关系进行线性拟合, 波长与温度具有良好的线性关系. 此外, 由于 PM-FBG 的快轴和慢轴的热膨胀系数不同, 两者的线性灵敏度不同, PM-FBG 传感器的快轴和慢轴

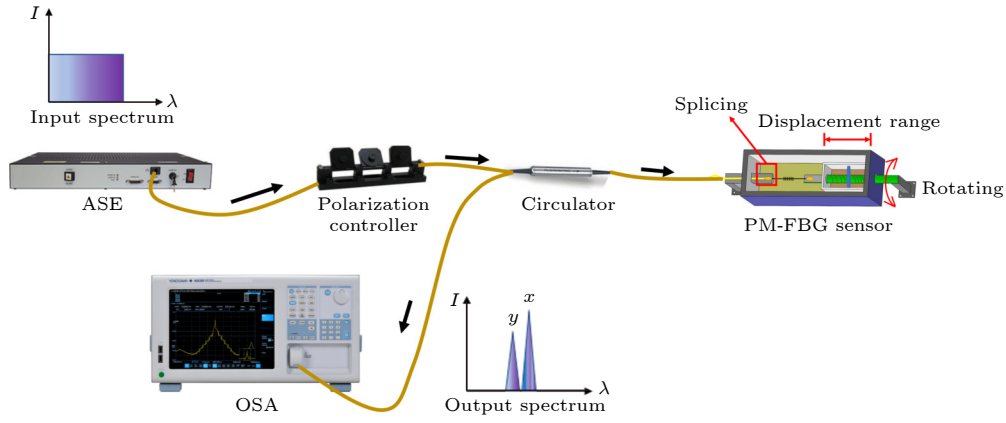


图 3 PM-FBG 传感器测试系统示意图

Fig. 3. Schematic diagram of PM-FBG sensor testing system.

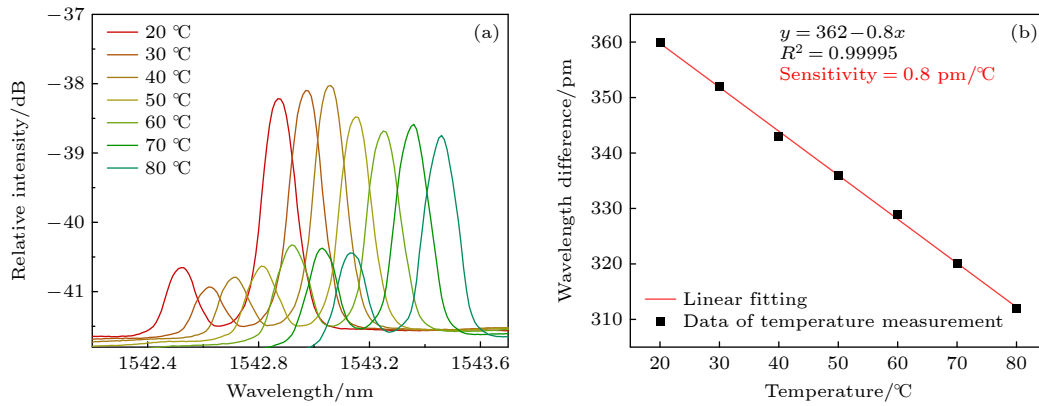


图 4 (a) PM-FBG 传感器不同温度下光谱图; (b) PM-FBG 的快轴和慢轴波长差与温度的关系

Fig. 4. (a) Spectra of PM-FBG sensor at different temperatures; (b) temperature versus wavelength difference corresponding to the fast axis and slow axis.

所对应的波峰的灵敏度系数分别为 $11.4 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $10.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$; 图 4(b) 是根据 PM-FBG 的快轴和慢轴的波长差 ($\Delta\lambda = \lambda_S - \lambda_F$) 与温度拟合得到的关系曲线, 拟合系数 $R^2 = 0.99995$, 传感器的温度补偿系数为 $0.8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$.

图 5(a) 是 PM-FBG 传感器的传感臂从 0° 旋转至 90° 的反射谱, 从图 5(a) 可以看出, 从 0° 旋转至 90° 的过程中, PM-FBG 的快轴的峰值强度增大, 慢轴的峰值强度减小, 该现象是由 PMF 内部正交偏振模式的变化引起的. 进一步, 调节 PM-FBG 传感器的传感臂, 使其从 -90° (逆时针) 逐渐旋转至 90° (顺时针), 旋转步长为 15° . 如图 5(b) 所示, PM-FBG 传感器反射峰的强度随扭转角的变化遵循正弦变化规律, 并且对顺时针扭转和逆时针扭转的响应不同, 其中, 正弦拟合曲线的方差 $R^2 = 1$, 平均扭转灵敏度为 $0.20\text{DB}/(^{\circ})$. 与文献 [21] 中报道的 $0.09\text{DB}/(^{\circ})$ 相比, PM-FBG 传感器的扭转

灵敏度有所提高.

对 PM-FBG 传感臂的位移与 PM-FBG 的弯曲之间的关系进行标定, 如图 6(a) 所示, 将 PM-FBG 固定于位移控制平台的弹性钢尺表面, 固定一端, 在另一端施加 5 g 的重量, 通过控制位移平台使 PM-FBG 产生弯曲. 曲率 $1/R$ 可以通过以下公式计算:

$$R^2 = (R - h)^2 - (d/2)^2, \quad (7)$$

式中, h 是弹性钢尺中点的高度, d 是钢尺两端之间的距离, 位移变化范围为 $0-20 \text{ mm}$, 曲率变化范围为 $0-11 \text{ m}^{-1}$.

图 6(b) 是上述实验的光谱响应结果, 从图 6(b) 可见, PM-FBG 的快轴和慢轴的波长与曲率具有良好的线性关系. 如图 6(c) 所示, 对波长与曲率之间的关系进行线性拟合, 结果显示, 其线性斜率均为 $82 \text{ pm}/\text{mm}^{-1}$, 线性系数 R^2 分别为 0.998 和 0.999 , 该现象与 PM-FBG 对温度的响应规律不同. 为了

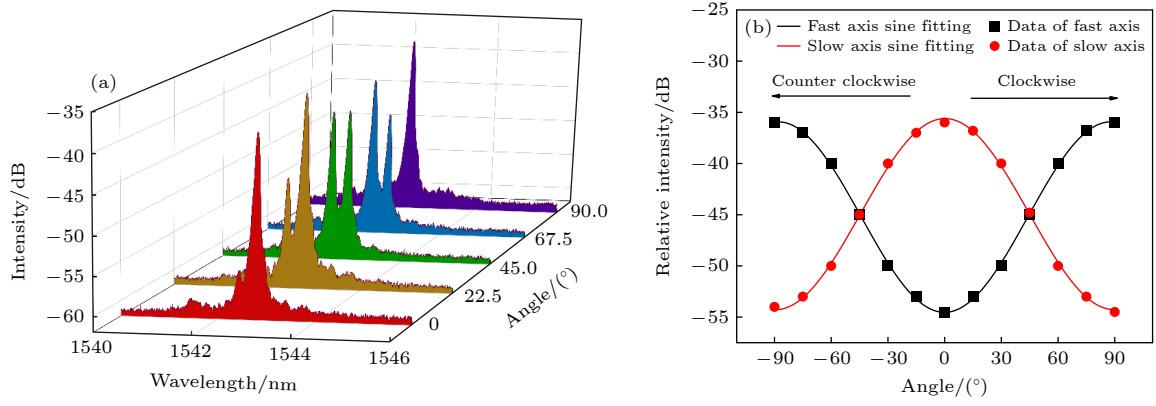


图 5 (a) PM-FBG 传感器不同扭转角度光谱图; (b) 对应于图 (a) 的峰值强度变化曲线

Fig. 5. (a) Spectral response of PM-FBG sensor versus rotation over -90° to 90° ; (b) individual peak intensities extracted from the spectra of (a).

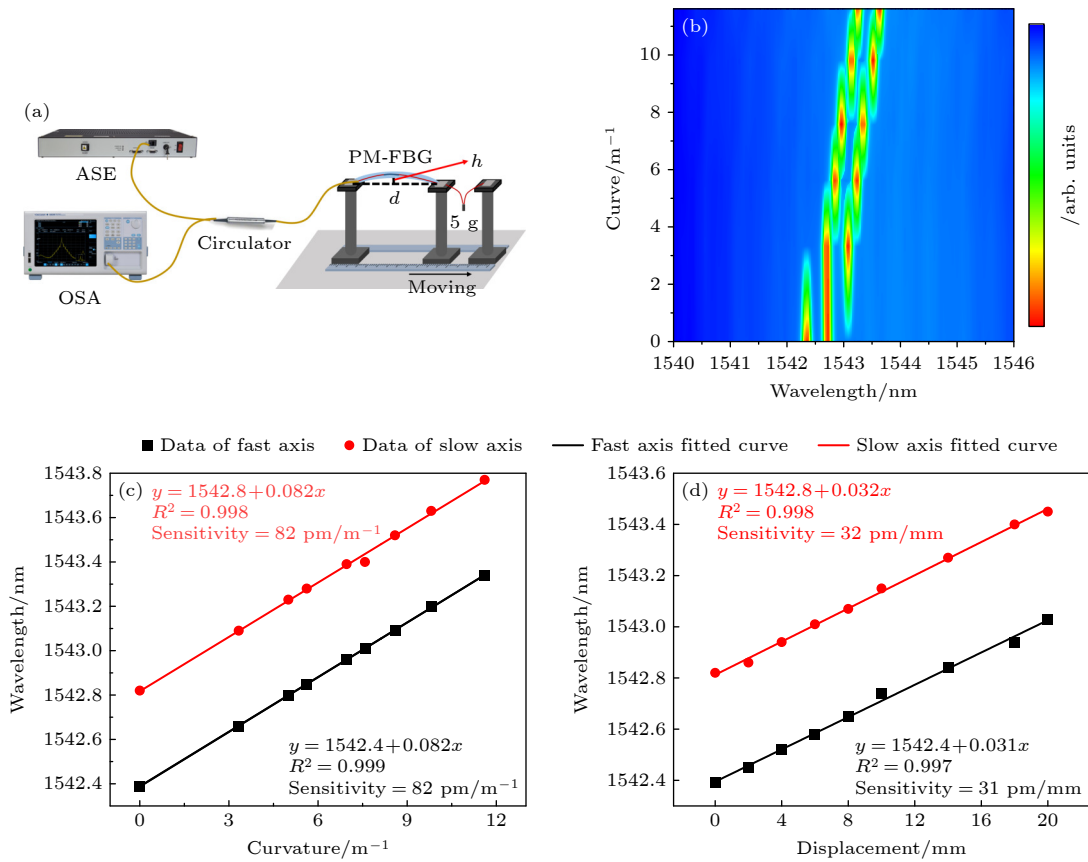


图 6 PM-FBG 传感器位移传感性能测试 (a) 弯曲测量实验装置; (b) 曲率为 $0-11 \text{ m}^{-1}$ 的光谱响应; (c) 曲率-波长; (d) 位移-波长 (快轴, 慢轴)

Fig. 6. Displacement sensing performance test of PM-FBG sensor: (a) Experimental setup for bending measurement; (b) spectral response of curvature over 0 to 11 m^{-1} ; (c) curvature versus wavelength; (d) displacement versus wavelength of the fast axis and slow axis.

进一步验证 PM-FBG 传感器的传感臂位移与波长之间的关系, 对传感臂位移与 PM-FBG 峰值波长的关系进行线性拟合, 如图 6(d) 所示, PM-FBG 传感器的快轴和慢轴的位移灵敏度分别为 31 pm/mm 和 32 pm/mm , 由于两者基本相同, 所以此处取两

者的平均值, 即 PM-FBG 传感器的位移灵敏度为 31.5 pm/mm .

为了验证 PM-FBG 传感器可以实现多参量的交叉测量, 分别在 0 , 40 和 80°C 的环境下测试 PM-FBG 传感器的位移和扭转传感性能. 如图 7(a)

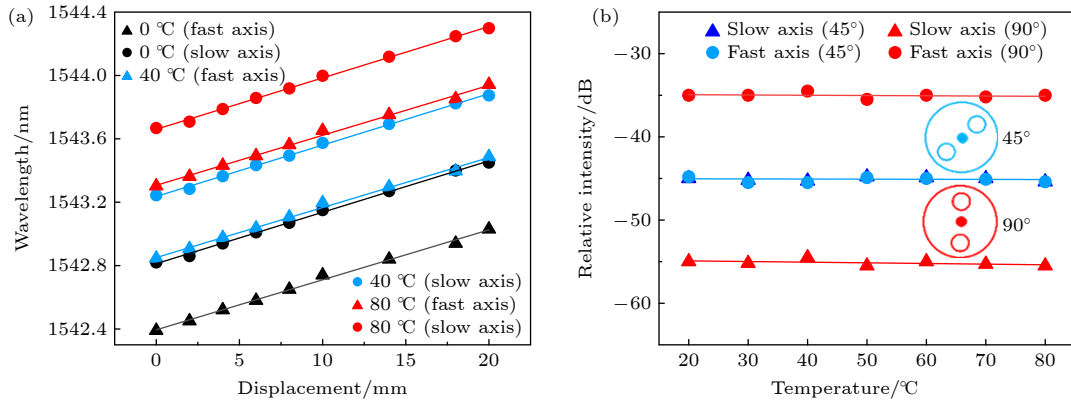


图 7 PM-FBG 传感器多参数同时测量 (a) 温度对位移的影响; (b) 温度对扭转的影响

Fig. 7. Cross measurement of different parameters by PM-FBG sensor: (a) Influence of temperature on displacement; (b) influence of temperature on torsion.

所示, 当环境的温度场和位移同时发生变化时, 传感器的波长漂移量 $\Delta\lambda$ 是温度场引起的波长变化 $\Delta\lambda_T$ 和位移引起的波长变化 $\Delta\lambda_D$ 的线性叠加, 具体可用公式表示为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_T + \Delta\lambda_D. \quad (8)$$

从上述实验可知, 温度的升高会导致 PM-FBG 传感器的快轴和慢轴的波长红移, 并且两者的灵敏度系数不同, 但位移的增大只会导致两者的线性红移. 因此, 基于以上原理, 该传感器可以实现温度和位移的同时测量.

接下来, 研究了当 PM-FBG 传感器传感臂的扭转角分别为 45° 和 90° 时, 温度场变化对传感器反射光谱的影响. 如图 7(b) 所示, 实验结果表明, 温度场的变化不会造成传感器的光谱形状发生变化, 即温度不会影响传感器的扭转测量 (图 7(b) 中 PMF 的截面为 PM-FBG 扭转角度的示意图). 因此, PM-FBG 传感器可以实现温度与扭转的同时测量.

最后, 改变 PM-FBG 传感器周围的温度场, 同时对传感臂施加位移和旋转. 图 8 是三参量同时变化时 PM-FBG 传感器的光谱图. 从图 8 可以看到, 传感臂的位移量增加导致快轴和慢轴的波峰发生红移, 同时, 由于传感器周围温度场的改变, 快轴和慢轴的波长漂移量不同. 此外, 由于传感臂的旋转, 在波长漂移的过程中, 快轴和慢轴的峰值强度发生变化. 综合以上分析, PM-FBG 传感器可以实现温度、位移和扭转的同时测量.

基于 (3) 式—(6) 式和本文的实验结果, 计算得到了 PM-FBG 传感器温度、位移和扭转同时测

量的解调方程组为

$$\Delta T = 1250(\Delta\lambda_{FB} - \Delta\lambda_{SB}), \quad (9)$$

$$\Delta D = 445.3\Delta\lambda_{FB} - 414.1\Delta\lambda_{SB}, \quad (10)$$

$$\Delta A = 5(R_0 - R), \quad (11)$$

式中, ΔT 为外界温度变化量, ΔD 为 PM-FBG 传感器传感臂的位移量, ΔA 为传感臂的旋转角度, $\Delta\lambda_{FB}$ 和 $\Delta\lambda_{SB}$ 分别为快轴和慢轴的波长漂移量, R_0 和 R 分别为 PM-FBG 传感器峰值强度的初始值和测量值. 根据 (9) 式—(11) 式的解调方程组, PM-FBG 传感器可以将外界的温度、位移和扭转的变化转换为波长和波峰的变化, 从而实现 3 个参量的同时检测.

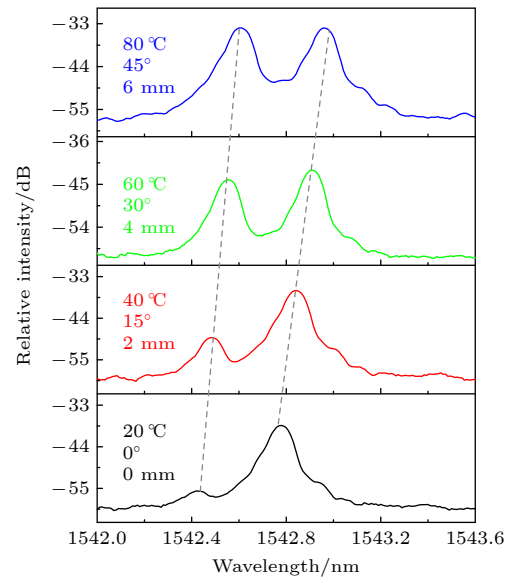


图 8 PM-FBG 传感器多参量同时测量光谱图

Fig. 8. PM-FBG sensor simultaneously measures multi-parameters spectral graph.

4 结 论

综上所述, 本文研制了一种具有温度自补偿功能的新多参量 PM-FBG 传感器, 其位移灵敏度为 31.5 pm/mm, 位移可调节范围为 0—20 mm; 扭转灵敏度为 0.20DB/(°), 扭转可调节范围为 180° (−90°—+90°); PM-FBG 的快轴和慢轴的温度灵敏度系数分别为 11.4 pm/°C 和 10.6 pm/°C, 温度补偿系数为 0.8 pm/°C, 以上 3 种灵敏度均优于商用的 FBG 传感器. 使用一个 PM-FBG 和熔融沉积 3D 打印技术实现传感器的制作, 有效降低了制作成本. 进一步验证了 PM-FBG 传感器在测量扭转和位移的同时可以检测温度的变化, 并给出了三参量同时传感的解调方程组. 本研究有望对多参量的同时测量提供可靠的依据, 所设计的 PM-FBG 传感器具有一定的商业价值.

参考文献

- [1] Yu B, Lin F, Wang M R, Ning H, Ling B D, Rao Y Y 2022 *Sci. Rep.* **12** 18281
- [2] Fan Z C, Diao X Z, Hu K J, Zhang Y, Huang Z Y, Kang Y B, Yan H, 2020 *Sci. Rep.* **10** 12330
- [3] Jinachandran S, Rajan G 2021 *Mater. Des.* **14** 897
- [4] Zhu C, Zhuang Y Y, Liu B, Huang J 2022 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **71** 7008212
- [5] Jinachandran, S, Li H, Xi J T, Prusty B G, Semenova Y, Farrell G, Rajan G 2018 *IEEE Sens. J.* **18** 8739
- [6] Fu D Y, Liu X J, Shang J Y, Sun W M, Liu Y J 2020 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **32** 747
- [7] Wang F, Pang K B, Ma T, Wang X, Liu Y F 2020 *Opt. Laser Technol.* **130** 106333
- [8] Sempionatto J R, Lin M Y, Yin L, Ernesto D, Pei K X, Thitaporn S, Silva A, Ahmed A K, Zhang F Y, Tostado N, Xu S, Wang J 2021 *Nat. Biomed. Eng.* **5** 737
- [9] Caucheteur C, Guo T, Albert J 2017 *J. Light. Technol.* **35** 3311
- [10] Jiang C, Liu Y Q, Mou C B 2021 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **33** 358
- [11] Ding Z H, Tan Z W, Gao Y S, Wu Y, Yin B 2020 *Optik* **221** 165352
- [12] Liu Q, Li Q, Sun Y D, Chai Q, Zhang B, Liu C, Sun T, Liu W, Sun J D, Ren Z H, Chu P K 2019 *Opt. Commun.* **452** 185
- [13] Huang J, Pham D T, Ji C Q, Wang Z C, Zhou Z D 2019 *Measurement* **134** 226
- [14] Leal-Junior A G, Theodosiou A, Min R, Casas J, Diaz C R, Dosantos W M, Pontes M J, Siqueira, Adriano A S, Marques C, Kalli C, Frizera A 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 4054
- [15] Xu H B, Li F, Gao Y, Wang W 2020 *IEEE Sens. J.* **20** 14857
- [16] Lu L D, Xu Y G, Dong M L, Zhu L Q 2022 *IEEE Sens. J.* **22** 338
- [17] Liu C, Jiang Y J, Du B B, Wang T, Feng D Y, Jiang B Q, Yang D X 2019 *Sens. Actuator A Phys.* **290** 172
- [18] Barot D, Wang G, Duan L Z 2019 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **31** 709
- [19] Yang F, Fang Z J, Pan Z Q, Ye Q, Cai H W, Qu R H 2012 *Opt. Express* **20** 28839
- [20] Chen G H, Liu L Y, Jia H Z, Yu J M, Xu L, Wang W C 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 221
- [21] Guo T, Liu F, Du F, Zhang Z, Li C, Guan B O, Albert J 2013 *Opt. Express* **21** 19097

Temperature-independent multi-parameter sensor based on polarization maintaining fiber Bragg grating^{*}

Li Jian-Yu¹⁾ Dong Zhong-Ji²⁾ Zhang Ji-Hong²⁾ Shi Wen-Hui¹⁾

Zheng Jia-Jin^{1)3)†} Wei Wei^{1)3)‡}

1) (*College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

2) (*Xi'an Institute of Nonferrous Metal Survey and Design, China Nonferrous Metal Industry, Xi'an 710051, China*)

3) (*Jiangsu Special Optical Fiber Materials and Devices Preparation and Application Engineering Research Centre, Nanjing 210023, China*)

(Received 28 March 2023; revised manuscript received 5 May 2023)

Abstract

Dynamic multi-parameter detection is of great significance in predicting fatigue damage to structures such as tunnels, bridges, and pipelines. Developing a high-sensitivity, environmentally friendly, low-cost, and easy-to-operate multi-parameter dynamic detection technology has always been the goal of the industry. The polarization-maintaining fiber Bragg grating (PM-FBG) has a special grating structure composed of fiber Bragg grating (FBG) directly written into high birefringence and polarization-maintaining fiber, and it supports two distinct polarization eigenmodes with two effective refractive indices. The PM-FBG couples the light beams polarized along the two principal axes corresponding to slow axis and fast axis at two different Bragg wavelengths. The two peaks of PM-FBG have different responses to external changes, which may be used to solve the cross-sensitivity problem of FBG sensor and realize the simultaneous multi-parameter measurement of the temperature, longitudinal strain, transverse strain, or twist. In order to solve the problems of complex structure and principle and high production cost of FBG-based multi-parameter sensors, a novel multi-parameter fiber-optic sensor with high sensitivity and temperature independence is designed based on PM-FBG in this work. The PM-FBG sensor proposed can simultaneously measure the changes of displacement and twist in two vertical directions at a certain point and has the function of temperature self-compensation. The external structure of the sensor is fabricated by using three-dimensional printing technology through the fused deposition method and the raw material for creating different components through using polylactic acid. Experimental results show that the fast axis and slow axis of the sensor have different temperature responses, with linear sensitivities of 11.4 pm/°C and 10.6 pm/°C, respectively, and the temperature compensation coefficient and average torsional sensitivity of the PM-FBG sensor are 0.8 pm/°C and 0.20 dB/(°), respectively. The fast axis and slow axis of the PM-FBG sensor have the same response to displacement, with a sensitivity of 31.5 pm/mm and an adjustable range of 0–20 mm. The sensitivity to displacement, torsion, and temperature sensitivities of the sensor are all superior over those of commercial FBG sensors. By changing the temperature field around the sensor, its displacement- and torsion-sensing performances are not affected, thereby realizing the temperature self-compensation. Consequently, the proposed sensor has potential applications in the multi-parameter dynamic detection due to its simple structure, high sensitivity, good mechanical strength, and low cost.

Keywords: optical fiber sensor, polarization-maintaining Bragg grating, temperature compensation, multi-parameter sensing

PACS: 42.81.–I, 42.81.Gs, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.72.20230478

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62075100) and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province, China (Grant No. KYCX21_0704).

[†] Corresponding author. E-mail: zhengjj@njupt.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: weiwei@njupt.edu.cn

具有温度自补偿的保偏光纤布拉格光栅多参量传感器的设计与制备

李建宇 董忠级 张吉宏 史雯慧 郑加金 韦玮

Temperature-independent multi-parameter sensor based on polarization maintaining fiber Bragg grating

Li Jian-Yu Dong Zhong-Ji Zhang Ji-Hong Shi Wen-Hui Zheng Jia-Jin Wei Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 144206 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230478

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230478>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双包层光纤布拉格光栅传感器的锂电池组温度场监控

Temperature field monitoring of lithium battery pack based on double-clad fiber Bragg grating sensor

物理学报. 2022, 71(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212302>

基于无芯光纤的多参数测量传感器

Multi-parameter measurement sensor based on no-core fiber

物理学报. 2021, 70(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201474>

基于拟合衰减差自补偿的分布式光纤温度传感器

Distributed optical fiber temperature sensor based on self-compensation of fitting attenuation difference

物理学报. 2020, 69(3): 030701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191456>

基于阵列波导光栅的光纤布拉格光栅解调技术综述

Review of fiber Bragg grating interrogation techniques based on array waveguide gratings

物理学报. 2022, 71(9): 094207 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212063>

芯内双微孔复合腔结构的光纤法布里-珀罗传感器研究

Dual micro-holes-based in-fiber Fabry-Perot interferometer sensor

物理学报. 2018, 67(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180528>

基于模场自积增强检测的光纤声光旋转传感器

Enhanced selfintegration algorithm for fiber torsion sensor based acoustically-induced fiber grating

物理学报. 2018, 67(1): 014208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171525>