

基于 π 相移光纤布拉格光栅的超灵敏超声传感器研究

郭古青,尹梦科,于隽雅,邱选兵,李传亮

(太原科技大学 山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心;应用科学学院,太原 030024)

摘要:针对高温、高压和核辐射等极端环境下金属构件的在线服役状态检测难题,提出了一种基于 π 相移光纤布拉格光栅(π PS-FBG)的超灵敏超声传感器.该传感器使用处于低成本通信波段(1 550 nm)的单模分布式反馈(DFB)激光器为光源,以 π PS-FBG 为超声应变敏感器件,采用平衡差分探测方法显著抑制了激光光源噪声、探测器噪声和电子噪声等,提高了探测的信噪比.以线性压电陶瓷管为激励源,采用传统应变片为参考,对比测量了传统 FBG 和 π PS-FBG 的中心波长与应变的关系.通过静态实验得到 π PS-FBG 的电压响应灵敏度为 190.907×10^9 V/m,为传统 FBG 的 5 倍.动态响应特性实验表明,传感器在 1~5 MHz 范围内的频率响应灵敏度变化小于 19 dB,灵敏度为 79.583×10^{-12} ϵ .这为基于 π PS-FBG 传感器的金属构件服役状态检测提供了实验依据,有助于极端环境下激光超声无损检测技术的进一步发展和应用.

关键词:超声传感器; π PS-FBG;传感器特性;激光解调法

中图分类号:O439

文献标志码:A

传统的超声波传感器是基于锆钛酸铅的压电陶瓷(Piezoelectric ceramics, PZT),其灵敏度虽高,但由于谐振效应导致其可探测的带宽较窄^[1].而光纤传感器具有灵敏度高、重量轻、体积小和带宽较宽等特点,与传统 PZT 传感器相比,更适于集成嵌入到结构部件中,且不受电磁干扰和腐蚀的影响,从而提高了光纤传感器的适用性和应用范围^[2].光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器作为一种新型的光纤传感器,应用潜力巨大,目前已逐渐成为 PZT 传感器的替代品,在超声传感领域引起了广泛的关注^[3].

FBG 光纤传感器的研究已持续 30 多年,为了适用于各种各样的新型应用场景,许多新的方法和技术仍然在不断发展^[4].如 HE 等使用压电陶瓷和光纤布拉格光栅的多点电压传感系统证明了电网多点电压实时监测的可行性^[5].BALL 等采用压电陶瓷驱动法非线性的调节 FBG 的波长,但可调谐范围有限^[6].PEREZ 等提出一种匹配解调系统,利用 FBG 波长具有微小差别的 2 个 FBG 分别作为匹配和检测 FBG,成功检测到声发射信号,但类似的常规 FBG 反射谱宽通常在 0.2~0.3 nm,不能充分发挥窄线宽激光器的精密波长调谐能力^[7-8].

π 相移光纤布拉格光栅(π -Phase-shifted Fiber Bragg Grating, π PS-FBG)作为一种典型的非均匀周期光纤光栅,它是在光纤布拉格光栅的栅区特定区域引入相移量,从而在其反射谱阻带中打开带宽极窄的透射窗口^[9].这种独特的光谱特性,使其在超声检测等动态信号的传感中具有很好的应用前景.如 WU 等采用 2 个级联的 π PS-FBG 作为声探测传感器,超声检测灵敏度比 FBG 传感器提高了 30 dB,同时为了消除光功率噪声,在提高检测信号振幅的同时,采用平衡探测器同时检测反射光和透射光来消除超声传感系统中的主要噪声^[10].WANG 等用相移光栅搭建了玫瑰花形和阵列式超声传感网络进行超声检测^[11],对兰姆波在复合材料

收稿日期:2021-09-30;**修回日期:**2021-11-14.

基金项目:国家自然科学基金(52076145;U1810129;11904252);山西省重点研发计划(201803D121090;201803D31077);山西科技厅青年科技研究基金(201801D221017);山西省高等学校优秀青年学术带头人(2018);山西省高等学校科技创新项目(2019L0612);应用光学国家重点实验室开放基金(SKLAO--201902);“1331 工程”研究生教育创新计划经费(2019SY500);太原科技大学博士启动金(20162039).

作者简介:郭古青(1986—),男,山西阳泉人,太原科技大学副教授,博士,研究方向为新型材料表征方法, E-mail:2016035@tyust.edu.cn.

通信作者:邱选兵, E-mail:qiuxb@tyust.edu.cn.

层板上的全方向传播进行了探索^[12].SRIVASTAVA和DAS总结了 π PS-FBG传感器比传统的光纤布拉格光栅传感器在灵敏度和解调方法等方面的优越性^[4],进一步说明了 π PS-FBG作为传感器的美好应用前景.

目前利用激光探测超声的方法较多,但均存在成本高、设备复杂或适用性差等问题,基于 π PS-FBG的激光超声方法有望突破以上限制,但研究尚处于起步阶段,相关研究成果较少,所以本文拟采用 π PS-FBG作为传感元件,通过研究不同程度应变作用下光栅中心波长位移量、探测灵敏度等特性,设计一种由 π PS-FBG和可调谐分布式反馈(Distributed Feedback,DFB)激光器构成的低成本、小型化、适用极端环境的 π PS-FBG超灵敏激光超声传感器.

1 π PS-FBG 传感原理

相移光纤布拉格光栅是一种分布在光纤中的布拉格反射器,在结构上只是在光纤纤芯中周期性地改变一定长度的折射率.

如图1所示, π PS-FBG在周期结构的中心引入了 π 相移跳变,这导致 π PS-FBG反射光谱中出现一个狭窄的光谱缺口; π PS-FBG反射光谱中形成的光谱缺口位置即为布拉格波长

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_0, \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ_0 为光栅周期.当

π PS-FBG受到超声波冲击时,光纤所受的机械应变会通过弹光效应改变光栅周期和光纤折射率,使布拉格波长发生偏移;因此,通过监测 π PS-FBG的谱移就可以得到所受应变,所以在进行应变测量时,要着重检测 π PS-FBG反射光谱中心波长的位置变化情况.

对于光栅的中心波长的变化^[13]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \frac{\Delta L_B}{L_B} + (\alpha_n + \alpha_A)\Delta T, \quad (2)$$

式中, λ_B 表示光栅中心波长, $\Delta\lambda_B$ 表示光栅中心波长变化量, L_B 表示光栅长度, ΔL_B 表示光栅长度的变化量, ρ_e 表示弹性光学系数;热光系数用 α_n 表示,热膨胀系数用 α_A 表示.当忽略温度影响时, $(\alpha_n + \alpha_A)\Delta T$ 不再存在,(2)式可化成

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \frac{\Delta L_B}{L_B}. \quad (3)$$

因此,通过监测超声波引起的 π PS-FBG传感器反射光谱中心波长的位移量 $\Delta\lambda_B$ 则可以表征出光栅所感应的应变大小,进而实现监测超声波变化的功能.

2 π PS-FBG 超声传感器结构及解调原理

超灵敏超声传感器的系统结构图如图2(a)所示,为了提高探测信号的强度和灵敏度,本文采用了激光光源解调法.由可调谐分布式反馈激光驱动板驱动1550 nm激光器产生光源,光源通过光纤分束器进入 π PS-FBG,光栅感应到应变时反射光谱中心波长会发生偏移,承载着外部物理信息的反射光谱信号被平衡光电探测器(Balanced photodetector,BPD)测量,把外部应变变化量转化为电信号进行数据收集.

激光光源解调法是利用可调谐分布式反馈(Distributed feedback,DFB)激光器等光源对光栅波长进行解调的方案,根据光电探测器得到的光栅反射或透射光功率以电压漂移的形式表示超声波信号,可表示为^[14-15]

$$V_s = \Delta\lambda_B G R_D I, \quad (4)$$

式中, V_s 为探测交流信号电压, G 为光栅光谱的斜率, R_D 为光电探测器的响应因子, I 为输入激光功率.探测信号电压与光栅光谱斜率以及输入激光功率成比例关系,因此可以采用具有陡峭光谱斜率的 π PS-FBG作为超声应变敏感器件来提高探测信号的强度和灵敏度.

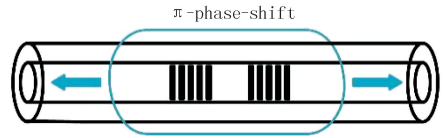


图1 π PS-FBG示意图

Fig.1 Schematic diagram of π PS-FBG

图 2(b)中阴影部分表示 π PS-FBG 的反射光谱与可调谐激光光谱的重叠区域,当 π PS-FBG 接收到超声信号时,光栅感应到应变折射率会改变,其中心波长随之发生偏移,从而导致光谱重叠面积改变,阴影部分面积的变化即为传感器输出电压信号的变化.在测量之前,可调谐激光器的中心波长应调谐到光谱的准线性范围,即 π PS-FBG 反射光谱左瓣 3 dB 点斜率最大处,此时可以更灵敏的测量共振光谱的微小变化,可调谐激光技术提供了更好的测量灵敏度,适用于超高分辨率动态应变测量^[16].

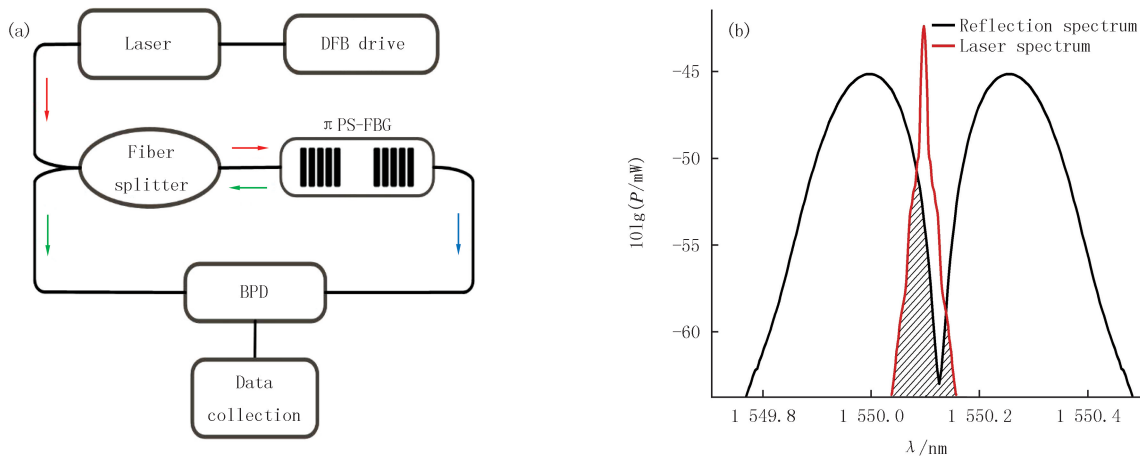


图2 传感器结构图(a)和解调过程示意图(b)

Fig.2 Structure diagram of π PS-FBG sensor(a), Schematic diagram of demodulation process(b)

3 π PS-FBG 超声传感器的静态特性

3.1 实验装置与方法

为了测试 π PS-FBG 的静态特性,以及其相比传统 FBG 的灵敏度优越性,按图 3 所示搭建了实验系统.激光光源部分由宽带光源和可调谐分布式反馈激光器组成;压电陶瓷管激励部分由信号发生器和高压放大器组成;信号检测部分由压电陶瓷管、应变片、静态电阻应变仪、平衡光电探测器、示波器和光谱仪组成.在压电陶瓷管激励部分,信号发生器产生的激励信号先经过高压放大器放大,然后激发压电陶瓷管产生不同程度的应变,最后由静态电阻应变仪测量出应变程度.激光光源部分产生的激光分别经过 FBG 和 π PS-FBG 得到对应反射光谱,同时紧密粘贴在压电陶瓷管表面的传感器会感应到相应的应变并转换成相应的光信号的变化,传输到光谱仪以测量出光谱中心波长的变化.在信号检测部分采用具有窄线宽反射峰的 π PS-FBG,结合可调谐 DFB 激光器,构建超

声传感器感应超声应变,最后通过 BPD 对传感器的反射和透射激光功率信号交流耦合,抑制激光噪声强度的同时放大被检测信号的交流分量.

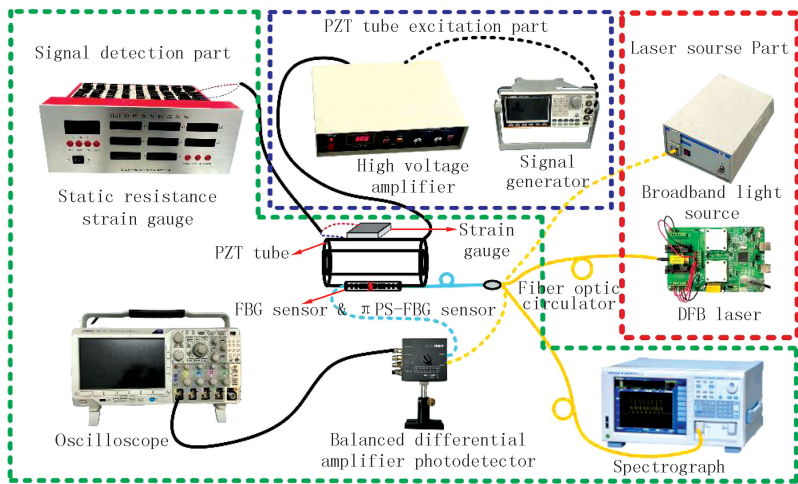


图3 π PS-FBG超声传感器静态特性实验示意图

Fig.3 Experimental diagram of static characteristics of π PS-FBG ultrasonic sensor

声传感器感应超声应变,最后通过 BPD 对传感器的反射和透射激光功率信号交流耦合,抑制激光噪声强度的同时放大被检测信号的交流分量.

3.2 实验过程与结果

实验首先采用宽带光源测试了 π PS-FBG 和 FBG 超声传感器的静态特性,然后比较了两种传感器波长随应变变化的灵敏度.通过改变高压放大器的电压激励压电陶瓷管,可使粘贴在压电陶瓷管上的应变片产生 0 到 $10^{-4}\epsilon$ 的应变.该压电陶瓷管加压后在径向和轴向 2 个方向上都能产生伸缩形变.当施加正电压时,应变为负应变,反之则为正应变.逐步增加激励电压使应变从 $10^{-6}\epsilon$ 开始,步长为 $2 \times 10^{-6}\epsilon$,记录每个应变下 FBG 和 π PS-FBG 反射光谱中心波长的变化;再逐步减小电压使应变由大到小变化,以完成一次试验的正反行程中心波长数据的测量.重复上述实验过程 3 次,计算得到 FBG 反射光谱中心波长随应变的变化关系: $\delta_{\lambda-\epsilon} = \Delta\lambda_B / \Delta\epsilon = 0.334 \ 3 \ \mu\text{m}/\epsilon$, π PS-FBG 为 $0.658 \ 2 \ \mu\text{m}/\epsilon$,变化关系线性拟合曲线的线性度均大于 0.998,且 2 种光栅反射光谱中心波长随着应变增大向短波段漂移.由于宽带光源本身光功率和反射信号强度较低,解调系统的信噪比难以提高,相应的波长分辨率也受到限制^[17].

图 4 为 DFB 激光解调法中的电压响应随应变的变化趋势,正反行程线性拟合曲线斜率平均值分别表示 FBG 和 π PS-FBG 电压响应随应变变化关系,斜率值($\delta_{v-\epsilon} = \Delta v / \Delta\epsilon$)分别为 $13.215 \ \text{kV}/\epsilon$, $125.655 \ \text{kV}/\epsilon$.实验中,设置窄带激光中心波长初始位置为 FBG 和 π PS-FBG 光栅反射光谱左瓣 3 dB 点处.但由于两者反射光谱的不同,FBG 随着应变的增大频谱重叠区域逐渐增大, π PS-FBG 先缓慢减小,然后线性递减再逐渐增大.FBG 和 π PS-FBG 反射光谱中心波长对电压响应的灵敏度($\delta_{\text{FBG}} = \delta_{v-\epsilon} / \delta_{\lambda-\epsilon}$)分别为 $39.530 \ \text{GV}/\text{m}$, $190.907 \ \text{GV}/\text{m}$.可以看出, π PS-FBG 的响应灵敏度为普通 FBG 的 5 倍.电压响应的正反行程曲线存在小幅度的波动,其原因可能是实验环境中温度变化引起发射光谱中心波长发生微小的偏移,然而其变化较小且缓慢,实验所测得的数据与真实值基本保持一致,线性拟合曲线的线性度也均大于 0.96.

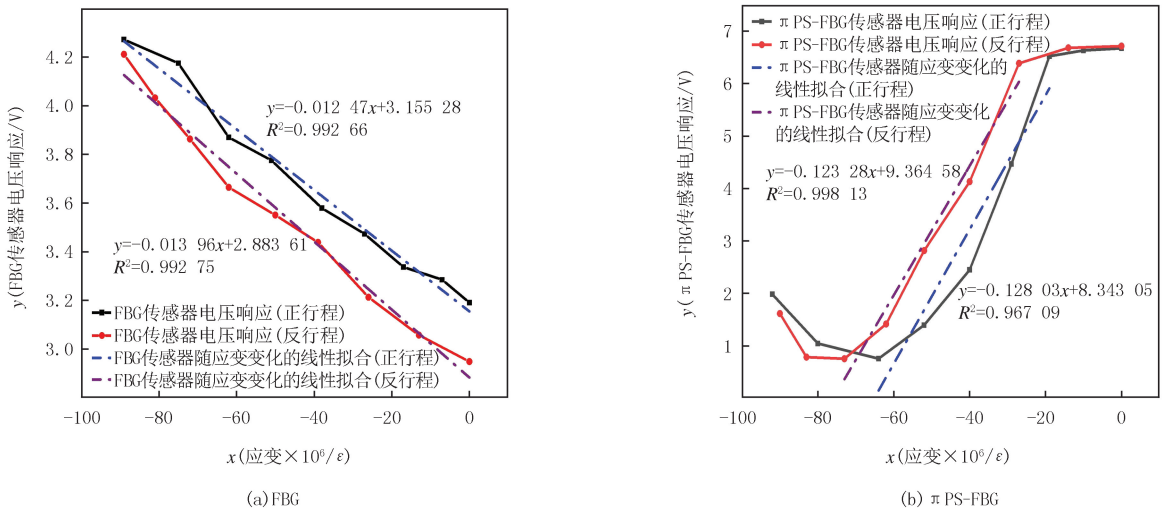


图4 DFB激光解调时电压响应随应变变化的线性拟合曲线

Fig.4 Linear fitting curve of voltage response with strain during DFB laser demodulation

4 π PS-FBG 传感器对超声的动态响应

4.1 实验装置与方法

图 5 为验证 π PS-FBG 超声传感器的动态响应特性的实验示意图.整个系统主要分为 PZT 超声激励部分和 π PS-FBG 传感器平衡光电探测部分.在 PZT 超声激励部分,将 10 个周期的正弦波信号经 Hanning 窗调制得到能减少频谱泄漏且能量集中的单频信号,将该信号导入信号发生器(固维 AFG-3051 型)作为激励信号,再通过功率放大器(T&C Power Conversion, Inc)放大后,驱动压电片产生超声波.实验试件选用对激光吸收率较高 6061 铝合金板,整体规格为 $200 \ \text{mm} \times 100 \ \text{mm} \times 10 \ \text{mm}$.超声压电片和 π PS-FBG 分别粘贴在距离无缺陷试件正中心点 $12.5 \ \text{mm}$ 的左右 2 侧,为了便于对比,传感压电片与 π PS-FBG 并排紧密粘贴.

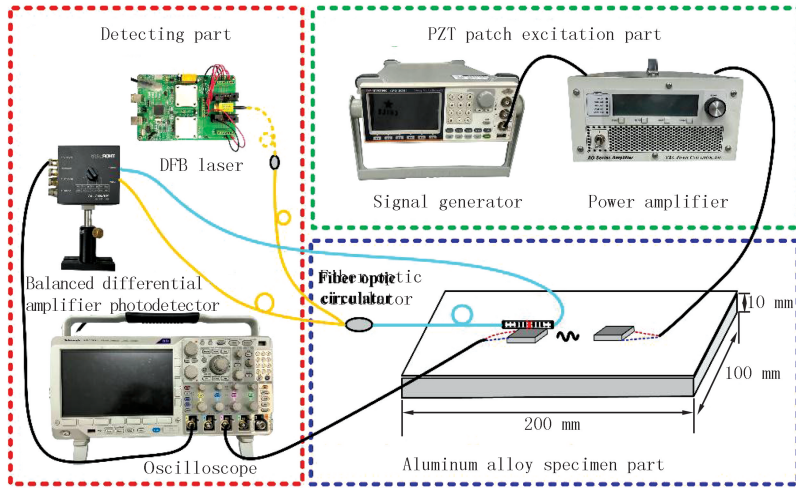
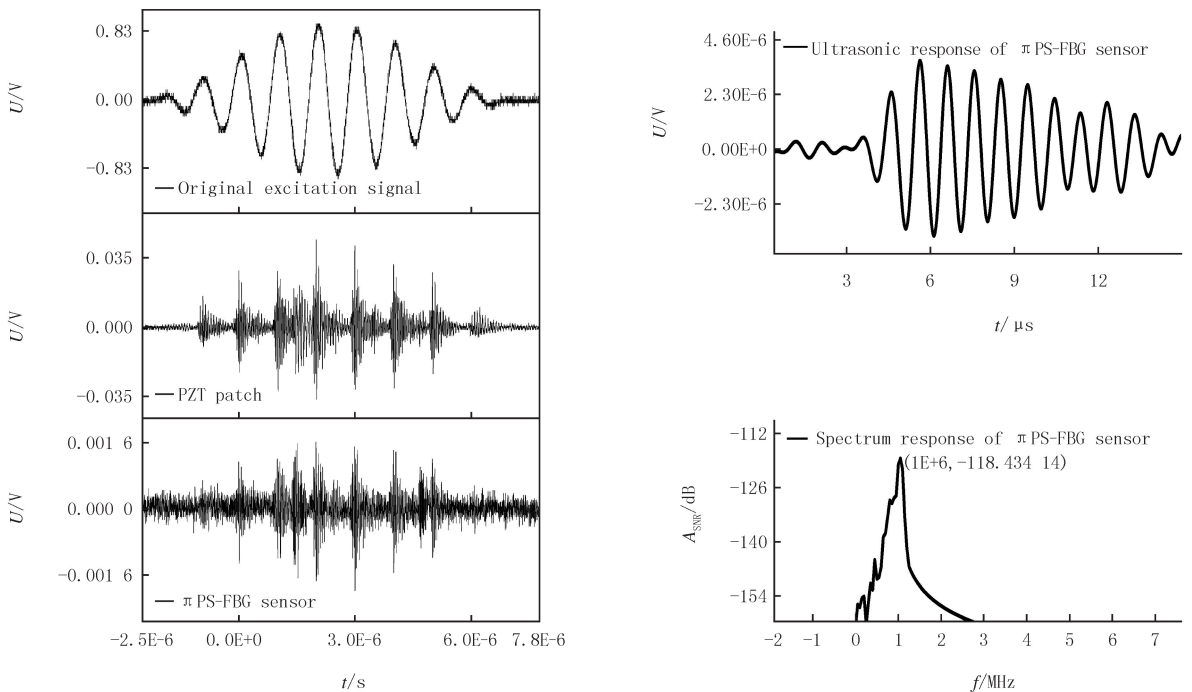


图5 π PS-FBG超声传感器动态响应实验示意图

Fig.5 Experimental diagram of dynamic response of π PS-FBG ultrasonic sensor

4.2 实验结果与讨论

通过观察图 6(a)可发现 π PS-FBG 与 PZT patch 传感器掺杂了较多的低频干扰噪声(相同相隔时延条件下),且混叠了功率放大器等电子仪器的高频噪声.噪声水平约为 0.01 mV,对比 π PS-FBG 静态灵敏度 (125.655 kV/ ϵ),可以得到对应的响应应变 $\Delta\epsilon = \Delta v / \delta_{v-\epsilon} = 79.583 \times 10^{-12} \epsilon$,这是该系统超声诱导的最小可检测应变.PZT patch 采集到的超声响应信号持续时间较长,压电片本身的振荡作用虽然导致压电片采集到的信号幅值较大,却不能真实反馈响应信号本身的特征,以致在时域出现较大误差.



(a) 原始数据图

(b) 去噪处理后时频谱

图6 1 MHz单频信号激励时的超声响应信号

Fig.6 Ultrasonic signal excited by 1 MHz single frequency signal

为了更直观地观察 π PS-FBG 传感器采集的超声响应信号特征,采用小波降噪结合带通滤波器去除高低频噪声,并通过快速傅里叶变换(FFT)算法对其进行频谱分析.图 6(b)为 π PS-FBG 传感器探测到的经去噪

处理后的时间响应信号和频谱响应信号, π PS-FBG 传感器能清晰的展示出激励源信号的波形结构且与压电片接收结果保持一致,峰-峰值电压约为 3.36 mV,其对应的响应应变为 $\Delta\varepsilon = \Delta v / \delta_{v-\varepsilon} = 26.740 \times 10^{-9} \varepsilon$,即 π PS-FBG 传感器可以较稳定地检测出 $10^{-9} \varepsilon$ 级别的超声应变,同时可以明显观察到 1 MHz 的响应频谱信噪比可达到 118 dB.

为了进一步探究 π PS-FBG 传感器频率响应灵敏度(信噪比)对每个频率的依赖关系,将激励源信号从 1 MHz 到 5 MHz 频率范围内以 0.5 MHz 为步长,驱动 PZT patch 产生超声波,然后分别将 π PS-FBG 与 PZT patch 传感器探测到的超声响应信号用相同的去噪方法处理,最后由响应频谱的振幅得到信噪比与频率之间的关系,如图 7 所示.拟合曲线表明 π PS-FBG 对 1~5 MHz 高频的响应灵敏度在 105 dB 以上,其在整个频率变化范围内的波动保持在 19 dB 以内.PZT patch 传感器的灵敏度波动(32 dB)比 π PS-FBG 传感器要大,主要是由于压电片的谐振性造成的固有误差,所以相对于 PZT patch 传感器, π PS-FBG 传感器具有更稳定的超声频率响应灵敏度.

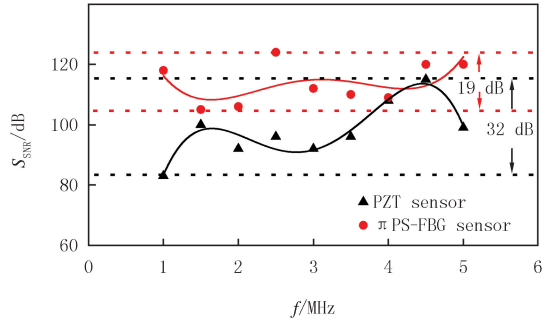


图7 π PS-FBG传感器和PZT patch传感器的频率响应灵敏度对频率的依赖性关系

Fig. 7 Dependence of frequency response sensitivity of π PS-FBG and PZT sensor on frequency

5 结 论

本文提出了一种结构简单、成本较低、探测性能良好的 π PS-FBG 超灵敏激光超声传感器,其电压响应灵敏度为 190.907 GV/m,对 1~5 MHz 高频的响应灵敏度在 105 dB 以上,其在整个频率变化范围内的波动保持在 19 dB 以内,且能够实际有效的检测到超声作用下 6061 铝合金板材上产生的 $10^{-9} \varepsilon$ 应变级的超声信号.实验结果表明,本文所提出的基于 π PS-FBG 的超声传感器可达到很高的灵敏度,有望为极端环境中金属构件的服役性能状态精确检测提供了一条可行的途径.

参 考 文 献

- [1] GUO J J, YANG C X. Highly stabilized phase-shifted fiber Bragg grating sensing system for ultrasonic detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(8): 848-851.
- [2] MARQUES C A F, ANTUNES P, MERGO P, et al. Chirped Bragg gratings in PMMA step-index polymer optical fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 500-503.
- [3] ZHANG Q, LIU N, FINK T, et al. Fiber-optic pressure sensor based on Γ -phase-shifted fiber Bragg grating on side-hole fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1519-1522.
- [4] DEEPA S, DAS B. Interrogation techniques for π -phase-shifted fiber Bragg grating sensor: a review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 315: 112215.
- [5] HE Y X, YANG Q, SUN S P, et al. A multi-point voltage sensing system based on PZT and FBG[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117: 105607.
- [6] BALL G A, MOREY W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser[J]. Optics Letters, 1992, 17(6): 420-422.
- [7] PEREZ I, CUI H, UDD E. High frequency ultrasonic wave detection using fiber Bragg gratings[EB/OL]. [2021-08-09]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.889.4461&rep=rep1&type=pdf>.
- [8] 陶鹏, 武向农. π 相移光纤布拉格光栅的应变传感特性研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2019, 48(1): 86-90.
TAO P, WU X N. Research on strain sensing characteristics based on π -PSFBG[J]. Journal of Shanghai Normal University(Natural Sciences), 2019, 48(1): 86-90.
- [9] 王正方, 王静, 隋青美. 动态应变场下相移光栅光谱特性及实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 4113-4119.
WANG Z F, WANG J, SUI Q M. Research on the phase-shifted fiber Bragg grating spectra under dynamic strain fields[J]. Spectroscopy

- and Spectral Analysis, 2016, 36(12):4113-4119.
- [10] WU Q, OKABE Y. High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system[J]. Optics Express, 2012, 20(27):28353-28362.
- [11] WANG R, WU Q, XIONG K, et al. Phase-shifted fiber Bragg grating sensing network and its ultrasonic sensing application[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(21):9790-9797.
- [12] 侯美江, 田晶. 基于 π 相移光栅的温度传感特性研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11):50-52.
HOU M J, TIAN J. Study on temperature sensing characteristics based on π -PSFBG[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(11):50-52.
- [13] HE Z Y, LIU Q W, CHEN J G. Ultrahigh resolution fiber optic strain sensing system for crustal deformation observation[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7):074208.
- [14] YU J Y, LI C L, QIU X B, et al. A full-optical strain FBG sensor for in situ monitoring of fatigue stages via tunable DFB laser demodulation[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(3):1-12.
- [15] WU Q, OKABE Y, YU F M. Ultrasonic structural health monitoring using fiber Bragg grating[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(10):3395.
- [16] 刘琳霞, 徐利, 王晴岚. DFB 半导体激光器啁啾系数的测量[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(6):34-38.
LIU L X, XU L, WANG Q L. Measurement of the chirp parameter in DFB semiconductor laser diode[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(6):34-38.
- [17] 崔巍, 苏建加, 姜培培, 等. 基于可调谐半导体激光器的高分辨率多路复用光纤光栅波长解调系统[J]. 光子学报, 2016, 45(7):0706003.
CUI W, SU J J, JIANG P P, et al. High-resolution multiplexed fiber Bragg grating wavelength interrogation system based on tunable LD[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7):0706003.

Research on ultra-sensitive ultrasonic sensor based on π phase-shifted fiber Bragg grating

Guo Guqing, Yin Mengke, Yu Junya, Qiu Xuanbing, Li Chuanliang

(Shanxi Engineering Research Center of Precision Measurement and Online Detection Equipment,
School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at addressing the problem that the structural health monitoring of metal components in extreme environments such as high temperature, high pressure, and nuclear radiation, an ultra-sensitive laser ultrasonic sensor based on π phase-shifted fiber Bragg grating (π PS-FBG) is proposed. The sensor used a single-mode distributed feedback (DFB) laser in the low-cost communication band (1 550 nm) as the light source, improving the signal-to-noise ratio of detection by using a π PS-FBG as ultrasonic strain sensitive device, and combined with balanced differential detection method which significantly suppresses the laser light source noise, detector noise or electronic noise. Taking linear piezoelectric ceramic tube as excitation source and traditional strain gauge as reference, the relationship between central wavelength and strain was compared and measured. Through static experiments, the voltage response sensitivity of π PS-FBG is 190.907 mV/ μ m, which was five times that of traditional FBG. The dynamic response characteristic experiment shows that the frequency response sensitivity of the sensor in the range of 1-5 MHz was less than 19 dB, and the sensitivity was 79.583 μ e. These research results would provide an experimental basis for the structural health monitoring of metal components based on π PS-FBG, and contribute to the further development and application of nondestructive testing technology base on laser ultrasonic in extreme environment.

Keywords: ultrasonic sensor; π PS-FBG; sensor characteristics; laser demodulation

[责任编辑 杨浦 刘洋]