

光纤超声传感器及应用研究进展

乔学光 邵志华 包维佳 荣强周

Fiber-optic ultrasonic sensors and applications

Qiao Xue-Guang Shao Zhi-Hua Bao Wei-Jia Rong Qiang-Zhou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 074205 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.074205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于全相位滤波技术的光纤表面等离子体共振传感解调算法

Optical fiber SPR sensing demodulation algorithm based on all-phase filters

物理学报.2017, 66(7): 074202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074202>

用于气象观测的阵列式温度传感器流体动力学分析与实验研究

Fluid dynamic analysis and experimental study of a temperature sensor array used in meteorological observation

物理学报.2016, 65(9): 094209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094209>

分布式光纤 Sagnac 干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法

Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer

物理学报.2016, 65(4): 044210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044210>

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究

Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor

物理学报.2015, 64(6): 064213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064213>

一种基于微波谐振测量 Sagnac 效应的新方案

A new scheme of measuring Sagnac effect based on microwave resonant

物理学报.2015, 64(4): 044205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044205>

专题: 光纤传感

光纤超声传感器及应用研究进展*

乔学光[†] 邵志华 包维佳 荣强周[‡]

(西北大学物理学院, 西安 710069)

(2016年9月22日收到; 2017年2月25日收到修改稿)

光纤超声传感器通过检测光纤内传输光的强度、波长、相位、偏振态等参数感知超声波的相关信息. 相比于传统的电类超声换能器, 光纤超声传感器能够实现宽频带超声波信号的高灵敏探测, 且其良好的抗干扰能力和复用性, 可有效地提高超声波探测的可靠性和效率, 在水下国防安全、生物成像、无损探伤、地震物理模型成像等领域具有巨大的应用潜力. 目前, 按照传感结构, 光纤超声传感器可分为光纤强度调制型、光纤干涉型和光纤光栅型, 并在不同方面发挥着各自的优势, 均受到关注. 本文主要综述了这几种传感器的传感机理、实现方法、发展现状, 总结了光纤超声传感器的几个应用领域及面临的科学技术挑战, 重点讨论了光纤超声传感器作为一种新技术应用于地震物理模型成像.

关键词: 光纤超声传感器, 光纤强度调制型, 光纤干涉型, 光纤光栅型

PACS: 42.81.Pa, 07.07.Df, 87.63.dh, 81.70.Cv

DOI: 10.7498/aps.66.074205

1 引言

超声波是一种广泛地应用在海底探潜、成像和结构健康监测等领域的重要的工具, 特别是对于不透明介质, 深层的穿透能力使其成为一种优良无损检测技术^[1-10]. 迄今为止, 超声波主要感测方式的核心元件仍然为压电换能器 (piezoelectric transducer, PZT), 将超声波信号转换为电压信号传输至解调单元, 其探测机理如图 1(a) 所示. PZT 表现出如下特点: 由于 PZT 是基于机械共振的方式感知超声波, 因此其响应频带决定于自身的结构, 表现出极窄的带宽; PZT 的方向性决定于其接收端面的几何结构, 针对不同的声波特点, 如表面波、体波等, 需要设计不同的探针结构; PZT 适合于目标结构的单点探测, 复用性较差, 多点同时检测将极大地增加系统的复杂性; 环境电磁干扰一直是困扰 PZT 稳定工作的难题, 且超声波信号远距离传输受制于传输电缆的性能和长度, 不利于实现远程监测. 尽管人们已尝试利用其他电类方式替代

PZT, 试图解决超声波探测出现的问题, 但效果不明显, 目前超声波探测仍然以 PZT 技术为主.

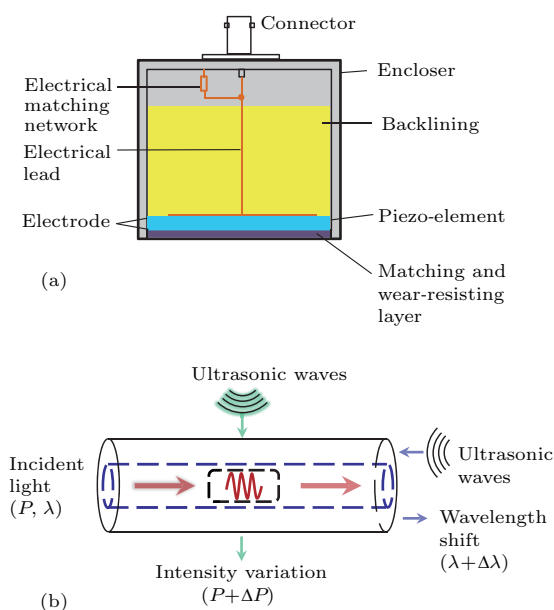


图 1 (a) PZT; (b) 光纤超声传感器传感机理
Fig. 1. Sensing mechanisms: (a) PZT; (b) fiber-optics ultrasonic sensor.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61275088, 61605159)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA03Z413, 2009AA06Z203)、中国石油集团公司项目 (批准号: 2014B-4012, 230114003) 和陕西省自然科学基金 (批准号: S2016YFJQ0899) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xgqiao@nwu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: qzrong2010@gmail.com

1966年, Kao和Hockham等报道了光纤的光通讯特性, 并研究了光在光纤中传输的调制方法, 这为光纤传感器的出现拉开了序幕. 光纤传感器是基于纤维光学、光电子学、智能材料及微结构加工融合的新型传感检测技术, 与传统常规传感检测技术相比, 具有检测精度高、本质安全、不受环境电磁场干扰; 传感器动态范围大, 适用于宽频带微弱信号检测; 传感系统复用性高, 可实现网络化, 提高信息检测效率; 传感器件耐高温、耐腐蚀, 适合于特殊恶劣环境长期使用. 因此, 研究新型光纤传感器在诸多领域具有十分重要的科学技术意义和应用价值. 光纤超声传感器作为光纤传感器的一种, 其传感机理主要是通过高速检测光纤内传输光的强度、波长、相位、偏振态等参数感知超声波的相关信息(幅频特性、发射源位置等, 如图1(b)所示), 与传统的常规压电型超声换能器相比较^[11-20], 光纤超声传感器充分发挥了光纤传感器的优势, 特别是在宽频带响应及信号长距离传输保真等方面尤为突出. 目前, 就光纤超声传感器本身而言, 如何提高传感器的灵敏度(高信噪比(signal to noise ratio, SNR)输出)、扩大传感器的频率响应范围(单一传感单元宽频带超声波信息获取)、微型化传感器结构和提高传感器可靠性一直是光纤超声传感器研究的主要方向. 此外, 由于超声波频率大于20 kHz, 常规的低频传感解调技术无法满足探测需求, 针对不同的超声波频段, 可采用相位解调^[21-25]、边带滤波解调^[26-30]、光频率解调^[31-34]等方式获取超声波信号. 为了进一步提高信号的SNR, 解调单元通常会配合光电转换、电信号放大、滤波处理等技术^[35-42]. 相较于PZT, 光纤超声传感器已表现出独特的优势, 表1对比总结了两种器件的性能.

表1 PZT与光纤超声传感器性能对比

Table 1. Comparison between PZT and fiber-optic ultrasonic sensor.

| PZT | Fiber |
|---|-----------------------------------|
| 响应频段窄 | 响应频带宽 |
| 体积大(直径与长度毫米级别) | 体积小、重量轻、可绕曲 |
| 易受电磁干扰 | 不受电磁干扰 |
| 不耐高温 (居里温度, $T_C < 60^\circ\text{C}$) | 耐高温($> 600^\circ\text{C}$) |
| 信号传输稳定性差 ($\sim 10\text{ m}$) | 可在光纤内稳定传输 ($> 20\text{ km}$) |
| 复用性差 | 良好复用性, 多通道同时检测 |
| 无方向识别性 | 超声波矢量传感, 具有方向性 |

综上所述, 开展光纤超声传感器的研究具有重要的科学研究意义、广阔的应用领域, 是当前国际

上声波传感器的研究热点. 从目前已有的研究来看, 光纤超声传感器在30年的发展, 国际上相关报道很多, 且部分已作为水听器成功应用于水下探测^[43-47]. 随着许多物理机理和科学技术问题的逐渐突破, 再加上光纤结构的多样化, 以及日新月异的激光微加工方法和新型智能材料的出现, 为光纤超声传感器的研制提供了创新空间, 也拓展了光纤超声传感器的应用领域, 如结构健康监测和地震物理模型成像等. 本文主要综述了几种光纤超声传感器及其应用研究进展.

2 光纤超声传感器类型

2.1 强度调制型光纤超声传感器

1977年, Nelson等^[48]首次报道了光纤传感器用于动态应变探测, 在此工作中, 光纤弯曲放置于U形装置内(如图2(a)所示), 并将一端固定, 弯曲中间点附近黏贴于薄膜上, 薄膜将环境声波震动传递至光纤, 引起光纤弯曲改变, 进而调制光纤中的光强度, 通过解调单元获得强度变化的幅频特性, 实现频率为1163 Hz的声波探测. 此传感器感知声波的灵敏度和频率决定于光纤的初始弯曲和薄膜的特性, 因此通过后期的改进, 该传感器的性能可以得到进一步提升. 但是, 低的灵敏度及初始弯曲损耗也是该传感器的主要不足. 1979年, Sheem和Cole^[49]提出了一种改进方案, 利用经腐蚀处理的双光纤缠绕制作出耦合器, 由于光纤腐蚀至纤芯, 两个光纤中传输光场出现强共振耦合区, 两束光的相互耦合率决定于光纤重叠区的环境折射率和光纤间隔, 基于此特性, 可灵敏探测声波引起的环境折射率变化及光纤间隔变化, 进而通过解调光强耦合率探测声波信号. 在实验测试中, 该传感器可感测2 kHz的声波信号. 此后也有类似报道进一步证实了该传感机理的可行性^[50,51], 不同的是利用多模光纤替代单模光纤, 增强光场共振重叠, 提高了声波感测灵敏度. 此外, 光纤拉锥的方式也能有效地帮助光纤纤芯中传输的光耦合出包层^[52,53], 如图2(b)所示, 由于光纤锥区保持原有的波导结构, 因此可有效地降低损耗. 两个光纤贴附后同时拉锥, 光纤中的光相互耦合, 形成光纤耦合器, 通过控制拉锥条件, 可以调节光耦合率. 同时光纤锥区对环境振动和折射率极为灵敏, 类似于上述的耦合器, 该光纤器件也可用于声波/超声波(10 kHz—1 MHz)探测, 相关研究已在文献^[54]中报道.

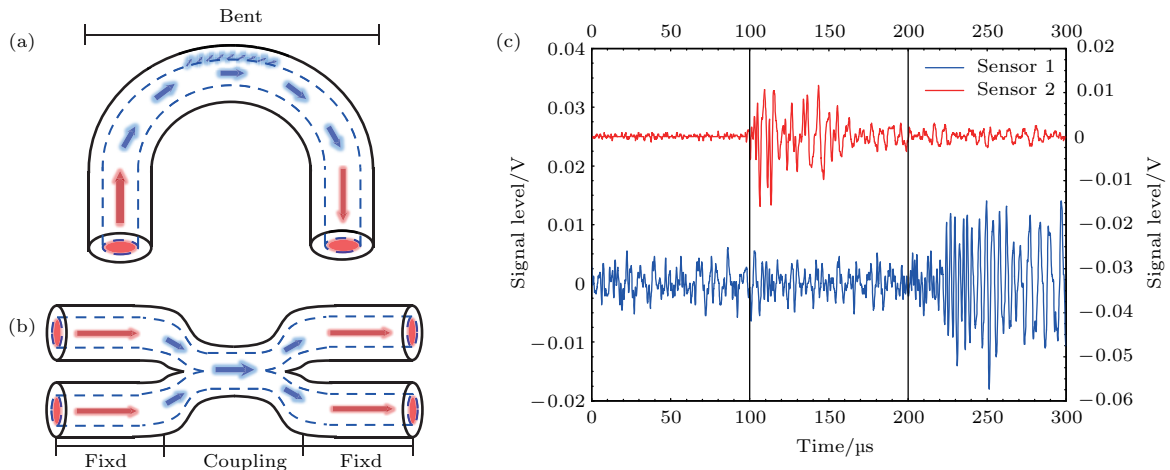


图2 (a) 光纤弯曲损耗型超声传感结构; (b) 光纤耦合损耗型超声传感结构; (c) 光纤耦合损耗型超声传感器时域响应; 引自文献 [48—54]

Fig. 2. (a) Ultrasonic sensor structure based on optical fiber bending loss; (b) ultrasonic sensor based on optical fiber coupling loss; (c) time-domain responses of ultrasonic sensor based on optical fiber coupling loss; from Ref. [48–54].

上述方法主要通过光耦合率感测声波/超声波的幅频特性, 尽管能够实现声波的灵敏探测, 但制作相对复杂, 需要考虑光纤缠绕工艺、腐蚀程度、锥区几何结构等因素. 光反射损耗型光纤传感器可以有效简化光纤耦合器, 且结构更为紧凑. 此类方法可分为两种方式: 传输型 [55–58] 和反射型 [59,60], 如图 3(a)–(c). 对于传输型光纤声波传感器, 需要将两根光纤端面正对, 或打磨成一定角度的斜面后相对时, 会形成一个光耦合区, 光的耦合率决定于两个斜面之间的间隔和位置, 因此一个端面固定, 另一端面感知声波产生的机械运动, 最终通过光反射损耗导致的强度变化感测声波 (图 3(a)). 反射型光纤声波传感器通过将光入射至待测物表面, 然后收集反射光信号强度 (图 3(c)), 此种传感器较高地依赖于物体表面的反射率, 以及物体表面受声波调制的程度. 从结构上看, 后者更为紧凑, 可作为声波探针使用, 但光损耗过大, 影响了信号的 SNR. 在传输损耗型光纤结构的基础上, Spillman 等 [55,57] 将体光纤光栅插入两个光纤端面之间 (图 3(b)), 并作为主动原件, 固定在薄膜 (机械响应声波的变化) 上, 随薄膜移动, 在不同位置, 光纤光栅可表现出不同的衍射效率, 进而改变光的传输. 此方案, 光纤作为传光介质固定, 可有效提高整体结构的稳定性.

此外, 通过改变光的偏振态也可实现光强度的调制. 基于此机理, 人们利用声波/超声波的特性 (声波是一种机械波, 能够引起传输介质形变), 并将其加载至具有双折射特性的传光结构上, 引起其双折射改变 [62–64]. 偏振光通过时, 材料的弹光效

应将有效地调制光强度. 在探测单元, 利用偏振态滤波器将光的两种偏振态滤出后, 分别探测光强度. 由于两种偏振态的正交性, 其光强调制方向相反, 可将两种光强变化叠加, 提高声波探测的灵敏度和 SNR. 尽管此种方式实现了频率 (100 Hz—2 kHz) 的声波探测, 但由于该方案中光调制仅决定于选取材料的弹光效应, 因此可通过优化材料选取, 进一

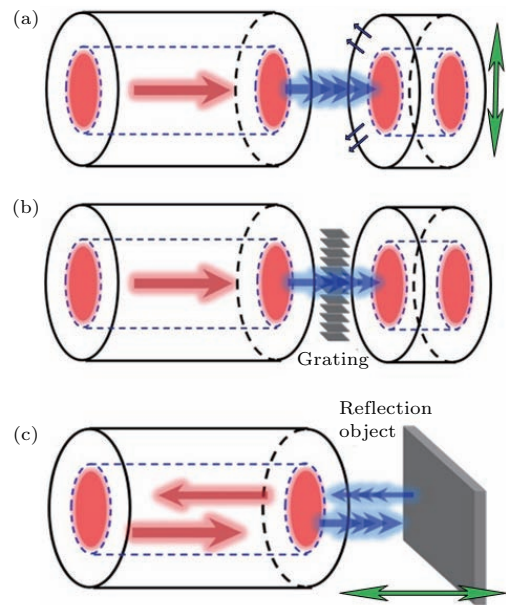


图3 (a) 光纤传输反射损耗型超声传感结构; (b) 光纤光栅传输损耗型超声传感结构; (c) 光纤反射损耗型超声传感器; 引自文献 [55–61]

Fig. 3. (a) Ultrasonic sensor structure based on optical fiber transmission-reflection loss; (b) ultrasonic sensor based on optical fiber grating transmission loss; (c) sensor based on optical fiber reflection loss; from Ref. [55–61].

步提高传感器的灵敏度和频率测量范围, 有助于解决高频声波探测灵敏度低的难题. 上述方案主要是利用偏振态模式之间的转化实现强度调制, 此外, 光纤中模式的耦合和干涉也可作为一种调制光强度的方式, 并应用于声波测量. 例如, 由于光通过多模光纤时, 在光纤内部产生多种模式激发, 它们之间将产生相互耦合和干涉, 即模态干涉, 在输出端可观测干涉散斑图随声波的变化^[65]. 光纤受到环境振动或声波影响, 参与干涉的多阶模式的相位和强度将会扰动, 最终影响干涉效果. 针对此方案, 在解调单元可以通过两种方式实现强度解调: 1) 通过解调干涉相位的变化感测声波的幅频特性, 该方案将在下文中详细阐述; 2) 由于输出光的总强度始终保持不变, 无法通过探测总强度变化获得声波信息, 但可将某一模式的光强度滤出, 其余光强度将会随声波调制发生变化, 进而可通过光强变化感测声波. 此种方案中, 光纤模式对于光纤微应变极为灵敏, 因此在探测声波时具有较高的灵敏度.

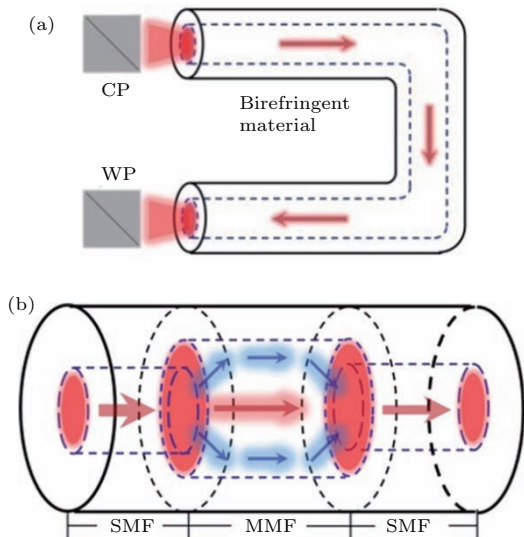


图4 (a) 光纤偏振态损耗型超声传感结构^[66]; (b) 光纤多模干涉损耗型超声传感结构^[67]

Fig. 4. Ultrasonic sensor structure: (a) Optical fiber polarization loss^[66]; (b) fiber multi-mode interference loss^[67].

上述基于光纤强度调制型的声波/超声波传感器主要是此领域前期的一些研究工作, 虽然在探测声波方面已表现出较高的灵敏度及宽频带的响应, 但方案自身存在的不足也限制了其在后期的应用: 1) 光强探测的SNR容易受到光源波动、传感系统稳定性的影响, 导致声波感测稳定性较差; 2) 传感系统自身的光强度损耗较大, 依赖于光纤之间的光耦合、待测物光传输和光反射、传感结构的稳定性等, 最终导致系统感测声波SNR较小; 3) 此类方

案仅适应于单点声波感测, 传感单元复用困难, 无法实现声波/超声波多点同时探测. 为了满足声波高灵敏、超宽频段的感测, 在光纤传感技术发展的基础上, 出现了下述两种类型的光纤超声波传感器技术.

2.2 干涉型光纤超声传感器

光纤干涉结构主要基于两束或多束光波之间的干涉, 并且光波之间的相位差易受光纤应变的影响, 因此可用于感测声波/超声波的幅频特性. 至今, 光纤干涉型声波传感器已发展了30余年, 人们已研制了多种光纤干涉型声波传感器^[68-74]. 按照干涉机理可分为Mach-Zehnder干涉 (Mach-Zehnder interference, MZI), Fabry-Perot干涉 (Fabry-Perot interference, FPI), Michelson干涉 (Michelson interference, MI), Sagnac干涉. 下文中, 重点讨论近些年基于上述几种干涉机理的光纤超声传感器, 探测频率大于20 kHz.

MZI是一种透射型干涉结构. 传统的MZI由两个3 dB光纤耦合器连接构成^[75,76], 两个耦合器分别用于光的耦合和复耦合, 耦合器之间的两根光纤作为干涉臂. 基于MZI的光纤传感器也是最早用于超声波探测的干涉型传感器^[77], 利用传感臂与参考臂之间的拍频信号感测水中超声波信号, 并实现了40—400 kHz的宽频带超声波探测. 随后, Jarzynsk等将传感光纤缠绕成线圈, 利用线圈感测超声波 (100 Hz—50 kHz). 在该方案中, 可以通过改变线圈数改变感测光纤长度. 由于超声波作用于线圈, 可引入表面压力和线圈的形变两种效果叠加, 提高干涉相位调制度, 最终改善传感器的灵敏度. 此文献也通过理论结合实验表明此类干涉计的灵敏度与声波频率相关, 且具有明显的方向相关性. 基于MZI干涉机理, 研究者又分别提出了多种方案用于进一步提高传感器的灵敏度, 例如, 利用多模光纤代替单模光纤作为传感臂^[78,79]、传感光纤埋伏在混合结构里^[80]、改变光纤涂覆层^[81,82]. 但此类传感器存在以下亟待解决的问题: 由于MZI传感单元体积较大, 对于高频超声波响应灵敏度低, 适合于低频超声波感测; 系统的参考臂和传感臂长度较长, 对光纤固定要求高, 须避免低频振动的影响; 复用性差也是该系统的不足之一, 需要进一步优化传感单元结构设计.

光纤MI作为另一种不同于光纤FPI的反射型干涉结构, 是基于相同波长的具有相位差的两束光的干涉. 传统的光纤MI是由3 dB耦合器构

成 [83,84]. 与光纤 MZI 类似, 一根光纤作为参考臂, 一根光纤作为传感臂用于响应声波作用. 在已有的报道中, 光纤 MI 干涉计已作为一种传感器实现了动态应变(振动, 500 Hz)的探测 [85]. 1989 年, Liu 等将光纤 MI 干涉计埋伏在复合材料中, 实现了连续的超声波激励探测, 并表现出宽频带响应特性, 频段主要为 0.1—1 MHz. 近期, 本课题组尽可能地缩短光纤 MI 两臂的长度, 微型化传感器结构, 提高了传感器的稳定性, 并在两臂端面镀上金膜, 提高了传感器的反射率 [86]. 由于此工作主要利用光

纤超声传感器实现地震物理模型成像, 需要传感器具有较高的灵敏度和机械强度, 因此将传感光纤进行腐蚀处理, 减小其直径至 $< 20 \mu\text{m}$, 并将其装置在有机管端面, 构成传感探针. 该传感器最终实现了超声波 (100—300 kHz) 的高灵敏探测. 光纤 MI 干涉计和光纤 MZI 干涉计在结构上具有相似之处, 1998 年, Wen 等 [87] 设计并对比分析了几种光纤 MI 和光纤 MZI 超声传感器结构, 通过优化传感探针, 可实现 MHz 的高频超声波探测, 这种高频的光纤超声波探针有望用于生物医疗成像.

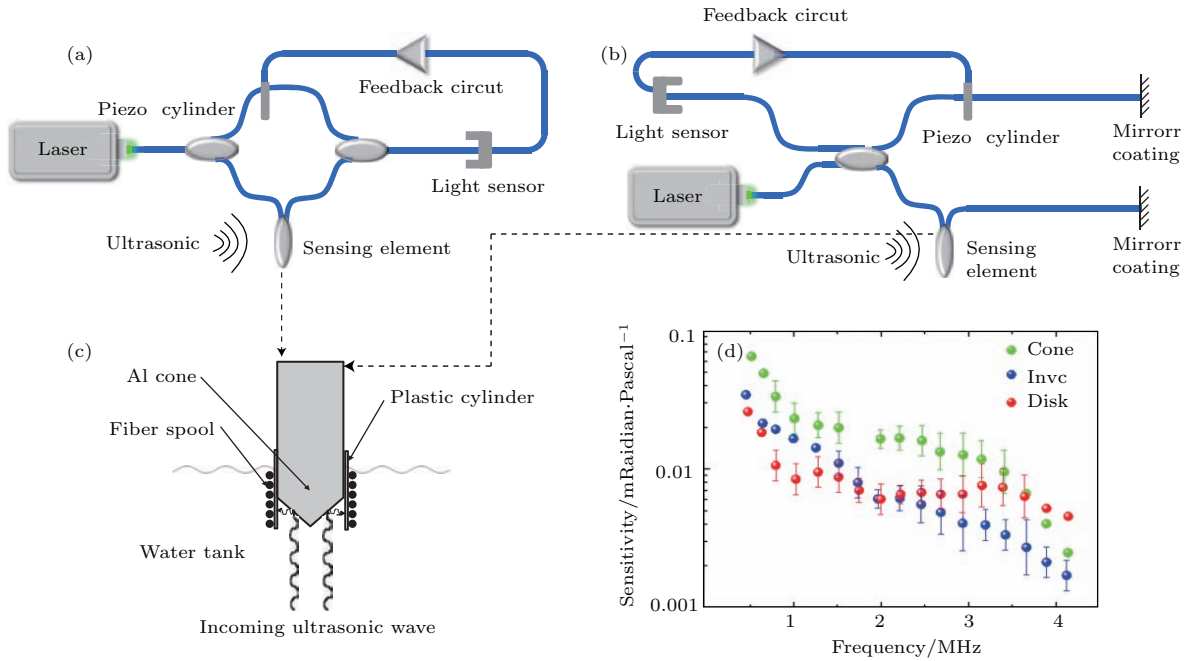


图 5 (a) 光纤 MZI 干涉型超声传感系统; (b) 光纤 MI 干涉型超声传感系统; (c) 光纤超声传感器结构; (d) 光纤干涉计超声波响应频率; 引自文献 [87]

Fig. 5. (a) Ultrasonic sensing system based on MZI; (b) ultrasonic sensing system based on MI; (c) optical fiber ultrasonic sensor structure; (d) ultrasonic frequency response of fiber interferometer; from Ref. [87].

光纤 FPI 作为另一种典型的干涉结构, 由于其稳定性高、结构紧凑和制作简单等优点也引起了研究者的高度关注 [88—90]. 光纤 FPI 主要分为两类: 本征型光纤 FPI (intrinsic Fabry Perot interferometer, IFPI) 和非本征型光纤 FPI (extrinsic Fabry Perot interferometer, EFPI), 如图 6 所示. 该类型的光纤传感结构通过干涉相位感测超声波 [91,92]. 光纤 FPI 制作的关键是构造两个反射面, 反射面可以由光纤自身折射率变化、光纤端面反射、光纤内部嵌入高反射镜面、光纤端面和其他薄膜反射等方式构成.

光纤 FPI, 超声波作用于传感器时, 将产生拉伸应变, 改变干涉腔长, 进而调制干涉相位, 通过解调光相位变化可获取超声波幅频特性 (0.1—5 MHz).

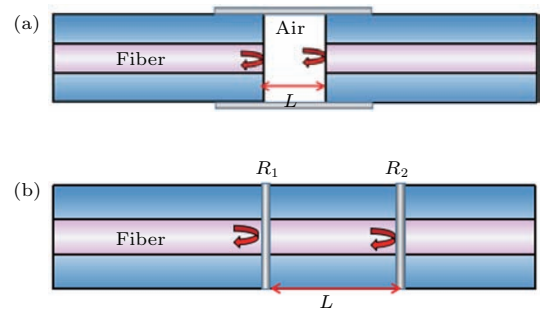


图 6 光纤 FPI 干涉仪 (a) EFPI; (b) IFPI
Fig. 6. Optical fiber FPI: (a) EFPI; (b) IFPI.

该类干涉结构用于感测超声波时, 其响应灵敏度和频带决定于自身结构和材料. 例如, Alcoz 等 [93] 在连续单模光纤内引入 TiO_2 反射面, 构成

但由于光纤自身杨氏模量较大, 超声波作用时, 光纤动态伸缩应变幅度小, 将严重限制其感测灵敏度. 因此, 通过有机材料代替光纤作为干涉腔体, 可以有效提高传感器的灵敏度. 2009年, Morris等^[94]利用聚对二甲苯-C有机材料制作出光纤FPI水听器, 并实现了宽频带超声波的高灵敏测量(10—40 kHz). 在该技术方案中, 光谱边带滤波技术用于解调超声波信号, 为了消除环境温度变化对系统稳定性的影响, 采用了伺服单元实时补偿温度的影响, 提高系统的稳定性. 为了进一步提高光纤FPI的灵敏度, 并简化结构, 人们结合光纤与薄膜材料构成干涉计^[95-98]. 由于薄膜厚度可小至纳米尺度, 因此与光纤直径相当的薄膜受声压作用极易发生形变, 进而改变腔体长度, 调制干涉相位. 在传感器制作过程中, 可以根据探测需求(频段、灵敏度)等选择不同的薄膜材料, 如有机薄膜、银膜、金膜、石墨烯薄膜等^[79,88,95-99].

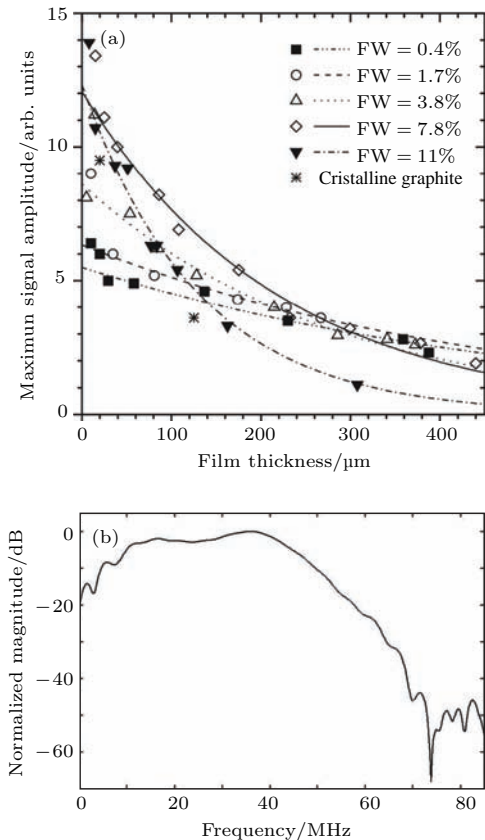


图7 (a) 薄膜厚度对光纤 FPI 传感器超声波响应的影响; (b) 超声波响应频带; 引自文献^[99]
 Fig. 7. (a) Ultrasonic response of optical fiber FPI sensor under different film thickness; (b) ultrasonic response frequency band of optical fiber FPI; from Ref. ^[99].

Sagnac干涉结构是基于光波偏振态之间的干涉. 传统的Sagnac干涉结构由3 dB耦合器尾

纤连接的环形光纤光路构成, 为了提高反方向传输的两束光的相位差, 通常在环形光路上加入一段保偏光纤 (polarization-maintaining fiber, PMF) 或高双折射 (Hi-Bi) 光纤 (如图8所示)^[100-104]. 由于PMF中光的偏振态容易受到光纤应变的影响, 进而改变干涉相位, 因此基于PMF的Sagnac干涉结构经过环绕集成后作为陀螺仪和检波器用于导航和地震勘探^[105,106]. 针对声波探测, Udd也已报道了系列光纤Sagnac干涉计, 利用传感光纤线圈中光相位和偏振态调制获得声波信号, 传感机理如图8(b)所示. 探测的声波频率依赖于线圈的尺寸, 例如, 直径1 cm的线圈可实现小于200 kHz的声波探测. 在声波探测过程, 该系统中需要引入偏振态相关器件提高光信号的稳定性, 但同时也增加了系统的复杂程度.

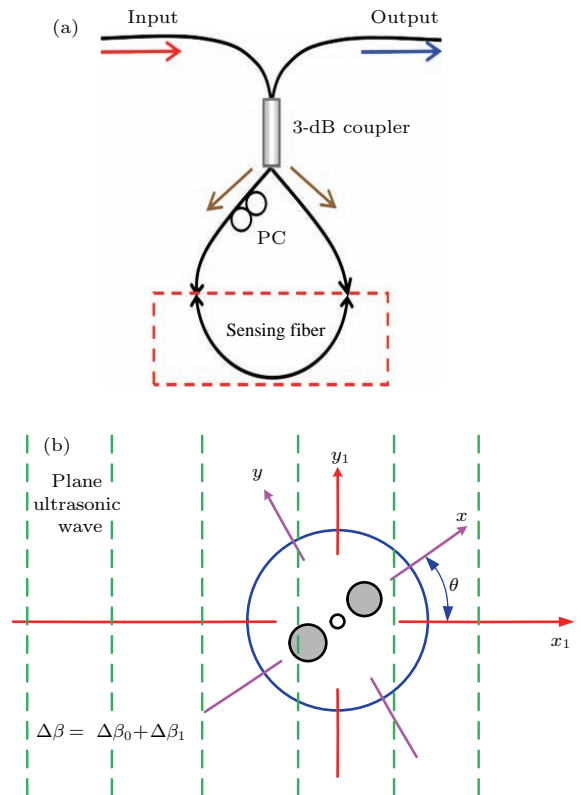


图8 (a) 光纤 Sagnac 干涉型超声传感器结构; (b) PMF 超声传感机理
 Fig. 8. (a) Ultrasonic sensor structure based on optical fiber Sagnac interference; (b) ultrasonic sensing mechanism of PMF.

除了上述几种典型的光纤干涉型超声传感器之外, 人们基于光纤模态干涉方式提出了其他类型的光纤干涉型超声传感器^[107-111], 该类传感器利用多模干涉强度感测超声波引起的光纤形变, 并通常将传感光纤贴附在薄膜表面, 提高感测灵敏度. 例如, 2016年, Sun等^[111]报道了一种基于单

模-多模-单模光纤结构的非接触式超声波传感器. 通过实验测试和优化传感器结构, 可在空气中实现距离为 7 m、频率为 25 kHz 的超声波感测, 并且在 6 mm 的测量范围内, 传感器的精度可达到 0.1 mm.

此部分主要综述了系列光纤干涉型超声传感器, 相比于光纤强度调制型光纤超声传感器, 此类传感器的结构更加紧凑, 特别是光纤 FPI 干涉型传感器, 探测频带更宽, 解调方式更加丰富. 但不可避免的问题是此类传感器同时对其他物理量具有较高的灵敏度(如: 温度、低频应变等参量), 超声波探测过程中将会产生严重的低频干扰, 因此需要在解调系统中配合信号放大、滤波、去噪等技术, 提高 SNR. 此外, 复用性也是此类方案亟待解决的难点问题. 时分复用技术可用于声波探测位置判断^[87,112-114], 但同时点与点之间需要较长的光纤产生时间延迟, 极大地增加了系统的复杂程度, 多个干涉型传感器的级联及超长的传输光纤将引起较大的光损耗和信号的不稳定.

2.3 光纤光栅超声传感器

1978 年, 加拿大通信研究中心的 Hill 等^[115]发现了光纤的光敏性, 并利用可见的氩离子激光照射一种掺锗的石英光纤, 刻写出了第一根光纤 Bragg 光栅 (fiber Bragg grating, FBG). FBG 超声传感器是基于共振波长的变化感测超声波^[116-120]. 1996 年, Webb 等^[121]首次报道了基于 FBG 的超声传感器, 并实现了频率为 950 kHz 的超声波探测. 次年, 该课题组进一步优化了解调技术, 利用非平衡干涉区分技术, 实现了 10 MHz 的超声波探测, 并且在实验中探讨了 FBG 的长度对超声波探测的影响. 在后续的报道中, 人们进一步从理论和实验方面确定了 FBG 长度和超声波探测灵敏度之间的关系(图 9 所示): 当 $\lambda_s/L < 1$ 时 (λ_s 为超声波波长, L 为 FBG 长度), 超声波作用于 FBG 的应力场呈正弦分布, 对栅区的拉伸和压缩作用互相抵消, 超声波的作用可以忽略; 当 $\lambda_s/L = 1$ 时, 超声波波长与 FBG 长度相同, 导致 FBG 长度改变, 引起 FBG 反射谱形状和波长均发生变化; 当 $\lambda_s/L \gg 1$ 时, 作用在 FBG 上的超声波为常量, 因此 FBG 反射谱波长发生漂移而形状保持不变. 因此, 超声波检测时, 光纤光栅长度选择要尽可能小于超声波波长.

Takahashi 等^[122-125]基于波分复用技术利用双 FBG 同时探测超声波 (20 kHz), 实验结果表明

两个 FBG 具有很好的独立性, 且配合相位解调技术, 可以确定超声波作用点位置. 随后该课题组成功地利用 FBG 在水中实现了超声波的多点探测^[126-132], 且空间分辨率可达到 1 mm (空间分辨率决定于 FBG 长度, 此工作中 FBG 长度为 24 mm). 该工作很好地证实了 FBG 超声传感器的复用性. 此外, 由于 FBG 的线形结构, 对超声纵波响应具有明显的方向性, 沿光纤方向的灵敏度远大于其他方向, 如图 10 (a) 所示^[10], 因此通过结合三个 FBG, 并以一定角度摆放, 可以感测 2D 超声波, 分析不同 FBG 的超声波响应信号, 可以判断超声波源位置^[133]. FBG 超声传感器应用于无损检测、漏液检测等方面时, 超声波与材料的耦合, 以及超声波在结构内部转换等都将影响传感器的性能, 因此随着 FBG 超声传感器的应用发展, 出现了大量有关超声波-封装材料-光纤相互作用的文献报道^[134-139].

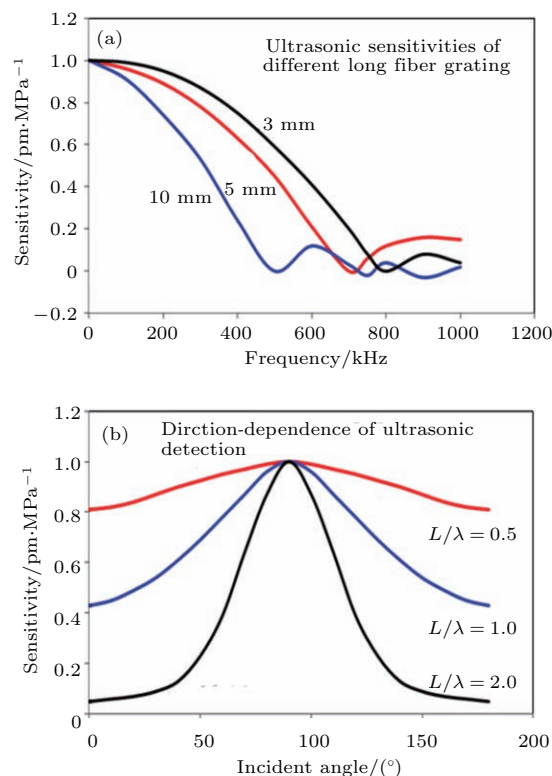


图 9 (a) 光纤光栅长度与超声波响应灵敏度; (b) 超声波检测方向相关性

Fig. 9. (a) Ultrasonic sensitivities of different long fiber gratings; (b) direction-dependence of ultrasonic detection.

为了简化解调系统, 近期多数光纤超声传感器利用光谱边带滤波或波长匹配滤波技术将光信号转化为电压信号^[140-144], 但是环境温度变化和低频振动将引起较大的光谱漂移, 进而影响超声波

感测的SNR. 为了解决此问题, 目前已报到的文献主要集中在 FBG 波长自动控制探测系统^[145-148]. 近期, Liu 等^[149] 利用波长匹配滤波的方式实现了温度不相关的超声波探测, 选择长度不同 (5 mm 和 20 mm) 的两个共振波长匹配的 FBG, 由于在高频探测时, 长 FBG 对超声波不灵敏, 短 FBG 具有高灵敏性, 同时两个 FBG 对温度响应相同, 因此可有效消除温度的影响. 但此技术方案对 FBG 的制作要求较高, 需要考虑 FBG 的共振波长匹配.

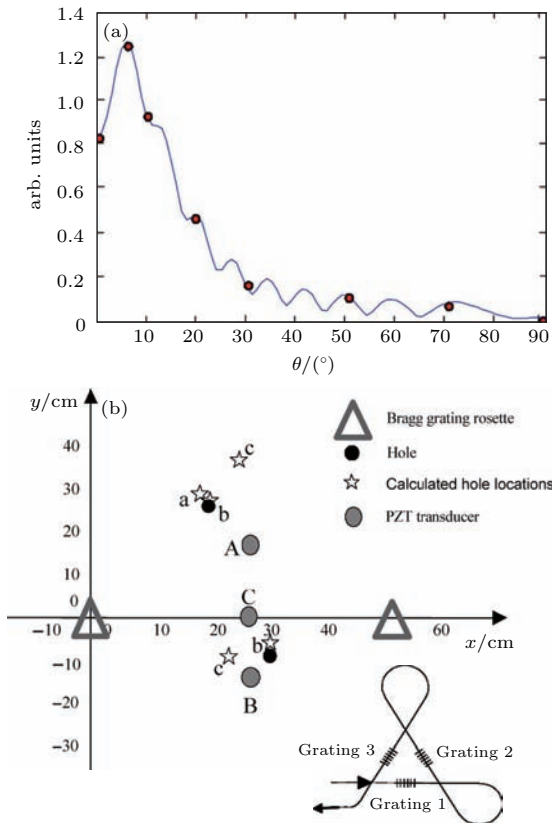


图 10 (a) 对于 270 kHz 超声波集成传感器的不同角度和极性响应^[10]; (b) 实验测定铝板上孔的位置^[133]
 Fig. 10. (a) Varying angle and polar response of the integrating sensors for an ultrasonic frequency of 270 kHz^[10]; (b) experimental determination of the holes locations in an aluminum plate^[133].

上述基于光谱边带滤波的超声波传感技术的灵敏度依赖于光谱边带的斜率, 由于相移光纤光栅 (phase-shifted fiber Bragg grating, PS-FBG) 的共振光谱中可以出现极窄的相移峰, 3 dB 光谱带宽可以压窄至 8 pm^[150-153], 如图 11 (a) 所示, 因此可以替代 FBG 作为一种高灵敏超声波传感元件. 2011 年, Rosenthal 等^[154] 报道了基于 PS-FBG 的光纤超声传感器, 窄线宽激光波长固定在相移峰的光谱线性边带上, 实现了频率为 10 MHz 超声波的高灵敏测量. 2012 年, Wu 和 Okabe^[155] 将窄线宽

激光固定在相移峰线性边带上, PS-FBG 传感器的反射和传输的光功率在平衡光电检测器 (balanced photoelectric detector, BPD) 的两个端口输出, 采集超声波作用后的两个信号并做相减处理, 最后输入解调单元. 此方案中, BPD 主要功能是抑制激光强度噪声, 消除直流分量并进一步放大检测信号中的交流分量, 该系统的灵敏度可达到 $9 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$. 类似于传统波长匹配滤波方式, 可将两个波长相近的 PS-FBG 级联, 一个作为参考光纤光栅, 一个作为传感光纤光栅, 也可实现超声波的高灵敏测量, 但是这对光纤光栅本身要求比较高, 需要严格控制光纤光栅写制技术, 获得相移峰可匹配的 PS-FBG 对. 2014 年, Guo 等^[156] 开展了基于 PS-FBG 的光纤超声传感器研究, 并利用 2D 扫描装置移动传感探头, 对多层有机玻璃板模型、弧形有机玻璃板模型进行了层析成像, 与传统的 PZT 成像效果相比较, 光纤超声波成像结果表现出了更高的空间分辨率.

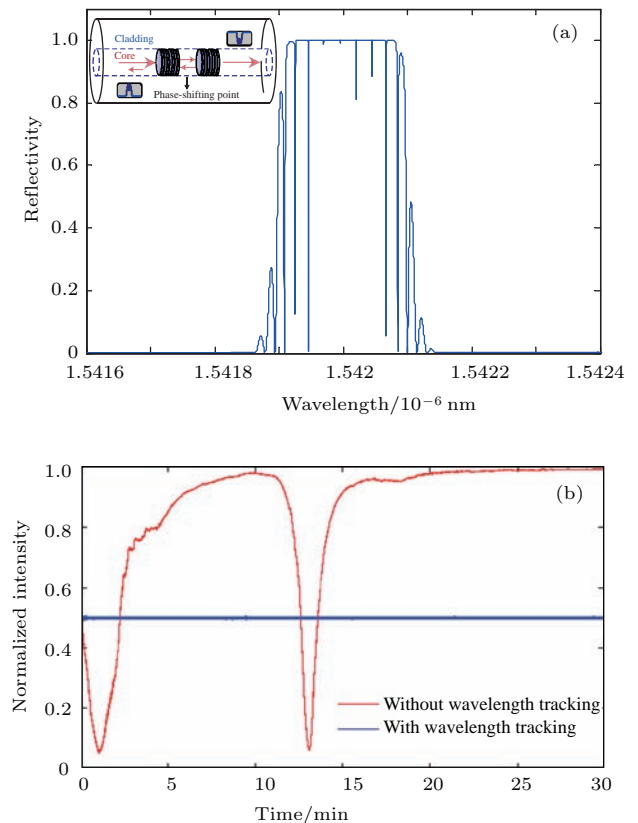


图 11 (a) PS-FBG 反射谱^[156]; (b) 无诱导超声波时归一化强度随时间变化 (观察时间为 30 min), 红线为无波长跟踪 PS-FBG, 蓝线为波长跟踪^[6]
 Fig. 11. (a) Reflected spectrum of the PS-FBG^[156]; (b) normalized intensity changing over time in observation for 30 minutes without ultrasound induced, red curve is PS-FBG without wavelength tracking, blue curve is with wavelength tracking^[6].

上述超声波探测均为光纤无源传感方式, 光信号由白光光源、激光光源等提供. 不同于上述技术, 在高掺杂增益光纤上写制光纤光栅可构成分布式反馈光纤激光器 (distributed feedback fiber laser, DFB) 作为传感元件 [157], 获得窄线宽、高功率的激光输出. 2004 年, Wierzba 和 Karioja [158] 利用在高掺铒光纤上写制的 FBG 构成 DFB, 此激光器中 FBG 作为传感元件, 另一根 FBG 作为参考元件, 共同构成水下声压传感系统. 由于 DFB 的激励方式有效压窄了 FBG 反射波长带宽, 提高了整个传感检测的光谱分辨率, 进而提高了 SNR. 此外, 在高掺杂增益光纤上写制两个波长匹配的 FBG, 可构成分布光纤光栅反射式 (distributed Bragg reflector, DBR) 激光器, 优化腔体结构, 可获得稳定的单一偏振态拍频分量, 高频声压 (MHz) 能够在声波方向上引起光纤折射率改变, 调制光纤自身的双折射, 因此, DBR 激光器对高频超声波具有灵敏性 [159]. 2012 年, Guan 等 [160] 综述了基于 DBR 激光器在传感方面的应用, 并阐述了 DBR 激光器在高频超声波 (10—100 MHz) 探测的优越性, 如图 12 所示.

此部分主要综述了几种基于 FBG 的光纤超声传感器, 同其他类型的光纤超声传感器相比较, FBG 超声传感器具有突出的优点: 其波长是绝对参量, 编码方式可靠, 测量结果不受光源功率波动或传输链路损耗起伏等因素影响, 抗干扰能力强; 此外, FBG 反射波长带宽窄, 易于复用, 可在一根光纤上级联多个光纤光栅构成传感网络, 实现多点准分布式超声波测量, 如图 13 (b) 所示. 相比于光纤干涉型超声传感器复用系统, 例如光纤 MZI 干涉计 (如图 13 (a) 所示), FBG 的复用系统明显简化, 且复用性提高. 总之, FBG 超声传感器在制作工艺、系统稳定性、大规模网络化等方面均具有明显的技术优势, 具有重要的研究价值和应用潜力.

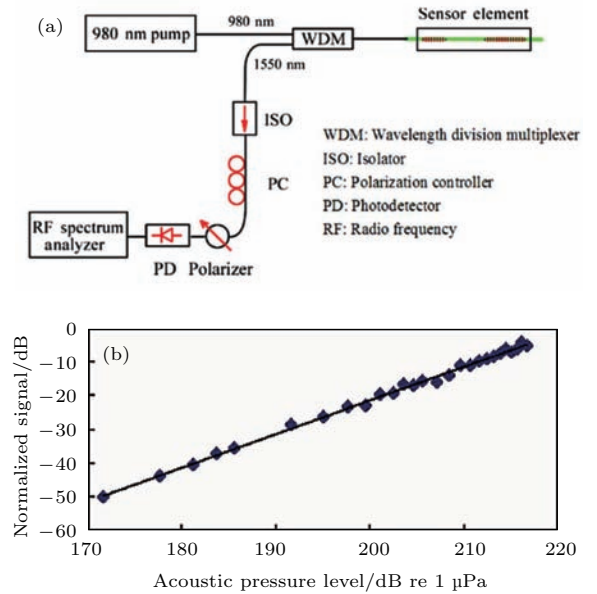


图 12 (a) 外差传感器拍频信号测量实验装置; (b) 一阶边带大小随超声波压力 (10 MHz) 的变化; 引自文献 [160] Fig. 12. (a) Experimental setup for beat signal measurement for the heterodyning sensors; (b) magnitude of the first-order sideband versus ultrasound pressure level at 10 MHz; from Ref. [160].

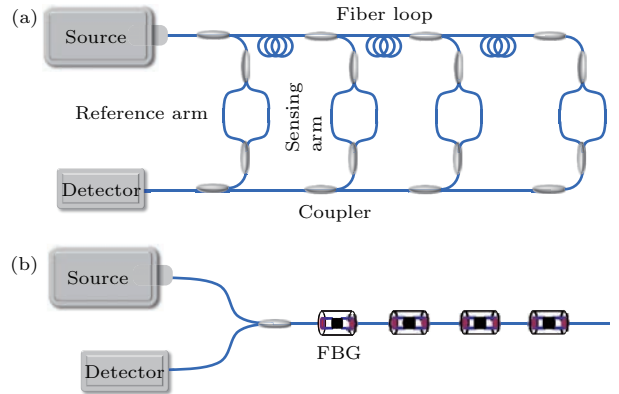


图 13 (a) MZI 干涉型光纤超声传感器复用方案; (b) FBG 超声传感器复用方案; 引自文献 [17] Fig. 13. Multiplexing scheme of ultrasonic sensor based on: (a) MZI; (b) FBG; from Ref. [17].

表 2 光纤超声传感器性能对比 Table 2. Comparison among fiber-optic ultrasonic sensors.

| 光纤超声传感器类型 | 超声传感器 | 测试距离/cm | SNR/dB | 响应频带/Hz |
|--------------|-----------------------------|---------|--------|-------------------|
| 强度调制型光纤超声传感器 | 单一光纤型超声传感器 [161,162] | 10 | 48 | 2×10^5 |
| | 熔锥型光纤超声传感器 [109,110] | 10 | 44 | 3×10^5 |
| | PMF 超声传感器 [163-165] | 近场检测 | 50 | 2×10^6 |
| 干涉型光纤超声传感器 | 光纤 FPI 型 [166-169,72,94-96] | 20-40 | 62.21 | 6×10^8 |
| | 光纤 MI 干涉型 [170-172,26,85] | 10 | 42 | 3.5×10^6 |
| | 光纤 MZI 干涉型 [173,4,5] | 10 | 45 | 1×10^7 |
| | 光纤 Sagnac 干涉型 [174,175,68] | 10 | 45 | 6×10^6 |
| 光纤光栅超声传感器 | FBG, PS-FBG [176-179,155] | 10 | 90 | 1×10^6 |
| | DFB, DBR 激光器 [180,181] | 9 | 105 | $> 2 \times 10^7$ |

上文中综述了多种类型的光纤超声传感器,不同的传感器之间表现出较大的性能差异,如在结构、灵敏度、频率范围、复用性等方面.为了更为直观地比较不同类型光纤传感器感测超声波的特性,表2从多个方面总结了上文中几种类型的光纤超声传感器性能指标.

3 光纤超声传感器的应用

光纤超声波检测技术是目前国际上智能结构与健康监测研究领域中的热点问题之一,提供了一种评价固体材料的微观组织及相关力学性能、检测其微观和宏观不连续性的有效通用方法.下面主要介绍光纤超声传感器在结构健康监测、生物医疗成像、地震物理模型成像三个应用方面的研究进展.

3.1 光纤超声波无损检测技术

无损检测技术是结构健康监测的有效手段,以保证材料质量和实现质量控制.超声波探伤是目前应用十分广泛的无损检测技术,通过研究超声波在被检工件中的传播情况来检测材料的结构和性能,广泛应用于铁路、冶金、造船、机械制造等工业.Kageyama等^[182,183,162]将弯曲缠绕光纤的多普勒效应用于钢筋混凝土结构的声发射损伤检测中,利用弯曲光纤的多普勒效应分析了钢筋混凝土内裂纹的产生和传播.测试中将25个传感器阵列分布于轨道梁的上下表面,成功检测到了10—200 kHz的声发射信号,检测灵敏度与传统PZT相当,但光纤传感器表现出更宽的频带响应.Lee等^[184,185]开展了基于FBG的超声波传感检测研究,并通过优

化光纤传感结构及扫描技术对组合材料的结构损伤进行了成像.同时,该课题组利用该技术通过检测频率为250 kHz的超声波经液体后强度的变化,模拟实现了液体泄漏检测.此外,Takeda和日立电缆有限公司研究了一种小直径FBG用于碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)和胶合结构件的超声波损伤检测,如图14所示.发射源产生的兰姆波沿样品传播,FBG传感器黏附于样品表面,通过解调FBG波长漂移来重建材料损伤状况.当兰姆波在CFRP脱层损伤区传播时,FBG检测到兰姆波表现出最大振幅减弱,同时有新的波形生成,可以从新波形模式的振幅比和到达时间估算出脱层长度.2007年,Tsuda等^[185]首次使用FBG超声传感器对金属材料疲劳裂纹的检测.该方案中,主要对18Cr-8Ni不锈钢的疲劳裂纹进行检测,相对于样品的完整区域,疲劳裂纹处的超声波响应明显表现出时间延时.测试表明,FBG超声传感器检测损伤的分辨率及位置信息要优于PZT.同年,Betz对光纤超声传感器结构健康监测的方向性及损伤定位进行了研究,提出了基于FBG的结构损伤检测和定位系统.该方案中,利用钻孔的铝质材料作为损伤模型,利用FBG构成玫瑰花结形结构,由于FBG具有很好的定向性,可以得到反射声波的方向信息,同时综合另外两个FBG的超声波响应,可以定位损伤区域.2008年,Oliveira在材料样品中分别嵌入FBG和FPI,实现了材料完整性的实时监测.Oliveira利用单模光纤端面菲涅耳反射构成的高灵敏FPI进行声发射测量,FBG传感器进行材料低频应变的检测,可探测样品的各个损伤区.

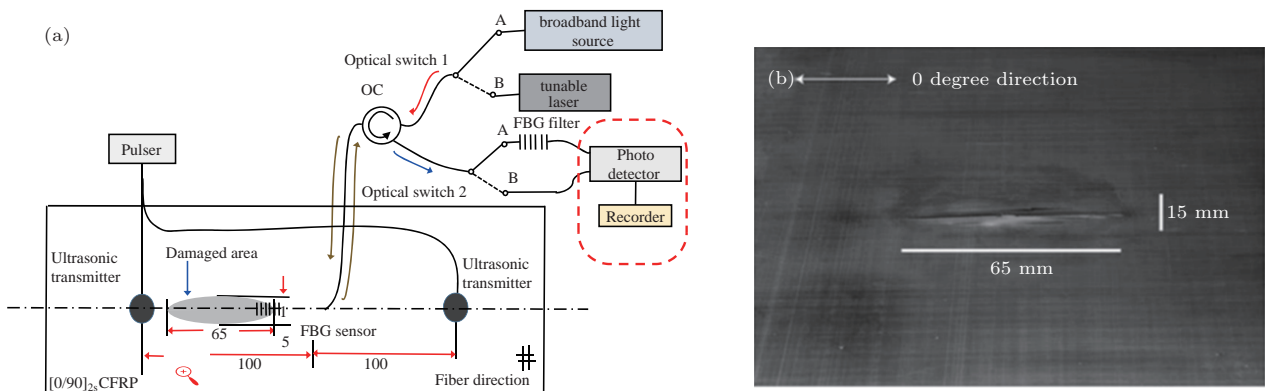


图14 (a) 基于压电传感器(虚线)与基于FBG传感器的超声波无损检测实验装置原理图; (b) 损伤样品实物图; 引自文献^[185]

Fig. 14. (a) Principle diagram of the ultrasonic nondestructive testing experiment devices based on piezoelectric sensor (dash line) and FBG sensor; (b) physical figure of the damage sample; from Ref. ^[185].

3.2 光纤超声波医疗成像技术

超声波可以很好地穿透生物组织, 并携带组织内部结构的信息反射回外部, 分析超声波信号可以获得生物组织内部图像. 传统 PZT 已成功应用在了临床医疗上(B 超), 可获得生物体外表面的结构信息. 但由于 PZT 体积较大无法实现小空间(生物体内部)的高空间分辨率成像, 因此光纤超声传感器可代替 PZT 实现内植式超声波成像^[186,187]. 要实现生物组织的高分辨率成像, 需要高频超声波作为载体(MHz), 其波长将小于 1 mm, 这就要求光纤传感器的结构尺寸在超声波长量级^[188]. 2009 年, Lamela 等^[4]报道了光纤干涉型超声传感器(100 kHz—5 MHz)用于仿生物组织成像, 如图 15 所示. 光纤超声传感器扫描仿生物组织(乳腺组织)的表面, 结合滤波径向投影算法重建其二维图像, 并与光声成像系统的成像结果进行对比, 两套系统在成像分辨率、尺寸、形状、位置上均保持一致. 2014 年, Li 等使用纳米加工技术将半径为 30 μm 的聚合物微环置于厚为 250 μm 的显微镜盖玻片上, 设计了一种基于微谐振环的高灵敏微型光纤超声传感器, 用于光声显微成像. 通过对碳黑薄膜材料的成像, 获得了高纵向分辨率(5.3 μm)的声光显微容积图像, 并量化了像素的大小, 其成像饱和限度高出 PZT 两倍. 微谐振环光纤超声传感器和光声显微成像系统完全兼容, 可与高数值孔径的物镜结合使用, 可应用于生物医学研究和临床诊断等领域.

为了进一步实现小空间范围内生物组织的全光纤超声波成像, 配合部分材料的热致声发射特性, 制作出光纤超声波发射装置^[189,190], 由于此超声波源频率决定于材料, 通常可实现 MHz 级的超声波发射, 满足生物成像对高频声波的需求. 例如, 2002 年, Fomitchov 等^[191]设计了多种光纤发射源, 在光纤端面制作微型的密封室, 其端面是镀有石墨烯薄层的玻璃窗口, 光源激光脉冲能量耦合进入光纤传播, 传输至光纤端面, 并以轻微的损耗通过玻璃窗口传输至石墨烯薄层, 石墨烯因快速的热膨胀而产生超声波. 将密封室的玻璃窗口设计成不同的形式, 可以得到多种发射模式的光纤超声波发射源, 如角度发射、聚焦发射等. 此类型的超声波发射器具有宽超声波频带, 超声波发射方向易控制, 稳定性好, 不受温度等环节扰动的影响等特点. 2013 年, Tian 等^[192]提出了基于倾斜光纤光栅(tilted fiber Bragg grating, TFBG)低阶包层模(ghost mode)的分布式高效光纤超声波产生方式.

TFBG 的 ghost mode 将特定波长的激光耦合出光纤, 配合石墨/环氧树脂吸收材料代替光纤包层, 由于此材料具有较大的热膨胀系数, 将 ghost mode 能量转化为声波形式, 可高效地产生超声波. 此外 TFBG 的 ghost mode 表现出特定波长的窄带宽, 因此多个 TFBG 可以级联, 构成多点超声波发射装置. 上述光纤超声波源可以极大地缩小传统压电型超声换能器的体积, 便于嵌入微小空间内(如生物体组织内), 但目前该类声源主要靠高功率激光器驱动, 系统复杂, 成本较高, 需要进一步改进优化.

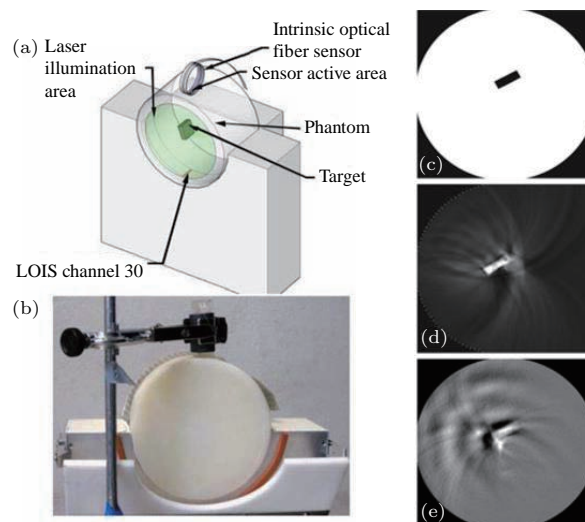


图 15 (a) 样品固定装置结构示意图; (b) 样品固定装置实物图; (c) 样品内部结构示意图; (d) 压电换能器成像图; (e) 光纤传感器成像图; 引自文献^[4]

Fig. 15. (a) Structure schematic of the sample holder device; (b) photograph of the sample holder device; (c) structure diagram of the internal sample; (d) piezoelectric transducer imaging; (e) optical fiber sensor imaging; from Ref. ^[4].

3.3 地震物理模型超声波成像

地震物理模型是按储藏地质结构等比例缩小的模拟结构, 作为一种工具可用于地震波传输及理论预测, 模拟结果具有真实性, 不受计算方法、假设条件的限制, 在近乎理想的岩石模型条件下测量声波的反应. 相较于地震现场, 在实验室搭建地震模型成本低, 且具有很好的重复性、稳定性及可控性. 超声波传感器是获取地震物理模型内部信息的核心器件^[193], 目前仍以传统 PZT 为主. 由于光纤超声传感器具有上述独特的优势, 可代替 PZT 实现高空间分辨率的地震物理模型成像. 近两年, Guo 等^[6]报道了 PS-FBG 超声传感器扫描成像的相关研究. 成像模型为 4 层界面的有机玻璃板和椭圆柱

有机玻璃模型. 相比于PZT地震物理模型成像系统, PS-FBG 光纤超声传感器呈现出高灵敏度及高成像分辨率. 在 200 kHz 的超声波探测频率下, 传感器的响应灵敏度 (SNR) 为 45 dB. 但在实际的地震物理模型成像过程中, 光纤超声传感器仍然需要在高灵敏度、结构微型化、复用性等方面进行改进.

本课题组一直针对地震勘探领域, 研究系列光纤地震检波器和光纤超声传感器 [85,194–197]. 下面主要总结本课题组近几年在此应用领域的研究进展. 光纤超声传感器主要包括 PS-FBG, fiber Bragg grating Fabry-Perot (FBG-FP) 干涉仪, FBG, 空气微泡型 IFPI 干涉仪, 基于金箔的光纤 EFPI 干涉仪, 并配合优化的封装结构和材料, 提高传感器的机械强度和输出 SNR, 微型化传感

器尺寸, 以满足地震物理模型超声波扫描成像的需求. 图 16(a)–(g) 所示为两种光纤探针型光纤超声传感器, 其中图 16(a)–(d) 展示了基于两种 FBG 元件的光纤超声传感器结构: 传统 FBG 和新型 FBG-FP, 光谱图分别如图 16(c) 和图 16(d) 所示; 为了提高 FBG 的超声波感测灵敏度, 且实现稳定的水听式探测, 这里采用铝锥-声波耦合式封装方法, 如图 16(a) 和图 16(b) 所示. 图 16(e)–(g) 所示为一种空气微泡型 IFPI 光纤超声传感器, 利用薄壁空气腔对声压的高灵敏响应, 其光谱优化过程如图 16(g) 所示, 由于该光纤 IFPI 结构尺寸微小, 可感测 MHz 级超声波, 因此主要用于高频超声波探测.

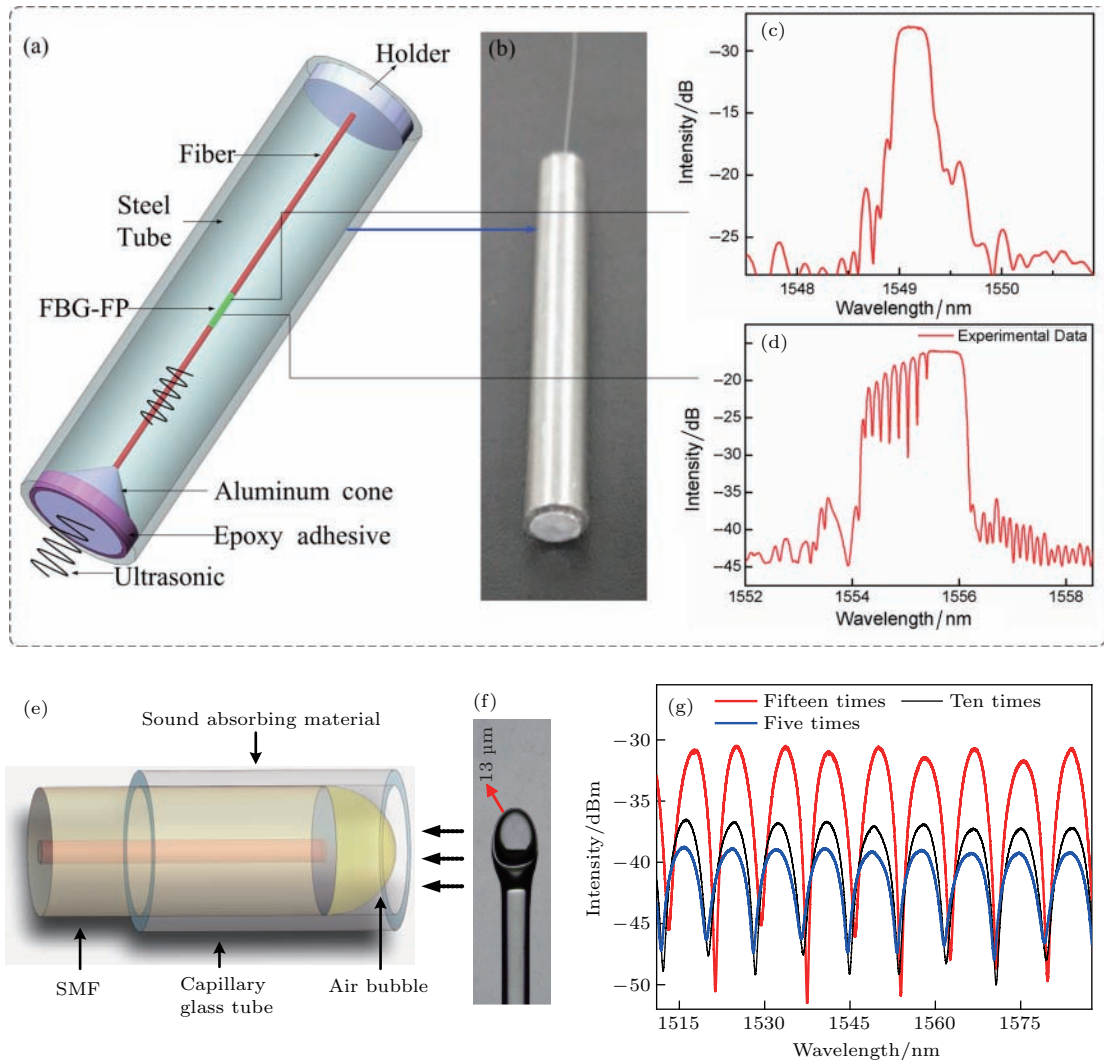


图 16 (a)–(d) FBG 和 FBG-FP 超声传感器及光谱; (e)–(g) IFPI 光纤超声传感器及光谱

Fig. 16. Structure scheme diagram and sensor spectrum: (a)–(d) The FBG and FBG-FP ultrasonic sensor; (e)–(g) optical fiber ultrasonic sensor based on IFPI.

在超声波探测过程中, 为了简化系统, 我们主要采用光谱边带滤波技术解调超声波调制后的光信号. 由于地震物理模型为实际地质结构的等比例缩小, 所需超声波频率为 100 kHz—10 MHz, 并且为了减小损耗和环境温度的影响, 将地震物理模型放置于水中. 针对这些地震物理模型的成像要求, 我们设计并制作了六种光纤超声传感器, 并实现了宽频带超声波感测. 此外, 为了清晰地区分

地震物理模型表面及内部间隙的位置和形状, 超声波源采用脉冲型声波, 后续成像处理主要采用时间渡越算法 (time-of-flight, TOF). 图 17 (a)—(c) 所示为光纤光谱边带滤波检测机理, 及 FBG 和 FPI 光谱随超声波作用发生的漂移. 图 17 (d) 和图 17 (e) 所示为光纤传感器对 300 kHz 和 1 MHz 脉冲超声波的响应信号及其随探测距离的变化.

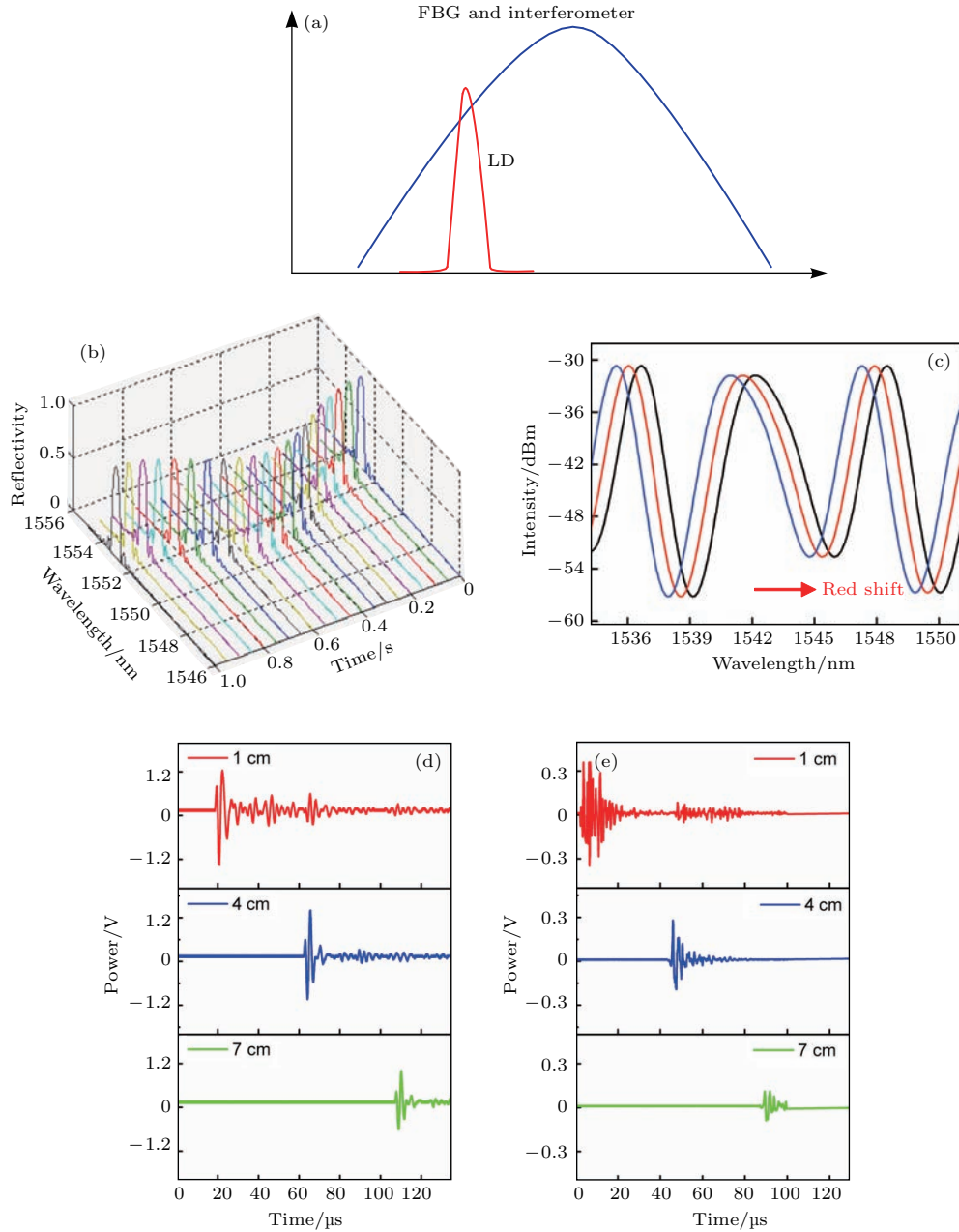


图 17 (a) 光谱边带滤波机理和理论模拟; (b) FBG 光谱随声波漂移; (c) FPI 干涉光谱随声波漂移; (d) 不同距离脉冲声波 (300 kHz); (e) 不同距离脉冲声波 (1 MHz)

Fig. 17. (a) Sideband filtering mechanism and theoretical simulation; (b) wavelength shift of the FBG versus acoustic wave; (c) wavelength shift of the interference spectrum versus acoustic wave; (d) time-domain spectra of ultrasonic response (300 kHz) versus increasing distances between PZT and sensor; (e) time-domain spectra of ultrasonic response (1 MHz) versus increasing distances.

不同的传感器结构表现出不同的 SNR、响应带宽、动态范围等传感特性, 在地震物理模型扫描成像过程中, 可根据成像环境、模型大小、空间分辨率等选择合适的传感器结构. 为了综合对比这几种光纤超声传感器的性能, 我们采用相同的超声波驱动电压 (300 V)、超声波源驱动频率 (300 kHz), 配合光谱边带滤波解调技术, 测试了上述六种光纤超声传感器, 并总结了多项性能指标, 列于表 3.

下面介绍选择基于 FBG 超声传感器的地震物理模型超声波扫描成像的实例. 待测地震物理模型包括两种: 半径为 5 cm 的半圆柱体, 置于宽 50 cm、厚 5 cm 的有机玻璃板上, 模拟垄状地质结构, 如图 18 (a) 所示; 两块方形有机玻璃板错位放置, 模拟断面地质结构, 如图 18 (b) 所示. 两个地震物理模型在测试时均放置于水中, 超声波扫描成像过程为: 传感器探头和 PZT 固定在水面上方的电动位移台上, 其端面均浸于水面, 与水下模型相距 5 cm. FBG 超声传感器和 PZT 间隔 6 cm, 二者以每步 1 mm 的速率沿着导轨滑动, 对模型进行点对点横向扫描, 实时记录探测的回波信号. 根据超声波在有

机玻璃板和水中传输速度不同, 利用 TOF 重建地震物理模型的图像, 分别如图 19 (a) 和图 19 (b) 所示. 图像中可清晰地分辨模型的曲面和断面信息, 与图 18 所建实物模型相符合.

表 3 六种光纤超声传感器比较 (300 V, 300 kHz 方波脉冲, 水中测试)

Table 3. Comparisons among the six types of fiber-optic ultrasonic sensors.

| 光纤超声传感器 | SNR/dB | 有效带宽/MHz |
|------------------|------------|----------|
| PS-FBG | 19.55 | 10 |
| FBG-FP [194] | 27.96 | 7.5 |
| FBG | 32.57 | 2 |
| 空气微泡型 IFPI [198] | 24.08 | 80 |
| 环氧树脂薄膜型 EFPI | 45.34 | 1.5 |
| 金膜型 EFPI | 62.21 (空气) | 1 |

备注: ① 基于光纤光栅的超声传感器 SNR 高; ② 光纤与材料结合可有效提高传感器灵敏度; ③ 通过合理有效的封装方式, 传感器灵敏度可以得到大幅提升; ④ 动态范围 90—140 dB

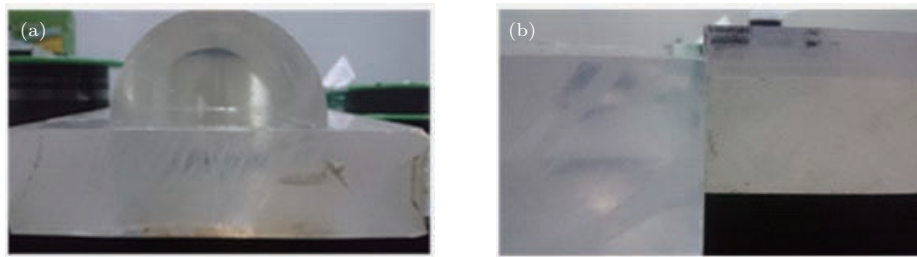


图 18 地震物理模型 (a) 垄状地质模拟结构; (b) 断面地质模拟结构

Fig. 18. Photograph of physical models: (a) Ridge-like bulk; (b) misplaced rectangular bulk.

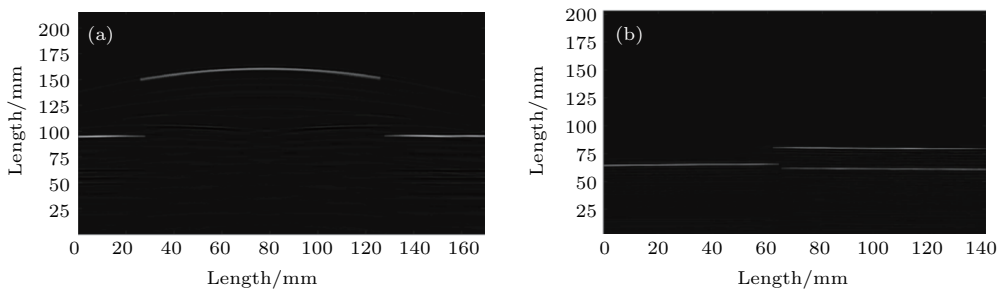


图 19 超声波成像 (a) 垄状地质模拟结构成像; (b) 断面地质模拟结构成像

Fig. 19. Images of two physical models: (a) Ridge-like bulk; (b) misplaced rectangular bulk.

4 光纤超声传感器展望

在近 20 年, 多个研究组已经开展了光纤超声传感器的相关研究, 通过多种光纤传感结构实现了

宽频带超声波探测, 并应用在结构健康监测、生物医疗成像等方面. 但针对地震物理模型超声波成像, 相关光纤超声传感器的报道较少. 因此, 针对这个新的研究方向, 经过几年的探索和研究, 实现了对宽频带超声波信号的高灵敏度、高 SNR 探

测及多种地震物理模型的超声波成像。下一步的工作将继续针对地震物理模型光纤超声波检测的难点,优化光纤超声传感器的性能,发展光纤超声传感器的复用技术,实现传感器的微型化及系统的仪器化,最终形成一套具有自主知识产权的高灵敏度、系统稳定、可组网的光纤超声波检测仪器。关于光纤超声传感器及其在成像领域的应用研究发展趋势总结如下。

1) 传感器性能优化

优化传感器结构及封装,吸收残余超声波,抑制噪声,提高超声波探测 SNR。此外,随着光纤材料及结构日新月异,新的超声波传感机理和方式可进一步优化光纤传感器的超声波探测灵敏度,进而提高超声波成像的分辨率。

2) 传感器微型化

在保证光纤超声传感器灵敏度的基础上,进一步缩小传感器的体积,可有效提高超声波成像的空间分辨率。这就要求:优化光纤光栅制作工艺,获得直径更小、长度更短的高反射率、窄带宽光纤光栅;FPI腔内置于光纤内部(可通过光纤微加工技术实现),缩小 FPI 的体积,但同时需要考虑传感器的响应灵敏度。

3) 传感器复用技术

采用时分复用技术,级联多个光纤超声传感器,均衡分配传感阵列功率,解决各通道传感器间的串扰、低频扰动等对采集信号的干扰问题,提高超声波采集效率。

4) 系统仪器化

光纤超声传感器均要求传感系统具有高集成度和仪器化前景,满足不同实验环境数据采集的需求。在后期工作中需进一步提高整个系统的集成度(激光光源、超声波驱动、数据采集等单元),配合自适应系统,提高各部分的关联性和整体的稳定性。

5 结 论

本文主要综述了几种光纤超声传感器的传感机理、实现方法、发展现状,总结了光纤超声传感器的几个重要应用领域及面临的科学技术挑战,重点讨论了光纤超声传感器作为一种新技术应用于地震物理模型成像。总之,尽管经过近几十年的努力,光纤超声传感器研究方面已取得了可喜的成果,但仍需继续深入相关研究,解决灵敏度、稳定性、结构微型化、复用性等方面存在的诸多问题。

参考文献

- [1] Betz D C, Thursby G, Culshaw B, Staszewski W J 2006 *Smart Mater. Struct.* **15** 1305
- [2] Tsuda H, Lee J R, Guan Y 2006 *Smart Mater. Struct.* **15** 1429
- [3] Fomitchov P A, Kromine A K, Krishnaswamy S 2012 *Appl. Opt.* **41** 4451
- [4] Lamela H, Gallego D, Oraevsky A 2009 *Opt. Lett.* **34** 3695
- [5] Gallego D, Lamela H 2009 *Opt. Lett.* **34** 1807
- [6] Guo J, Xue S, Zhao Q, Yang C 2014 *Opt. Express* **22** 19573
- [7] Wang D H, Jia P G, Wang S J, Zhao C L, Zeng D P, Wang H, Li F Q 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 044102
- [8] Liu T, Hu T, Han M 2014 *Opt. Lett.* **39** 4462
- [9] Kim K S, Mizuno Y, Nakamura K 2014 *Ultrasonics* **54** 1047
- [10] Sorazu B, Thursby G, Culshaw B 2011 *IEEE Sens. J.* **11** 1623
- [11] Liu G G, Sandfort E, Hu L L, Liu T Q, Han M 2015 *IEEE Sens. J.* **15** 2848
- [12] Dan N, Zhao Y 2010 *Transd. Microsyst. Technol.* **29** 72 (in Chinese) [单宁, 赵雁 2010 传感器与微系统 **29** 72]
- [13] Liang Y J, Zhang S, Xu Y D, Deng H 2006 *Opt. Tech.* **32** 507 (in Chinese) [梁艺军, 张森, 徐彦德, 邓虎 2006 光学技术 **32** 507]
- [14] Posada-Roman J E, Garcia-Souto J A, Serrano J R, Nunez I B 2013 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference* Minneapolis, USA, May 6–9, 2013 p1921
- [15] Zhao H, Li M, Wang P P, Zhang Y 2008 *Proc. CSEE* **28** 59 (in Chinese) [赵洪, 李敏, 王萍萍, 张影 2008 中国电机工程学报 **28** 59]
- [16] Zhao H, Li M, Zhang Y, Wang P P 2008 *Opt. Precision Engineer.* **16** 1018 (in Chinese) [赵洪, 李敏, 张影, 王萍萍 2008 光学精密工程 **16** 1018]
- [17] Wild G, Hinckley S 2008 *IEEE Sens. J.* **8** 1184
- [18] Yuan L B 2008 *J. Natural Sci. Heilongjiang Univ.* **25** 827 (in Chinese) [苑立波 2008 黑龙江大学自然科学学报 **25** 827]
- [19] Ma B, Xu J, Sui Q M 2010 *Piezoelectr. Acoustoopt.* **32** 15 (in Chinese) [马宾, 徐健, 隋青美 2010 压电与声光 **32** 15]
- [20] Culshaw B, Thursby G, Betz D, Sorazu B 2008 *IEEE Sens. J.* **8** 1360
- [21] Guo F, Yu C T 1992 *Optical Fiber Sensing Techniques and Applications* (Hangzhou: Zhejiang University Press) p203 (in Chinese) [郭凤珍, 于长泰 1992 光纤传感技术与应用 (杭州: 浙江大学出版社) 第 203 页]
- [22] Wang L, Wang X W 1996 *Electron Measur. Instrum.* **12** 29 (in Chinese) [王琳, 王学伟 1996 电测与仪表 **12** 29]
- [23] Iwamoto K, Kamata I 1992 *Appl. Opt.* **31** 51
- [24] Chapper R E, Dallah R T 1983 *The TAPPI 1983 Annual Meeting* Atlanta, Georgia, March 2–4, 1983 p313
- [25] Deng H Y, Rao Y J, Ran C L 2008 *J. Opt.* **2** 255 (in Chinese) [邓洪有, 饶云江, 冉曾令 2008 光学学报 **2** 255]
- [26] Wu Q, Okabe Y, Iwamoto, Kamata K I 1992 *Appl. Opt.* **31** 51

- [27] Wang S, Lu P, Liu L, Liao H, Sun Y, Ni W J, Fu X, Jiang X Y, Liu D M, Zhang J S, Xu H, Yao Q P, Chen Y M 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 1264
- [28] Lee J R, Tsuda H 2005 *Scripta Mater.* **53** 1181
- [29] Wu Q, Okabe Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 16
- [30] Kim K S, Mizuno Y, Nakamura K 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 080202
- [31] Jang T S, Lee S S, Kim Y G 2004 *Ultrasonics* **42** 837
- [32] Jang T S, Lee S S 2002 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control* **49** 6
- [33] Churgin M A, Liu M, Buma T 2009 *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium Rome, Italy, September 20–23, 2009* p952
- [34] Knudsen S, Bletekjr K 1994 *J. Lightw. Technol.* **12** 9
- [35] Xu M F, Han Y, Dong J L 2005 *Nondestruct. Test.* **27** 198 (in Chinese) [徐美芳, 韩焱, 董剑龙 2005 无损检测 **27** 198]
- [36] Tang Y L, Chen Y P 2002 *Geophys. Geochem. Explorat.* **26** 225 (in Chinese) [汤悦林, 陈元平 2002 物探与化探 **26** 225]
- [37] Wang Y Z, Wan S P, Zhang H 2009 *J. Appl. Opt.* **30** 125 (in Chinese) [王玉枝, 万生鹏, 张辉 2009 应用光学 **30** 125]
- [38] Chen X, Yu S J, Yang J X, Lin M 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 145 (in Chinese) [陈显, 余尚江, 杨吉祥, 林明 2009 光学学报 **29** 145]
- [39] Yang T, Ji W Y, Zhang S Y 2001 *Acta Acust.* **26** 202 (in Chinese) [杨挺, 季文赞, 张叔英 2001 声学学报 **26** 202]
- [40] Wu Y T, Liu Y K, Chang X, Zhang J M, Chen B S, Li P, Li X C 2012 *Chin. J. Geophys.* **55** 1007 (in Chinese) [武银婷, 刘伊克, 常旭, 张金淼, 陈宝书, 李鹏, 李学聪 2012 地球物理学报 **55** 1007]
- [41] Wu D L 2004 *Geophys. Prospect. Petrol.* **43** 599 (in Chinese) [邬达理 2004 石油物探 **43** 599]
- [42] Wu D L, Jiang Y, Chen Z M 2006 *Geophys. Prospect. Petrol.* **45** 2006 (in Chinese) [邬达理, 姜游, 陈竹梅 2006 石油物探 **45** 2006]
- [43] Hill D J, Nash P J, Hawker S D 1998 *European Workshop on Optical Fibre Sensors Peebles* Scotland, July 8–10, 1998 p301
- [44] Sheng S G, Yang D S 2003 *J. Harbin Engineer. Univ.* **24** 132
- [45] Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K 2003 *IEEE Sens. J.* **3** 19
- [46] Leslie C B, Kendall J M, Jones J L 1956 *J. Acoust. Soc. Am.* **28** 711
- [47] Kringlebotn J T, Nakstad H, Eriksrud M 2009 *Proceedings of 20th International Conference on Optical Fibre Sensors* Edinburgh, United Kingdom, October 5, 2009 p7503
- [48] Nelson D F, Kleinman D A, Wecht K W 1977 *Appl. Phys. Lett.* **30** 94
- [49] Sheem S K, Cole J H 1979 *Opt. Lett.* **4** 322
- [50] Fields J N 1979 *Appl. Opt.* **18** 3533
- [51] Carome E F, Koo K P 1980 *Opt. Lett.* **5** 359
- [52] Chen R S, Bradshaw T, Badcock R, Cole P, Jarman P, Pedder D, Fernando G F 2005 *J. Physpp.Conf. Series* **15** 232
- [53] Chen R S, Bradshaw T, Burns J, Cole P, Jarman P, Pedder D, Theobald R, Fernando G F 2006 *Measur. Sci. Technol.* **17** 2313
- [54] Chen R S, Fernando G F, Butler T, Badcock R 2004 *Measur. Sci. Technol.* **15** 1490
- [55] Spillman W B, McMahon D H 1980 *Appl. Opt.* **19** 113
- [56] Phillips R L 1980 *Opt. Lett.* **5** 318
- [57] Spillman W B 1981 *Appl. Opt.* **20** 465
- [58] Tietjen B W 1981 *J. Acoust. Soc. Am.* **69** 993
- [59] Guo F, Fink T, Han M, Koester L, Turner J, Huang J 2012 *Opt. Lett.* **37** 1505
- [60] Wang D H, Jia P G, Wang S J, Zhao C L, Zeng D P, Wang H, Li F Q 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 044102
- [61] Rines G A 1981 *Appl. Opt.* **20** 3453
- [62] Bennecer A, McGuire M, Flockhart G M H, Pierce S G, Hayward G, Culshaw B 2010 *Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors* Porto, Portugal, September 8–10, 2010 p76530S
- [63] Chiang K S, Chan H L W, Gardner J L 1990 *J. Lightw. Technol.* **8** 1221
- [64] Paula R P D, Flax L, Cole J H, Bucaro J A 1982 *IEEE J. Quantum Electron.* **18** 680
- [65] Spillman W B, McMahon D H 1980 *Appl. Phys. Lett.* **37** 145
- [66] Spillman W B, McMahon D H 1982 *Appl. Opt.* **21** 3511
- [67] Fuhr P L 1994 *Smart Mater. Struct.* **3** 124
- [68] Ma J, Yu Y, Jin W 2015 *Opt. Express* **23** 29268
- [69] Xu F, Ren D X, Shi X L, Li C, Lu W W, Lu L, Lu L, Yu B L 2012 *Opt. Lett.* **37** 133
- [70] Nair A K, Machavaram V R, Mahendran R S, Pandita S D, Paget C, Barrow C, Fernando G F 2015 *Sens. Actuat. B: Chemical* **212** 93
- [71] Lee B H, Kim Y H, Park K S, Eom J B, Kim M J, Rho B S, Choi H Y 2011 *Sensors* **12** 2467
- [72] Liu B, Lin J, Liu H, Ma Y, Yan L, Jin P 2017 *Opt. Commun.* **382** 514
- [73] Shan N 2015 *Chin. J. Sens. Actuat.* **28** 487
- [74] Teixeira J G, Leite I T, Silva S, Frazão O 2014 *Photon. Sens.* **4** 198
- [75] Spammer S J, Swart P L 1995 *Appl. Opt.* **34** 2350
- [76] Tao P L, Yan F P, Tan Z W, Liu Y, Yin G L, Jian S S 2010 *Int. Soc. Opt. Photon.* **4** 774919
- [77] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 1302
- [78] Wang A, Xie H 1991 *The International Conference on Optical Fibre Sensors in China OFS(C)'91* Wuhan, China, October 9–11, 1991 p365
- [79] Frazão O, Viegas J, Caldas P, Santos J L, Araujo F M, Ferreira L A, Farahi F 2007 *Opt. Lett.* **32** 3074
- [80] Liang Y J, Zhang S, Xu Y D 2006 *Opt. Tech.* **32** 507
- [81] Hocker G B 1979 *Opt. Lett.* **4** 320
- [82] Hocker G B 1979 *Appl. Opt.* **18** 3679
- [83] Imai M, Ohashi T, Ohtsuka Y 1983 *J. Lightw. Technol.* **1** 75
- [84] Kersey A D, Marrone M J, Dandridge A, Tveten A B 1988 *J. Lightw. Technol.* **6** 1599
- [85] Gang T T, Hu M L, Qiao X G, Li J C, Shao Z H, Tong R X, Rong Q Z 2017 *Opt. Lasers Engineer.* **88** 60

- [86] Culshaw B, Giles I 1982 *IEEE J. Quantum Electron.* **18** 690
- [87] Wen H, Wiesler D G, Tveten A, Danver B, Dandridge A 1998 *Ultrasonic Imaging* **20** 103
- [88] Beard P C, Mills T N 1996 *Appl. Opt.* **35** 663
- [89] Beard P C, Mills T N 1997 *Electron. Lett.* **33** 801
- [90] Ashkenazi S, Hou Y, Buma T, O'Donnell M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 134102
- [91] Chen N, Xu P, Pangh F, Wang T, Zeng X, Chen Z 2008 *China-Japan Joint Microwave Conference* Shanghai, China, September 10–12, 2008 p612
- [92] Weihong B I 2000 *Chin. Opt. Lett.* **9** 140
- [93] Alcoz J J, Lee C E 1990 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control* **37** 302
- [94] Morris P, Hurrell A, Shaw A, Zhang E, Beard P 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 3611
- [95] Xu F, Shi J, Gong K, Li H F, Hui R Q, Yu B L 2014 *Opt. Lett.* **39** 2838
- [96] Ma J, Jin W, Ho H L, Dai J Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 2493
- [97] Ma J, Xuan H, Ho H L, Jin W 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 932
- [98] Zhou J T, Wang Y P, Liao C R, Sun B, He J, Yin G L, Liu S, Li Z Y, Wang G J, Zhong X Y, Zhao J 2014 *Sens. Actuat. B: Chemical* **208** 315
- [99] Biagi E, Cerbai S, Gambacciani P, Masotti L 2008 *Sensors* 363
- [100] Farries M C, Payne D N 1989 *Appl. Phys. Lett.* **55** 25
- [101] Hoshino H, Sawada I, Amamo N, Noda K 1988 *IEICE Trans.* **E71** 350
- [102] Lefevre H 1988 *J. Opt.* **19** 117
- [103] Moon D S, Kim B H, Sun G, Han Y G, Han W T, Chung Y 2007 *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics* Seoul, South Korea, August 26–31, 2007 p7962-7
- [104] Markowski K, Osuch T 2013 *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments* Wilga, Poland, May 25–27, 2013 p89030U
- [105] Inagaki K, Tamura S, Noto H, Harayama T 2006 *Optical Fiber Sensors* Cancun, Mexico, October 23–27, 2006 pME7
- [106] Xu B, Li Y, Sun M, Zhang Z W, Dong X Y, Zhang Z X, Jin S Z 2012 *Opt. Lett.* **37** 4768
- [107] Foster S, Tikhomirov A, Milnes M, Velzen J V, Hardy G 2005 *17th International Conference on Optical Fibre Sensors* Bruges, Belgium, May 23, 2005 p627
- [108] Wu Q, Okabe Y, Sun J 2014 *Opt. Express* **22** 8405
- [109] Li F M, Liu Y Y, Wang L J, Zhao Z Y 2015 *Appl. Opt.* **54** 6986
- [110] Chen R, Fernando G F, Butler T, Badcock R A 2004 *Measur. Sci. Technol.* **15** 1490
- [111] Sun A, Wu Z S, Fang D, Zhang J, Wang W 2016 *IEEE Sens. J.* **16** 5632
- [112] Guo Z, Li W, Liu T 2011 *IOP Sci.* **276** 255
- [113] Malla R B, Garrick N W, Sen A, Dua P 1998 *The National Academies of Science Engineering Medicine* 251
- [114] Caleya R F D, Manuel L A S, Pereda M, Antonio J 1994 *Int. J. Optoelectron.* **9** 81
- [115] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, Kawasaki B S 1978 *Appl. Phys. Lett.* **32** 647
- [116] Vellekoop M J, White R M, Martin S J, Ricco A J, Zellers E T, Frye G C, Wohltjen H, Diego S 1997 *Sens. Actuat. A: Physical* **63** 79
- [117] Fujisue T, Nakamura K, Ueha S 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 4577
- [118] Daniels D J, Gunton D J, Scott H F 1988 *IEE Proc. F: Commun. Radar and Signal Process.* **135** 277
- [119] Tsuda H 2005 *Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites, and Civil Infrastructure IV* San Diego, CA, March 6, 2005 p90
- [120] Measures R M 1989 *Prog. Aerospace Sci.* **26** 289
- [121] Webb D J 1996 *Comput. Geosci.* **22** 569
- [122] Takahashi N, Akatsu T, Udagawa N, Sasaki T, Yamaguchi A, Moseley J M, Martin T J, Suda T 1988 *Endocrinology* **123** 2600
- [123] Suda T, Takahashi N, Martin T J 1992 *Endocr. Rev.* **13** 66
- [124] Takahashi N, Shinjoh H, Iijima T, Suzuki T, Yamazaki K, Yokota K, Suzuki H, Miyoshi N, Matsumoto S, Tanizawa T, Tanaka T, Tateishi S, Kasahara K 1996 *Catalysis Today* **27** 63
- [125] Suda T, Takahashi N, Udagawa N, Jimi E, Gillespie M T, Martin T J 1999 *Endocr. Rev.* **20** 345
- [126] Kotake S, Udagawa N, Takahashi N, Matsuzaki K, Itoh K, Ishiyama S, Saito S, Inoue K, Kamatani N, Gillespie M T, Martin T J, Suda T 1999 *Journal of Clinical Investigation* **103** 1345
- [127] Tanaka S, Yokosuka H, Inamoto K, Takahashi N 2005 *Steering Committee of Symposium on Ultrasonic Electronics* **26** 329
- [128] Inamoto K, Tanaka S, Yokosuka H, Takahashi N 2006 *Steering Committee of Symposium on Ultrasonic Electronics* **27** 261
- [129] Isago R, Nakamura K, Ueha S 2008 *19th International Conference on Optical Fibre Sensors* Perth, WA, Australia, April 14, 2008 p700411
- [130] Tsuda H, Sato E, Nakajima T, Nakamura H, Arakawa T, Shiono H, Minato M, Kurabayashi H, Sato A 2009 *Opt. Lett.* **34** 2942
- [131] Isago R, Nakamura K A 2009 *Measur. Sci. Technol.* **20** 54
- [132] Inamoto K, Tanaka S, Yokosuka H, Takahashi N 2005 *Steering Committee of Symposium on Ultrasonic Electronics* **26** 469
- [133] Culshaw B, Thursby G, Betz D, Sorazu B 2008 *IEEE Sens. J.* **8** 1360
- [134] Rao Y J 1997 *Measur. Sci. Technol.* **8** 355
- [135] Wang H, Liu W, Zhou Z, Wang S, Li Y 2011 *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications* Beijing, China, November 6, 2011 p81990L
- [136] Kuang K S C, Cantwell W J 2003 *Appl. Mech. Rev.* **56** 493
- [137] Culshaw B 2004 *J. Lightw. Technol.* **22** 39

- [138] Guo H L, Xiao G Z, Mrad N, Yao J P 2011 *Sensors* **11** 3687
- [139] Li H, Dong B, Zhang Z, et al. 2014 *Sci. Reports* **4** 4496
- [140] Monchalín J P 1985 *Appl. Phys. Lett.* **47** 14
- [141] Monchalín J P, Heon R, Boucharde P, Padióleau C 1989 *Appl. Phys. Lett.* **55** 1612
- [142] Porterfield D W, Hesler J L, Densing R, Mueller E R, Crowe T W, Weikle R M 1994 *Appl. Opt.* **33** 6046
- [143] Tamura K, Doerr C R, Haus H A, Ippen E P 1994 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6** 697
- [144] Hamilton J D, O'Donnell M 1998 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control* **45** 216
- [145] Tanaka S, Yokosuka H, Takahashi N 2005 *17th International Conference on Optical Fibre Sensors* Bruges, Belgium, May 23, 2005 p699
- [146] Xu M G, Geiger H, Dakin J P 1996 *J. Lightw. Technol.* **14** 391
- [147] Rao Y J, Jackson D A 1996 *Fiber Optic Sensors V* Beijing, China, November 4, 1996 p171
- [148] Takahashi N, Thongnum W, Takahashi S 2002 *Acoust. Sci. Technol.* **23** 353
- [149] Liu T, Liu G, Hu L, Han M 2014 *The Fiber Optic Sensors and Applications XI* Baltimore, Maryland, USA, May 5, 2014 p90981A
- [150] Smelser C W, Mihailov S J, Grobncic D 2005 *Opt. Express* **13** 5377
- [151] Kabakova I V, Sterke C M D, Eggleton B J 2010 *JOSA B* **27** 2648
- [152] Lin B, Tjin S C, Zhang H, Tang D Y, Liang S, Hao J Z, Dong B 2011 *Opt. Fiber Technology* **17** 120
- [153] Li W, Yao J 2012 *IEEE Trans. Microw. Theo. Tech.* **60** 1735
- [154] Jaffer F A, Calfon M A, Rosenthal A, Mallas G, Razansky R N, Mauskopf A, Weissleder R, Libby P, Ntziachristos V 2011 *J. Am. College Cardiol.* **57** 2516
- [155] Wu Q, Okabe Y 2012 *Opt. Express* **20** 28353
- [156] Guo J J, Wang S R, Li X G, Zhang F, Shao X N, Lian X J 2014 *J. Molecul. Struct.* **1060** 17
- [157] Archambault J L, Grubb S G 1997 *J. Lightw. Technol.* **15** 1378
- [158] Wierzba P, Karioja P 2004 *Lightguides and Their Applications II* Jan Wojcik, Waldemar Wojcik, September 8, 2004 p348
- [159] Yelen K, Hickey L M B, Zervas M N 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 711
- [160] Guan B O, Jin L, Zhang Y, Tam H Y 2012 *J. Lightw. Technol.* **30** 1097
- [161] Li F, Murayama H, Kageyama K, Shirai T 2009 *Opt. Fiber Technol.* **15** 296
- [162] Kageyama K, Murayama H, Ohsawa I, Kanai M, Nagata K, Machijima Y, Matsumura F 2005 *Smart Mater. Struct.* **14** S52
- [163] Maud M, Patricia D, Jean-Marie M 2010 *European Workshop on Optical Fibre Sensors International Society for Optics and Photonics* **7653** 76530S
- [164] Pierce S, Flockhart G, Mcguire M, Benneker A, Hayward G, Thursby G, Stewart G, Culshaw B 2013 *International Workshop on Structural Health Monitoring* **32** 1504
- [165] Vandenplas S, Papy J M, Wevers M, Huffel S V, Inaudi D 2005 *17th International Conference on Optical Fibre Sensors* Bruges, Belgium, May 23, 2005 p1064
- [166] Eom J, Park C J, Lee B H, Lee J H, Kwon I B, Chung E 2015 *Sens. Actuat. A: Physical* **2** 25
- [167] Lima S E U, Frazão O, Araújo F M, Ferreira L A, Miranda V, Santos J L 2009 *Opt. Engineer.* **42** 024401
- [168] Martin E, Zhang E, Beard P, Treeby B 2015 *IEEE International Ultrasonics Symposium* 1
- [169] Jo W, Akkaya O C, Solgaard O, Dignonnet M J F 2013 *Opt. Fiber Technol.* **19** 785
- [170] Claudio S, Luca M, Marco M, Maddalena F, Marco G 2016 *8th European Workshop On Structural Health Monitoring* Spain, Bilbao, July 5–8, 2016 pA3A
- [171] Liang Y, Qu D, Deng H 2013 *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Fiber Optic Sensors and Optical Coherence Tomography* Beijing, China, June 25, 2013 p89140Z
- [172] Speirs R, Bishop A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 053501
- [173] Gallego D, Sáez-Rodríguez D, Webb D, Bang O, Lamela H 2014 *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors* Santander, Spain, Jun 2–6, 2014 p91574X
- [174] Fomitchov P, Krishnaswamy S, Achenbach J 2000 *Opt. Engineer.* **39** 1972
- [175] Zhang G, Xi C, Liang Y, Zuo H 2011 *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference* **2** 1598
- [176] Liu L, Lu P, Liao H, Wang S 2016 *IEEE Sens. J.* **16** 3054
- [177] Wissmeyer G, Soliman D, Shnaiderman R, Rosenthal A, Ntziachristos V 2016 *Opt. Lett.* **41** 1953
- [178] Zheng Q, Ma G, Jiang J, Li C 2015 *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* 282
- [179] Wu Q, Okabe Y, Saito K, Yu F M 2013 *Sensors* **14** 1094
- [180] Bo T, Huang J, Gu H, Mao X 2016 *8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices* Suzhou, China, April 26, 2016 p96860U
- [181] Launay F X, Lardat R, Bouffaron R, Roux G, Doisy M, Bergogne C 2013 *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors* Krakow, Poland, May 19, 2013 p87940K
- [182] Kageyama K, Murayama H, Uzawa K, Ohsawa I, Kanai M, Akemastu Y, Nagata K, Ogawa T 2006 *J. Lightw. Technol.* **24** 1768
- [183] Eum S H, Kageyama K, Murayama H, Uzawa K, Ohsawa I, Kanai M, Kobayashi S, Igawa H, Shirai T 2007 *Smart Mater. Struct.* **16** 2627
- [184] Lee J R, Tsuda H, Toyama N 2007 *NDT & E Int.* **40** 85
- [185] Tsuda H, Lee J R, Guan Y, Takatsubo J 2007 *Opt. Fiber Technol.* **13** 209
- [186] Letcher S V 1998 *Biosens. Bioelectron.* **13** 495
- [187] Gallego D, Lamela H 2011 *21st International Conference on Optical Fiber Sensors* Ottawa, Canada, May 15–19, 2011 p775370
- [188] Lamela H, Gallego D, Oraevsky A 2009 *Opt. Lett.* **34** 3695

- [189] Kochergin V, Flanagan K, Shi Z, Pedrick M, Baldwin B, Plaisted T, Yellampelle B, Kochergin E, Vicari L 2009 *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems* San Diego, California, USA, March 8, 2009 p72923D
- [190] Wu N, Wang W, Tian Y, Guthy C, Wang X 2010 *Fiber Optic Sensors and Applications VII* Orlando, Florida, April 5, 2010 p76770X
- [191] Fomitchov P A, Kromine A K, Krishnaswamy S 2002 *Appl. Opt.* **41** 4451
- [192] Tian J, Zhang Q, Han M 2013 *Opt. Express* **21** 6109
- [193] Stewart R R, Dyaour N, Omoboya B, de Figueiredo J J S, Willis M, Sil S 2011 *Geophysics* **78** D11
- [194] Rong Q Z, Shao Z H, Yin L X, Gang T T, Liu F, Sun A, Qiao X G 2016 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **1** 99
- [195] Rong Q Z, Qiao X G, Guo T, Bao W J, Su D, Yang H Z 2014 *Opt. Lett.* **39** 6616
- [196] Weng Y Y, Qiao X G, Xiang G H, Zhang J H, Zhou R, Yang Y, Zhang J 2011 *Photon. Optoelectron.* **1**
- [197] Zhang J H, Qiao X G, Feng Z Y, Weng Y Y, Yang Y, Zhou R 2011 *Symposium on Photonics & Optoelectronics* **1**
- [198] Gang T, Hu M L, Rong Q Z, Qiao X G, Liang L, Liu N, Tong R X, Liu X B, Bina C 2016 *Sensors* **16** 2125

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Fiber-optic ultrasonic sensors and applications*

Qiao Xue-Guang[†] Shao Zhi-Hua Bao Wei-Jia Rong Qiang-Zhou[‡]

(School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

(Received 22 September 2016; revised manuscript received 25 February 2017)

Abstract

Fiber-optic ultrasonic sensors possess the ability to detect ultrasonic waves by recovery of light intensity, wavelength, phase, and polarization. Compared with traditional electrical ultrasonic transducers, fiber-optic ultrasonic sensors have several merits, such as broadband response, high sensitivity, disturbance resistance, and good reusability, which are helpful to improve the reliability and efficiency of ultrasonic detection in underwater defense security, bioimaging, nondestructive inspection, and imaging of seismic physical models.

To date, according to the principle, fiber-optic ultrasonic sensors can be classified into three types, including intensity modulation, fiber-optic interferometers and fiber gratings. For the intensity-modulated fiber-optic ultrasonic sensors, ultrasonic waves can be detected by measuring optical fiber coupling loss, fiber transmission-reflection loss, fiber reflection loss and fiber polarization loss. The phase difference in fiber-optic interferometers can be modulated by ultrasonic strain. According to the interference mechanism, fiber-optic interferometric ultrasonic sensors are generally based on Mach-Zehnder interference, Fabry-Perot interference, Michelson interference and Sagnac interference. For the ultrasonic sensors based on fiber gratings, the grating length is supposed to be shorter than the ultrasonic wavelength so that the ultrasonic stress presents constant along the fiber gratings. Currently, the approaches of spectral edge filtering and wavelength-matched filtering are utilized to transform optical signals into voltage signals, which highly depend on the slope of the grating spectra. Thus, the fiber gratings with extremely narrow 3-dB bandwidth, such as phase shifted fiber Bragg grating, are preferred for highly sensitive ultrasonic detection. Besides the fiber-optic passive sensing,

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275088, 61605159), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2007AA03Z413, 2009AA06Z203), CNPC LOGGING CO., LTD (Grant Nos. 2014B-4012, 230114003), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. S2016YFJQ0899).

[†] Corresponding author. E-mail: xgqiao@nwu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: qzrong2010@gmail.com

the distributed feedback fiber laser and distributed Bragg reflector also exhibit outstanding advantages in ultrasonic detection.

Fiber-optic ultrasonic detecting technique is one of the hot topics in international research community, which is an effective method to evaluate the microstructure and related mechanical properties, and detect the microcosmic and macroscopic discontinuities of solid materials. In this paper, three typical applications of ultrasonic detection, i.e., monitoring of smart structure and health, biomedical imaging, and imaging of seismic physical models are reviewed, respectively. Our group has been engaged in the research fields of fiber-optic geophones and ultrasonic sensors for seismic exploration for decades. Several fiber-optic ultrasonic sensors with smart packaging are proposed and also used for the scanning imaging of two physical models.

In this paper we review the sensing mechanism, fabrication method, and current status of three types of fiber-optic ultrasonic sensors, respectively. Besides, the corresponding applications and technology challenges are also summarized. In particular, we present several kinds of home-made optical fiber ultrasonic sensors as a new technology applied in the imaging of seismic physical models. Overall, after decades of efforts, gratifying achievements have been achieved in the research of fiber-optic ultrasonic sensors. Further work needs to solve various technical issues, such as sensitivity, stability, structural microminiaturization, and multiplexing, etc. The next step will focus on the research issues in ultrasonic detection of seismic physical models, performance improvement, and multiplexing technology for distributed sensing. Miniaturization of fiber sensors and instrumentation of sensing system will also be the important research topic. The final objective of the research is to build a well integrated fiber-optic ultrasonic detecting system with high sensitivity and stability, networking construction, and proprietary intellectual property rights.

Keywords: fiber-optic ultrasonic sensors, intensity modulation, fiber-optic interferometers, fiber gratings

PACS: 42.81.Pa, 07.07.Df, 87.63.dh, 81.70.Cv

DOI: [10.7498/aps.66.074205](https://doi.org/10.7498/aps.66.074205)