

# 激光与光电子学进展

## 光纤超声安全监测研究进展

魏鹤鸣\*, 龚哲, 车嘉炜, 庞拂飞\*\*

上海大学特种光纤与光接入网省部共建国家重点实验室培育基地, 特种光纤与先进通信  
国际合作联合实验室, 上海 200444

**摘要** 超声波在金属、陶瓷等不透明介质中具有强穿透特性,其作为感测单元的超声安全监测技术已成为一种重要的检测工具。与传统的压电超声传感器相比,光纤超声传感器具有较强的抗干扰性、复用性、高灵敏性和宽探测频带,在结构无损探测和电力安全系统等领域具有大量的应用。针对安全监测中声发射信号的特性以及探测手段,主要综述了光纤超声传感技术以及光纤超声在安全监测领域中的应用,并就光纤超声传感机理、传感方法以及传感过程中存在的问题进行深入分析,最后对本领域未来潜在的发展方向和应用价值进行讨论。

**关键词** 光纤传感器; 光纤干涉仪; 光纤布拉格光栅; 超声探测; 安全监测

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306018

### Optical Fiber Ultrasonic Safety Monitoring: A Review

Wei Heming\*, Gong Zhe, Che Jiawei, Pang Fufei\*\*

*Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,  
Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced  
Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China*

**Abstract** Ultrasonic waves can penetrate into opaque media, such as metals and ceramic, which has become an important testing tool for ultrasonic safety monitoring. Compared with traditional piezoelectric-based ultrasonic sensors, optical fiber ultrasonic sensors exhibit strong anti-interference, strong multiplexing, high sensitivity, and broadband frequency response, which has applications in structural nondestructive detection and electric power system. Aiming at the characteristics and detection methods of acoustic emission signals in safety monitoring, we mainly review optical fiber ultrasonic sensing technologies and applications in ultrasonic safety monitoring. Furthermore, the sensing mechanisms, detection methods, and existing issues are analyzed. The next step will focus on the discussion of the future research direction and potential applications.

**Key words** optical fiber sensor; optical fiber interferometer; fiber Bragg grating; ultrasound detection; safety monitoring

**OCIS codes** 060.2370; 120.3180; 060.3735

## 1 引言

超声安全监测是一种利用超声波信号作为感测单元对结构、环境等安全状况进行监测的无损测

量方法,在金属、陶瓷等不透明介质中具有强穿透能力,可获取结构的内部信息,其中频率和幅值反映了被测结构的特性,可用于评估被测结构的健康状况。目前,超声探测技术在结构无损探测、光声

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-04-04; 录用日期: 2021-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(62005153)、上海市自然科学基金(20ZR1420300)

通信作者: \*hmwei@shu.edu.cn; \*\*ffpang@shu.edu.cn

成像、目标识别等领域具有大量的应用<sup>[1-5]</sup>。而感测超声波信号的传感器件主要以压电类传感器和光纤类传感器为主。压电类传感器主要采用基于压电效应的压电换能器(PZT),将超声波信号转换为电信号并直接输出至数据采集分析端,具有极高的探测灵敏度。这类PZT超声传感器基于机械共振感知超声波,其结构特征决定了其频响特性。为了提升超声探测性能,研究人员一般通过减小PZT尺寸以及阵列化来提升频响性能或提高成像质量<sup>[6-8]</sup>。然而这两种方式存在两个问题:一方面,当PZT共振频率达到兆赫兹量级时,加工极为困难;另一方面,在阵列传感应用中,信号难以解调且易受电磁环境的干扰。此外,PZT传感器也不易于嵌入被测物。因此,在极端环境应用中,PZT超声传感器难以实现有效测量。

相比较而言,基于光纤传感技术的超声传感器具有不受环境电磁干扰、耐腐蚀、易嵌入被测物结构、传感器尺寸小、灵敏度高、频带宽等优点,广泛应用于弱信号探测<sup>[9-13]</sup>。此外,光纤超声传感器可实现分布式、准分布式测量,系统复用性高。光纤超声传感器的基本原理是超声压力波与光纤相互作用,引起光纤信号光的强度、相位、波长、偏振态等发生变化,通过解调微小变化来获取超声波信息。目前,光纤超声传感器的发展趋势是微型化、集成化、芯片化,而如何保证传感器的高灵敏度、宽频响和高可靠性是未来的主要关注点。此外,由于目前光纤超声传感器受光纤材料、尺寸以及结构等方面的限制,越来越多的研究聚焦于解调技术,同时从材料和工艺等方面制备新型光纤超声传感器件,从而进一步提升传感器的性能<sup>[14-24]</sup>。

综合光纤技术在近几十年的发展,光纤超声传感器在材料、结构以及加工方式等方面均具有较大的突破,部分已应用于工程领域。针对安全监测领

域中超声信号的特性以及探测手段,本文主要综述了近二十年来用以实现不同介质中超声信号探测的光纤超声传感器及其在安全监测领域中的应用,分析了传感器的传感机理、方法以及存在的问题,讨论了本领域未来潜在的发展方向和应用价值。通过对光纤超声传感器件的微型化和系统集成化,有望进一步提高器件探测性能,并解决目前传感技术中存在的问题。

## 2 光纤超声传感技术

针对不同的工程应用需求,光纤超声传感技术的性能指标也具有一定的差异,其主要性能包括:频率响应、可测带宽、灵敏度和信噪比(SNR)等。从传感器传感机理分析可知,传感器的性能不仅依赖于声耦合结构,也依赖于传感器的解调技术。通过优化传感器材料和结构,可进一步提高传感器的灵敏度,而解调技术则会影响传感器的频响、信噪比以及量测范围等。本文基于调制原理对光纤超声传感器进行分类,并引入材料、结构等方面的因素,综述了光纤超声传感技术的现状及发展方向。

### 2.1 强度调制型光纤超声传感技术

强度调制型传感技术是一种最基本的光纤传感技术,早期被广泛应用于超声探测以及振动测量,其主要原理是利用声波振动影响光纤中光的损耗、耦合、反射等。该方法早期主要用于声波频段的测量,例如,Nelson等<sup>[25]</sup>提出采用薄膜与弯曲光纤结合的方案,如图1(a)所示,声波引起薄膜的振动并传递至光纤引起弯曲光纤的曲率变化,导致其损耗发生变化,实现了对输出光强的调制。Spillman等<sup>[26-27]</sup>提出了一种光纤空间对接型声波传感装置,如图1(b)所示,其主要原理是声波引起其中一根光纤振动并导致纤芯与纤芯的耦合效率发

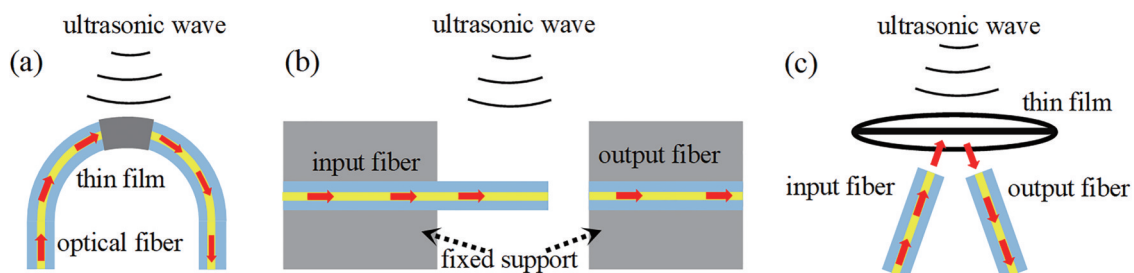


图1 光纤传输损耗型超声传感器。(a)弯曲损耗型<sup>[25]</sup>; (b)悬臂耦合型<sup>[26-27]</sup>; (c)反射耦合型<sup>[28]</sup>

Fig. 1 Optical fiber ultrasonic sensor based on transmission loss. (a) Bending loss<sup>[25]</sup>; (b) cantilever coupling<sup>[26-27]</sup>; (c) reflection coupling<sup>[28]</sup>

生变化,通过测量该变化实现了对输出光强的调制。此种结构相对简单,共振频率易受尺寸的限制,制约了灵敏度和频响带宽。NessAiver等<sup>[28]</sup>提出了一种反射耦合型装置,如图1(c)所示,声波引起反射膜振动并改变膜的反射率,导致光纤输出的耦合光强改变。

上述方法主要是通过声波扰动光纤传输损耗感知声波振幅特性,结构简单,但受材料以及尺寸因素的限制,灵敏度较低,损耗过大,影响了信号的信噪比,难以实现超声频段的高灵敏探测。为了提高探测频响和灵敏度,研究人员通常通过减小器件的尺寸或提高光纤的集成度来实现。Chen等<sup>[29]</sup>提出一种光纤熔融锥型耦合器并用于超声探测,如图2(a)所示,两光纤在锥型耦合区的互耦合率取决于纤芯的间距、周围环境折射率以及耦合区存在的应力场。而声波应力场影响了耦合区的应变分布,导致耦合器的耦合率发生改变,通过解调两输出端的光强则可以感知声波信号。基于锥形耦合器的超声传感器具有较高的灵敏度,在几十 kHz 到几百 kHz 的频段中具有较高的响应,传感器探测频率为 155 kHz 的信号灵敏度为 5.6 V/kPa。

针对上述光纤波导耦合型的超声传感器也有类似报道<sup>[30-31]</sup>。尽管采用熔融拉锥微纳型结构可提高其超声测量灵敏度,但工艺相对复杂,难以实现传感器结构尺寸的一致性。此外,还有一些基于其他效应实现光强度调制的测量方案,在超声探测方面表现出较好的性能,但基于光强探测的方案也存在明显的不足,受光源、结构等稳定性的影响,难以实现传感器复用。相比较而言,基于相位调制和波长调

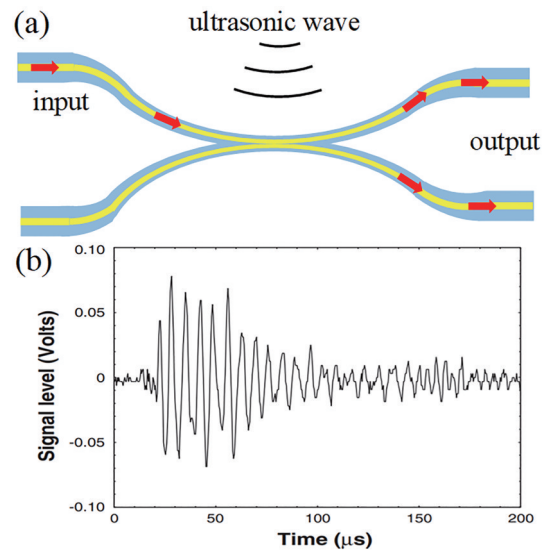


图 2 光纤耦合型超声传感器<sup>[29]</sup>。(a) 光纤耦合型超声传感结构; (b) 超声时域响应

Fig. 2 Optical fiber coupler-based ultrasonic sensor<sup>[29]</sup>. (a) Optical fiber coupler-based ultrasonic sensing structure; (b) time-domain response of the ultrasonic sensor

制的方案具有极大的优越性,能实现高灵敏、宽频带、高频响的超声测量。因此,下文着重综述基于相位和波长调制技术在超声探测方面的发展情况。

### 2.2 相位调制型光纤超声传感技术

相位调制型光纤超声传感器主要是基于光纤干涉仪探测声波时引起的干涉仪相位变化感知声场特性<sup>[32-33]</sup>。目前,常用的光纤干涉仪主要包括马赫-曾德尔干涉仪型(MZI)、迈克耳孙干涉仪型(MI)、萨格纳克干涉仪型(SI)和法布里-珀罗干涉仪型(FPI),如图3所示。

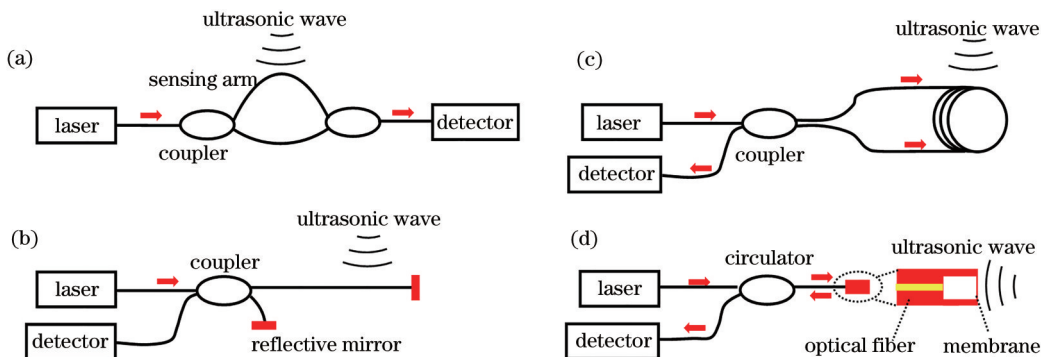


图 3 光纤干涉型超声传感器。(a) 光纤马赫-曾德尔干涉仪型; (b) 光纤迈克耳孙干涉仪型; (c) 光纤萨格纳克干涉仪型; (d) 光纤法布里-珀罗干涉仪型

Fig. 3 Optical fiber interferometry-based ultrasonic sensors. (a) Optical fiber Mach-Zehnder interferometer; (b) optical fiber Michelson interferometer; (c) optical fiber Sagnac interferometer; (d) optical fiber Fabry-Perot interferometer



从传感结构上来看, MZI 和 MI 较为相似, 均将干涉仪的一臂作为传感, 另外一臂作为参考, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示。声场压力波作用在传感区域, 引起传感臂光纤的折射率等参数发生变化, 引起传感端的光程改变, 从而导致干涉仪两臂的光程差(OPD)发生改变。基于这样的传感原理, Bucaro 等<sup>[34]</sup>率先提出基于 MZI 结构的光纤超声传感器并实现了水下 40~400 kHz 的宽频带超声探测。Gang 等<sup>[35]</sup>提出一种基于 MI 结构的倾斜式光纤超声传感器, 该传感器可以探测 300 kHz 的超声信号且具有方向识别性。为了提升超声探测性能, 实验方案设计中, 通过增加传感光纤长度并采用光纤线圈式传感结构, 或将光纤缠绕在不同材质的柱状结构上来增强声波对光纤的应力累积效应, 提高了相位调制度并进一步提高了传感灵敏度<sup>[36-38]</sup>。例如, Prince 等<sup>[36]</sup>提出将光纤 MI 传感器的传感光纤设计成光纤线圈, 并粘贴在样品表面以感知弹性波应力场。Lan 等<sup>[37]</sup>采用将光纤 MZI 传感臂缠绕在空心圆柱体的方式, 将超声压力波耦合到柱体并作用在光纤上, 该传感方案在实验中可探测频率为 140 kHz 的超声信号。但由于线圈缠绕型的光纤超声传感器的尺寸相对较大, 其频率响应会受到一定的限制。

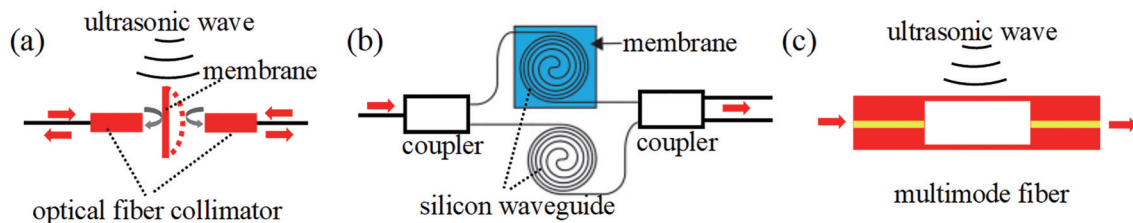


图 4 部分灵敏度提高型光纤超声传感器。(a) 基于振膜反射镜的光纤 MI 超声传感器<sup>[40]</sup>; (b) 基于螺旋硅波导的光纤 MZI 超声传感器<sup>[41]</sup>; (c) 基于多模光纤的光纤超声传感器<sup>[43]</sup>

Fig. 4 Some highly sensitive optical fiber ultrasonic sensors. (a) Optical fiber MI based on a diaphragm<sup>[40]</sup>; (b) optical fiber MZI based on spiral silicon waveguide<sup>[41]</sup>; (c) multimode interference-based fiber-optic ultrasonic sensor<sup>[43]</sup>

总的来说, 基于光纤 MZI 和 MI 的超声传感器均具有较高的灵敏度, 但光纤 MZI 传感结构较大, 在实际应用测量中具有局限性, 而光纤 MI 是一种反射式测量方法, 具有传感长度可选以及可远程探测等优点。

不同于前两种干涉结构, 光纤 SI 是一种偏振敏感的共光路干涉结构, 利用光在光纤线圈中正反传输时存在一定的相位差来形成干涉并用于超声探测<sup>[32-33, 49-53]</sup>。传统的光纤 SI 主要由  $2 \times 2$  的耦合器输出端光纤连接一段光纤光路构成, 当声波信号作用在非对称光纤区域时, 利用 SI 两束光的时延特性,

为了进一步提高传感器的灵敏度, 研究人员还从光纤材料和结构等方面开展了大量的研究<sup>[39-48]</sup>, 如图 4 所示。例如, Gallego 等<sup>[39]</sup>提出基于聚合物光纤的 MZI 超声传感器, 该传感器具有高达 5 MHz 的频率响应带宽, 其灵敏度高达 13.1 mrad/kPa。这是由于聚合物材料具有较低的弹性模量, 与声场更易耦合且对压力波具有更高的响应灵敏度, 相比于传统的基于石英光纤的传感方案, 该传感器灵敏度提升了 12 倍。Liu 等<sup>[40]</sup>采用一种基于聚丙烯传感膜并将其两面作为 MI 的反射镜, 声波使膜片发生形变, 如图 4(a) 所示。值得一提的是, 其光程差改变量是其形变量的两倍, 灵敏度高达  $-128 \text{ dB re rad}/\mu\text{Pa}$ , 但由于受尺寸限制, 其频率响应会受到一定的限制。Ouyang 等<sup>[41]</sup>将一种螺旋式硅波导作为光纤 MZI 的传感单元并用于超声探测, 如图 4(b) 所示, 其探测极限为  $0.38 \text{ mPa}/\text{Hz}^{1/2}$ , 动态范围为 59 dB。通过材料提升声压响应灵敏度是一个比较重要的研究方向, 此外, 优化光纤结构对提升灵敏度也具有重要的意义。研究人员通过研究多模光纤<sup>[图 4(c)]</sup><sup>[42-43]</sup>、微纳光纤<sup>[44-46]</sup>以及光子晶体光纤<sup>[47-48]</sup>等从结构上提升了声波响应的灵敏度。

声波导致的相位信息可在探测端被感知。但由于光纤环光路的限制, 其难以实现非接触探测。Fomitchov 等<sup>[49-50]</sup>设计了一种光纤探针式非接触超声探测方法, 如图 5(a) 所示, 用于在粗糙样品表面探测 MHz 频段的兰姆波, 该传感器可进一步设计成阵列式并用于声源定位测量, 如图 5(b) 所示。Ma 等<sup>[54]</sup>设计了一种基于膜片式的光纤 SI 声传感器, 可感知声频波段的声波信号, 后续可通过优化膜片参数进一步提高声波探测灵敏度。为了提高正反方向传输光的相位差和灵敏度, 通常可通过优化光纤环路上的光纤结构来实现, 例如, 引入一段高双折

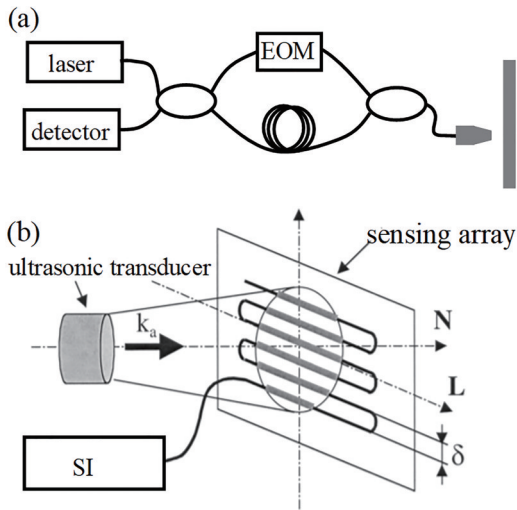


图 5 光纤 SI 超声传感器。(a) 非接触式光纤 SI 超声传感器<sup>[49]</sup>; (b) 阵列式光纤 SI 超声传感器<sup>[50]</sup>  
 Fig. 5 Optical fiber SI ultrasonic sensors. (a) Noncontactive optical fiber SI ultrasonic sensor<sup>[49]</sup>; (b) optical fiber SI ultrasonic sensing array<sup>[50]</sup>

射光纤或保偏光纤<sup>[55-56]</sup>。

相较于光纤 MZI、MI 以及 SI 来说, FPI 型超声传感器是一种结构紧凑微腔型干涉仪, 主要分为本征型 FPI (IFPI) 和非本征型 FPI (EFPI), 目前在超

声探测领域具有大量的应用<sup>[57-68]</sup>。其基本原理是光纤 FPI 干涉腔易受到声波信号的扰动, 导致干涉腔的相位发生变化, 其频率响应灵敏度和频带取决于自身结构和材料。最早 FPI 传感器主要利用光弹效应探测超声信号, 当超声压力波作用于光纤传感器时, 光纤折射率的改变会改变干涉光的相位。例如, Dorighi 等<sup>[57]</sup>在 90 年代提出了一种镀反射膜的 IFPI 并用于超声探测, 可感知 MHz 级别的超声幅频信息, 如图 6(a) 所示。Murphy 等<sup>[58]</sup>采用空心光纤连接两个单模光纤, 组成一种空气腔型 EFPI 传感器。Wei 等<sup>[59]</sup>提出一种基于空心光纤的封闭式空气腔型 EFPI, 并将其作为多波长光纤环形激光超声传感系统的反馈单元, 如图 6(b) 所示, 其激光输出边模抑制比大于 30 dB, 实验中可探测 10 MHz 的超声信号, 灵敏度较高。尽管上述传感器具有一定的宽频带超声感知能力, 但由于光纤等材料的弹性模量较大, 导致超声诱导的动态应变幅度小, 限制了其测量灵敏度。为了进一步提高 FPI 超声传感器的灵敏度, 研究人员从材料、制备工艺以及信号解调等方面开展了大量的研究。部分研究人员选用弹性模量较低的聚合物在光纤端面制备高性能 FPI 微腔, 可实现高频响、宽频带的超声探测<sup>[60-62]</sup>, 如图 6(c) 和图 6(d) 所示。

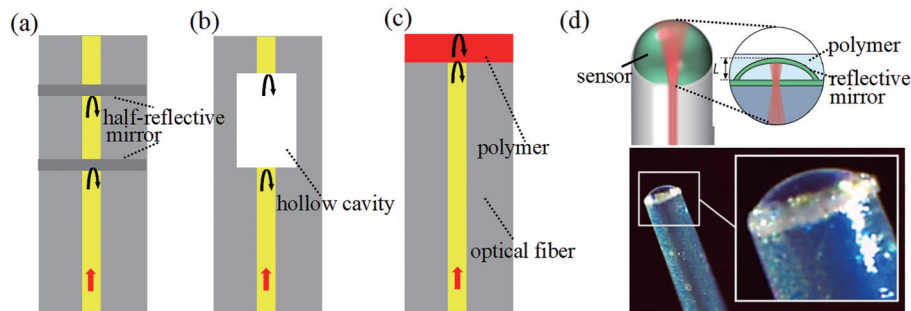


图 6 不同腔式结构的 FPI 超声传感器。(a) 镀有反射镜的 FPI 超声传感器<sup>[57]</sup>; (b) 空气腔式 FPI 超声传感器<sup>[59]</sup>; (c) 基于聚合物的光纤端 FPI 超声传感器<sup>[60]</sup>; (d) 基于聚合物的光纤端平面凹型 FPI 超声传感器<sup>[61]</sup>  
 Fig. 6 FPI ultrasonic sensors with different cavities. (a) FPI ultrasonic sensor with reflective mirrors<sup>[57]</sup>; (b) FPI ultrasonic sensor with an air cavity<sup>[59]</sup>; (c) optical fiber tip-based FPI ultrasonic sensors with polymer cavity<sup>[60]</sup>; (d) optical fiber tip-based FPI ultrasonic sensors with polymer plano-concave cavity<sup>[61]</sup>

此外, 膜片式 EFPI 的超声传感器也受到广泛研究, 根据固体力学理论, 可知其共振频率与其结构参数和材料等相关, 因此, 研究人员提出采用新型材料诸如金属、聚合物以及二维功能材料制备高性能薄膜<sup>[63-68]</sup>, 如图 7(a) 所示。Rong 等<sup>[63]</sup>采用薄金属膜实现 EFPI 超声传感, 可探测百 kHz 的超声信号并应用于超声成像等领域。Wei 等<sup>[64]</sup>采用双光子激光直写技术在光纤端制备了聚合物 FP 微腔, 结

合相应的光纤激光技术将该腔用于超声探测, 结果表明该方法具有较高的灵敏度, 如图 7(b) 所示。Wang 等<sup>[65]</sup>采用双光子激光直写技术在光纤端制备了具有弹簧结构的膜片, 可探测 400~2000 Hz 的声波信号, 如图 7(c) 所示。Yao 等<sup>[66]</sup>采用单光子聚合技术在光纤端制备出具有螺旋结构的膜片, 频率响应可达百 kHz 量级, 其声频噪声等效声压为 0.328  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ , 如图 7(d) 所示。研究表明弹性结

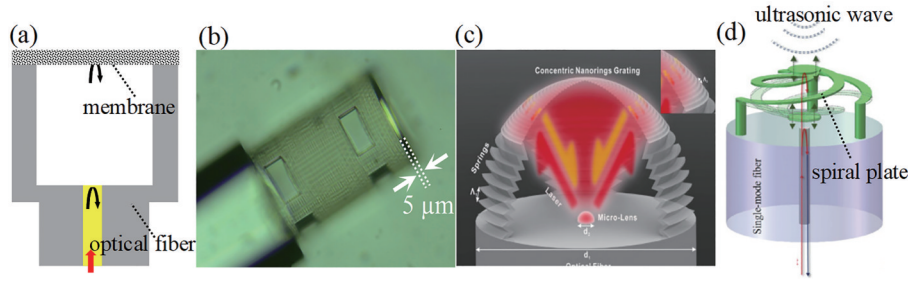


图 7 不同膜片式结构的 FPI 超声传感器。(a) 光纤端 FPI 超声传感器示意图; (b) 双光子 3D 打印光纤端聚合物膜片式 FPI 超声传感器<sup>[64]</sup>; (c) 双光子 3D 打印光纤端弹簧式 FPI 声传感器<sup>[65]</sup>; (d) 单光子 3D 打印光纤端基于螺旋式微盘的 EFPI 声传感器<sup>[66]</sup>

Fig. 7 FPI ultrasonic sensors with different diaphragms. (a) Schematic diagram of the diaphragm-based FPI ultrasonic sensors; (b) two-photon 3D printing optical fiber tip-based FPI ultrasonic sensor with polymer diaphragm<sup>[64]</sup>; (c) two-photon 3D printing optical fiber tip-based FPI acoustic sensor with microspring-based diaphragm<sup>[65]</sup>; (d) single-photon 3D printing optical fiber tip-based FPI acoustic sensor with polymer spirally-suspended cavity<sup>[66]</sup>

构可进一步增强声信号探测灵敏度,此外,新型材料的研究也有助于高性能 FPI 超声传感器的发展。Ni 等<sup>[67]</sup>设计了一种基于石墨烯薄膜的 EFPI 声传感器,其频率响应范围 5 Hz~0.8 MHz,噪声等效声压在  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$  量级。Yu 等<sup>[68]</sup>设计了一种基于二硫化钼薄膜的 EFPI 超声传感器,灵敏度可达  $89.3 \text{ nm}/\text{Pa}^{-1}$ ,从调研结果可知,目前基于二维材料的薄膜具有极高的声压灵敏特性,如图 8 所示。尽管新型材料有助于传感器性能的提升,但对薄膜制作工艺也提出了要求,在超声探测应用中,可根据实际需求选择不同的薄膜材料。

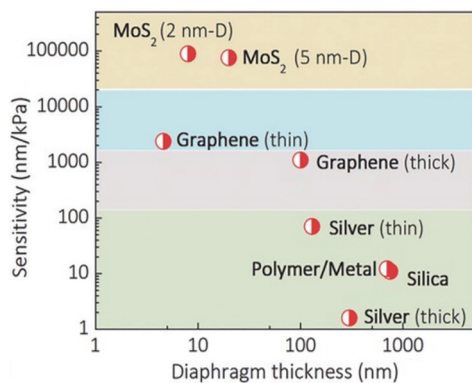


图 8 不同膜片式结构的光纤 FPI 超声传感器灵敏度比较<sup>[68]</sup>  
Fig. 8 Comparison of sensitivity of optical fiber FPI ultrasonic sensors with different diaphragm materials<sup>[68]</sup>

### 2.3 波长调制型光纤超声传感技术

波长调制型光纤超声传感器主要原理是声振动导致器件的特征波长或共振波长发生变化,利用这一特性传感超声,典型代表为光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器。自 1978 年首次报道在掺锗石英光

纤上成功刻写 FBG 以来,基于 FBG 的超声传感器取得了重要的进展<sup>[69]</sup>。1996 年,Webb 等<sup>[70]</sup>提出基于 FBG 的超声传感方案并探测到 950 kHz 的超声信号。随后,Fisher 等<sup>[71]</sup>优化了基于 FBG 的实验系统,指出了光纤光栅长度对超声波探测的影响,实现了水下 MHz 量级的声波探测,并进一步用于医学等领域。Fomitchov 等<sup>[2]</sup>研究了 FBG 超声传感机理并分析了传感器在液体和固体下的超声探测性能。

近二十年来,FBG 在超声探测领域取得了重要进展,相关解调方案也有大量的报道,主要分为扫描法、光谱法以及相位解调法等<sup>[72-75]</sup>。基于可调激光器、FP 滤波器以及声光可调滤波器的扫描法,受采样率的限制,难以实现多路复用<sup>[72]</sup>。光谱解调法主要利用衍射光学器件实现 FBG 光谱解调,但其灵敏度和时频分辨率较低且难以多路复用<sup>[73]</sup>。目前,大量的研究主要集中于相位解调,例如,Qiao 等<sup>[74]</sup>研究了基于光折变晶体的两波混频干涉原理,实现了 FBG 的动态解调,该传感器能自适应温度以及环境的低频扰动,光谱分辨率可达 0.3 pm。Perry 等<sup>[75]</sup>提出基于非平衡光纤 MZI 的 FBG 解调方案,可实现纳米级的精度,达  $17 \text{ ne}/\text{Hz}^{1/2}$ 。Wei 等<sup>[14]</sup>采用非平衡 MI 作为 FBG 的解调方案,理论推导出基于非平衡干涉的光谱相位解调法中光程差与 FBG 光谱带宽的关系,如图 9 所示,在实验中传感器与环形激光器相结合,进一步提升传感器的性能,能自适应环境的低频扰动,可探测频率为 MHz 量级的超声信号。随后,该课题组进一步研究了基于 FBG 的光纤激光高频动态测量的频率响应等问题<sup>[15]</sup>。此外,其他解调技术诸如光栅匹配法、脉冲干涉法等也被大量报道<sup>[76-79]</sup>。



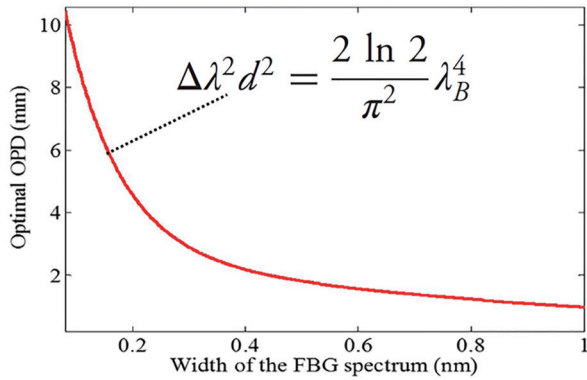


图9 非平衡干涉解调中最佳光程差与FBG光谱宽度的关系<sup>[14]</sup>

Fig. 9 Optimum OPD versus the spectral width of the FBG sensor for unbalanced interferometric method<sup>[14]</sup>

尽管FBG作为一种典型的波长调制型光纤超声传感器件,但由于Q值较低,限制了其灵敏度。为了提高传感器的Q值,科研人员开展了相关研究。一方面是通过增加栅区的长度提高Q值,但这会限制光栅对高频超声的响应性能<sup>[2]</sup>。研究表明,当光栅长度接近或大于超声波波长时,难以有效感

知超声波幅频特性,只有当光栅长度小于超声波波长时,压力波与光谱漂移才具有一致性。另一方面,研究人员采用相移光栅(PS-FBG)代替传统的FBG,在FBG栅区的某一位置引入折射率调制的突变,导致一定的相移量,使其在透射/反射光谱中具有一个线宽极窄的窗口,利用该窗口可实现高灵敏度的超声探测<sup>[80-84]</sup>。此外,利用FBG超声传感波长调制特性,研究人员从材料、加工工艺等方面制备出先进微纳光栅器件并用于超声探测,例如, Govindan等<sup>[85]</sup>通过电子束刻蚀加工工艺制备出长度仅为500 μm的聚合物布拉格光栅波导(BGW)并用于超声探测,结果表明该波导具有较高灵敏度。Wei等<sup>[20]</sup>采用双光子3D打印技术制备了一种基于聚合物的高性能相移光栅波导(PS-BGW)微型超声传感器,如图10所示,光栅长度仅100 μm,其Q值最高可达18000,灵敏度为1878.6 mV/MPa。基于波导的微纳光栅器件可以极大地提高超声探测灵敏度,同时通过优化制备参数和引入回流技术,可使器件表面光滑化,减少了散射和耦合造成的损失,进一步提高了传感器检测灵敏度。

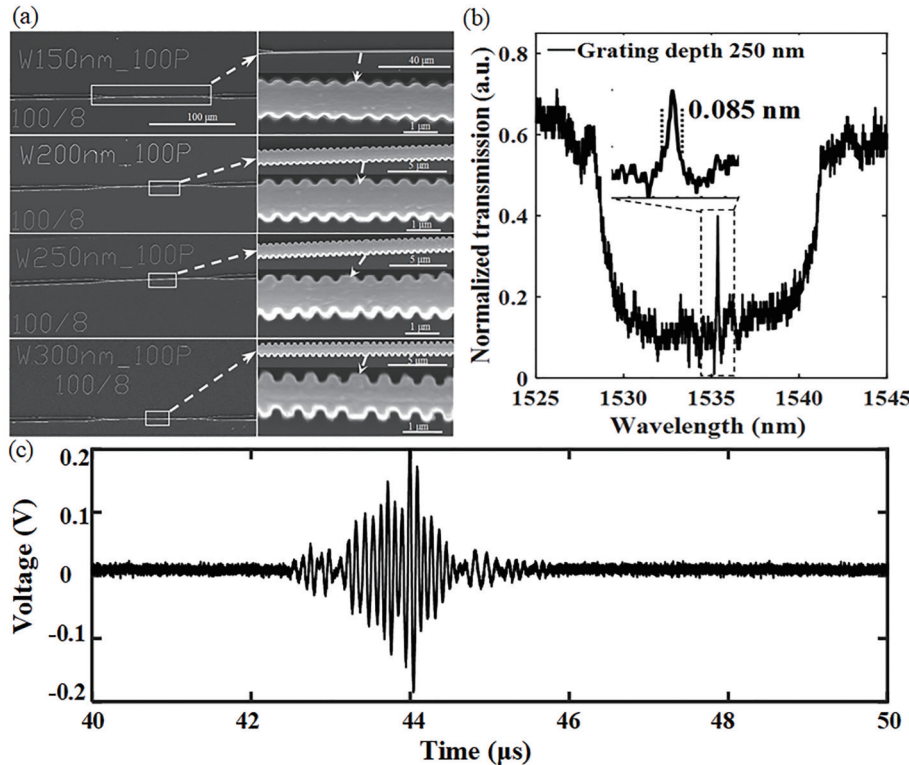


图10 双光子3D打印波导相移布拉格光栅超声传感器<sup>[20]</sup>。(a)波导相移光栅的电子扫描电镜图;(b)传感器透射谱;(c)传感器探测到的时间响应信号

Fig. 10 Two-photon 3D printing phase-shifted Bragg grating waveguide ultrasonic sensors<sup>[20]</sup>. (a) SEM of phase-shifted Bragg grating waveguide; (b) optical transmission spectrum of the sensor; (c) time response signal detected by the sensor

此外,基于波长调制型的光纤超声传感技术还有表面等离子激元谐振 (SPR)<sup>[86-89]</sup>、回音壁模微环<sup>[90]</sup>等。当声压信号作用在 SPR 微腔或回音壁微环上时,其谐振谱随材料折射率变化而发生波长移动,因此,利用施加的声压与共振波长关系可实现传感应用。上海交通大学杨天等<sup>[86-89]</sup>制备了光纤端 SPR 超声传感器,如图 11 所示,其噪声等效声压约为 5 kPa,可进行高频响、宽带宽的超声测量。Maxwell 等<sup>[90]</sup>通过纳米压印技术制备了高 Q 值的波导微环并用于高频超声探测,其噪声等效声压为

4.1 kPa,带宽为 70 MHz。Li 等<sup>[91]</sup>制备了高 Q 值的波导微环超声探测器,其噪声等效声压为 6.8 Pa,带宽为 140 MHz。Wei 等<sup>[21]</sup>采用双光子 3D 打印技术制备了高性能波导微环,如图 12 所示,所制备的微环器件可与光纤环形激光器集成并用于超声探测,其灵敏度高达 289.16 mV/MPa。由于 SPR 和微环器件具有微米级尺寸,可以灵敏地感知超高频段的超声幅频特性,在结构安全检测、水下超声定位以及生物医学光声成像等方面具有重要的应用价值<sup>[92-94]</sup>。

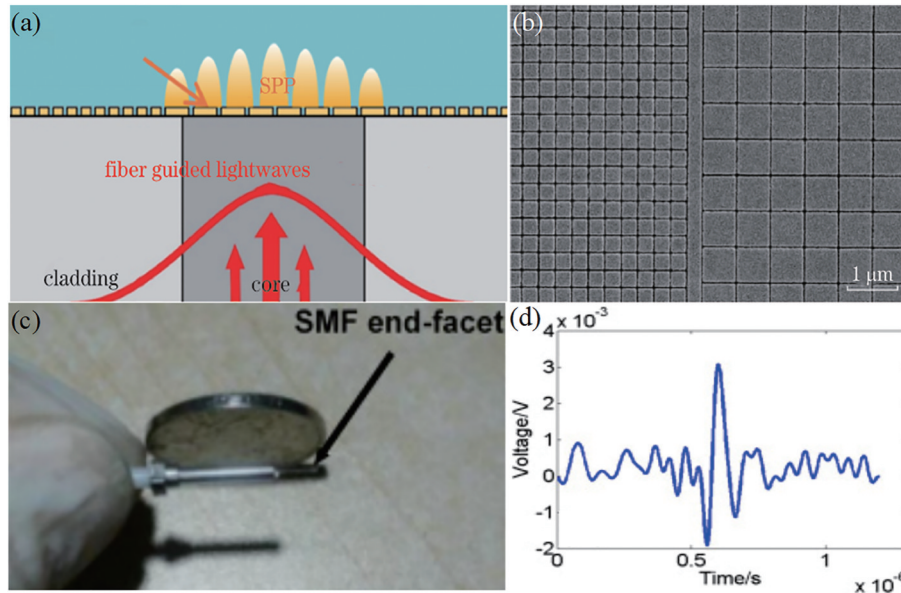


图 11 光纤端面 SPR 超声传感器<sup>[86-89]</sup>。(a)传感器结构示意图;(b)SPR 传感器扫描电子显微镜图;(c)传感器实物图;(d)传感器探测到的时间响应信号

Fig. 11 Optical fiber tip-based SPR ultrasonic sensor<sup>[86-89]</sup>. (a) Schematic of the proposed sensor; (b) SEM image of the SPR sensor; (c) picture of the fabricated sensor; (d) time response signal detected by the sensor

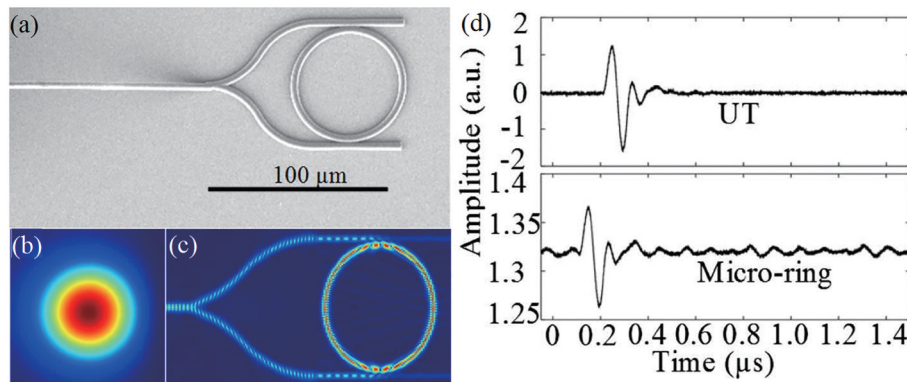


图 12 制备的光纤集成波导微环谐振超声传感器<sup>[21]</sup>。(a)传感器扫描电子显微镜图;(b)波导模式的电场分布仿真图;(c)共振波长时微环谐振传感器光场图;(d)探测到的时间响应信号

Fig. 12 Fabricated optical fiber integrated-waveguide micro-ring resonator-based ultrasonic sensor<sup>[21]</sup>. (a) SEM image of the sensor; (b) simulated electric field distribution of the guided mode; (c) light profile of the micro-ring resonator sensor at a resonant wavelength; (d) detected time response signal



上文综述了多种类型的光纤超声传感器,不同类型的传感器之间存在较大的性能指标差异,如结构、信噪比、响应带宽等方面。为了更加直观地比

较不同类型光纤传感器感测超声波的特性,表 1 从多个方面总结了上述几种类型的光纤超声传感器性能指标。

表 1 光纤超声传感器性能比较

Table 1 Comparison among fiber-optic ultrasonic sensors

Ultrasonic sensor	Sensing type	SNR /dB	Bandwidth /MHz
Intensity modulation	Direct transmission loss <sup>[25-27]</sup>	48	0.2
	Coupling loss <sup>[28-29]</sup>	44	0.3
Phase modulation	MZI <sup>[34, 37, 39]</sup>	45	10
	MI <sup>[35-36]</sup>	42	3.5
	Sagnac <sup>[32-33, 49-53]</sup>	45	6
	FPI <sup>[57-68]</sup>	62	25
Wavelength modulation	FBG, PS-FBG,	90	>60
	BGW, PS-BGW <sup>[20, 72-82, 85]</sup>		
	SPR, Microring <sup>[86-89, 90-91]</sup>	126	>140

### 3 光纤超声安全监测应用

#### 3.1 光纤局部放电安全监测技术

电力系统中一般采用高于大气压的气体作为绝缘介质的金属封闭开关设备和控制设备,简称气体绝缘开关设备(GIS),这种设备在电力高压系统中经常发生局部放电(局放)现象,极易引起运行事故,因此,利用局放方法可以有效地检测 GIS 绝缘缺陷并进一步实现对电力系统的预警。通常情况下,局放常伴随有光、电、声等现象,而基于声信号的检测因具有抗电磁干扰的优点,受到了国内外同行广泛的关注。目前,具有高分辨率、高灵敏度以及抗电磁干扰等独特优势的光纤超声传感检测技术在局放安全监测领域具有十分广泛的应用前景。早在 2003 年, Kim 等<sup>[95]</sup>开展了基于 MZI 的局放安全检测研究,通过优化传感实验方案,可检测局放诱导的超声波信号频率高达 400 kHz。2017 年, Li 和 Wang 等<sup>[96-97]</sup>设计了一种检测局放信号的光纤环结构,构建了基于 Sagnac 干涉原理的光纤传感局放检测方案。实验证明,在 10 kV 电压等级下,局放时域信号幅值范围为 0.1~1.8 V,频率响应范围可达 60 kHz,而当传感探头光纤环长度约为 12 m 时,时域信号幅值达到峰值。2019 年, Ma 等<sup>[98-99]</sup>设计了基于 Michelson 干涉原理的光纤超声传感系统,并用于 GIS 设备局放超声信号检测,在 126 kV 电压等级下,所研制的光纤超声传感器的平均灵敏度较传统的 PZT 传感器高 32 dB,在相同超声信号激励下,该传感器最大响应幅值比 PZT 传感器高 525%。相比较而言,基于 FP 的光纤局放超声传感结构紧凑,可

通过改进 FP 振动膜进一步提高局放探测灵敏度<sup>[100-103]</sup>。Li 等<sup>[103]</sup>提出了一种基于微机电系统(MEMS)的 EFPI 传感器并用于局放超声探测,该类型传感器具有高灵敏度和宽频带的优点,其噪声极限声压在声频 63 kHz 下小于 316  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。另外,研究人员还提出了基于 FBG 的局放超声传感器<sup>[104-107]</sup>。基于 FBG 的局放传感系统可以将传感器进行串联并采用波长解调技术进行分布式或准分布式测量,实现了局放定位探测。为了提高探测灵敏度, Ma 等<sup>[104]</sup>提出采用 PS-FBG 阵列结构实现局放信号的定位测量,所提的传感器灵敏度比传统的传感器高 8.46 dB。

相比较而言,局放信号的定位测量在安全检测中尤为重要,除部分上述传感技术外,研究人员还针对分布式光纤局放传感技术进行了大量的研究<sup>[108-109]</sup>。例如, Chen 等<sup>[109]</sup>开展了基于  $\Phi$ -OTDR 的 GIS 击穿放电声发射探测技术研究,提出高泊松比的弹性体结合光纤的方式,进一步提高了检测灵敏度,与传统的光纤环传感技术相比,传感头解调波形峰峰值大于光纤环的解调波形,传感头的功率谱峰值比普通光纤环大 15 dB 左右,验证了弹性体的增敏作用,如图 13(a)~(c)所示。该方案利用 3D 打印技术灵活制备了具有不同参数的声发射振动传感头,并用于 GIS 击穿放电的声发射信号检测,如图 13(d)和图 13(e)所示,分析不同位置的传感头解调波形的时延差,可实现对击穿放电区域的精确定位,在脉冲重复频率为 10 kHz 时定位精度为 0.3 m,与传统方式 2.5 m 的定位精度相比,有明显提升,且该方案可随脉冲重复频率的提高实现更加精确的定位。

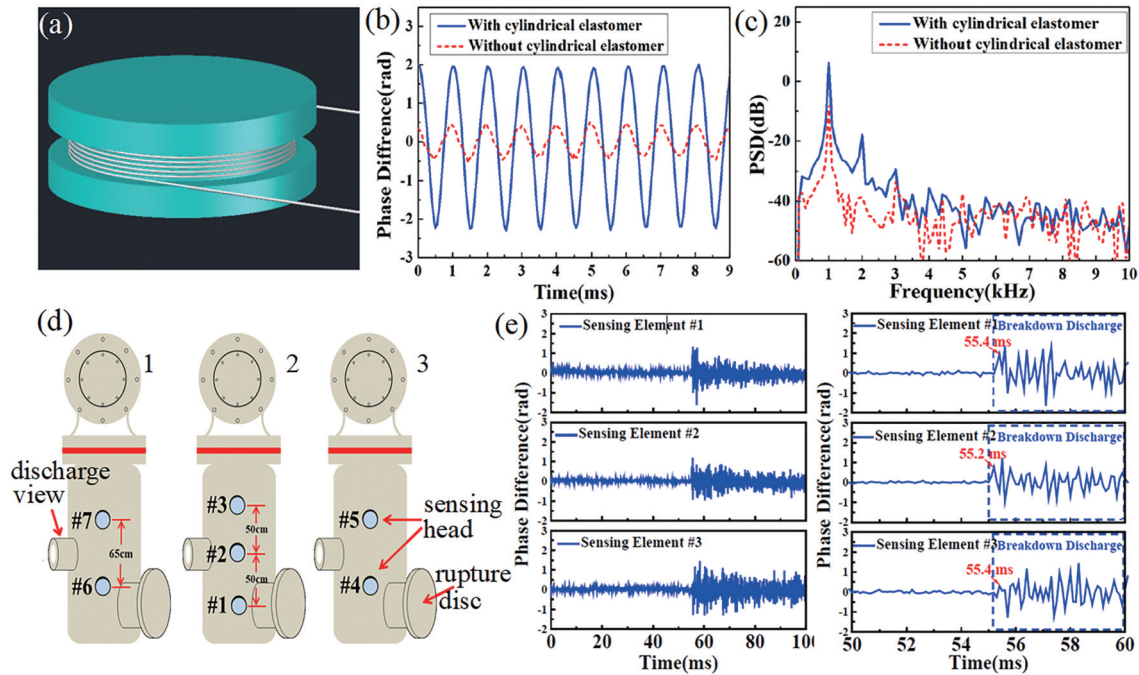


图 13 3D 打印制备光纤局放声发射传感器<sup>[109]</sup>。(a) 传感头示意图；(b) 传感头和光纤环的解调信号；(c) 传感头和光纤环解调的功率谱密度；(d) 传感头布设示意图；(e) 传感头#1、#2和#3的解调波形

Fig. 13 3D printing optical fiber partial discharge acoustic emission sensor<sup>[109]</sup>. (a) Schematic diagram of the sensing head; (b) demodulated signals of the proposed sensing head and optical fiber ring; (c) power spectral densities of the signals detected by the proposed sensing head and optical fiber ring; (d) schematic diagram of the sensor head layout; (e) demodulated signals of the sensor#1, sensor#2 and sensor#3

尽管目前大量的研究集中在光纤局放信号探测方向,但由于局放应用场合信号复杂,还难以有效实现对信号的定量分析,难以减少事件误判现象。今后,可以在声源探测和信号处理等方面作进一步研究,以提高传感器在局放安全检测中的实用性。

### 3.2 光纤超声结构安全监测技术

大型结构的健康安全状况关系到结构服役的寿命,材料中一个初始的小缺陷可能会发展成大的损伤并导致整个结构发生灾难性的失效,最终威胁到人们的生命财产安全。因此,如何有效地进行结构安全监测一直是结构安全领域研究的热点。

目前,光纤超声检测技术是智能结构安全监测领域中最基本的无损检测手段,能有效探测结构内部微观不均匀特性并评价其力学性能特征,已广泛应用于航空航天、土木工程以及机械工程等领域。2006年,Betz等<sup>[110]</sup>开展了FBG传感器在结构健康监测(SHM)中的应用研究,通过对比铝板中260 kHz和460 kHz两种激励频率的声波检测信号,发现FBG传感器检测性能与PZT传感相当

且具有更宽的频带响应。在后续的工作<sup>[111]</sup>中,该课题组还研究了FBG在SHM中的损伤定位问题,由于FBG对超声波的响应具有一定的方向性,他们设计了一种由FBG组成的玫瑰花形结构,并利用由三个FBG测得的反射声波的方向特征信息对损伤位置进行精确定位。2007年,Tsuda等<sup>[112]</sup>首次开展了对于金属材料疲劳损伤裂纹的FBG检测研究,证明了移动FBG传感器在裂纹探测领域的可行性。与未开裂区域的参考响应相比,交叉疲劳裂纹的超声响应具有一定的时延;与传统的PZT传感器相比,FBG超声传感器在对裂纹尖端进行检测和定位时具有更高的分辨率和精确度。随后,该课题组利用FBG对碳纤维复合材料中的声发射信号进行了连续检测工作<sup>[113]</sup>,实验表明FBG超声传感器具有与PZT传感器相当的声发射信号检测能力。同年,Lam等<sup>[114]</sup>开展了基于FBG的超声波结构安全监测研究,通过将FBG嵌入到复合材料层压板中,分别采用宽带光源和可调谐激光源对FBG进行解调,实验结果表明,基于复合材料分层之后的兰姆波信号变化情况可实现对缺陷性质的分析。Okabe课题组<sup>[115-119]</sup>也提出了

应用于监测复合材料结构损伤的 FBG 传感系统, 利用兰姆波传感定量评估碳纤维复合材料层压板的分层长度, 并利用小波变化对 FBG 粘接处的脱胶程度进行估计。在随后的工作中, 为了提高传感器的灵敏度, 该课题组采用 PS-FBG 作为传感单元, 实现了对碳纤维复合材料和层压板结构中的裂纹检测, 通过对声-超声检测、声发射信号检测和非线性超声检测三种基于超声 SHM 技术的研究, 验证了该技术在 SHM 领域的可行性。

此外, 研究人员优化了实验传感方案, 解决了超声探测多路复用以及传感器集成等问题。2011 年, Kirikera 等<sup>[11]</sup>研究了基于 FBG 传感器和双波混频干涉仪的自适应解调系统, 成功实现了频率高达 180 kHz 的动态应变测量, 同时利用时频小波分析, 得到了兰姆波模态的群速度频散曲线, 并以此来确定载荷冲击的位置。2016 年, Hu 等<sup>[120]</sup>提出了基于 FBG 的全光纤的多参数 SHM 系统并用于板结构的损伤检测, 该结构由一个超声激励单元和一个超声传感单元组成, 其中超声激励单元由多模光纤中的微结构将光散射出光纤, 继而通过热弹性效应产生超声波, 超声传感单元则由 FBG 构成, 用于

检测由超声波信号引起的动态应变, 实现了对铝板材料裂纹损伤的探测。同年, Wei 等<sup>[14]</sup>研究了基于 FBG 和半导体光放大器的激光自适应解调系统, 并用于裂纹开裂和荷载冲击等动态检测, 该系统能够自适应检测环境变化引起的低频漂移。实验可探测频率高于 400 kHz 的荷载冲击信号, 灵敏度与传统 PZT 相当, 如图 14 所示。在随后的研究工作中, 该课题组<sup>[15]</sup>从理论上研究了基于半导体光放大器和掺铒光纤放大器组成的自适应激光动态应变系统对高频超声信号的响应问题, 并提出基于光折变晶体的两波混频干涉解调及多路复用技术, 进一步推广了传感器在结构安全检测的应用。2020 年, Williams 等<sup>[121]</sup>提出了一种基于分布式反馈激光器 (DFB) 的多通道光纤激光声发射传感系统并用于铝板疲劳裂纹的检测与定位, 该系统具有极高的灵敏度, 其测试性能与现有的 PZT 传感器较为接近, 其探测精度可以达到 1 mm 量级。相比较于提升传感系统的光学性能, 研究人员从结构性能上提升了系统探测性能, 设计了基于耦合锥结构的 FBG 超声传感器, 改进了传统的裸光纤布置工艺, 具有灵敏度高、布置位置灵活以及可重复利用等优点<sup>[122-123]</sup>。

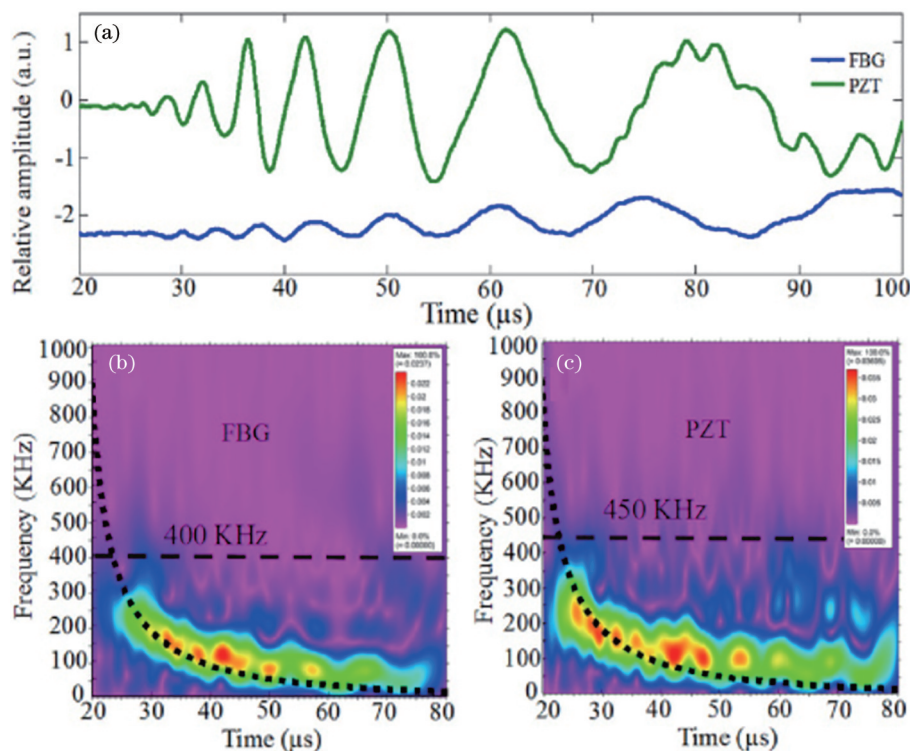


图 14 FBG 和 PZT 探测到的动态应变响应<sup>[14]</sup>。(a) 时间响应信号; (b) FBG 的时频响应; (c) PZT 的时频响应

Fig. 14 Dynamic strain response of the FBG sensor and the PZT transducer<sup>[14]</sup>. (a) Time response of the sensors; (b) time frequency response of the FBG sensor; (c) time frequency response of the PZT transducer



## 4 对光纤超声传感技术的展望

迄今为止,光纤超声传感技术已受到国内外同行广泛的关注,多个研究单位开展了相关的基础和应用研究,实现了高灵敏、高频响、宽频带的超声探测并广泛应用于航空航天、土木工程以及军事装备等方面的安全检测。尽管光纤传感技术趋于成熟,其超声感知性能还有待进一步提升,技术中仍存在一系列诸如声场耦合不匹配、传感方案无法兼顾高频响和宽频带等问题。考虑到具体实际应用需求以及现场应用环境的要求,提升传感器及系统性能的同时,下一步的工作将主要聚焦于传感器的复用技术、微型化以及集成化等方面,如图 15 所示,进一步探索新型传感机理、敏感材料以及高性能光刻工艺等,最终形成具有系统稳定、灵敏度高、可组网的光纤超声传感检测设备。关于光纤超声传感安全监测技术应用发展趋势可总结如下:

1) 复用技术。传感器复用及复用解调在工程应用中具有大量的需求,目前,诸如时分复用、波分复用技术等已比较成熟,但遇到的问题也比较多,例如,如何均衡传感阵列功率,如何解决各通道传感器间的串扰以及低频扰动等。因此,研究传感器复用技术是目前光纤超声传感器实用化必须要考虑的一个问题。

2) 微型化。由于光纤超声传感器受光纤材料、尺寸以及制备工艺等方面的限制,越来越多的研究聚焦于材料和制备工艺等方面,以制备出新型光纤超声传感器。一方面,在保证器件灵敏度的基础上,采用先进的飞秒激光微加工工艺可进一步缩小器件的体积,优化传感器结构及封装,获取更加紧凑的光纤微结构器件;另一方面,研究新型敏感材

料,进一步提高超声波探测灵敏度,提高探测极限。

3) 集成化。目前部分光纤超声传感器已经实现了微型化,但不论是传感器和传感器之间连接还是传感系统内部,都比较分散,难以进行有效的集成,因此,要想提高系统空间分辨率,提升系统可靠性等,需使系统高度集成化,需解决传感器的串扰以及环境干扰等问题。这方面可以结合新型材料采用芯片化生产工艺制备高性能集成化的超声传感系统。

综合分析,具体关键研究技术主要从传感机理、封装技术等方面进行突破,如图 15 所示,为了提高传感器的灵敏度,设计传感器的同时需考虑到声场耦合特征、最大优化接收角。针对不同的应用场合如高温、高压等极端环境时,如何保证传感器的高稳定性和耐久性,其封装技术至关重要。采用恰当的传感器封装技术,可保证传感器的测量数据可靠,能够实现长期稳定的测量。此外,合适的传感解调技术也可保证传感器对信号幅频特性的高灵敏感知。

## 5 结 论

主要综述了光纤超声传感技术以及光纤超声在安全监测领域中的应用,分析了传感机理、传感方法及存在的问题,总结了光纤超声传感器在几个重要的安全监测领域面临的挑战。经过近几十年的发展,光纤超声传感器从材料、结构以及加工方式等均具有较大的突破,部分已实际应用于工程领域,但仍存在诸多问题,后续研究重点将聚焦于器件的性能、复用技术、微型化以及集成化等方面。

## 参 考 文 献

- [1] Kirikera G R, Balogun O, Krishnaswamy S. Adaptive fiber Bragg grating sensor network for structural health monitoring: applications to impact monitoring[J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10(1): 5-16.
- [2] Fomitchov P A, Krishnaswamy S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(4): 956-963.
- [3] Shao Z H, Wang W X, Chen F Y, et al. Fiber-optic endoscopic ultrasonic imaging of pipe-type seismic physical models[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 132: 106479.
- [4] Dong B Q, Li H, Zhang Z, et al. Isometric multimodal photoacoustic microscopy based on optically

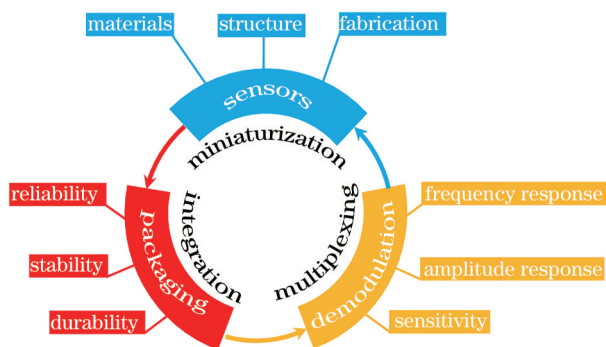


图 15 光纤超声传感技术可行的研究方向示意图

Fig. 15 Illustration of possible research directions for optical fiber ultrasonic sensing technologies

- transparent micro-ring ultrasonic detection[J]. *Optica*, 2015, 2(2): 169-176.
- [5] Bai X H, Hu M L, Gang T T, et al. An ultrasonic sensor composed of a fiber Bragg grating with an air bubble for underwater object detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 467-472.
- [6] Wang D, Filoux E, Levassort F, et al. Fabrication and characterization of annular-array, high-frequency, ultrasonic transducers based on PZT thick film[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 216: 207-213.
- [7] Zhang Q Q, Djuth F T, Zhou Q F, et al. High frequency broadband PZT thick film ultrasonic transducers for medical imaging applications[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44: e711-e715.
- [8] Ishikawa M, Kurosawa M K, Endoh A, et al. Lead zirconate titanate thick-film ultrasonic transducer for 1 to 20 MHz frequency bands fabricated by hydrothermal polycrystal growth[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(6B): 4342-4346.
- [9] Wild G, Hinckley S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1184-1193.
- [10] Qiao X G, Shao Z H, Bao W J, et al. Fiber-optic ultrasonic sensors and applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 074205.  
乔学光, 邵志华, 包维佳, 等. 光纤超声传感器及应用研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 074205.
- [11] Gao C M, Nie F, Zhang P, et al. Optical fiber acoustic sensors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180050.  
高椿明, 聂峰, 张萍, 等. 光纤声传感器综述[J]. *光电工程*, 2018, 45(9): 180050.
- [12] Wu Q, Okabe Y, Yu F M. Ultrasonic structural health monitoring using fiber Bragg grating[J]. *Sensors*, 2018, 18(10): E3395.
- [13] Bao X Y, Zhou D P, Baker C, et al. Recent development in the distributed fiber optic acoustic and ultrasonic detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3256-3267.
- [14] Wei H, Tao C, Zhu Y, et al. Fiber Bragg grating dynamic strain sensor using an adaptive reflective semiconductor optical amplifier source[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2752-2759.
- [15] Wei H, Krishnaswamy S. Comparative assessment of erbium fiber ring lasers and reflective SOA linear lasers for fiber Bragg grating dynamic strain sensing [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3867-3874.
- [16] Tadayon M A, Baylor M E, Ashkenazi S. Polymer waveguide Fabry-Perot resonator for high-frequency ultrasound detection[J]. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2014, 61(12): 2132-2138.
- [17] Liu G G, Zhu Y P, Liu Z G, et al. Passive quadrature demodulation of an ultrasonic fiber-optic interferometric sensor using a laser and an acousto-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2756-2759.
- [18] Liang S, Tjin S C, Lin B, et al. Novel fiber Bragg grating sensing method based on the sidelobe modulation for ultrasound detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2686-2693.
- [19] Wang J F, Flockhart G M H, Uttamchandani D. Demodulation of polarimetric fiber laser ultrasonic sensor with intensity noise cancellation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4872-4880.
- [20] Wei H, Krishnaswamy S. Direct laser writing of a phase-shifted Bragg grating waveguide for ultrasound detection[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3817-3820.
- [21] Wei H, Krishnaswamy S. Polymer micro-ring resonator integrated with a fiber ring laser for ultrasound detection[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2655-2658.
- [22] Dong B Q, Chen S Y, Zhang Z, et al. Photoacoustic probe using a microring resonator ultrasonic sensor for endoscopic applications[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4372-4375.
- [23] Zhu E Y, Rewcastle C, Gad R, et al. Refractive-index-based ultrasound sensing with photonic crystal slabs[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2609-2612.
- [24] Han C, Zhao C, Ding H, et al. Spherical microcavity-based membrane-free Fizeau interferometric acoustic sensor[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3677-3680.
- [25] Nelson D F, Kleinman D A, Wecht K W. Vibration-induced modulation of fiberguide transmission[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 30(2): 94-96.
- [26] Spillman W B, Gravel R L. Moving fiber-optic hydrophone[J]. *Optics Letters*, 1980, 5(1): 30-31.
- [27] Spillman W B, McMahan D H. Frustrated-total-internal-reflection multimode fiber-optic hydrophone [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(1): 113-117.
- [28] NessAiver M S, Stone M, Parthasarathy V, et al. Recording high quality speech during tagged cine-MRI studies using a fiber optic microphone[J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2006, 23

- (1): 92-97.
- [29] Chen R, Fernando G F, Butler T, et al. A novel ultrasound fibre optic sensor based on a fused-tapered optical fibre coupler[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(8): 1490-1495.
- [30] Wang S, Lu P, Zhang L, et al. Optical fiber acoustic sensor based on nonstandard fused coupler and aluminum foil[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(7): 2293-2298.
- [31] Chen R S, Bradshaw T, Burns J, et al. Linear location of acoustic emission using a pair of novel fibre optic sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(8): 2313-2318.
- [32] Fomitchov P, Krishnaswamy S, Achenbach J D. Fiberized Sagnac interferometer for ultrasound measurement[M]//Thompson D O, Chimenti E. *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*. Boston: Springer, 1996, 15A: 645-650.
- [33] Fomitchov P A. Extrinsic and intrinsic fiber optic Sagnac ultrasound sensors[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(7): 1972-1984.
- [34] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F. Optical fiber acoustic sensor[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(7): 1761-1762.
- [35] Gang T T, Hu M L, Qiao X G, et al. Fiber-optic Michelson interferometer fixed in a tilted tube for direction-dependent ultrasonic detection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 60-64.
- [36] Prince J A, Kohl F, Sauter T. Modeling of distributed sensing of elastic waves by fiber-optic interferometry[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1433.
- [37] Lan C M, Zhou W S, Xie Y W. Detection of ultrasonic stress waves in structures using 3D shaped optic fiber based on a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1218.
- [38] Liu G G, Zhu Y P, Sheng Q W, et al. Polarization-insensitive, omnidirectional fiber-optic ultrasonic sensor with quadrature demodulation[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(15): 4164-4167.
- [39] Gallego D, Lamela H. High-sensitivity ultrasound interferometric single-mode polymer optical fiber sensors for biomedical applications[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(12): 1807-1809.
- [40] Liu L, Lu P, Liao H, et al. Fiber-optic Michelson interferometric acoustic sensor based on a PP/PET diaphragm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(9): 3054-3058.
- [41] Ouyang B L, Li Y L, Kruidhof M, et al. On-chip silicon Mach-Zehnder interferometer sensor for ultrasound detection[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 1928-1931.
- [42] Sun A, Wu Z S, Wan C F, et al. All-fiber optic acoustic sensor based on multimode-single mode-multimode structure[J]. *Optik*, 2012, 123(13): 1138-1139.
- [43] Sun A, Wu Z S, Fang D, et al. Multimode interference-based fiber-optic ultrasonic sensor for non-contact displacement measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(14): 5632-5635.
- [44] Nayeem M O G, Lee S, Jin H, et al. All-nanofiber-based, ultrasensitive, gas-permeable mechanoacoustic sensors for continuous long-term heart monitoring[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(13): 7063-7070.
- [45] Fan H B, Chen L, Bao X Y. Chalcogenide microfiber-assisted silica microfiber for ultrasound detection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1128-1131.
- [46] Ju Y, Zhang W, Yang C, et al. Displacement and acoustic vibration sensor based on gold nanobipyramids doped PDMS micro-fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31889-31897.
- [47] Pang M, Jin W. Detection of acoustic pressure with hollow-core photonic bandgap fiber[J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 11088-11097.
- [48] Pawar D, Rao C N, Choubey R K, et al. Mach-Zehnder interferometric photonic crystal fiber for low acoustic frequency detections[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(4): 041912.
- [49] Fomitchov P A, Krishnaswamy S, Achenbach J D. Compact phase-shifted Sagnac interferometer for ultrasound detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 1997, 29(6): 333-338.
- [50] Fomitchov P A, Kromine A K, Krishnaswamy S, et al. Sagnac-type fiber-optic array sensor for detection of bulk ultrasonic waves[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2000, 47(3): 584-590.
- [51] Pelivanov I, Buma T, Xia J, et al. A new fiber-optic non-contact compact laser-ultrasound scanner for fast non-destructive testing and evaluation of aircraft composites[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(11): 113105.
- [52] Wang L T, Fang N, Wu C X, et al. A fiber optic PD sensor using a balanced Sagnac interferometer and an EDFA-based DOP tunable fiber ring laser[J].



- Sensors, 2014, 14(5): 8398-8422.
- [53] Culshaw B. The optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(1): R1-R16.
- [54] Ma J, Yu Y Q, Jin W. Demodulation of diaphragm based acoustic sensor using Sagnac interferometer with stable phase bias[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29268-29278.
- [55] Wada K J, Narui H, Yamamoto D, et al. Balanced polarization maintaining fiber Sagnac interferometer vibration sensor[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21467-21474.
- [56] Li X G, Nguyen L V, Zhao Y, et al. High-sensitivity Sagnac-interferometer biosensor based on exposed core microstructured optical fiber[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 269: 103-109.
- [57] Dorighi J F, Krishnaswamy S, Achenbach J D. Stabilization of an embedded fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasound detection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1995, 42(5): 820-824.
- [58] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors[J]. Optics Letters, 1991, 16(4): 273-275.
- [59] Wei H, Krishnaswamy S. Adaptive fiber-ring lasers based on an optical fiber Fabry-Perot cavity for high-frequency dynamic strain sensing[J]. Applied Optics, 2020, 59(2): 530-535.
- [60] Shen S, Wei H M, Wang J, et al. 3D printing optical fiber Fabry-Perot cavity acoustic emission sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906004.  
沈诗, 魏鹤鸣, 王俊, 等. 3D 打印光纤法布里-珀罗腔声发射传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906004.
- [61] Thathachary S V, Ashkenazi S. Toward a highly sensitive polymer waveguide fiber Fabry-Perot ultrasound detector[J]. Journal of Biomedical Optics, 2018, 23(10): 106008.
- [62] Guggenheim J A, Li J, Allen T J, et al. Ultrasensitive Plano-concave optical microresonators for ultrasound sensing[J]. Nature Photonics, 2017, 11(11): 714-719.
- [63] Rong Q Z, Zhou R X, Hao Y X, et al. Ultrasonic sensitivity-improved Fabry-Perot interferometer using acoustic focusing and its application for noncontact imaging[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-11.
- [64] Wei H, Krishnaswamy S. Femtosecond laser fabricated Fabry-Perot sensors on optical fiber tip for acoustic sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10972: 1097215.
- [65] Wang H, Xie Z W, Zhang M L, et al. A miniaturized optical fiber microphone with concentric nanorings grating and microsprings structured diaphragm[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 110-115.
- [66] Yao M, Zhang Y, Ouyang X, et al. Ultracompact optical fiber acoustic sensors based on a fiber-top spirally-suspended optomechanical microresonator[J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3516-3519.
- [67] Ni W J, Lu P, Fu X, et al. Ultrathin graphene diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometer for ultra-wideband fiber optic acoustic sensing[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20758-20767.
- [68] Yu F F, Liu Q W, Gan X, et al. Ultrasensitive pressure detection of few-layer MoS<sub>2</sub>[J]. Advanced Materials, 2017, 29(4): 1603266.
- [69] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [70] Webb D J, Surowiec J, Sweeney M, et al. Miniature fiber optic ultrasonic probe[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2839: 76-80.
- [71] Fisher N E, Surowiec J, Webb D J, et al. In-fibre Bragg gratings for ultrasonic medical applications[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(10): 1050-1054.
- [72] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(3): 391-396.
- [73] Feng Z W, Zhang L. Demodulation technique based on diffraction optical element for fiber Bragg grating sensing system[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7853: 78530I.
- [74] Qiao Y, Zhou Y, Krishnaswamy S. Adaptive demodulation of dynamic signals from fiber Bragg gratings using two-wave mixing technology[J]. Applied Optics, 2006, 45(21): 5132-5142.
- [75] Perry M, Orr P, Niewczas P, et al. Nanoscale resolution interrogation scheme for simultaneous static and dynamic fiber Bragg grating strain sensing

- [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(20): 3252-3258.
- [76] Bai X H, Hu M L, Gang T T, et al. A submerged optical fiber ultrasonic sensor using matched fiber Bragg gratings[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1942.
- [77] Li Y, Tian J J, Fu Q, et al. A multi-point switchable and self-adaptive ultrasonic sensor using fiber Bragg gratings in a fiber ring laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1160-1167.
- [78] Hazan Y, Rosenthal A. Passive-demodulation pulse interferometry for ultrasound detection with a high dynamic range[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1039-1042.
- [79] Hazan Y, Rosenthal A. Simultaneous multi-channel ultrasound detection via phase modulated pulse interferometry[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28844-28854.
- [80] Rosenthal A, Razansky D, Ntziachristos V. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1833-1835.
- [81] Wu Q, Okabe Y. High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28353-28362.
- [82] 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.
- [83] Hu L L, Liu G G, Zhu Y P, et al. Laser frequency noise cancelation in a phase-shifted fiber Bragg grating ultrasonic sensor system using a reference grating channel[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-8.
- [84] Liang Y Z, Jin L, Wang L D, et al. Fiber-laser-based ultrasound sensor for photoacoustic imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40849.
- [85] Govindan V, Ashkenazi S. Bragg waveguide ultrasound detectors[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, 59(10): 2304-2311.
- [86] Wang T X, Cao R, Ning B, et al. All-optical photoacoustic microscopy based on plasmonic detection of broadband ultrasound[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(15): 153702.
- [87] Yang T, He X L, Zhou X, et al. Surface plasmon cavities on optical fiber end-facets for biomolecule and ultrasound detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 101: 468-478.
- [88] Zhou X, Cai D, He X L, et al. Ultrasound detection at fiber end-facets with surface plasmon resonance cavities[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 775-778.
- [89] Yang T, Chen C, Wang X D, et al. Plasmonic sensing on fiber tip[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202404.
- 杨天, 陈成, 王晓丹, 等. 光纤端的等离子体探测技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202404.
- [90] Maxwell A, Huang S W, Ling T, et al. Polymer microring resonators for high-frequency ultrasound detection and imaging[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 14(1): 191-197.
- [91] Li H, Dong B Q, Zhang Z, et al. A transparent broadband ultrasonic detector based on an optical micro-ring resonator for photoacoustic microscopy[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4496.
- [92] Baac H W, Ling T, Huang S W, et al. Characterization of optical microring ultrasound detector by using a high frequency focused photoacoustic transmitter[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(14): 144105.
- [93] Lin S Y, Schonbrun E, Crozier K. Optical manipulation with planar silicon microring resonators [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2408-2411.
- [94] Yang W J, Song S J, Powell K, et al. Etched silicon-on-insulator microring resonator for ultrasound measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 1-9.
- [95] Kim T Y, Suh K S, Nam J H, et al. Acoustic monitoring of HV equipment with optical fiber sensors[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(2): 266-270.
- [96] Li X M, Gao Y, Wang Y, et al. Study on partial discharge ultrasonic signal detection method based on optical fiber sensing technology[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(11): 1619-1624.
- 李晓敏, 高妍, 王宇, 等. 基于光纤传感技术的局部放电超声信号检测方法研究[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(11): 1619-1624.
- [97] Wang Y, Li X M, Gao Y, et al. Partial discharge ultrasound detection using the Sagnac interferometer system[J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1425.
- [98] Ma G M, Zhou H Y, Zhang M, et al. A high sensitivity optical fiber sensor for GIS partial discharge detection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(20): 9235-9243.
- [99] Zhou H Y, Ma G M, Zhang M, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in

- GIS based on the Michelson fiber optic interferometer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6452-6460.
- 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于 Michelson 光纤干涉的 GIS 局部放电超声信号检测技术[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6452-6460.
- [100] Zhang W C, Zhao H, Chu X. Partial discharge acoustic emission sensor design based on extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406002.
- 张伟超, 赵洪, 楚雄. 基于非本征光纤法布里-珀罗干涉仪的局放声发射传感器设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406002.
- [101] Guo S P, Gao Y Y, Xu L N, et al. Partial discharges detection system based on fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(12): 61-64.
- 郭少朋, 高莹莹, 徐鲁宁, 等. 基于光纤法珀传感器的局部放电测试系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2015(12): 61-64.
- [102] Gao C F, Wang W, Song S, et al. Localization of partial discharge in transformer oil using Fabry-Pérot optical fiber sensor array[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(6): 2279-2286.
- [103] Li H, Lü J, Li D, et al. MEMS-on-fiber ultrasonic sensor with two resonant frequencies for partial discharges detection[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18431-18439.
- [104] Ma G M, Zhou H Y, Shi C, et al. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7): 2788-2795.
- [105] Ye H F, Qian Y, Liu Y D, et al. Partial discharge detection technology based on fiber Bragg grating[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(1): 225-230.
- 叶海峰, 钱勇, 刘亚东, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的局放检测技术[J]. *高电压技术*, 2015, 41(1): 225-230.
- [106] Ghorat M, Gharehpetian G B, Latifi H, et al. Partial discharge acoustic emission detector using mandrel-connected fiber Bragg grating sensor[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(7): 074107.
- [107] Sarkar B, Koley C, Roy N K, et al. Condition monitoring of high voltage transformers using fiber Bragg grating sensor[J]. *Measurement*, 2015, 74: 255-267.
- [108] Chen H, Xu Y, Qian S, et al. Distributed fiber-optic ultrasonic sensor applied in detection of discharging fault of power cable joint[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0306001.
- 陈浩, 徐阳, 钱森, 等. 分布式光纤超声传感器用于检测电缆接头放电故障[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0306001.
- [109] Chen Z, Zhang L, Liu H H, et al. 3D printing technique-improved phase-sensitive OTDR for breakdown discharge detection of gas-insulated switchgear[J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 1045.
- [110] Betz D C, Thursby G, Culshaw B, et al. Identification of structural damage using multifunctional Bragg grating sensors: I. theory and implementation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(5): 1305-1312.
- [111] Culshaw B, Thursby G, Betz D, et al. The detection of ultrasound using fiber-optic sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1360-1367.
- [112] Tsuda H, Lee J R, Guan Y S, et al. Investigation of fatigue crack in stainless steel using a mobile fiber Bragg grating ultrasonic sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, 13(3): 209-214.
- [113] Tsuda H, Sato E, Nakajima T, et al. Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2942-2944.
- [114] Lam P M, Lau K T, Ling H Y, et al. Acousto-ultrasonic sensing for delaminated GFRP composites using an embedded FBG sensor[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(10): 1049-1055.
- [115] Takeda N, Okabe Y, Kuwahara J, et al. Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using lamb wave sensing[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(15/16): 2575-2587.
- [116] Yu F M, Wu Q, Okabe Y, et al. The identification of damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates using a novel fiber-optic acoustic emission sensor[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2016, 15(1): 93-103.
- [117] Yu F M, Okabe Y, Wu Q, et al. A novel method of identifying damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates based on acoustic emission detection using a fiber-optic sensor[J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 135: 116-122.
- [118] Wu Q, Okabe Y, Wo J H. Fiber sensor based on interferometer and Bragg grating for multiparameter



- detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1345-1348.
- [119] Wu Q, Wang R, Yu F M, et al. Application of an optical fiber sensor for nonlinear ultrasonic evaluation of fatigue crack[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(13): 4992-4999.
- [120] Hu C N, Yu Z H, Wang A B. An all fiber-optic multi-parameter structure health monitoring system [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20287-20296.
- [121] Williams C R S, Hutchinson M N, Hart J D, et al. Multichannel fiber laser acoustic emission sensor system for crack detection and location in accelerated fatigue testing of aluminum panels[J]. APL Photonics, 2020, 5(3): 030803.
- [122] Shi J M, Zheng D, Pan W, et al. Fiber grating ultrasonic sensor based on coupling cone structure and its application in nondestructive detection[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206004.  
史镜名, 郑狄, 潘炜, 等. 基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器及其无损检测研究[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206004.
- [123] Zou Z J, Qin Z B, Li Y Y, et al. Optimization design of fiber optic ultrasonic sensor based on coupling cone structure[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2306004.  
邹子杰, 秦忠宝, 李易依, 等. 基于耦合锥结构的光纤超声传感器优化设计[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2306004.