



DOI: 10.12086/oe.2018.180050

## 光纤声传感器综述

高椿明\*, 聂峰, 张萍, 赵斌兴, 王静, 李斌成

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054

**摘要:** 光纤声传感器是一种利用光纤作为传光介质或探测单元的一类声传感器, 相比传统电声传感器其具有灵敏度高、频带响应宽、抗电磁干扰等优越特性, 可广泛应用于国防安全、工业无损检测、医疗诊断及消费电子等领域。按照声场与光的耦合方式, 把光纤声传感器分为间接耦合型和直接耦合型两种, 其中, 间接耦合型光纤声传感器受声耦合材料频响特性限制, 存在频响不平坦、带宽较窄及动态范围小等缺点; 而直接耦合型光纤声传感器克服了上述的缺点, 具有广阔的发展潜力。

**关键词:** 光纤声传感器; 间接耦合; 直接耦合; 频率响应; 灵敏度

**中图分类号:** TP212; TN253

**文献标志码:** A

**引用格式:** 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

## Optical fiber acoustic sensors

Gao Chunming\*, Nie Feng, Zhang Ping, Zhao Binxing, Wang Jing, Li Bincheng

School of Opto-Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract:** Optical fiber acoustic sensors are a kind of acoustic sensors that use optical fibers as light-propagating media or detection units. Compared to traditional electro-acoustic sensors, it features high sensitivity, broad-band frequency response, anti-electromagnetic interference etc, thus very promising for national security, industrial non-destructive testing, medical diagnostics, consumer electronics etc. Optical fiber acoustic sensors are classified, in terms of the coupling mode between acoustic field and light, as indirect and direct coupling types. The former presents some problems such as uneven frequency response, narrower bandwidth, and smaller dynamic range due to the frequency response features of the acoustic coupling materials, while the latter has overcome these shortcomings and thus possesses broad development potential.

**Keywords:** optical fiber acoustic sensors; indirect coupling; direct coupling; frequency response; sensitivity

**Citation:** Gao C M, Nie F, Zhang P, et al. Optical fiber acoustic sensors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180050

## 1 引言

声波作为信息和能量的载体是最早受到关注并研究的自然现象, 随着信息技术突飞猛进, 高灵敏度、大带宽的探测声信号越来越重要。近年来, 声传感器

的研究热点已从电声传感技术向光声传感技术发展。

早在 1880 年, Bell<sup>[1]</sup>提出“光电话”的概念并首次实现声信号的光探测。随着电子技术、激光及光纤技术的出现和进步, 越来越多的新型光声探测技术得

收稿日期: 2018-01-09; 收到修改稿日期: 2018-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61379013); 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1103002); 四川省科技计划项目(2016GZ0002)

作者简介: 高椿明(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事光声感知技术的研究。E-mail: gaocm@uestc.edu.cn

到发展。光纤声传感技术是在上世纪 70 年代<sup>[2-3]</sup>迅速发展起来的, 由于光波检测精度高, 结合光纤工作频带宽、传输损耗小等优势使得光纤声传感器相比空间光传声器及传统电声传感器, 具有灵敏度高、信噪比高、频带响应宽和动态范围大的优点; 同时由于其免电磁干扰且可微型化, 可用于传统电声传感器难以正常工作的高温、高压、强腐蚀、强辐射等环境。因此, 光纤声传感器在国防安全、工业无损检测、医疗诊断等领域<sup>[4-7]</sup>受到了重视和广泛应用。

随着新材料和新工艺的出现, 光纤声传感器日新月异。从光纤参与声传感的方式出发, 光纤声传感器主要分为本征型(光纤本身作为声敏感元件的同时也为光传输元件)和非本征型(光纤仅作为光信息传输元件, 声敏感元件为非光纤的薄膜或其他声压变化量的探测器件)<sup>[4, 7-8]</sup>, 主要研究不同光学参数、声场耦合材料与光纤的融合等内容, 并未重点关注引入声场耦合结构对声传感及声场分布的影响。从光纤声传感器的频响曲线的角度出发, 本文引入一种按是否使用声场耦合材料为标准的新的分类方法, 综述光纤声传感器的现状及发展方向。

## 2 光纤声传感技术分类

衡量光纤声传感器性能的参数主要包括: 灵敏度、信噪比、频率响应和动态范围。其中灵敏度和信噪比越高越好, 意味着声传感器可探测声压越小, 声信号拾取更准确; 频率响应越平坦越好, 带宽越大越好, 表明声探测线性度好, 声信号还原度高; 动态范围越大越好, 可实现高压环境下不失真声探测。从频响曲线的角度分析可得, 以上四个性能参数均受声场耦合结构的影响。因此为了分析各类光纤声传感技术性能参数的限制问题, 本文所述光纤声传感器根据声场与光的耦合形式的不同可分为间接耦合型与直接耦合型

光纤声传感器, 其中间接耦合型光纤声传感器使用了声耦合材料, 常用的有光纤、声敏感膜片等, 声场通过声耦合材料间接与光相互作用; 直接耦合型光纤声传感器无声耦合材料, 声场与光直接相互作用。目前发展较为成熟并广泛使用的多为间接耦合型, 直接耦合型是近几年才逐渐受到关注的新技术。

### 2.1 间接耦合型光纤声传感技术

间接耦合型光纤声传感器主要分为光强调制型、相位调制型和波长调制型等类型。

#### 2.1.1 光强调制型光纤声传感技术

光强调制型光纤声传感技术是一种使用广泛的传统技术, 其利用声波振动影响光传输通道从而进行测量, 主要包括五种类型: 弯曲波导型<sup>[2, 8]</sup>、耦合波导型<sup>[9-10]</sup>、悬臂型<sup>[11-13]</sup>、反射型<sup>[14-15]</sup>、移动闸门型<sup>[8, 16]</sup>, 如图 1 所示。

弯曲波导型、耦合波导型、悬臂型光纤声传感器均使用光纤作为声敏感单元, 光纤在声场作用下的微小变形会影响光纤的光学参数从而实现声场对光强的调制, 达到声检测目的。但是由于空气与光纤、光纤包层与纤芯的声阻抗匹配不良, 其灵敏度较低, 因此改进后的此类传感器使用薄膜或低质量结构材料来匹配声阻抗, 常见的有改变光纤涂覆层、黏贴声敏感薄膜等。

反射型和移动闸门型光纤声传感器直接采用膜片感应声波, 光纤仅作为传光媒质, 此两类光纤声传感器结构简单、稳定, 且均可以借助微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 膜技术提升灵敏度和响应线性度<sup>[14]</sup>。目前, 移动闸门型光纤声传感器在以色列 Optoacoustic 公司<sup>[16]</sup>已有成熟的商业产品。以上五种光强调制型光纤声传感器原理及性能参数见表 1 所示, 弯曲波导型、耦合波导型及悬臂型常

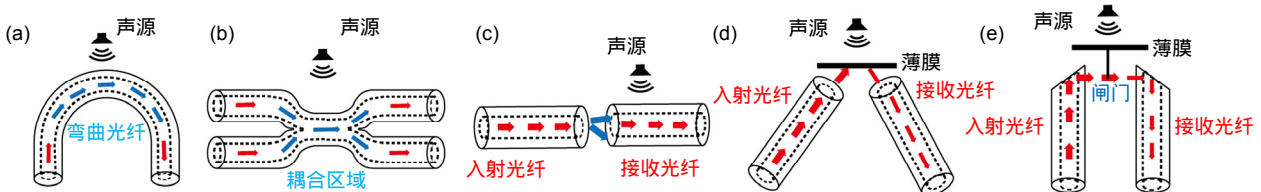


图 1 光强调制型光纤声传感器。(a) 弯曲波导型<sup>[2,8]</sup>; (b) 耦合波导型<sup>[9-10]</sup>; (c) 悬臂型<sup>[11-13]</sup>; (d) 反射型<sup>[14-15]</sup>; (e) 移动闸门型<sup>[8,16]</sup>

Fig. 1 Optical fiber sensors with light intensity modulation. (a) Bending waveguide<sup>[2,8]</sup>; (b) Coupling waveguide<sup>[9-10]</sup>; (c) Cantilever<sup>[11-13]</sup>; (d) Reflective membrane<sup>[14-15]</sup>; (e) Moving gate<sup>[8,16]</sup>

表 1 光强调制型光纤声传感器原理及性能参数

Table 1 Comparison among optical fiber acoustic sensors with light intensity modulation

传感器类型	基本原理	信噪比/dB	灵敏度/(mV·Pa <sup>-1</sup> )	响应带宽/kHz	测试环境
弯曲波导型 <sup>[2,8]</sup>	外界扰动光纤中的微弯曲损耗	34	0.56	1.5	水
耦合波导型 <sup>[9-10]</sup>	二根光纤熔锥耦合区域耦合率改变光强	44	5.6	30	水
悬臂型 <sup>[11-13]</sup>	微扰光纤相对另一根固定光纤移动	32	0.73	10	水
反射型 <sup>[14-15]</sup>	膜位置曲率变化调制光纤反射接收光强	63	80	10	空气
移动闸门型 <sup>[8,16]</sup>	膜上固定一个闸门阻隔光纤传输光通量	63	100	15	空气

用于水声领域；反射型与移动闸门型常用于空气中声检测，其灵敏度较高。

### 2.1.2 相位调制型光纤声传感技术

相位调制型光纤声传感器利用光纤干涉仪探测声场引起的光路光程微小变化，从而实现声场检测，主要包括四种类型：马赫-曾德尔干涉仪型(Mach-Zehnder interferometer, MZI)、迈克尔逊干涉仪型(Michelson interferometer, MI)、萨格奈克干涉仪型(Sagnac interferometer, SI)和法布里-珀罗干涉仪型(Fabry-Pérot interferometer, FPI)，如图 2 所示。

MZI 型光纤声传感器采用双耦合器，耦合器之间的两根光纤作为干涉臂。1977 年，Bucaro 等<sup>[17]</sup>首次提出基于 MZI 的光纤水听器，实现频率响应范围 40 kHz~400 kHz，最小探测声压为 0.1 Pa。1998 年，Wen 等<sup>[18]</sup>采用光纤缠绕于聚乙烯圆柱的方式，实现水中相移灵敏度 45 mrad/kPa，响应带宽达 4 MHz。该技术方案中光纤在声场作用下的轴向应力与缠绕圆柱半径成

反比，可减小圆柱半径并采取多匝缠绕方式提高灵敏度，但是由于光纤弯曲直径和光纤层厚度的限制，导致高频探测灵敏度较低。2009 年，Gallego 等<sup>[19]</sup>基于单模聚合物光纤实现 MZI 型光纤传感，由于聚合物光纤相比传统熔融石英光纤有着更低的杨氏模量，使得光纤在水中与声场耦合更好，实现相移灵敏度 1.31 mrad/kPa，响应带宽高达 5 MHz。虽然该方式下灵敏度不如光纤缠绕方法，但其在提高带宽的同时减小了 MZI 型光纤声传感器的尺寸，可用于生物医学领域。此外，采用多模光纤<sup>[20]</sup>、改变光纤涂覆层<sup>[21]</sup>、将传感光纤嵌入复合结构<sup>[22]</sup>、结合膜片反射式光纤探头<sup>[23]</sup>也可以改善 MZI 型传感灵敏度和频率响应。2014 年，安徽大学徐峰等<sup>[23]</sup>通过将高灵敏度纳米银膜探头接入干涉臂中，实现频率响应范围 200 Hz~8 kHz，声压响应灵敏度 160 nm/Pa，但是对光纤固定要求高，需避免环境温度变化等低频信号干扰。

MI 型<sup>[24]</sup>和 SI 型<sup>[25]</sup>光纤声传感器采用单耦合器，

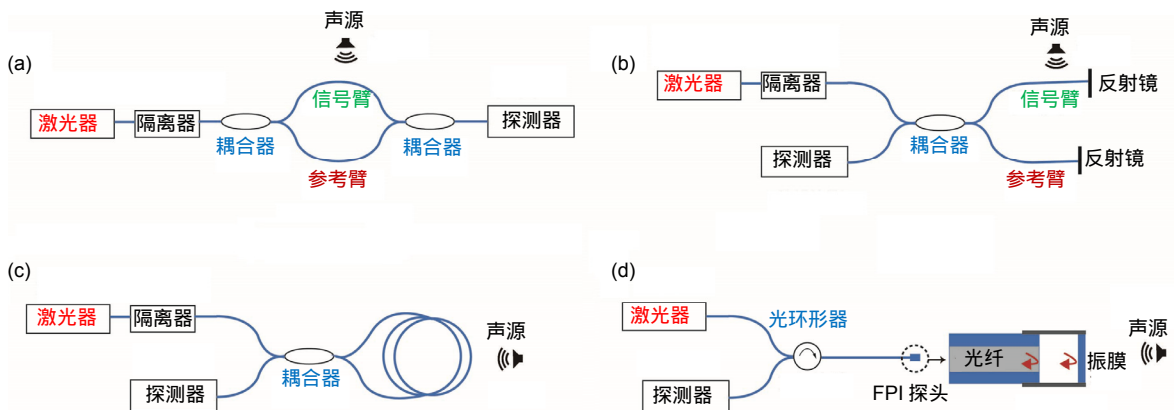


图 2 相位调制型光纤声传感器。(a) 马赫-曾德尔干涉仪型；(b) 迈克尔逊干涉仪型；(c) 萨格奈克干涉仪型；(d) 法布里-珀罗干涉仪型

Fig. 2 Optical fiber acoustic sensors with phase modulation. (a) MZI; (b) MI; (c) SI; (d) FPI

相比 MZI 型结构较简单。MI 型光纤声传感器原理与 MZI 型是相似的,不同之处是 MI 型光纤声传感器采用反射型干涉结构,因此 MI 型光纤声传感器除了结合 MZI 型光纤声传感器的相关方法提升灵敏度和频率响应,还可以对 MI 型光纤声传感器的反射结构进行优化获得较好的线性响应度。2011 年,国防科技大学张学亮等<sup>[26]</sup>采用光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)作为 MI 的反射器件,测得频率响应范围 100 Hz~2 kHz 内波动低于 0.3 dB。2016 年,华中科技大学鲁平等<sup>[27]</sup>采用聚合物(PP/PET)膜作为 MI 型的反射镜,参考光和信号光均入射至该反射镜上可成倍提高灵敏度,实现频率响应范围 90 Hz~4 kHz,相移灵敏度高达 0.398 rad/Pa。

SI 型光纤声传感器利用光纤线圈中相反两束光存在光程差而干涉进行声探测,该技术不使用参考臂,减小 MZI 型和 MI 型光纤声传感器存在的低频干扰问题。为了提高相位调制度,一种改进方法是在光纤线圈上加一段保偏光纤或高双折射光纤,2013 年 Markowski 等<sup>[28]</sup>在 SI 的光纤线圈上加入熊猫(PANDA)型保偏光纤,空气中实现了频率响应平坦范围 300 Hz~4.5 kHz。不过由于 SI 型光纤声传感器探测频率依赖于光纤线圈尺寸,实现宽频带较困难。另一种改进方法是引入膜片传感探头,2015 年,香港理工大学 Ma 等<sup>[29]</sup>提出了基于膜片探头实现新型 SI 光纤声传感器,空气中频率响应范围提升至 1 kHz~20 kHz。

FPI 型光纤声传感器无耦合器和参考臂,相比上述三种干涉仪型具有结构紧凑、高灵敏度等优势。其核心为两个反射面构造的 F-P 腔,检测声场引起 F-P 腔长度变化来实现声探测。20 世纪 90 年代, Murphy 小组<sup>[30]</sup>和 Lee 等人<sup>[31]</sup>分别制作出了 F-P 腔非本征型(EFPI)和 F-P 腔本征型(IFPI)光纤传感器,促进了高性能微型光纤声传感器的发展。通常,采用光纤尾端面面和薄膜构成 F-P 腔的光纤 EFPI 声传感器可实现大带

宽和高灵敏度。1996 年,Beard 等<sup>[32]</sup>基于聚合物薄膜和多模光纤末端形成 F-P 腔,实现了 EFPI 型光纤水听器的探测灵敏度 61 mV/MPa,带宽高达 25 MHz,最大探测声压为 22.4 kPa。中国科学院较早开始膜片式 EFPI 型声传感器的研究,随后一些高校也开始研究并取得不错的成果。2014 年,国防科技大学王付印等<sup>[33]</sup>研制了一种新型 EFPI 型光纤水听器,其敏感膜片中心存在凸起的质量块,实验测得灵敏度 18 mV/Pa,频率响应范围 10 Hz~2 kHz。虽然改变膜材料、谐振频率等参数可以提升 EFPI 型光纤水听器性能,但是在水下需要克服大静压力才能探测声信号,难以保证大带宽下提升灵敏度,该类型更适合空气中声传感。2013 年,香港理工大学 Ma 等<sup>[34]</sup>采用多层石墨烯薄膜实现光纤 EFPI 声传感,空气中测得频率响应平坦范围 200 Hz~22 kHz,灵敏度为 13 mV/Pa。2017 年,电子科技大学饶云江团队<sup>[35]</sup>采用石墨烯氧化膜制作了 EFPI 型光纤声麦克风,实现频率响应平坦范围 100 Hz~20 kHz,灵敏度为 690 mV/Pa,不过膜的机械稳定性差导致最大探测声压为 158.9 mPa。此外,基于金属膜<sup>[36]</sup>、光子晶体膜<sup>[37]</sup>、二氧化硅膜<sup>[38]</sup>的高灵敏度微型化光纤 EFPI 声传感器也陆续被研制出来,不过均由于膜的限制存在频率响应平坦范围较窄,同时强声压下易导致膜损坏。

相位调制型光纤声传感器与光强调制型光纤声传感技术相比,其探测灵敏度更高,频带响应更宽,具体性能参数如表 2 所示,其中 FPI 型光纤声传感器灵敏度最高,响应频带最宽。

### 2.1.3 波长调制型光纤声传感技术

一种典型的波长调制型光纤声传感技术将光纤布拉格光栅(FBG)作为声敏感单元,如图 3 所示,声振动导致光栅常数发生变化,从而改变光栅反射和透射光的中心波长,该技术克服了光强调制型光纤声传感技术易受强度波动影响的缺点。1996 年,Webb 等<sup>[39]</sup>首

表 2 相位调制型光纤声传感器性能对比

Table 2 Comparison among optical fiber acoustic sensors with phase modulation

传感器类型	信噪比/dB	最小探测灵敏度/( $\mu\text{Pa}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ )	响应带宽/MHz
MZI 型 <sup>[19,23]</sup>	43	14.5	5
MI 型 <sup>[4,26-27]</sup>	43	650.8	3.5
SI 型 <sup>[7,28-29]</sup>	45	450	6
FPI 型 <sup>[32,35]</sup>	62	10.2	25



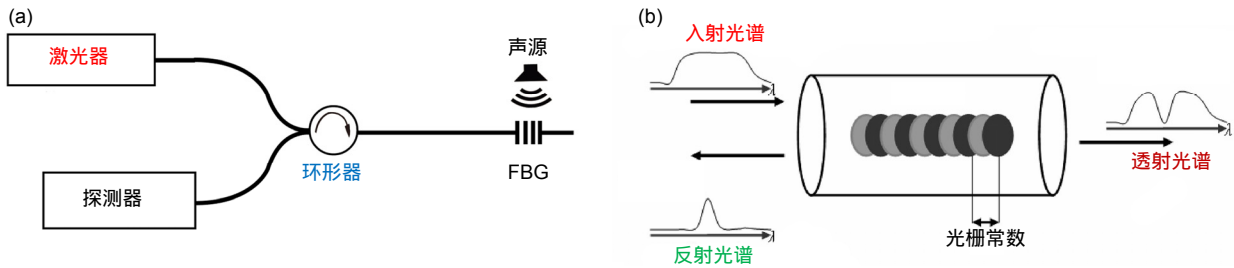


图 3 (a) 波长调制型光纤声传感器<sup>[4]</sup>; (b) 光纤布拉格光栅<sup>[43]</sup>  
 Fig. 3 (a) Optical fiber acoustic sensors with wavelength modulation<sup>[4]</sup>; (b) Fiber Bragg grating<sup>[43]</sup>

次报道了基于 FBG 的声传感器，通过探测 FBG 反射波长变化实现了水中 950 kHz 声波探测。2000 年，Takahashi 等<sup>[40]</sup>进行了 FBG 水听器探测透射波长变化的研究，实现频率响应范围 1 kHz~3 MHz。FBG 声传感器频率受限于 FBG 光栅常数，改变 FBG 结构可提高谐振频率。2005 年，Guan 等<sup>[41]</sup>提出了新型光纤水听器，通过制作两个 FBG 构成分布式反馈激光器作为声敏感单元，可探测频率高达 40 MHz，最大探测声压可达 89.1 kPa。2012 年，Wu 等<sup>[42]</sup>将相移光纤布拉格光栅(PS-FBG)用于波长调制型声传感，可改善探测灵敏度。FBG 型声传感器由于光谱边带的限制，灵敏度相对较低。

间接耦合型光纤声传感器技术已经发展了近 40 年，该技术是目前的热点技术之一，但由于受到了间接耦合声材料的限制，灵敏度和频率响应对膜、光纤或敏感材料的依赖性大，水中可实现大带宽、高声压下低灵敏度声探测；空气中灵敏度较高但难以实现大

带宽和动态范围。其中间接耦合介质为振膜的声传感器灵敏度更高、线性度更好，不过会降低平坦频率响应范围。

## 2.2 直接耦合型光纤声传感技术

直接耦合型光纤声传感器是近年来发展起来的新技术，该类技术不使用声耦合材料，直接利用光束检测声波引起空气介质折射率的微小变化实现声探测，相比间接耦合型光纤声传感器，具有稳定性好、高频灵敏度高、大带宽、大动态范围等优点，主要包括自耦合效应型和法布里-珀罗标准具(FPE)型两种类型。

### 2.2.1 自耦合效应型光纤声传感技术

半导体激光器自耦合效应型声传感技术基本原理如图 4 所示，半导体激光器输出光经声场调制后返回出光光路，引起半导体激光器的自耦合效应，波长随之被声场调制，从而实现声检测。2009 年，Nawa 等人<sup>[44]</sup>首次利用半导体激光器的自耦合效应实现微小振

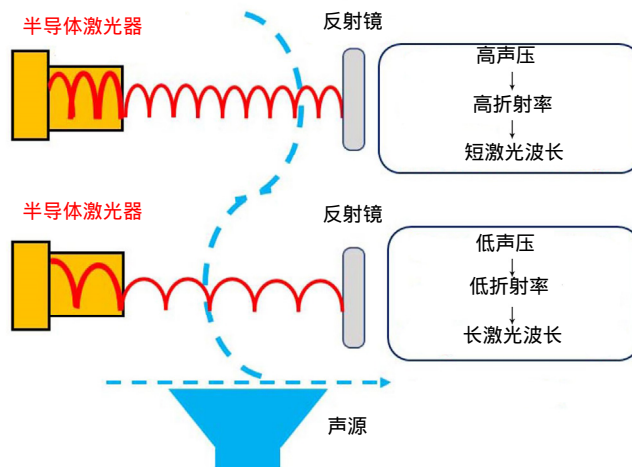


图 4 半导体激光器自耦合效应声探测原理<sup>[46]</sup>  
 Fig. 4 Sound detection principle using self-coupling effect of semiconductor laser<sup>[46]</sup>

动检测, 系统由一个激光二极管和透镜组成, 可实现 5 nm 振动的检测。2016 年, Mizushima 等<sup>[45]</sup>提出利用半导体激光器的自耦合效应来探测声信号, 最小探测声压为 10 mPa, 声波信号会线性改变空气折射率, 从而导致自耦合激光光强的变化。次年, Mizushima 等<sup>[46]</sup>通过加入抛物面的反射镜的方式进行改进, 最终实现平坦的 40 Hz~50 kHz 频率响应, 灵敏度 35 mV/Pa, 最小探测声压低至 4.5 mPa。此外, 该声传感装置将半导体激光器发出光束耦合进光纤, 通过光纤准直入射至反射镜可以实现小型化光纤声传感。目前, 基于自耦合效应型光纤声传感器在空气中响应频带是间接耦合型光纤声传感器的二倍以上, 同时具有非常好的线性度。

### 2.2.2 FPE 型光纤声传感技术

FPE 型光纤声传感器和光纤 EFPI 型声传感器相

似, 其声敏感单元也是一个 F-P 腔, 不过不存在腔长机械位移。2011 年, Fischer 等<sup>[47]</sup>在第 18 届国际声与振动会议提出了这类新型声传感技术, 传感结构为两个部分透射的平面镜组成的一个刚性的 FPE, 其利用镜间空气分子密度受到声波的扰动发生变化导致空气折射率变化来探测声信号, 其实验原理、性能如图 5 所示, FPE 腔长为 5 mm, 镜面反射率为 95%, 实现声探测灵敏度可达 80 mV/Pa, 最小探测声压灵敏度 32  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。探测声信号的幅度是由反射镜的反射率决定的, 探测灵敏度越高则要求反射率越高。实际上, 在室温和标准大气压下, 空气折射率变化约  $3 \times 10^{-9}/\text{Pa}$ <sup>[48]</sup>, 而 FPE 型声传感器可检测折射率  $10^{-14}$  以上的变化<sup>[5]</sup>。

2016 年, 奥地利 XARION 激光声学公司研发了微型化高性能的 FPE 型光纤声传感器<sup>[6]</sup>, 其原理图及微

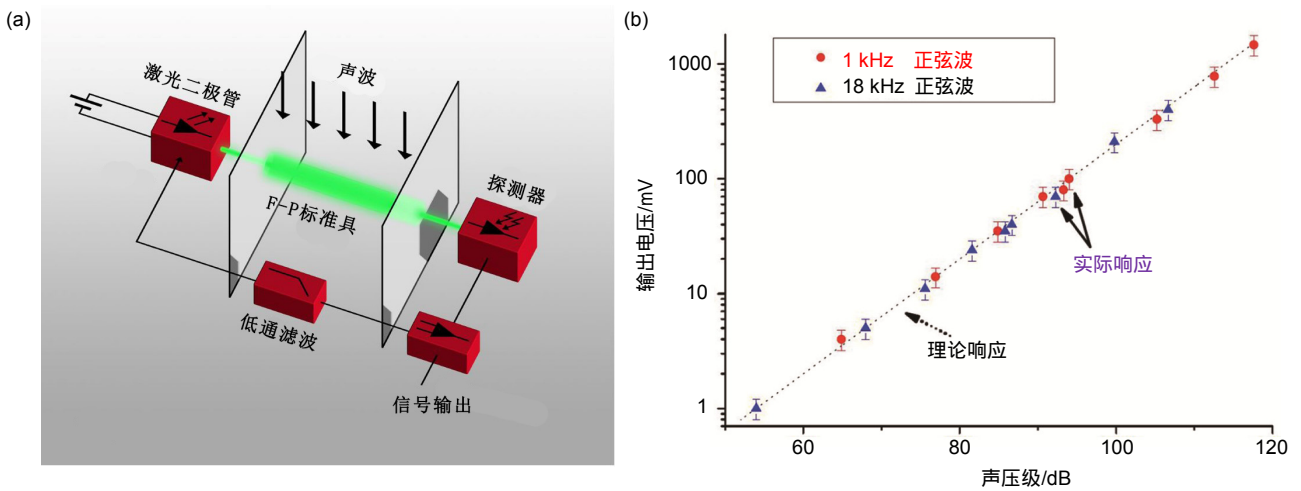


图 5 (a) 法布里-珀罗标准具声传感原理<sup>[47]</sup>; (b) 声压灵敏度曲线<sup>[47]</sup>

Fig. 5 (a) Acoustic sensing principle of Fabry-Perot etalon<sup>[47]</sup>; (b) Sensitivity of sound pressure<sup>[47]</sup>

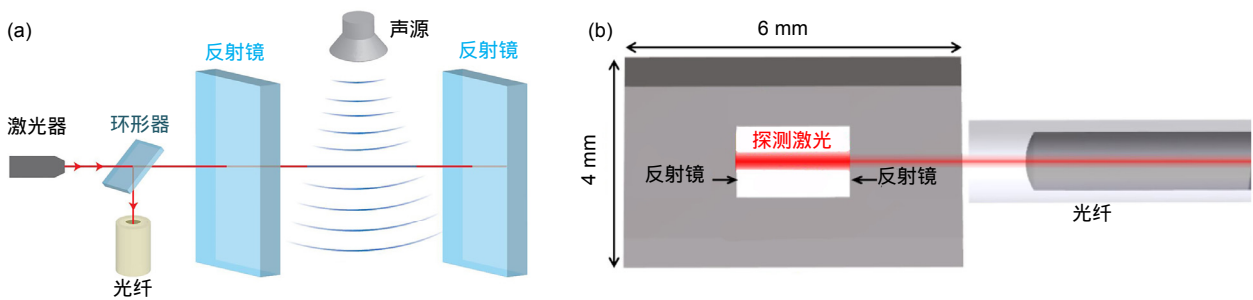


图 6 (a) 法布里-珀罗标准具光纤声传感原理<sup>[49]</sup>; (b) 微型化声传感探头<sup>[49]</sup>

Fig. 6 (a) Optical fiber acoustic sensing principle of Fabry-Perot etalon<sup>[49]</sup>; (b) Miniature acoustic sensing probe<sup>[49]</sup>

型化声传感探头结构如图 6 所示, 目前该产品<sup>[49]</sup>在空气中频率响应范围 10 Hz~1 MHz, 动态范围 50 dB~180 dB, 最大探测声压可达 100 kPa。改变腔中的介质可以很好地提高频率响应, 水或其他液体中声阻抗更容易匹配, F-P 标准具型光纤水听器已实现频率响应平坦范围 10 Hz~20 MHz, 动态范围 60 dB~214 dB。目前, 液体中最高探测频率为 50 MHz, 其探测上限受限于声波波长接近于激光束直径; 探测下限受制于系统噪声及环境振动干扰, 可引入参考 FPE 提高信噪比<sup>[50]</sup>。

直接耦合型光纤声传感器利用光与声场直接耦合实现声探测, 使得传感器具有很好的线性频响特性和大动态范围, 其中自耦合效应型光纤声传感器的结构相对复杂, 但是开辟了一种新的声探测路径; FPE 型光纤声传感器不仅结构简单, 体积小, 还可以实现频率响应平坦范围在兆赫兹以上的声探测。国内目前暂无直接耦合型光纤声传感器的报道。

### 2.3 光纤声传感技术性能对比

为了分析两大类光纤声传感器的性能, 本文制作了光纤声传感器的基本性能参数对比图, 如图 7 所示, 红色虚线右上方区域是直接耦合型光纤声传感器, 左下方区域内为间接耦合型光纤声传感器, 其中纵坐标

表示灵敏度和动态范围的乘积, 横坐标表示频率响应, 并均取对数坐标; 由于理想的光纤声传感器发展方向为高灵敏度, 宽频率响应和大动态范围, 即图中蓝色箭头方向, 因此由图可知直接耦合型声传感器具有更好的声探测性能。

间接耦合型光纤声传感器中的光强调制型和相位调制型光纤声传感器的灵敏度相对更高, 但是其频率响应平坦范围和动态范围较小。这两种高灵敏度光纤声传感器均是使用薄膜为声耦合材料, 膜越薄则灵敏度越高, 但是膜也容易破裂导致动态范围减小。此外, 频率响应受膜的材质、尺寸、厚度和纹路等限制, 目前只能在窄带宽下实现高灵敏度和大动态范围, 改进性能的方式只能是采用新材料和新工艺, 但是声耦合材料自身的限制导致传感性能提升有限。波长调制型光纤声传感器容易实现大带宽声探测, 不过其通过光纤材料与声场耦合, 大大降低了光纤声传感器的灵敏度和频率响应平坦度, 同时环境温度变化和低频振动将引起光谱漂移导致传感器信噪比减小, 其主要用于光纤水听器领域。若要提高波长调制型光纤声传感器的灵敏度, 必须得改进光栅结构或改变制作光栅的材料。无论如何, 光纤材料与声场存在阻抗匹配不良问题, 难以实现高灵敏度声探测。

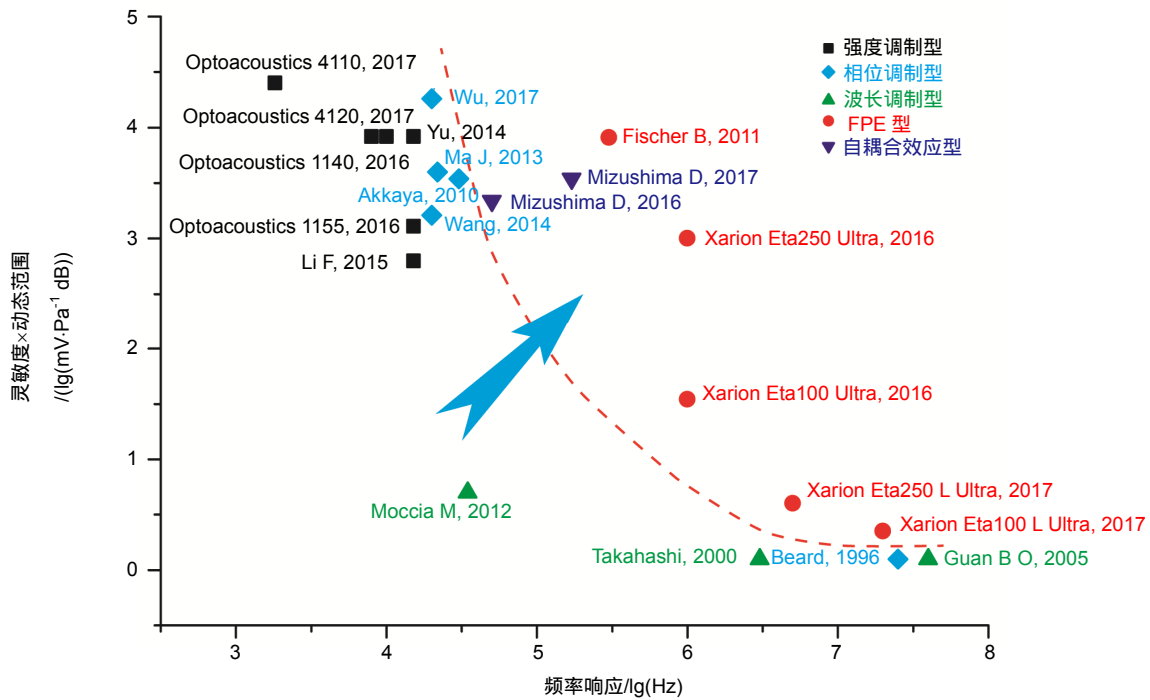


图 7 光纤声传感器性能对比

Fig. 7 Comparison of optical fiber acoustic sensors

直接耦合型光纤声传感器中的自耦合效应型和 FPE 型光纤声传感器不仅可以实现高灵敏度, 还可以实现宽频率响应平坦范围, 大动态范围声探测。这两种光纤声传感器提升灵敏度的方式均是增加光与声场直接耦合的作用距离, 其中自耦合效应型光纤声传感器只能通过增大传感器尺寸实现, 不利于微型化声传感; FPE 型光纤声传感器可通过提高镜面反射率实现更好的声传感性能, 因此还可以实现毫米级微型化声传感。

### 3 结 论

通过对光纤声传感技术的调研分类和分析, 总结了从间接耦合的光强度调制型、相位调制型及波长调制型光纤声传感技术, 到直接耦合的自耦合效应型及 FPE 型光纤声传感技术, 分析了各种技术的原理、性能及优缺点, 得到如下结论:

1) 光纤声传感技术具有灵敏度高、带宽大等优点, 是目前已知各种声传感技术中最具有发展潜力的技术。

2) 间接耦合型光纤声传感技术在水中可实现大带宽及大动态范围声检测, 但在空气中受限于声场耦合材料的声学限制, 其线性度、动态范围及带宽难以进一步提高。

3) 直接耦合型光纤声传感技术利用光与声场直接耦合, 脱离了声学耦合材料的限制, 在水和空气环境下均可实现大带宽及大动态范围声检测, 特别是 FPE 型光纤声传感技术能充分利用光腔的多次反射特性, 通过增加光程进一步提高检测灵敏度, 是一种极具发展价值的新技术。

### 参考文献

- [1] Bell A G. Upon the production and reproduction of sound by light[J]. *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, 1880, **9**(34): 404–426.
- [2] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F. Fiber-optic hydrophone[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, **62**(5): 1302–1304.
- [3] Culshaw B, Davies D E N, Kingsley S A. Acoustic sensitivity of optical-fibre waveguides[J]. *Electronics Letters*, 1977, **13**(25): 760–761.
- [4] Wild G, Hinckley S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1184–1193.
- [5] Fischer B. Optical microphone hears ultrasound[J]. *Nature Photonics*, 2016, **10**(6): 356–358.
- [6] Preisser S, Rohringer W, Liu M Y, et al. All-optical highly sensitive akinetic sensor for ultrasound detection and photoacoustic imaging[J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, **7**(10): 4171–4186.
- [7] 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.
- [8] Bilaniuk N. Optical microphone transduction techniques[J]. *Applied Acoustics*, 1997, **50**(1): 35–63.
- [9] 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.
- [10] Li F M, Liu Y Y, Wang L J, et al. Investigation on the response of fused taper couplers to ultrasonic wave[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(23): 6986–6993.
- [11] Spillman S W, Jr, Gravel R L. Moving fiber-optic hydrophone[J]. *Optics Letters*, 1980, **5**(1): 30–31.
- [12] Spillman S W, Jr, McMahon D H. Frustrated-total-internal-reflection multimode fiber-optic hydrophone[J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(1): 113–117.
- [13] Rines G A. Fiber-optic accelerometer with hydrophone applications[J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(19): 3453–3459.
- [14] Yu H F, Wang W, Wang S N, et al. An optical acoustic sensor based on acoustics-sensitive corrugated configuration[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, **33**(9): 68–70, 73.  
于洪峰, 王伟, 王世宁, 等. 一种基于感声波纹结构的光学式声传感器[J]. *传感器与微系统*, 2014, **33**(9): 68–70, 73.
- [15] Nessesaver M S, Stone M, Vijay Parthasarathy M S, 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.
- [16] Optoacoustics. Optimic 1140 - Indoor monitoring applications[EB/OL]. 2007. <http://www.optoacoustics.com/industrial/optimic-microphones/optimic-1140>.
- [17] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F. Optical fiber acoustic sensor[J]. *Applied Optics*, 1977, **16**(7): 1761–1762.
- [18] Wen H, Wiesler D G, Tveten A, et al. High-sensitivity fiber-optic ultrasound sensors for medical imaging applications[J]. *Ultrasonic Imaging*, 1998, **20**(2): 103–112.
- [19] 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.
- [20] Shajenko P. Multimode optical fibers as sensing devices[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(23): 4185–4186.
- [21] Lagakos N, Schnaus E U, Cole J H, et al. Optimizing fiber coatings for interferometric acoustic sensors[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, **18**(4): 683–689.
- [22] Hocker G B. Fiber-optic acoustic sensors with increased sensitivity by use of composite structures[J]. *Optics Letters*, 1979, **4**(10): 320–321.
- [23] Xu F, Shi J H, Gong K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(10): 2838–2840.
- [24] Imai M, Ohashi T, Ohtsuka Y. Fiber-optic Michelson interferometer using an optical power divider[J]. *Optics Letters*, 1980, **5**(10): 418–420.
- [25] Udd E. Fiber-optic acoustic sensor based on the Sagnac interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, **425**: 90–95.
- [26] Zhang X L, Meng Z, Hu Z L. Sensing system with Michelson-type fiber optical interferometer based on single FBG reflector[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(11): 110601.

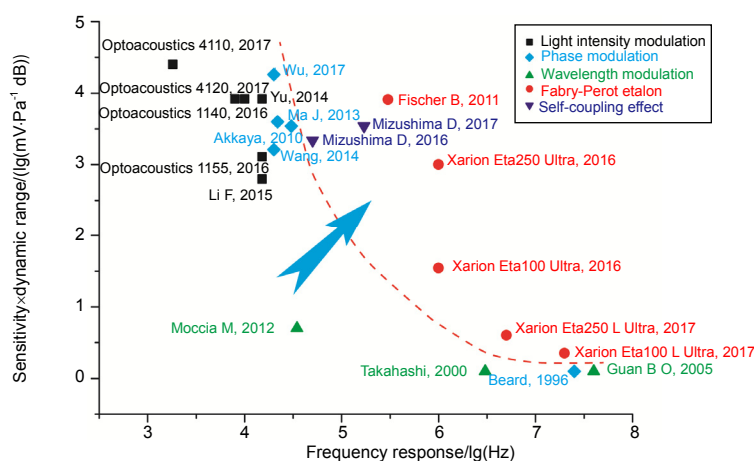


- [27] Liu L, Lu P, Liao H, *et al.* Fiber-optic michelson interferometric acoustic sensor based on a PP/PET diaphragm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, **16**(9): 3054–3058.
- [28] Markowski K, Turkiewicz J, Osuch T. Optical microphone based on Sagnac interferometer with polarization maintaining optical fibers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8903**: 89030Q-1–89030Q-7.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Lee C E, Taylor H F. Interferometric optical fibre sensors using internal mirrors[J]. *Electronics Letters*, 1988, **24**(4): 193–194.
- [32] Beard P C, Mills T N. Extrinsic optical-fiber ultrasound sensor using a thin polymer film as a low-finesse Fabry–Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(4): 663–675.
- [33] Wang F Y, Shao Z Z, Xie J H, *et al.* Extrinsic Fabry–Pérot underwater acoustic sensor based on micromachined center-embossed diaphragm[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(23): 4628–4636.
- [34] Ma J, Xuan H F, Ho H L, *et al.* Fiber-optic Fabry–Pérot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(10): 932–935.
- [35] Wu Y, Yu C B, Wu F, *et al.* A highly sensitive fiber-optic microphone based on graphene oxide membrane[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(9): 4344–4349.
- [36] Guo F W, Fink T, Han M, *et al.* High-sensitivity, high-frequency extrinsic Fabry–Perot interferometric fiber-tip sensor based on a thin silver diaphragm[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(9): 1505–1507.
- [37] Akkaya O C, Kilic O, Digonnet M J F, *et al.* High-sensitivity thermally stable acoustic fiber sensor[C]//*Proceedings of 2010 IEEE Sensors*, 2010: 1148–1151.
- [38] Wang W H, Wu N, Tian Y, *et al.* Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9006–9014.
- [39] Webb D J. An ocean model code for array processor computers[J]. *Computers & Geosciences*, 1996, **22**(5): 569–578.
- [40] Takahashi N, Yoshimura K, Takahashi S, *et al.* Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating[J]. *Ultrasonics*, 2000, **38**(1–8): 581–585.
- [41] Guan B O, Tam H Y, Lau S T, *et al.* Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(1): 169–171.
- [42] Wu Q, Okabe Y. High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(27): 28353–28362.
- [43] Tosi D, Olivero M, Perrone G. Optical microphone with fiber Bragg grating and signal processing techniques[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7098**: 70981E.
- [44] Nawa Y, Tsuda N, Yamada J. Small vibration sensor using self-coupling effect of semiconductor laser[J]. *Review of Laser Engineering*, 2008, **37**(8): 619–623.
- [45] Mizushima D, Yoshimatsu T, Goshima K, *et al.* Sound detection by laser microphone using self-coupling effect of semiconductor laser[J]. *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, 2016, **136**(7): 1021–1026.
- [46] Mizushima D, Tsuda N, Yamada J. Study on laser microphone using self-coupling effect of semiconductor laser for sensitivity improvement[C]//*Proceedings of 2016 IEEE SENSORS*, 2017: 1–3.
- [47] Fischer B, Fruthwirth R, Wintner E. Optical pressure transducer without membrane: an analysis of sensor noise sources[C]//*INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2011.
- [48] Ciddor P E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(9): 1566–1573.
- [49] Xarion Laser Acoustics. Membrane-free optical microphones[EB/OL]. (2017) <http://xarion.com/products>.
- [50] Fischer B, Reining F, Wintner E. Optical sensor: EP2525194 A1[P]. 2012-11-21.

# Optical fiber acoustic sensors

Gao Chunming\*, Nie Feng, Zhang Ping, Zhao Binxing, Wang Jing, Li Bincheng

School of Opto-Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China



Comparison of optical fiber acoustic sensors

**Overview:** Sound wave as the carrier of information and energy is the natural phenomena which has been paid attention to study for the first time. With the rapid development of information technology, the detection of acoustic signals with high sensitivity and large bandwidth becomes more and more important. In recent years, the research focus of acoustic sensors has been developed from electro-acoustic sensing technology to photoacoustic sensing technology. Optical fiber sensing technology was developed rapidly in the 70 s of last century. Due to the high precision of light detection and the advantages of fiber working frequency band and small transmission loss, optical fiber acoustic sensor features high sensitivity, broad-band frequency response, high signal to noise ratio and high dynamic range compared with space optical microphones and traditional electroacoustic sensors. Furthermore, because of its immune electromagnetic interference and miniaturization, it can be used in environments with high temperature, high pressure, strong corrosion and strong radiation that traditional electroacoustic sensors can not work normally. Therefore, optical fiber acoustic sensor has been valued and widely used in the national security, industrial non-destructive testing, medical diagnostics, consumer electronics etc. In this paper, from the perspective of the frequency response curve of optical fiber acoustic sensors, optical fiber acoustic sensors are classified as indirect and direct coupling types by introducing a new classification method based on whether acoustic coupling materials are used or not.

As shown in the figure above, indirect coupling type, including light intensity modulation, phase modulation and wavelength modulation, present some problems such as uneven frequency response, narrower bandwidth, and smaller dynamic range due to the frequency response features of the acoustic coupling materials. While direct coupling type, including the self-coupling effect and Fabry-Perot etalon (FPE) optical fiber sensors, have overcome these shortcomings and thus have very good linear frequency response characteristics, large bandwidth and large dynamic range. Direct coupling optical fiber acoustic sensor technology has got rid of limitations from acoustic coupling materials by using direct coupling of light and sound field, especially FPE optical fiber sensing technology can make full use of light multi-reflection characteristic of the cavity to further enhance the detection sensitivity, which is a new technology with great development value.

**Citation:** Gao C M, Nie F, Zhang P, *et al.* Optical fiber acoustic sensors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180050

Supported by National Natural Science Found of China (61379013), National Key R&D Plan (2017YFB1103002) and Sichuan Science and Technology Project (2016GZ0002)

\* E-mail: gaocm@uestc.edu.cn