

引用格式: SHAO Zhihua, YIN Huanhuan, WANG Ruohui, et al. Research on Fiber-optic Ultrasonic Imaging of Seismic Physical Models (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1006001

邵志华, 阴欢欢, 王若晖, 等. 地震物理模型光纤超声成像技术研究(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10):1006001

地震物理模型光纤超声成像技术研究(特邀)

邵志华^{1,2}, 阴欢欢^{1,2}, 王若晖^{1,2}, 乔学光^{1,2}

(1 西北大学 物理学院, 西安 710072)

(2 西北大学 油气资源光纤测井技术陕西省高校工程研究中心, 西安 710072)

摘要: 光纤超声波传感器是一种利用光纤作为敏感探测单元的微小声波传感器。相比于传统的电磁类超声波换能器, 光纤超声波传感器具有灵敏度高、频带响应宽、体积小、抗电磁干扰等优越性, 已广泛应用于国防安全、工业无损检测、生物医学成像、地震物理模型成像等领域, 在不同的生产与生活中均备受关注。本文主要综述了光纤干涉型和光纤光栅型等几种典型的光纤超声波传感器的传感机理和发展现状, 并针对地震物理模型超声波成像技术, 对比展示了常规的电声换能器、新型的光纤超声波传感器以及新兴的激光超声波技术的研究进展, 阐述了其中存在的科学技术问题与挑战。

关键词: 地震物理模型; 光纤超声波传感器; 电声换能器; 激光超声; 超声成像

中图分类号: TN25

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225110.1006001

0 引言

地震物理模型超声波成像技术是将野外的地质构造和地质体按照一定的模拟相似比制作成地质模型, 在实验室内利用超声波或激光超声波等方法对野外地震勘探工作进行正演模拟的一种地震模拟方法。地震物理模型实验已广泛应用于石油天然气勘探和开发中, 如研究波传播的基本规律和典型地质构造的地震响应、优化野外观测系统和勘探方法, 以及验证波传播理论和数学计算方法等。复杂模型中传输的超声波信号通常强度较弱, 需使用高性能的超声波换能器采集模型回波信号。传统的检测方式是采用压电陶瓷 (Piezoelectric Transducers, PZT) 换能器^[1-5], 由于 PZT 是基于机械共振的方式接收超声波, 自身结构特征决定了其较窄的频响特性。另外, 在阵列传感应用中, PZT 信号难以解调且易受电磁环境的干扰。

相较而言, 光纤超声波传感器能够充分规避 PZT 存在的多数不足, 具有传感器尺寸小巧 ($<10 \mu\text{m}$ ^[6])、灵敏度高 (52.6 mV/kPa ^[7])、频带宽 ($>90 \text{ MHz}$ ^[8])、易复用 (>5 通道^[9])、不易受电磁干扰等优点。因此, 研究新型的光纤超声波传感器具有十分重要的科学技术意义和应用价值。目前, 光纤超声波传感器的发展趋势主要聚焦于高灵敏度、高空间分辨率、宽频响应等特性。光纤超声波传感器的基本原理是超声波与光纤之间的相互作用引起光纤传输光的强度、相位、波长、偏振态等发生变化, 通过解调上述光参量的微小变化来获取超声波信息, 解调方式包括相位解调^[10]、强度解调^[11]、光频率解调^[12]等。在材料和工艺等方面制备新型光纤超声波传感器器件的同时, 将光电转换、电信号放大、滤波处理等技术融合用于信号解调系统, 可进一步提升光纤感测超声波的信噪比。

在超声回波采集端, 光纤传感器已表现出明显的优势; 在超声波源激励端, 激光超声波激励技术逐渐涌现^[13-18]。与传统的 PZT 电压驱动激励方式相比, 激光超声波技术可以在不同尺度和不同形貌的物体表面激发超声波场, 具有宽频带、多模式、高强度、非接触等特点。基于光声效应, 一系列光声功能材料, 如贵金属

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61735014, 61927812, 62005214)

第一作者: 邵志华 (1987—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光超声和光纤超声传感技术。Email: zhshao@nwu.edu.cn

通讯作者: 乔学光 (1955—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子技术、光纤通信与传感、油气田光纤测井、油气管线光纤检测等。

Email: xgqiao@nwu.edu.cn

收稿日期: 2022-07-01; 录用日期: 2022-09-16

<http://www.photon.ac.cn>

纳米颗粒^[19-21]、碳纳米管^[22-25]、石墨烯^[26-27]、有机纳米颗粒^[28-29]、半导体聚合物纳米颗粒^[30]等,已表现出高效的光声性能。然而,几乎所有的光声功能材料都是为生物医学应用而设计的,这些光声材料需具有低毒性、免疫原性、高目标亲和力和特异性,以及高生物相容性等。将光声功能材料均匀涂覆于地震物理模型表面,可替代常规PZT发射源,实现高品质超声激励,即要求材料具有宽波段吸收、高热声转换效率、高激光损伤阈值、低成本、易大面积铺展等特性。因此,为继续满足地震物理模型实验应用需求,需进一步发展高效的光声功能材料及激光激励技术。

将高品质激光超声激励技术和高性能光纤超声感测技术兼容结合,实现宽频超声波的高强度激发与高保真感测,即地震物理模型全光脉冲回波成像,可精细提取地震物理模型内部构造信息。20世纪90年代初^[31],世界著名的综合性石油、天然气、化工研究机构——法国石油研究院率先提出了地震物理模型的光学超声成像技术,即使用脉冲激光产生超声波和通过激光干涉仪检测模型中的振动声信号。由于地震物理模型中包含较多树脂、硅橡胶、石蜡、石膏等弱光声性能的材料,脉冲激光直接辐照于模型时难以产生高强度的超声波,且接收端一般采用激光干涉仪,而此类干涉仪接收器存在价格贵、灵敏度低、使用不便等不足,因此,近些年鲜有报道地震物理模型全光超声成像技术。对于地震物理模型室内检测来说,光纤灵活纤细、功能多样化的特点使得全光纤超声成像倍受关注。

纵观光纤技术近几十年的发展,光纤声波传感器在材料、结构以及加工方式等方面均有较大的突破^[32-34],部分光纤声波传感器已经成功应用于工业无损检测^[35]、海洋地震勘探^[36]等领域。如Takeda和日立电缆有限公司研究了一种小直径光纤Bragg光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)并用于碳纤维复合材料的结构损伤监测,根据所检测兰姆波的振幅比和到达时间估算出脱层长度。此外,北京神州普惠科技股份有限公司将光纤水听器阵列探测系统应用于海洋地震探勘,能清楚辨识海底地层不同的反射界面,具有灵敏度高、分辨率高、采集数据连续等优点。本文主要综述了光纤干涉型和光纤光栅型等几种典型的光纤超声波传感器的传感机理和发展现状,对比展示了电声换能器、光纤超声波传感器以及激光超声波技术在地震物理模型超声成像方面的研究进展,深入分析了其中存在的科学技术问题与挑战。通过综合探讨地震物理模型超声波成像研究的发展新风向,揭示室内模拟技术创新的新趋势和新机遇,以提升我国油气资源勘测能力和信息化水平。

1 光纤超声波传感器研究进展

由于光纤传感技术相比于传统电类检测方式具有突出优势,表1对比总结了光纤与PZT的超声波换能特点。光纤超声波传感器研究意义深远且发展潜力巨大^[37],随着光纤结构及种类的多样化,以及光纤传感器研制新方法和新工艺的不断浮现,国内外已报道了种类繁多的光纤超声波传感器及其相关应用(如无损检测、生物医学成像等)。在已出现的多种光纤超声波传感器中,常采用的光纤超声波传感结构主要有光纤光栅型、光纤干涉型等。结合激光微加工技术与新型传感材料,光纤光栅型超声波传感器和干涉型光纤超声波传感器由于其自身优势(如结构简单、响应灵敏度高、易复用等)可实现高灵敏的超声波探测。此部分主要介绍这两种光纤超声波传感器及相关研究进展。

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
Narrow detection bandwidth	Broadband response
Large size	Small size, light weight, flexibility
Sensitive to electromagnetic disturbance	Immunity to electromagnetic interference
Poor stability of signal transmission	Stabilized transmission in fiber
Poor multiplexing	Good multiplexing, multichannel detection

1.1 干涉型光纤超声波传感器

干涉型光纤超声波传感机制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微应变的影响,因此可用于感测弱超声波场的幅频特性。目前,常用的光纤干涉仪主要有马赫-曾德尔干涉仪型(Mach-Zehnder Interference, MZI),迈克尔逊干涉仪型(Michelson Interference, MI),萨格奈克干涉仪型

(Sagnac Interference, SI),法布里-珀罗干涉仪型(Fabry-Perot Interference, FPI)等,如图1所示。

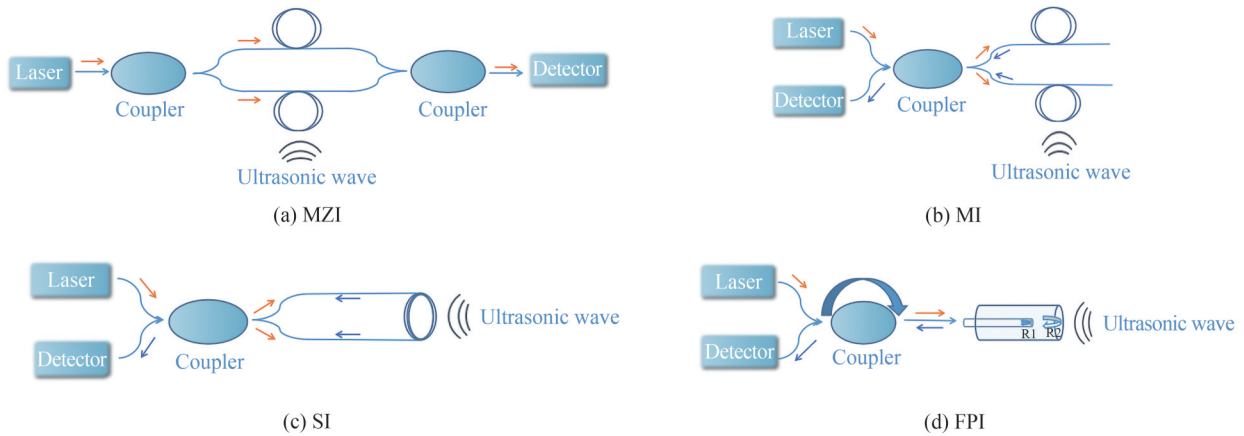


图1 干涉型光纤超声传感器

Fig. 1 Optical fiber interferometry-based ultrasonic sensors

MZI型光纤声波传感器是一种采用双耦合器的透射型光干涉结构,将干涉仪的一臂作为传感端,另外一臂作为参考端,两束光在第二个耦合器汇合干涉。声场压力波作用于传感臂,引起传感臂光纤的折射率、长度等参数发生变化,进而导致干涉仪两臂的光程差发生改变,干涉光谱发生飘移。BUCARO J A等^[38]率先提出基于MZI结构的光纤超声波传感器,实现了水下40 Hz~400 kHz宽频带声波探测,最小探测声压为0.1 Pa。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^[39-43]。GALLEGO D等^[44]提出了基于单模聚合物光纤的MZI超声波传感器,如图2(a)所示,该传感器具有5 MHz

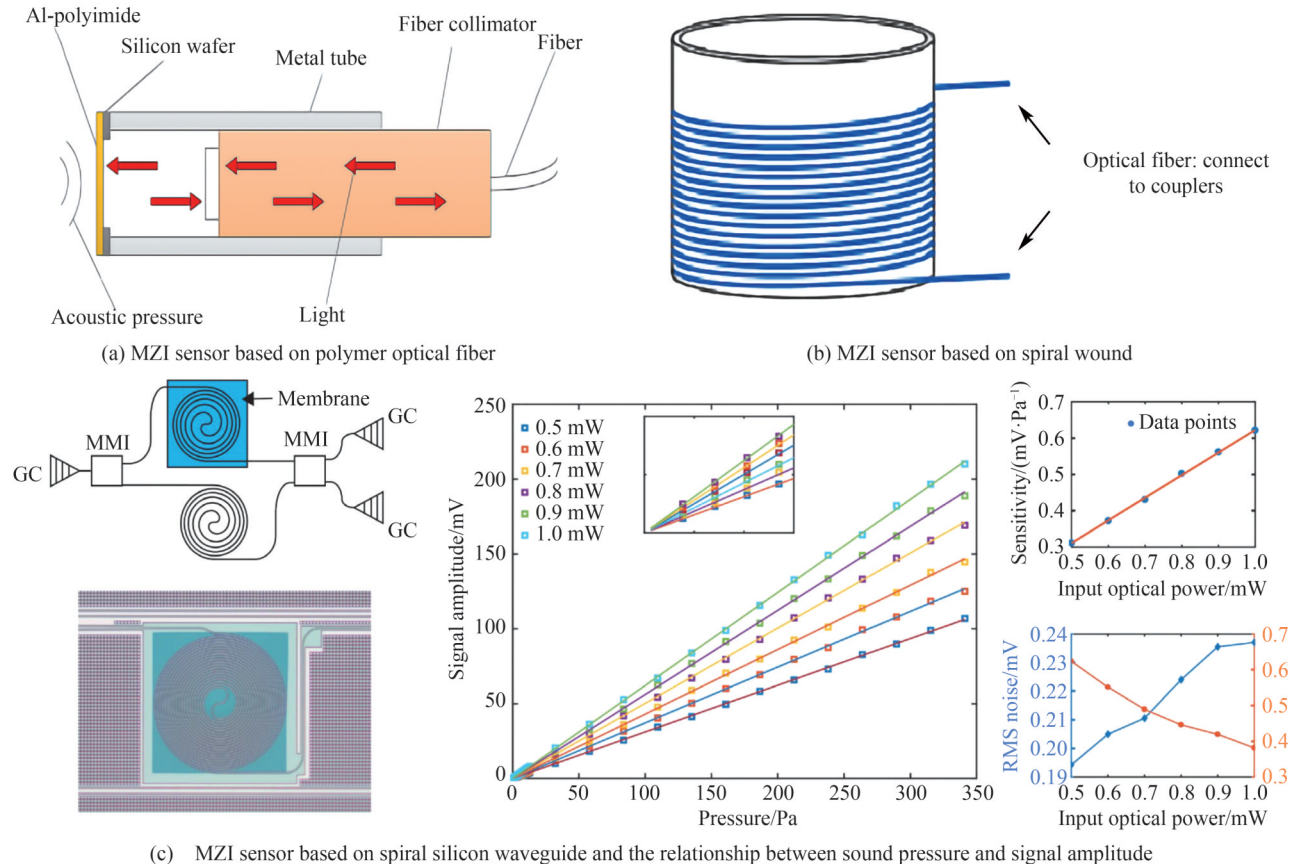


图2 MZI型光纤超声传感器^[44-46]
Fig. 2 MZI optical fiber ultrasonic sensors^[44-46]

以上的响应频带,且灵敏度高达13.1 mrad/kPa。相比于常规石英传感光纤,聚合物材料具有适配的声阻抗和较低的弹性模量,与声场更易耦合且对压力波具有更高的响应灵敏度,该类传感器超声灵敏度提升了10余倍。随后,LAN C等^[45]将光纤MZI的传感臂缠绕在空心圆柱体上,超声压力波耦合到柱体继而作用于光纤,如图2(b)所示。该传感方案可探测到频率为140 kHz的超声信号,但由于线圈缠绕型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。OUYANG B等^[46]将一种螺旋式硅波导作为光纤MZI的传感单元,如图2(c)所示,其超声探测极限为0.38 mPa/Hz^{1/2},动态范围为59 dB。因此,通过优化MZI传感光纤结构,如使用多模光纤^[47-48]、改性光纤涂覆层^[49-51]等,或是设计高效的声固耦合方式,如将光纤嵌入复合结构^[52],可明显改善超声感测灵敏度。同时,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,对高频超声波响应灵敏度较低,适用于低频声波检测;干涉结构参考臂和传感臂的长度较长,要求稳健的光纤固定和封装方法,以避免低频扰动的影响;复用性不足,难以开展多通道的超声感测。

MI型和SI型光纤声波传感器一般采用单耦合器构建,相比MZI型结构较简单。MI型光纤超声传感原理与MZI型相似,而MI型属于反射型干涉结构。因此,MI型光纤超声波传感器可借鉴MZI型相关方法提升传感器灵敏度和频率响应,也可进一步优化MI型反射结构以获得较好的线性响应度^[53-54]。例如,LIU L等^[55]制作了一种基于聚丙烯/聚对苯二甲酸乙二醇酯(PP/PET)隔膜的新型声波传感器,入射光通过PP/PET薄膜的两侧反射到光纤准直器中形成MI。如图3(a)所示,在该传感器的光路中,声信号引起的膜片变形会被放大两倍。该传感器的灵敏度在90 Hz~4 000 Hz的频率范围内超过-128 dB re 1 rad/ μ Pa,在频率为600 Hz时,信噪比达到了约42 dB。但由于受传感膜片半径的尺寸限制(封装尺寸2.3 mm \times 13 mm),该传感器的工作频率低于4 kHz。GANG T等^[56]提出了一种基于MI结构的斜口封装式光纤超声波传感器,有效减小了MI尺寸,结构稳定性也得以提高。另外通过光纤端面涂覆的方式增强了干涉条纹可见度,整个传感结构的机械强度和响应灵敏度均有提升。将此MI结构用于地震物理模型超声波成像,能够检测到300 kHz的连续脉冲超声波信号。FAN P等^[57]提出了一种基于金膜片的MI光纤声波传感器,MI由两个金膜片和一个光纤

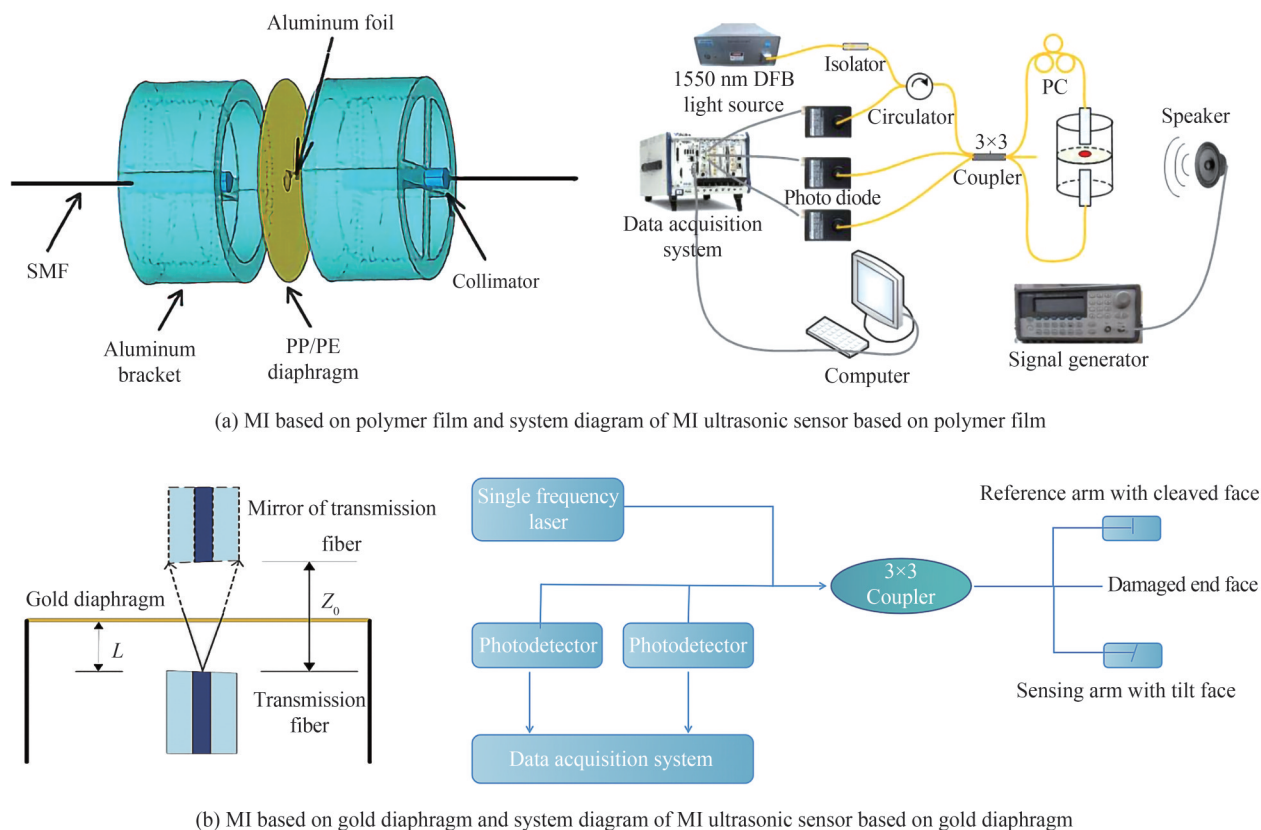


图3 MI型光纤超声传感器^[55, 57]
Fig. 3 MI optical fiber ultrasonic sensors^[55, 57]

端面组成,如图3(b)所示,确保了反射光的强度。采用电子束蒸发沉积法制备了厚度和直径分别为300 nm和2.5 mm的金薄膜,达到了高灵敏度和低噪声水平,传感器相位灵敏度约为 $-130.6 \text{ dB re } 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$,灵敏度波动低于0.7 dB。目前,MI声传感器仍存在尺寸较大、稳定性不足等问题,相较于FPI传感器而言,MI传感器报道较少。在未来MI声波传感器研究中,可通过缩短光纤MI两臂的长度,并减小传感膜的半径,以提高传感器的谐振频率,进一步提高传感器的工作频率范围;此外,在实际应用中可通过特定的结构封装来提高传感器机械强度,制成传感探针。

不同于上述两种干涉结构,光纤SI是一种偏振敏感的共光路干涉结构。光在SI环路中正反传输时存在一定的相位差,从而形成干涉并可用于声波检测。该技术不需使用光参考臂,因此可有效降低MZI型和MI型光纤声波传感器存在的低频干扰噪声。由于SI型光纤声波传感器探测频率依赖于光纤线圈尺寸,实现宽频带检测较为困难。FOMITCHOV P A等^[58]提出了一种光纤探针式非接触超声探测方法,用于检测粗糙样品表面的MHz频段兰姆波,该探测提供了高空间分辨率的超声波探测,并对裂缝(1 mm)进行成像。此外,由于保偏光纤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,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 K等^[59]在SI的光纤线圈上熔入一段熊猫型保偏光纤,如图4(a)所示,该结构在空气中的频率响应平坦范围为300 Hz~4.5 kHz。另一种改进方法是构建膜片式传感探头来进一步提高SI检测频带,MA J等^[60]基于膜片式探头研制了新型的SI光纤声波传感器,其在空气中的声频率响应范围提升至1 kHz~20 kHz。另外,通过在光纤环路中增设光学器件优化光谱质量,ZHAO W等^[61]在光纤环路中增设两个偏振控制器和一个适配器,调节偏振控制器和旋转适配器,以获得最佳的干涉条纹,如图4(b)所示。该SI光谱条纹可见性可达43.9%,接近于最高理论值50%,基于B-Scan扫描检测方法,实现了对不同深度表面缺陷的精细评价。研究表明,SI尾纤环的尺寸决定了所能检测的超声波频率,理论上1 cm直径的尾纤环结构可检测到200 kHz以下超声波。Sagnac超声波检测系统的稳定性与传输光的偏振态有关,在系统中集成偏振器件可有效增强其稳定性,但也更复杂。

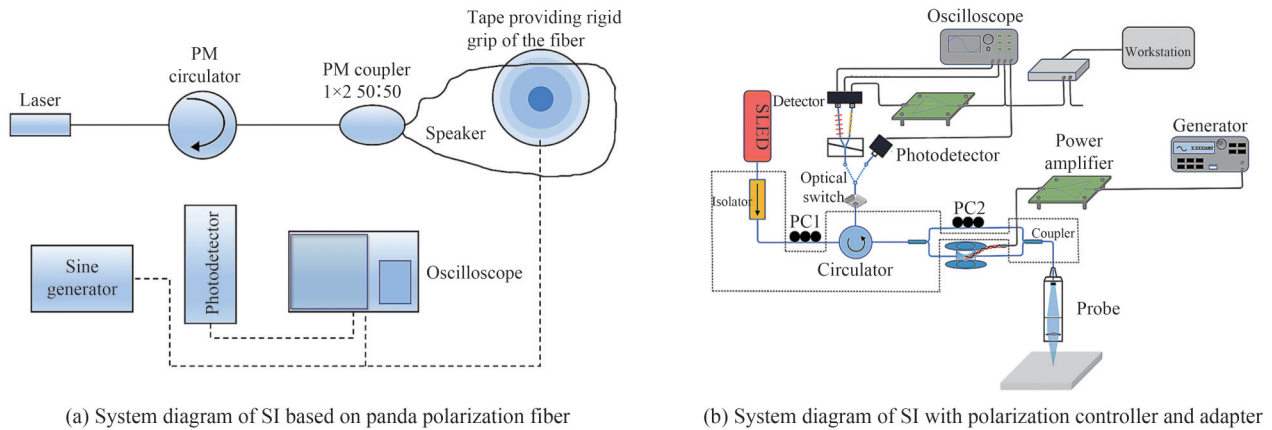


图4 SI型光纤超声传感器^[59, 61]

Fig. 4 SI optical fiber ultrasonic sensors^[59, 61]

相较于上述MZI、MI以及SI型三种光纤干涉仪,FPI光纤传感器无需耦合器和参考臂,具有高灵敏度、结构紧凑、制作简单等优势^[62-68]。光纤FPI主要分为本征型光纤FPI(EFPI)和非本征型光纤FPI(IFPI),其核心为两个光反射面构造的FP腔,一般通过解调声场引起FP腔长度的变化来实现声波探测。早期光纤FPI传感器主要利用光弹效应检测超声波信号,当声压力波作用于传感光纤时,其折射率发生改变,从而引起干涉光相位的变化和光谱漂移。WEI H等^[69]提出了一种基于空芯光纤的封闭式空气腔EFPI,并将其作为多波长光纤环形激光超声波传感系统的反馈单元,其激光输出边模抑制比大于30 dB,实验中可探测到10 MHz的超声波信号。尽管上述传感器具有一定的超声感测能力,但其灵敏度和响应频带受限于传感光纤的结构和材料。近些年,基于膜片式的EFPI型声波传感器备受关注,成为声波探测领域的主要传感方式。根据固体力学理论,此类EFPI型传感器的声学表现与膜片材料性质息息相关。因此,研究人员常使用金属膜^[70]、石墨烯膜^[71]以及二氧化硅膜^[72]等杨氏模量较低(1.14 GPa~1.42 GPa^[73])、厚度极薄(纳米级别^[74])、稳定可控的

膜片材料制作高灵敏度的微型光纤EFPI声传感器。XIANG Z等^[75]采用薄金属膜作为传感膜片,如图5(a)所示,所研制传感器具有400 Hz~12 kHz的宽平坦响应范围,几乎覆盖了可闻声波的主频率成分。NI W等^[76]提出了一种由光纤端面 and 厚度为10 nm的石墨烯薄膜组成的超宽带光纤声波传感器,如图5(b)所示,超宽带频率响应范围为5 Hz~0.8 MHz,涵盖了次声到超声的频率范围。FU X等^[77]在硅衬底上制作FP腔,平坦频率响应区域为0.5 Hz~250 Hz,可用于低频声波检测,如图5(c)所示,传感器灵敏度波动小于0.8 dB。超声波实为动态应变波,作用于光纤时沿光纤轴向拉伸或压缩光纤,使之发生形变。若选用杨氏模量更小的材料替代石英光纤,所构建FPI传感器的超声波灵敏度更高。THATHACHARY S等^[78]制作了一种聚合物光纤FP腔,通过在谐振腔内创建一个自对准聚合物波导来限制衍射损失,在25 MHz带宽上的等效噪声压力为350 Pa。FPI型光纤超声波传感器制作简单,膜片式FPI结构非常适用于高灵敏的声波探测,但该类传感器仍存在机械强度低、鲁棒性不足等缺点。因此,需优化选择传感光纤和膜片材料,结合先进的加工及封装工艺,进一步提升FPI传感器的声学性能。

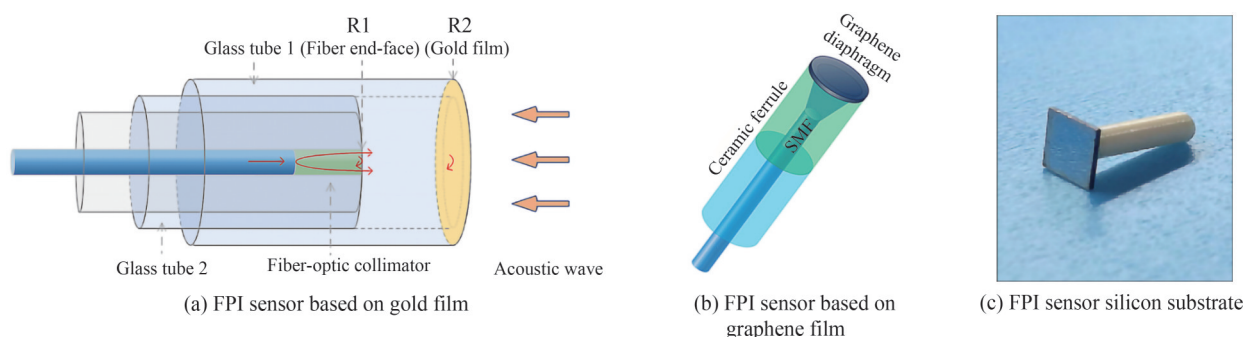


图5 FPI型光纤超声传感器^[75-77]
Fig. 5 FPI optical fiber ultrasonic sensors^[75-77]

此部分主要综述了系列干涉型光纤超声波传感器的基本特点和发展趋势,特别是光纤FPI型传感器,具有探测频带更宽、制作封装更简单、解调方式更丰富等明显优势,属于目前主流的干涉型光纤超声波感测方式。干涉型光纤传感器具有较高的超声波响应灵敏度,但同时对其他物理量(如温度、低频振动等)也较为敏感,在超声波探测过程中容易产生可见的本底噪声。因此,需要结合反馈调谐机制^[79]以保持传感器稳定,运用信号放大、滤波、去噪等处理技术来综合提高传感器声波信号的信噪比。

1.2 光纤光栅型超声波传感器

当超声波场作用在FBG上时,导致FBG周期和有效折射率发生变化,从而改变FBG反射中心波长^[80-82]。光纤光栅型超声波传感器克服了测量结果受光源功率波动影响的缺点,反射光谱带宽窄,易于复用,可在一根光纤上级联多个FBG构成传感网络,实现超声波多点准分布式测量。光纤光栅超声灵敏度取决于栅区长度(L)与超声波长(λ_s)的相对大小:当 $\frac{\lambda_s}{L} < 1$ 时,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 $\frac{\lambda_s}{L} = 1$ 时,超声波波长与FBG长度相当,超声作用时FBG反射光谱的形状和波长均发生变化;当 $\frac{\lambda_s}{L} \gg 1$ 时,作用在FBG上的超声波应变为常量,因此FBG反射光谱的波长发生漂移而形状保持不变。因此,使用FBG检测超声波时,FBG的栅区长度需尽可能小于超声波波长。

WEBB D J等^[83]报道了FBG型超声波传感器,用于检测950 kHz超声波。随后,该课题组进一步优化了解调技术,基于非平衡干涉区分原理,成功探测到10 MHz高频超声波,由此分析了FBG长度与传感器灵敏度之间的关系。相移光纤光栅(Phase-Shifted Fiber Bragg Grating, PS-FBG)因其传感光谱中存在带宽极窄的相移峰(数皮米),基于光谱边带滤波法,在超声感测灵敏度方面极具优势。传感光源使用窄线宽激光器,将激光输出波长调制于PS-FBG相移峰上,进行边带滤波解调,传感器灵敏度优于常规FBG。2011年,ROSENTHAL A等^[84]提出了基于PS-FBG的超声传感器,实现了对频率在10 MHz以下的超声波

的高灵敏度测量。2016年, HU L等^[85]使用一对PS-FBG对超声波进行探测,其中一个光栅作为传感元件,另一个光栅作为参考并与声信号隔离,两者的检测信号相减以消除噪声,实验结果显示传感系统的信噪比可提高20 dB。传感器封装也是决定光纤光栅感测性能的关键, LIU W F等^[86]提出了一种新型的光纤水听器,将栅长为20 mm的光纤光栅封装在贴有硅膜片的凹槽上,如图6(a)所示,并且通过减小光纤直径提高了FBG的频率响应和灵敏度,图6(b)为灵敏度曲线图,成功探测到水下4~10 kHz的低频声波。此外,通过改善光纤材料和加工工艺也可大幅提升FBG超声传感器的性能。LI C等^[87]提出了一种侧面抛光的FBG传感器,用于检测由轴向或径向传播的超声波引起的光栅轴向应变,如图6(c)所示,并且验证了轴向和径向工作模式下超声波长/布拉格比对传感器声压响应的依赖性,从而有助于在有限的测量范围内(40~120 kHz)以提高灵敏度(91.29 nm/MPa),如图6(d)所示。WEI H等^[88]采用双光子3D打印技术制备了一种基于聚合物相移光栅波导(PS-BGW)的微型超声传感器,PS-BGW器件的截面积为 $1.5\ \mu\text{m}\times 2\ \mu\text{m}$,光栅长度仅为 $100\ \mu\text{m}$,灵敏度为 $1\ 878.6\ \text{mV/MPa}$ 。基于微波导的微纳光栅器件可以极大提高超声探测灵敏度,同时通过优化波导参数,可使器件表面光滑化,减少了散射和耦合造成的光损失,进一步优化传感器检测灵敏度。

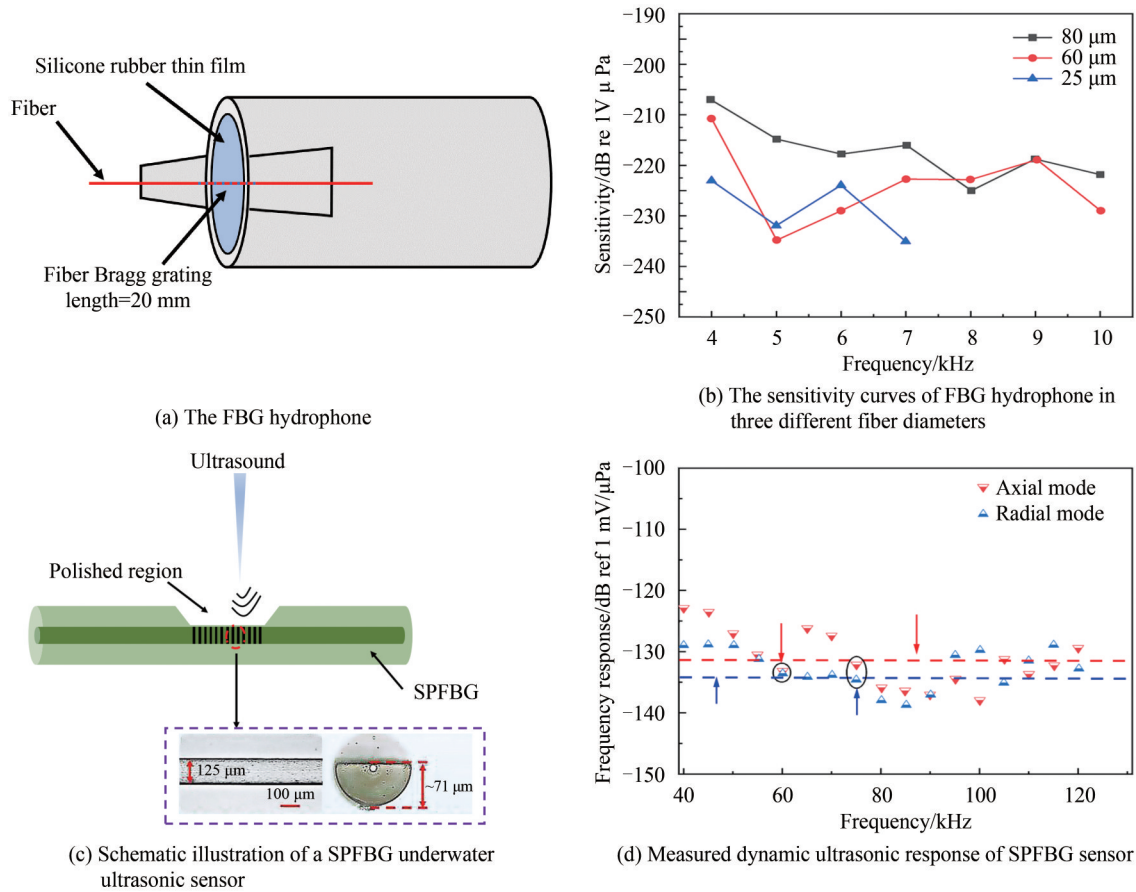


图6 基于FBG的水下超声波传感器^[86-87]

Fig. 6 Underwater ultrasonic detector based on FBG^[86-87]

除了上述无源FBG超声波传感技术,分布式反馈光纤激光器(Distributed Feedback Fiber Laser, DFB)也可用于超声波检测。DFB技术通过在增益光纤上刻写FBG,可输出具有极窄线宽的高功率激光,有效增强检测信噪比,实现有源型超声探测。2005年, GUAN B O等^[89]通过在掺饵光纤上刻写两个反射率大于99%的FBG,构建了如图7(a)所示的分布反射式(Distributed Bragg Reflector, DBR)光纤激光器实验系统,测试了图7(b)所示的拍频信号,可以检测频率高达40 MHz的超声波。由于双折射效应的存在,激光器输出两束不同频率且偏振态正交的窄线宽激光。受超声扰动时,光纤的双折射率发生变化,从而改变激光器谐振腔的腔长,导致两个偏振态的激光相对频率发生变化,通过检测相对频率的波动实现对入射超声波的高

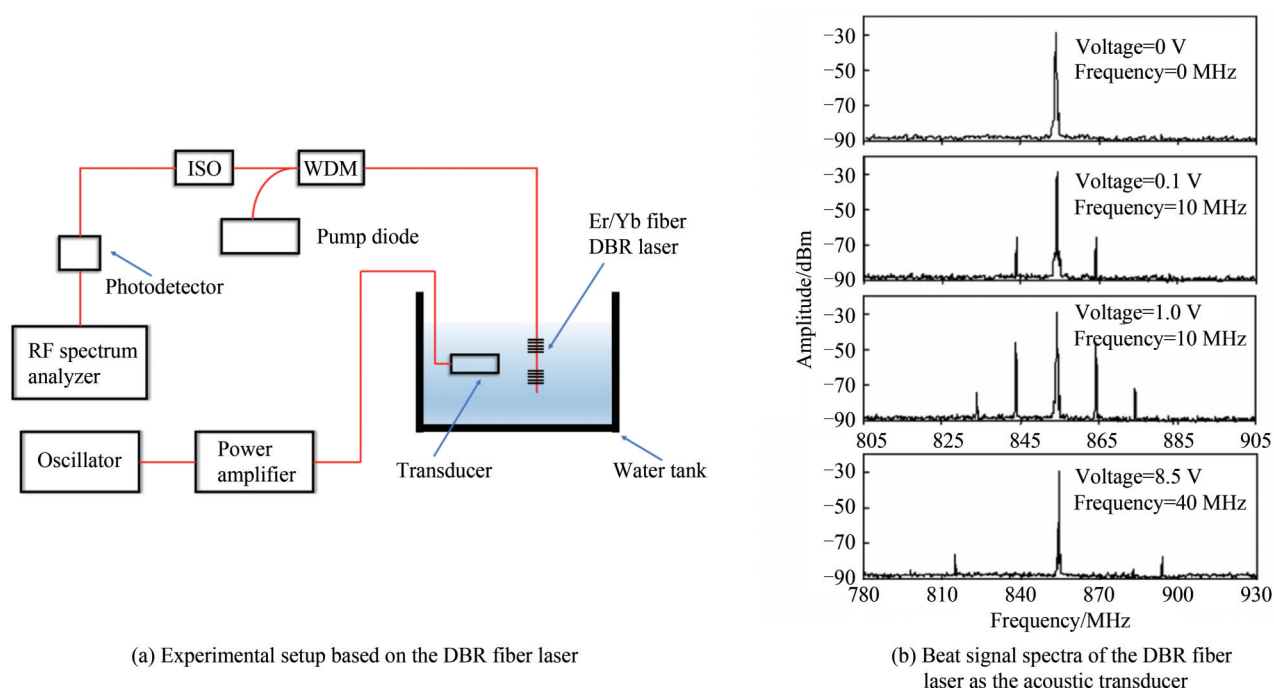


图 7 基于DBR的超声实验系统图^[89]

Fig. 7 Experimental setup for ultrasonic measurement based on DBR fiber laser^[89]

灵敏探测。此外,LYU C等^[90]使用DBR测量了双频超声波,理论上分析了不同调制深度下双频超声波压力与DBR传感信号输出的关系,在此基础上,采用3 MHz和5 MHz超声信号调制传感光纤中的双折射率,对DBR传感器的远、近场输出进行了实验研究。结果表明,DBR声传感器在不同测试距离和不同超声波振幅下具有多频超声识别能力。基于DFB原理,DBR光纤激光器则是在增益光纤上刻写共振波长相匹配的双FBG,一般通过解调超声波所引起的DBR拍频信号变化来获取波源信息。在基于光纤激光器的超声波传感器制作过程中,可通过腐蚀或是在光纤表面涂覆声阻抗材料等方式进一步提升探测性能。

FBG反射光谱具有窄带宽特征,易于复用,可在一根光纤上级联多个FBG构成传感网络,实现多点准分布式超声波测量。基于FBG波分复用技术,TANAK S等^[91-94]实现了水环境中超声波多点高精度检测,说明FBG超声波传感器具有良好的复用性。此外,FBG线形结构的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,因此通过结合三个同波长的FBG,并以一定角度摆放^[95],可以感测2D超声波,分析不同FBG的超声波响应信号即可判断超声波源位置。基于激光强度调制方法,LIU G^[96]等报道了啁啾FBG超声传感器的多路复用和解复用工作,如图8所示,使用15 MHz和25 MHz的正弦载波信号调制

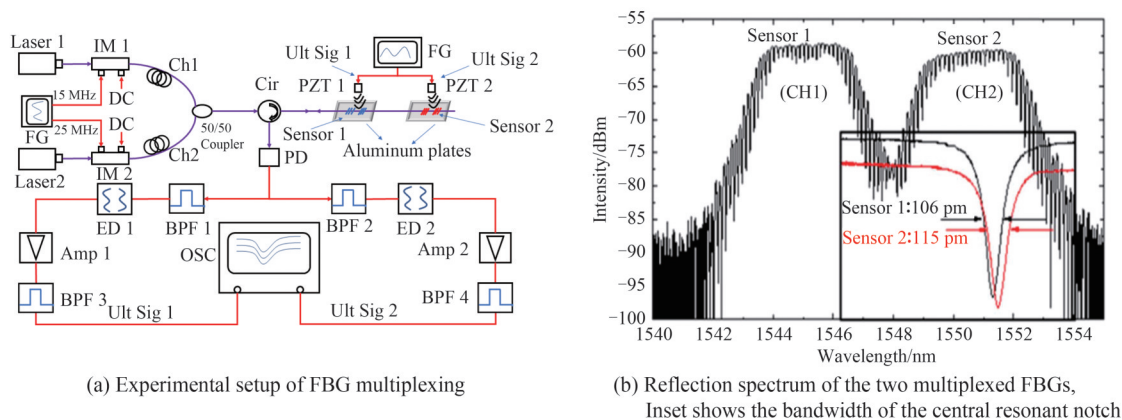


图 8 啁啾FBG多路复用测量超声波实验系统图^[96]

Fig. 8 Diagram of ultrasonic experimental system for chirped FBG multiplexing measurement^[96]

激光强度,超声信号分别由 150 kHz 和 200 kHz 的压电换能器产生,在频域上将超声信号编码的载波信号和边带信号与其他信道的载波信号和边带信号分离。双通道系统的实验结果表明,两通道之间不存在串扰,很好地证实了 FBG 超声传感器的复用特性。在实际应用中,通常使用光开关实现通道扩展以增加波分复用传感器数量,通道扩展会降低传感器的扫描速度,同时系统变得更加复杂。

本节主要综述了 FBG 及其相关器件的声波传感特点和研究现状,FBG 用于超声波检测时有其独特优势,如批量写入、稳定可靠、容易复用等。相比于干涉型超声波传感器,FBG 超声波传感器在制作工艺、系统稳定性、大规模网络化等方面均具有明显的技术优势,但仍存在灵敏度低、难以检测高频超声波等不足。

以上主要介绍了干涉型和光纤光栅型光纤超声波传感器的技术特点和发展现状,不同光纤传感器感测超声波时在传感结构、制作方法、响应灵敏度、响应频带、测量精度等方面各有特点,需结合实际应用需求择优而取。近二十年国内外已积极开展了光纤超声波传感器的诸多研究,不断突破传感器小尺寸、宽频带、高灵敏度检测的极限,并充分应用于生物医学成像^[97-98]、结构无损检测^[99-101]、局部放电的检测^[102-103]、地震物理模型超声成像^[104]等方面。

2 地震物理模型超声成像

地震物理模型是按储藏地质结构等比例缩小的三维模型结构,作为一种实验室模拟方法可用于地震波传输规律验证及理论预测,模拟结果具有真实性,不受计算方法、假设条件的限制,在近乎理想的地质模型条件下探究弹性波的传输行为。相较于地震现场,在实验室搭建地震物理模型成本更低,且具有很好的重复性、稳定性及可控性。地震物理模型成像系统中的超声波激励源和信号接收器可统称为超声换能器,现阶段超声换能器主要有电声换能器、光纤超声换能器(即光纤超声传感器)、激光超声换能器等,如下分别介绍其在地震物理模型超声成像方面的应用。

2.1 基于电声换能器的模型成像

在常规地震物理模型超声成像实验中,一般采用电声换能器作为实验室模型数据采集的激发源和接收器。其中,利用压电换能器产生和接收超声波已成为最常用的方式,主要表现为 PZT。在实际的超声波检测应用中,探测物表面的粗糙程度、探测物内部的构造情况、超声耦合剂的性能等都会影响测试结果。加拿大卡尔加里大学 COOPER J K 等^[105]采用电声换能器对高速楔形模型进行了二维超声测试,建立声学有限差分法确定声波在模型中的传播时间,并识别不同反射回波的模式。此外,通过几种深度偏移方法,成功地实现了纯纵波的主反射成像。此外,休斯敦大学 WONG J 等^[106]构建了基于高精度直线电机的三维定位系统,并将其与多个发射和接收压电换能器阵列耦合,对有机玻璃模型进行了快速且清晰的扫描成像,如图 9 所示。韩国海洋大学 KIM D 等^[107]开发了能够自动控制震源和接收器三轴定位的地震物理建模系统,在盐丘模型上进行了多道采集,获得的模型图像与地震勘探图像一致。北京石油大学 DING P B 等^[108]利用两组页岩块体建立了物理模型,并扫描获得了二维地震数据。结果表明,不同的粘土含量和孔隙度对地震反射有较大的影响,并且用三项反演方法估计了弹性性质和纵波各向异性参数,搭建的系统如图 10 所示。吉林大学 WANG Q 等^[109]建立了一系列平行微裂缝的三维物理模型,同时利用三分量换能器对该模型进行了探索,并采集了三维弹性波数据,分析了横波传播特性。通过研究弹性波中共极化和交叉极化响应幅值的变化以及横波分裂现象,可以判断裂缝的方向和密度等性质。

在复杂物理模型研究中,PZT 的辐射面积较大而反射信号复杂,震源接近点源可优化模型成像精度。目前实现点源有两种途径:一是减小压电晶片的辐射面积,二是使用特殊形态的压电晶片(球状或管状压电晶片)。以上技术在实现时存在以下矛盾:首先,小直径($<5\text{ mm}$)的球状压电晶体很难制作;其次,当辐射面积减小且换能器工作频率不变时,换能器中压电晶片的厚度与直径接近,使得晶片内的其他振动模式能量增大;同时,减小换能器的辐射面积,势必大幅降低换能器的功率和灵敏度。此外,PZT 易受电磁干扰,也存在灵敏度低、复用差等问题。如上诸多限制给电声换能器的性能提升带来了很大的挑战,因此,光纤超声传感器可代替 PZT 实现高精度的地震物理模型成像。

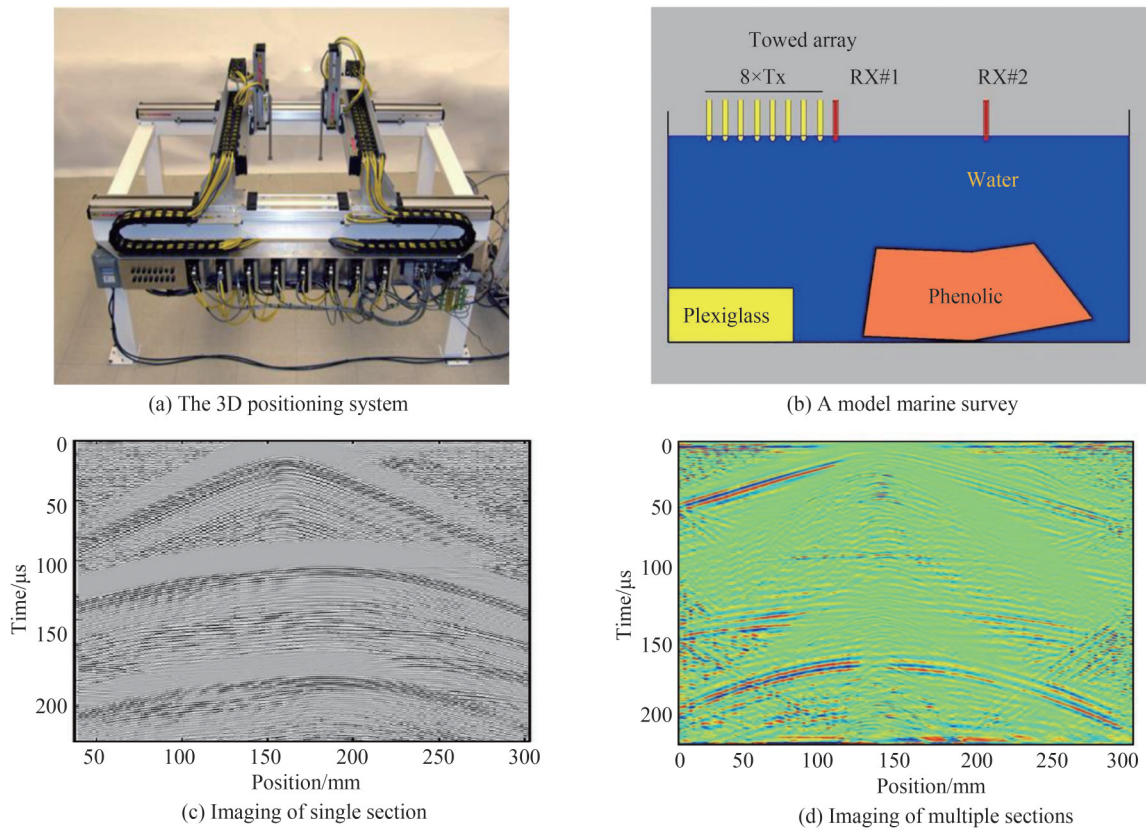


图9 休斯敦大学地震物理模型成像^[106]
 Fig. 9 Seismic physical model imaging at University of Houston^[106]

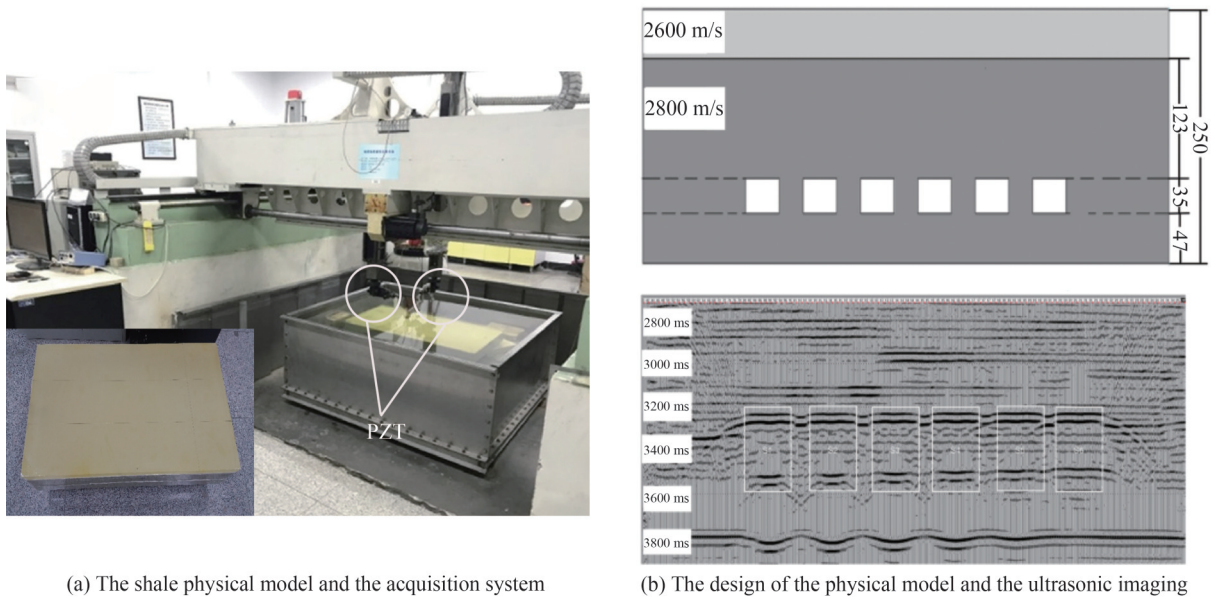


图10 北京石油大学页岩物理模型成像^[108]
 Fig. 10 Shale physical model imaging at Beijing Petroleum University^[108]

2.2 基于光纤超声传感器的模型成像

光纤超声波传感器具有结构小巧紧凑、不受电磁干扰、多通道同时检测等优点,因此可替代传统模型研究中的PZT超声接收器,实现高信噪比的超声回波检测。地震物理模型光纤超声成像系统采用PZT作为超声激发源,光纤超声传感器作为回波接收器。GUO J等^[110]报道了基于PS-FBG的光纤超声扫描成像研究,传感器结构图如图11(a)所示,物理模型如图11(c)所示为多层有机玻璃板模型。采用系统图11(b)所示

对模型进行二维超声扫描,PS-FBG超声传感器呈现出高灵敏度及高成像分辨率特征如图11(d),传感器的响应幅值(Signal–Noise Ratio, SNR)为45 dB(200 kHz)。但在实际的地震物理模型光纤超声波成像研究中,仍需进一步提升光纤传感器性能,以实现结构微巧、高灵敏度、宽频带响应、多路复用等感测能力。

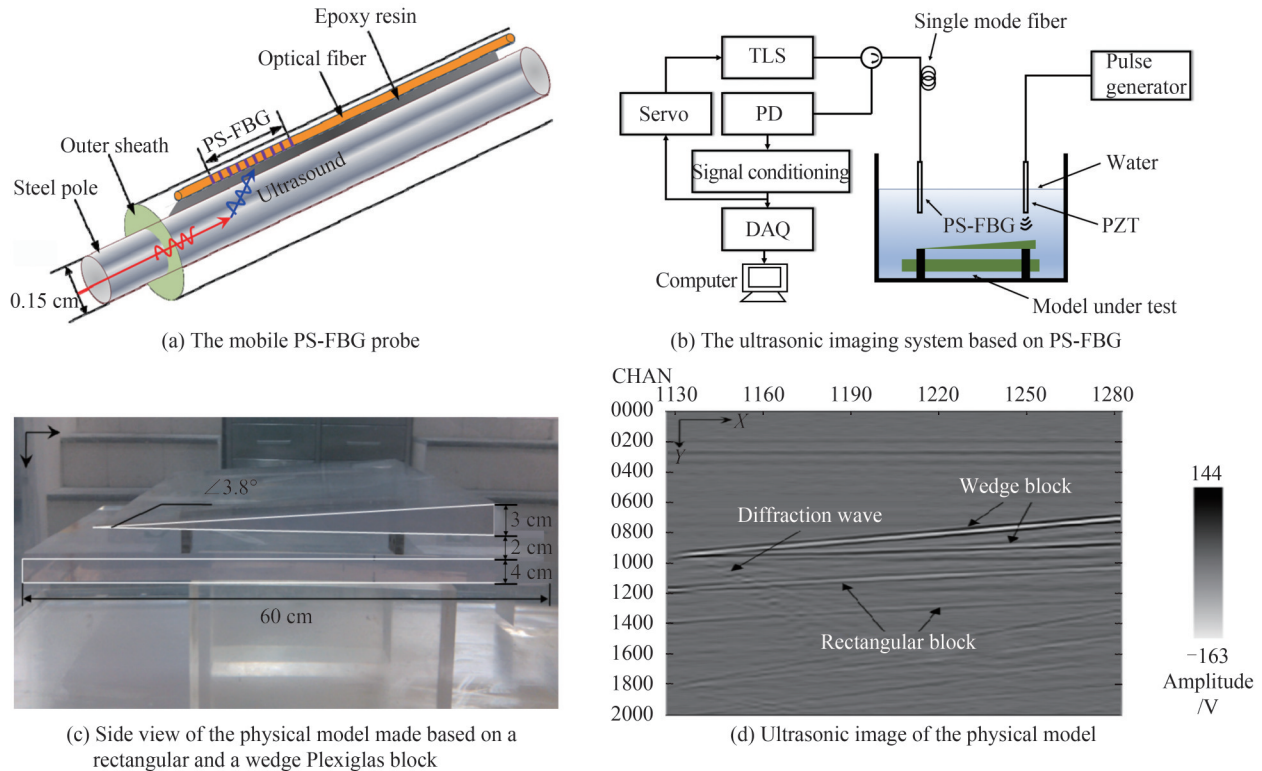
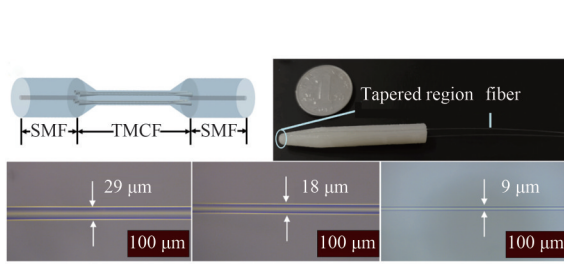


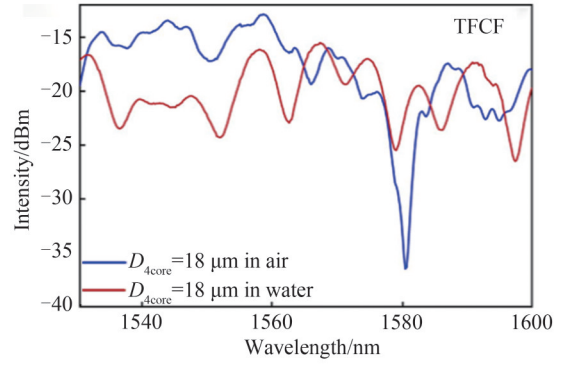
图 11 基于相移光纤布拉格光栅的地震物理模型超声成像^[110]
Fig. 11 Ultrasonic imaging of seismic physical models using a phase-shifted fiber Bragg grating^[110]

在地震物理模型光纤超声波成像领域,本课题组开展了长期深入的研究,以下主要展示了本课题组近些年在地震物理模型光纤超声波成像领域的研究进展。光纤超声传感器逐渐趋于微型化,不断实现高灵敏度、高空间分辨率和宽频带的传感功能,以满足复杂地震物理模型超声波扫描精细成像的需求。对于干涉型光纤超声波传感器,主要集中于FPI及微结构等传感类型,图12为近期研制的两种干涉型光纤超声波传感器。图12(a)展示了基于锥形多芯光纤(Tapered Multi-Core Fiber, TMCF)的紧凑型光纤超声波传感器,其透射光谱如图12(b)所示,在TMCF的锥形区域极易激发和耦合多模态光场,从而形成高灵敏度的模间干涉。超声波改变TMCF锥体周围介质(如水)的有效折射率,而周围水体与TMCF透射光之间存在倏逝场相互作用,从而可对TMCF的透射光谱进行周期性调制。该TMCF传感器被封装在聚氨酯棒上,作为超声波探头可获得高信噪比的电压信号^[111]。图12(c)是一种基于悬芯光纤的微型超声波传感器,采用双FBG代替常规光纤端面反射镜,从而构成光纤内FPI干涉仪(FBG-FPI),大大提高了FPI传感器的灵敏度和稳定性。悬芯光纤传感器的反射光谱如图12(d)所示,由于该光纤IFPI结构尺寸微小(传感尺径 $<20\ \mu\text{m}$),将其用作室内地震物理模拟探头,可感测MHz级超声波,因此非常适用于高频超声波探测^[112]。

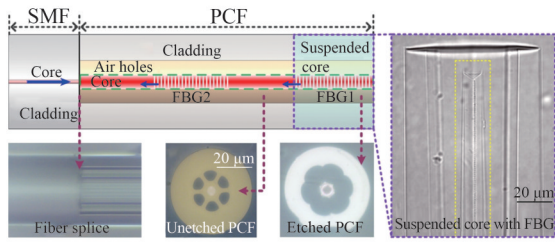
本课题组在FBG型超声波传感器的研究中并未采用常规的PS-FBG,而是创造性地改进封装技术和刻栅技术来进一步提高FBG传感器的超声波灵敏度。图13(a)是一种基于声耦合锥封装的FBG超声波传感器^[113],其光谱图如图13(b)所示。将光纤光栅-法布里珀罗传感器固定于声耦合锥的顶端,通过锥体的底面接收超声波,同时外围增设保护性封装壳体,基于声耦合锥间接耦合的方式,可增强整个传感结构的机械强度;更为重要的是,独特设计的声耦合锥具有声聚焦效果,可将模型中的超声回波高效聚焦于传感光纤上,增加光纤的轴向应变幅度,从而大幅提升FBG传感器的响应灵敏度。图13(c)所示为一种基于聚合物波导的微型光栅传感器^[114]。不同于常规石英光纤光栅传感器,此处使用紫外胶聚合物波导刻写传感布拉格光栅。利用毛细管效应将紫外胶密封在毛细管中,以制备质地均匀的聚合物波导,然后采用逐行刻写技术,通



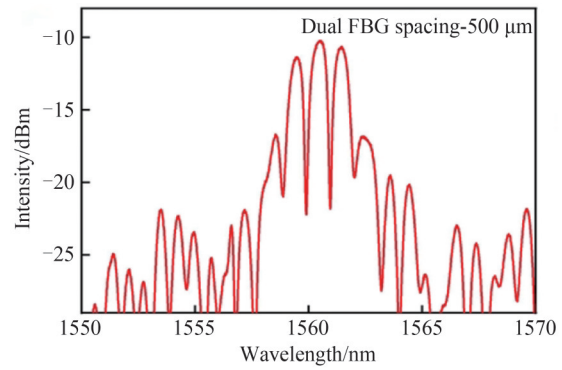
(a) The sensor structure based on TCMF



(b) Transmission spectra of TFCF with taper diameters of 18 μm



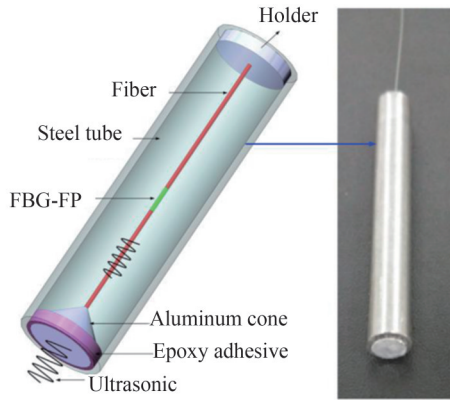
(c) The suspended-core fiber sensor based on FBG-FPI



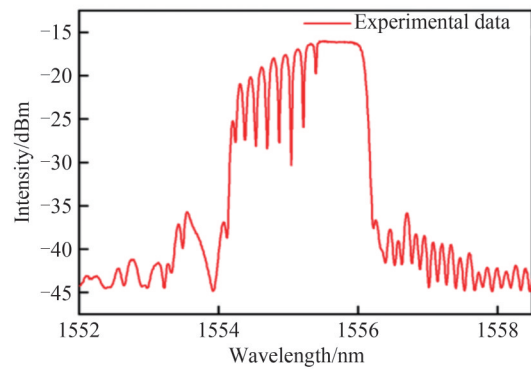
(d) The reflection spectra of the FBG-FPI when grating spacing is 500 μm

图 12 干涉型光纤超声波传感器^[111-112]

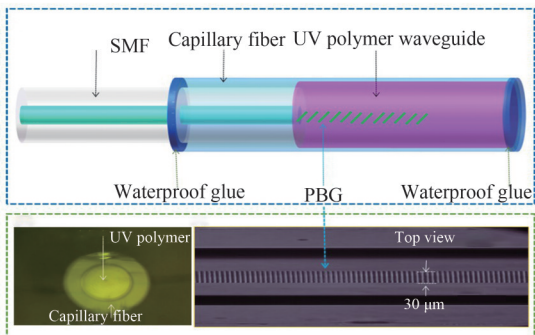
Fig. 12 Interferometric optical fiber ultrasonic sensors^[111-112]



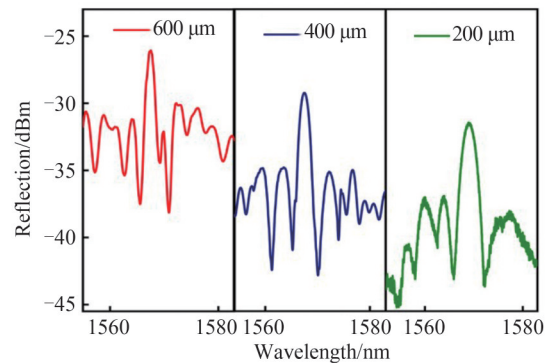
(a) Structure of the ultrasonic sensor based on coupling cone



(b) Reflection spectrum of the ultrasonic sensor



(c) Polymer optical fiber sensor



(d) The reflection spectra of the polymer optical fiber sensor

图 13 FBG 型光纤超声波传感器^[113-114]

Fig. 13 FBG optical fiber ultrasonic sensors^[113-114]

过激光束横向扫描,对聚合物波导的折射率形成周期性调制,以获得不同栅区长度的聚合物光栅,反射光谱图如图13(d)。实验结果表明,与具有相同反射率的单模FBG和PS-FBG相比,聚合物光栅传感器由于其较低的杨氏模量,对相同强度的超声场拥有较高的响应幅值。

图14为基于边缘滤波解调技术搭建的地震物理模型光纤超声成像系统的装置,整个系统可分为超声波发射部分和接收部分。超声波发射部分通过函数发生器发出电压信号,从而驱动PZT产生对应频率与波形的超声波,经由水传播到待测物理模型,超声波在模型的各个层面发生反射和透射,层面深度越大,反射波时延越大,各层面不同时延的超声反射波信号通过光纤传感器接收。系统光路的光源为窄带可调谐激光器(Santec, TSL-710),光源发出的光经过光纤环形器传输至光纤传感器,经超声调制的光波信号再次由光纤环形器到达光电探测器(PD:New focus,2117-FC),最后通过示波器(RIGOL,DS2302A)采集超声电压信号。将地震物理模型放置在水箱中,并将光纤传感器与PZT固定在扫描平台(Newport,SMC100)上,换能器下端均刚好浸入水中,扫描平台通过RS232-USB接口与电脑相连,以操纵光纤传感器与PZT进行三维扫描检测。为了获取最佳的超声响应,将光源波长调至传感器光谱边带的3 dB带宽处,超声波作用于传感器将引起FBG或干涉光谱变化,基于边带滤波技术即可将声信号转换为电信号,从而实现高频超声信号的快速解调。

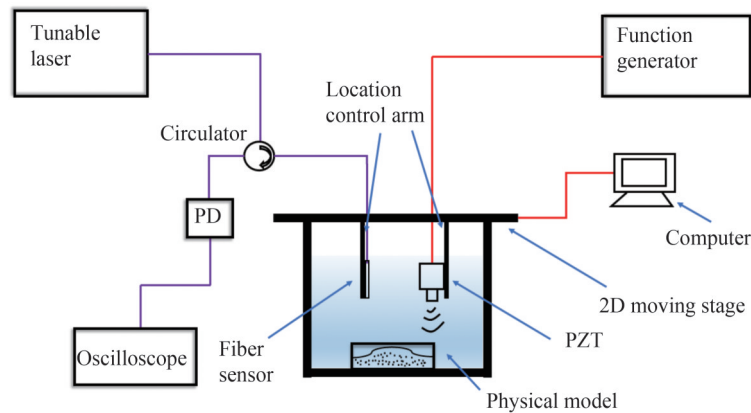


图14 光纤超声波检测系统示意图

Fig. 14 Experimental setup of optical fiber ultrasonic testing system

在地震物理模型超声回波探测过程中,对获取的多道回波信号进行去噪放大处理,结合成像算法可获得物理模型的三维图像。根据地震物理模型缩放规则,超声波工作频率为100 kHz~10 MHz。将地震物理模型放置于消声水箱中,使用水作为超声波传输耦合剂,可降低高频超声波的传输损耗;同时,水具有高比热容特征,在室温测试环境中可有效减小温度波动对光纤传感器性能的影响。本课题组所研制的系列光纤传感器均表现出不同的SNR、响应带宽、动态范围等特性,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、空间分辨率等需求选择合适的传感器结构。图16(a)展示了模拟断面地质结构的三维复杂物理模型,模型长60 cm,宽60 cm,高12 cm,重量超过250 kg。分别对模型第1层和第2层的形态进行测试,以说明模型层次的结构特征。图15(a)和(b)是层表面的二维轮廓,其中图15(c)和(d)中的颜色轻度分别表示图15(a)和(b)模型厚度的变化,层1和层2的形态学图像与图15(c)和(d)中的层表面吻合良好。

对复杂三维地震物理模型扫描成像的典型过程为:两个探头端面与水下模型相距5 cm,光纤传感器和PZT间隔4 cm,二者以1 mm的步进距离沿着导轨滑动,对水箱底部模型进行点对点横向扫描,通过示波器或数据采集卡实时记录传感器探测的回波信号。根据超声波在模型各层和水中的传播速度不同,利用时间渡越法即可重建地震物理模型的图像。图16(a)展示了模拟断层特征的模型结构(如图中标识所示),对特征区域进行三维扫描后即可获得如图16(b)所示的三维模型图像,清晰展现了模型内部各层的特征分布情况。此外,利用光纤传感器和PZT对模型尖灭层进行了扫描检测,成像结果如图16(c)和16(d)所示。相比之下,两种换能器都能清晰揭示尖灭层特征,光纤传感器重建图像具有更完整的尖灭层形貌,同时也获取了尖灭层下更多的构造层信息,而自发送和自接收模式的PZT在图16(d)中只能显示出模糊的尖灭层轮廓。由此说明,在地震物理模型成像中光纤传感器性能更具优势,能够感测到模型深层微弱的回波信号。

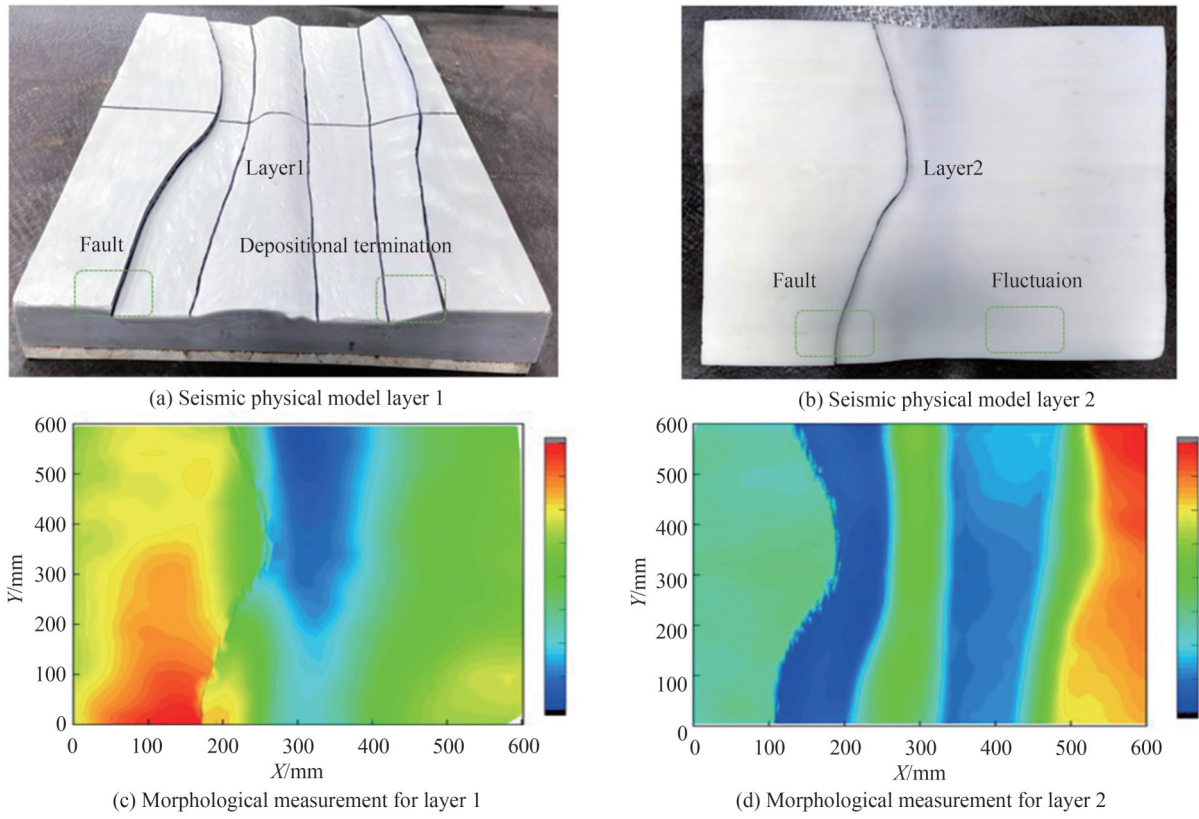


图 15 基于川南地区地下结构的3D地震物理模型^[114]

Fig. 15 Photograph of the designed 3D seismic physical model corresponding to the structure in southern Sichuan area^[114]

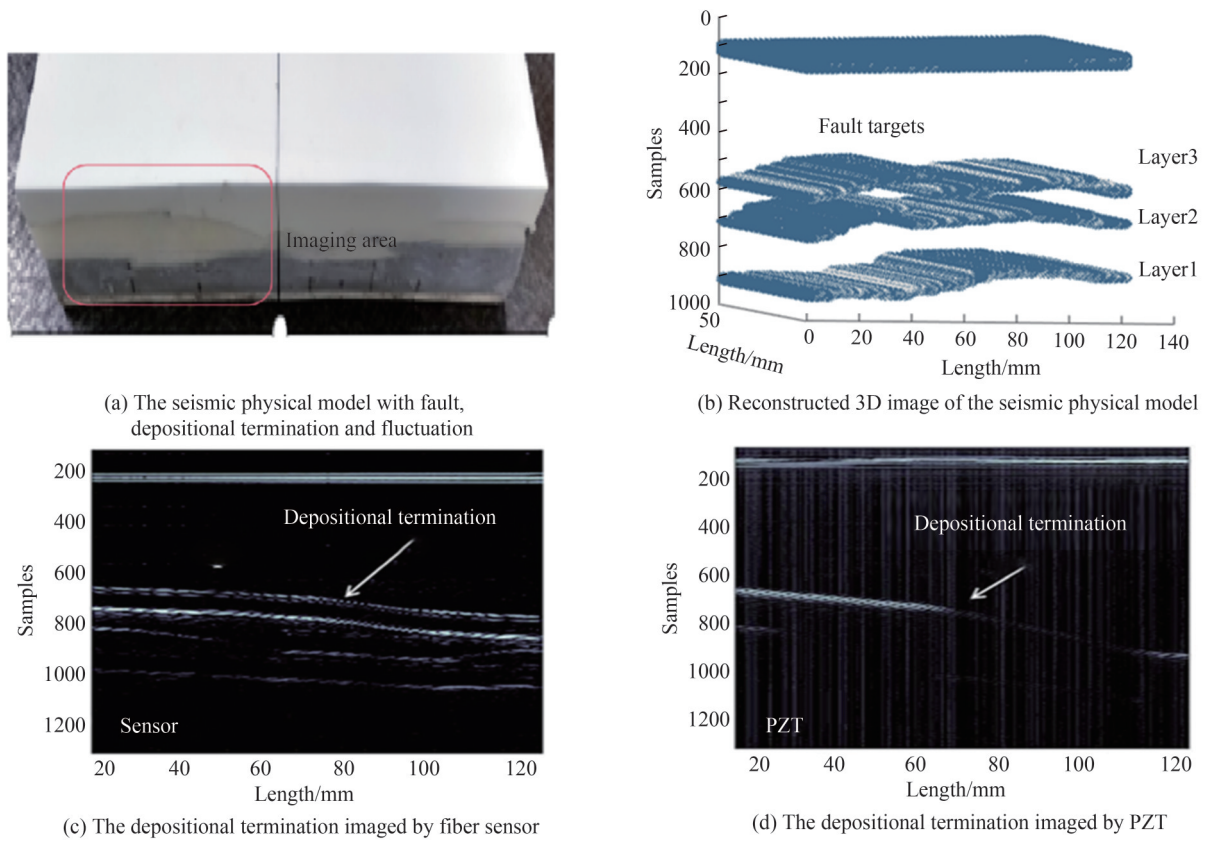


图 16 地震物理模型扫描成像^[114]

Fig. 16 Scanning imaging of seismic physical model^[114]

针对地震物理模型光纤超声波成像技术,本课题组经过多年的探索和研究,基本实现了对宽频带超声波信号的高灵敏度检测及对多种复杂地震物理模型的精细成像。本课题组将继续瞄准地震物理模型光纤超声波检测的难点,深入优化光纤超声传感器性能,发展光纤超声传感复用技术,以期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。

2.3 基于激光超声激励的模型成像

激光超声波模型成像技术将激光超声源和光纤传感器相结合,是解决宽频超声高品质激励和回波高灵敏检测的有效方法,可实现地震物理模型全光脉冲回波超声成像,精细重构地质模型深层构造特征。相比于PZT超声激励方式,激光超声波技术所激励的超声波具有宽频带、高强度、多模式等优势。将纳秒脉冲激光辐照于具有高吸收特性的光声功能材料,材料吸热产生周期性膨胀收缩,进而产生超声波,如图17(a)为地震物理模型激光超声原理,图17(b)为模型内部激光超声激励传播图。

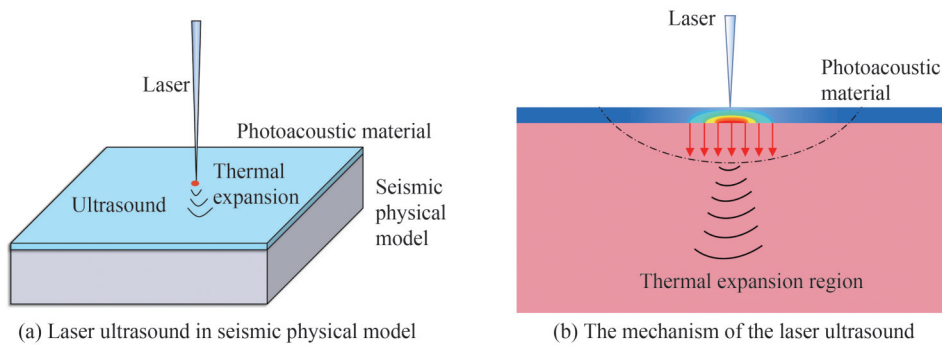


图 17 激光超声原理

Fig. 17 Schematic of laser ultrasound

1990年POUET B等^[31]介绍了激光超声波方法在地球物理探测中的应用,在如图18(a)所示的测试系统中,发射端使用1064 nm Nd:YAG激光器产生宽频超声信号,激光最大能量值为100 mJ,持续时间为20 ns,峰值功率为5 mW,超声检测端采用激光干涉仪,在岩石物理模型中测量了材料弹性波的本征张力和频散,并且模拟了井间地震实验,如图18(b)所示。如引言所述,为了进一步提高激光超声波成像效果,一种解决方案是采用具有高光声转换效率的功能材料覆盖在模型表面,以提高激光超声波激发强度。

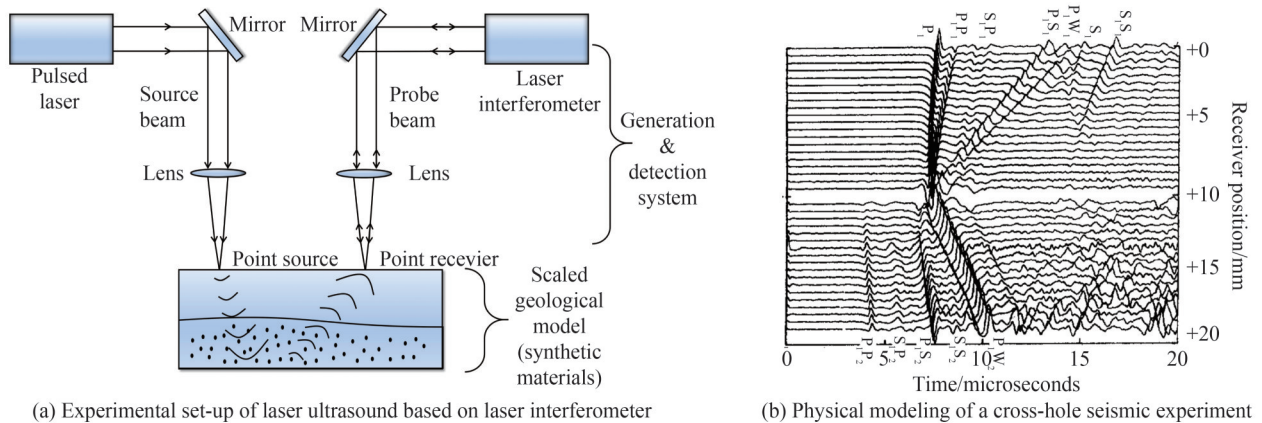


图 18 基于激光干涉仪的地震物理模型激光超声系统^[31]

Fig. 18 Laser ultrasonic system based on laser interferometer^[31]

近期,本课题组采用光声功能材料作为地震物理模型成像系统激励超声波的媒介,功能材料因吸收纳秒激光而发生热膨胀,通过热膨胀效应或热蚀效应产生应变和应力场,进而在模型内部产生超声波,可为地震物理模型成像提供高强度、宽频带、多模式的超声源。针对大型复杂物理模型,需将光声功能材料均匀涂敷于模型表面,因此选择吸收波长匹配、光声转化效率高、价格低廉易铺展、成膜性好等特点的光声功能材料尤为关键。实验室激光超声波成像系统如图19(a)所示,采用532 nm纳秒脉冲激光器作为激励源,脉冲重复

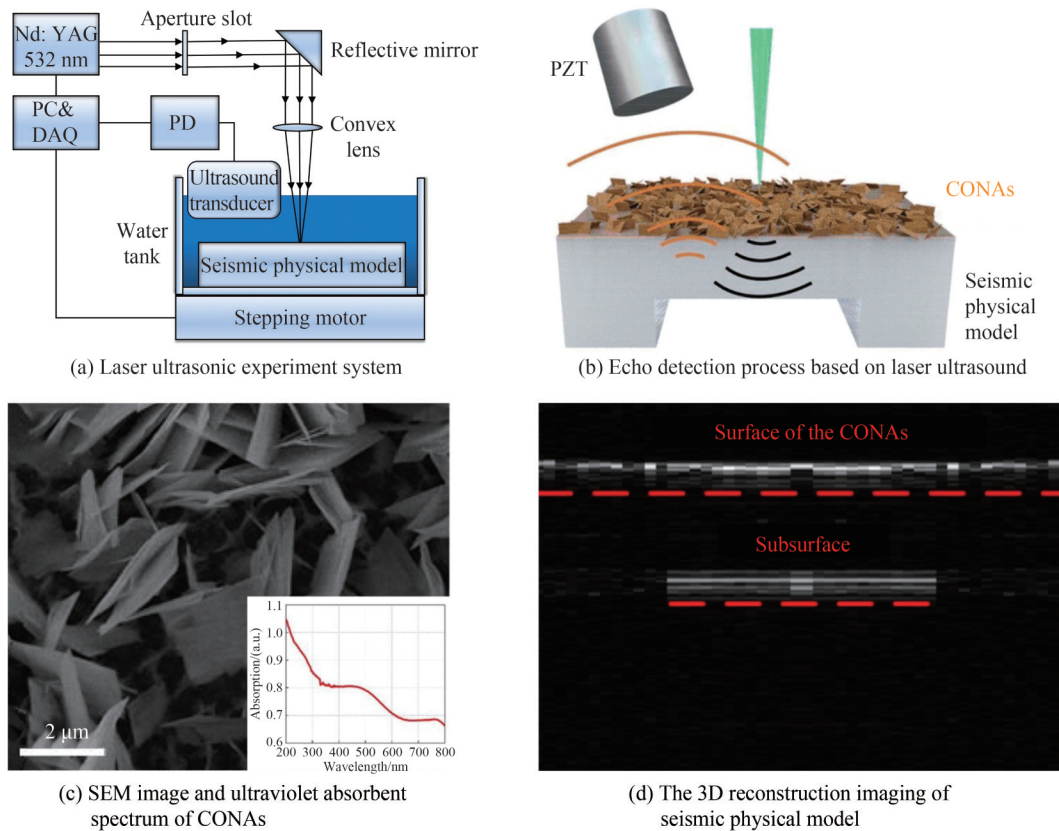
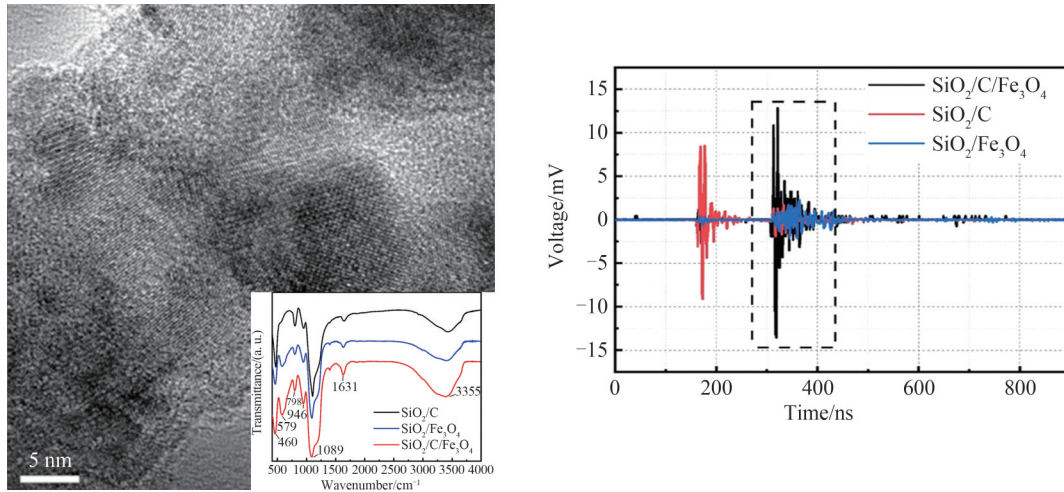


图 19 基于 CONAs 纳米材料的地震物理模型成像^[115]
Fig. 19 Imaging of seismic physical model based on CONAs^[115]

频率为 1 Hz~12 Hz, 单脉冲功率为 1 mW~6 mW, 光斑半径为 1 mm, 纳秒激光通过系列光调制后聚焦辐照于模型表面的光声功能材料上。使用 PZT 或光纤传感器接收超声回波, 结合电动位移台对物理模型进行激光扫描检测。课题组 LIU X 等^[115]制备了高效 Co_3O_4 纳米片 (CONAs) 功能材料, 并将其应用于地震物理模型成像系统。电镜图和紫外吸收谱图如图 19(c) 所示, 因 CONAs 具有较高的光吸收和光声转换效率以及优良的热稳定性, 与 SiO_2 相比, CONAs 产生的光声相响应信号幅值提高了 16 倍以上。将 CONAs 平铺于模型表面, 如图 19(b) 所示, 使用中心频率为 1 MHz 的 PZT 接收模型的回波, 经激光扫描后可清晰重构模型分层特征, 成像结果如图 19(d) 所示。由于单金属对 532 nm 光具有高吸收特点, JIN K 等^[116]使用金纳米薄膜作为超声激发的功能材料, 使用标准 PZT 接收回波信号, 通过反演运算成像得到了清晰的模型分层图像。相较于 CONAs, 金纳米薄膜制作工艺更成熟, 通过市场购置即可获得不同厚度的成品, 且光声转换能力也优于常规模型制作材料, 符合光声功能材料选取的一般特征。PENG Y 等^[117]自制了一种多功能光声磁热纳米材料, 即 $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。采用有限元方法模拟分析了材料的光声信号, 利用 532 nm 纳秒脉冲激光照射 $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 薄片, 结果表明, $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 具有较好的光声功能, 电镜图和紫外吸收谱图如图 20(a) 所示, 相比于金膜, 其光声信号幅值提高了近 5 倍, 光声信号测试图如图 20(b) 所示。为了进一步实现对大型物理模型的大面积铺展检测, XU L 等^[118]选取了低成本的黑石墨烯膜片, 通过改变激光功率和薄膜厚度, 对石墨烯膜片的光声效应进行了理论分析和实验验证, 并且应用于物理模型检测时, 可以清晰地获得模型分层信息。

光声功能材料的光谱吸收特性与热致弹性应变特征, 以及光声信号与地震物理模型的高效耦合是超声波源宽频带、高信噪比、多样化激励的关键。虽然多数材料具有不错的光声响应, 但若无法承受高能量脉冲激光的辐照, 也无法完成地震物理模型的连续激光扫描。另外, 高性能光纤传感器性能可作为激光超声信号的理想接收器, 但目前光纤传感器的声学表现还需进一步提升。虽已能够使用光纤传感器接收到分层模型的激光超声信号, 也能获得初步的成像结果, 但整个全光成像系统还需进一步完善, 以取代 PZT 获得高质量的激光超声成像结果。

图 20 具有光声性质的 $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 复合粒子^[117]Fig. 20 Composite particles of $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ with photoacoustic effect^[117]

3 结论

本文综述了几种光纤超声传感器的传感机理、制作方法及发展近况,并重点讨论了地震物理模型成像中电声换能器、光纤超声传感器和激光超声技术的应用特点和技术挑战。经过近几十年的发展,光纤超声传感技术在材料、结构以及加工方式等方面均有较大的突破,且已成功应用于地震勘探工程领域,但仍存在诸多关键科学技术问题亟需突破和解决。后续研究将重点聚焦于传感新机制新方法、器件微型化和仪器化、与激光超声技术等其它光学方法深度融合等方面,以全面提升光纤传感器对地层信息的勘测能力。

参考文献

- [1] OR S W, CHAN H L W, LO V C, et al. Ultrasonic wire-bond quality monitoring using piezoelectric sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 65(1): 69-75.
- [2] LI Shangong, HONG Xiaodong, LI Yongchuan. Study on performance of two-dimensional array ultrasonic transducer based on piezoelectric composite[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(4): 28-31.
李尚宫, 洪晓东, 李永川. 基于压电复合材料的二维面阵超声换能器性能研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(4): 28-31.
- [3] WANG H, YU Y, CHEN Z, et al. Design and fabrication of a piezoelectric micromachined ultrasonic transducer array based on ceramic PZT [C]. IEEE Sensors, 2017, 17:1381.
- [4] LU Danhong, Lin Qiuxiang, XU Jianqiao, et al. Linear ultrasonic motor based on longitudinal-bending coupled modal standing wave excited by the shear vibration mode of PZT ceramics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(22): 121-127+187.
陆旦宏, 林秋香, 徐健乔, 等. 基于 PZT 扭振模式的纵-弯耦合模态驻波型直线超声波电机[J]. 振动与冲击, 2021, 40(22): 121-127+187.
- [5] JUNG J, ANNAPUREDDY V, HWANG G T, et al. 31-mode piezoelectric micromachined ultrasonic transducer with PZT thick film by granule spraying in vacuum process[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(21): 212903.
- [6] 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.
- [7] LU C, LU S, ZHONG C, et al. High-sensitivity low-frequency Fabry-Perot ultrasonic hydrophone with Chitosan diaphragm[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(7): 6669-6676.
- [8] FAN H, MA W, CHEN L, et al. Ultracompact twisted silica taper for 20 kHz to 94 MHz ultrasound sensing[J]. Optics Letters, 2020, 45(14): 3889-3892.
- [9] LI Y, ZHOU C, TIAN J, et al. An all-fiber multi-channel ultrasonic sensor using a switchable fiber Bragg gratings filter in erbium-doped fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(17): 4330-4339.
- [10] HAZAN Y, ROSENTHAL A. Simultaneous multi-channel ultrasound detection via phase modulated pulse interferometry[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 28844-28854.
- [11] LIU G, HAN M. Multiplexing fiber-optic ultrasound sensors using laser intensity modulation[J]. Optics Letters, 2019, 44(4): 751-754.
- [12] MIAO S, ZHANG W, HUANG W, et al. High-resolution static strain sensor based on random fiber laser and beat frequency interrogation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(18): 1530-1533.

- [13] LI J, XU J, LIU X, et al. A novel CNTs array-PDMS composite with anisotropic thermal conductivity for optoacoustic transducer applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 196: 108073.
- [14] ZHANG K, LI S, ZHOU Z. Detection of disbonds in multi-layer bonded structures using the laser ultrasonic pulse-echo mode[J]. *Ultrasonics*, 2019, 94: 411-418.
- [15] ZENG Y, WANG X, QIN X, et al. Laser Ultrasonic inspection of a Wire+Arc Additive Manufactured (WAAM) sample with artificial defects[J]. *Ultrasonics*, 2021, 110: 106273.
- [16] GE Jin, CHENG Xiaojin, SHANG Jianhua. Study of defect detection mechanism of carbon fiber reinforced polymer based on laser thermoelastic effect[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2022, 33(1): 83-90.
葛进, 程小劲, 尚建华. 基于激光热弹效应的碳纤维增强树脂复合材料缺陷检测机理研究[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(1): 83-90.
- [17] GAO Feng, ZHOU Hong, HUANG Chao. Tests for crack diffraction enhancement based on phased array laser ultrasound [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(3): 37-44+72.
高峰, 周虹, 黄超. 基于相控阵激光超声的裂纹衍射增强试验研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(3): 37-44+72.
- [18] ZOU X, WU N, TIAN Y, et al. Broadband miniature fiber optic ultrasound generator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18119-18127.
- [19] TIAN Y, WU N, ZOU X, et al. Fiber-optic ultrasound generator using periodic gold nanopores fabricated by a focused ion beam[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(6): 065005.
- [20] ZHUANG Wei. Development of high concentration glutathione intelligent response hybrid gold nanoparticles in tum or microenvironment for PAI/PPTT of tumors[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021.
庄伟. 谷胱甘肽智能响应型杂化金纳米颗粒用于肿瘤光声成像/光热治疗研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [21] CHEN Y S, FREY Y, KIM S, et al. Silica-coated gold nanorods as photoacoustic signal nanoamplifiers [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(2): 348-354.
- [22] BAAC H W, OK J G, MAXWELL A, et al. Carbon-nanotube optoacoustic lens for focused ultrasound generation and high-precision targeted therapy[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2(1): 1-8.
- [23] BAAC H W, OK J G, LEE T, et al. Nano-structural characteristics of carbon nanotube-polymer composite films for high-amplitude optoacoustic generation[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(34): 14460-14468.
- [24] WU Ranran, XIA Hui, ZHANG Jingjing, et al. Photoacoustic properties of carbon nanotubes-polydimethylsiloxane [J], *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(7): 2079-2086.
吴然然, 夏慧, 张晶晶, 等. 碳纳米管-聚二甲基硅氧烷的光声特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(7): 2079-2086.
- [25] OSER P, JEHN J, KAISER M, et al. Fiber-optic photoacoustic generator realized by inkjet-printing of CNT-PDMS composites on fiber end faces[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306(2): 2000563.
- [26] BIAGI E, MARGHERI F, MENICHELLI D. Efficient laser-ultrasound generation by using heavily absorbing films as targets[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001, 48(6): 1669-1680.
- [27] LEE S H, LEE Y, YOH J J. Reduced graphene oxide coated polydimethylsiloxane film as an optoacoustic transmitter for high pressure and high frequency ultrasound generation[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): 081911.
- [28] CHANG W Y, HUANG W, KIM J, et al. Candle soot nanoparticles-polydimethylsiloxane composites for laser ultrasound transducers[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(16): 161903.
- [29] CHEN Zikang. Near-infrared absorbing organic small molecule nanoparticles for photoacoustic imaging and photothermal therapy[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2020.
陈子康. 近红外有机小分子纳米颗粒的光声成像和光热治疗应用[D]. 广州: 南方医科大学, 2020.
- [30] MA Y, XU L, YIN B, et al. Ratiometric semiconducting polymer nanoparticle for reliable photoacoustic imaging of pneumonia-induced vulnerable atherosclerotic plaque in vivo[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(10): 4484-4493.
- [31] POUET B, RMOLOFOSAON P N. Seismic physical modeling using laser ultrasonics [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990: 841-844.
- [32] SI Wenrong, LI Zechun, XIONG Chaoyu, et al. Design and development of partial discharge positioning system based on MEMS-on-Fiber ultrasonic sensors[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(10): 1522-1528.
司文荣, 李泽春, 熊朝羽, 等. 基于MEMS光纤超声传感器的局放定位系统研制[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(10): 1522-1528.
- [33] ZHAO Yaming. Research on cantilever based fiber-optic ultrasonic sensor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
赵亚明. 悬臂梁式光纤超声传感器研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [34] ZHANG Jie, ZHAO Chunliang, ZENG Deping, et al. Fabry-Perot interferometric fiber-optic ultrasonic hydrophone based on parylene film[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2012, 34(3): 355-358.
张洁, 赵纯亮, 曾德平, 等. 基于Parylene膜的法-珀干涉型光纤超声水听器[J]. *压电与声光*, 2012, 34(3): 355-358.
- [35] TAKEDA N. Fiber optic sensor-based SHM technologies for aerospace applications in Japan [J]. In *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems*, 2008, 6933: 15-27.
- [36] HAO Xiaozhu, ZHANG Hanquan, WEI Chenglong, et al. Sea trial for fiber-optic hydrophone array used in marine

- geophysical exploration[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37(3): 93-98.
- 郝小柱, 张汉泉, 韦成龙, 等. 光纤水听器阵列应用于海洋地震勘探的试验[J]. *热带海洋学报*, 2018, 37(3): 93-98.
- [37] SHAN Ning. Extremum experimental study of defect echo base on non-contact optical fiber F-P Laser[J]. *Laser Journal*, 2010, 31(5): 33-34.
- 单宁. 基于光纤 F-P 传感器的缺陷波极值实验研究[J]. *激光杂志*, 2010, 31(5): 33-34.
- [38] BUCARO J A, DARDY H D, CAROME E F. Optical fiber acoustic sensor[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(7): 1761-1762.
- [39] LI L, XIA L, XIE Z, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11109-11120.
- [40] HUA P, LUFF B J, QUIGLEY G R, et al. Integrated optical dual Mach-Zehnder interferometer sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2002, 87(2): 250-257.
- [41] LI B, JIANG L, WANG S, et al. Ultra-abrupt tapered fiber Mach-Zehnder interferometer sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11(6): 5729-5739.
- [42] WANG X, CHEN D, LI H, et al. In-line Mach-Zehnder interferometric sensor based on a seven-core optical fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 17(1): 100-104.
- [43] TIAN Z, YAM S. In-line abrupt taper optical fiber Mach-Zehnder interferometric strain sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 21(3): 161-163.
- [44] 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.
- [45] LAN C, ZHOU W, XIE Y. Detection of ultrasonic stress waves in structures using 3D shaped optic fiber based on a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1218.
- [46] OUYANG B, LI Y, KRUIDHOF M, et al. On-chip silicon Mach-Zehnder interferometer sensor for ultrasound detection[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 1928-1931.
- [47] LIU Y, PENG W, LIANG Y, et al. Fiber-optic Mach-Zehnder interferometric sensor for high-sensitivity high temperature measurement[J]. *Optics Communications*, 2013, 300: 194-198.
- [48] FU H, LI H, SHAO M, et al. TCF-MMF-TCF fiber structure based interferometer for refractive index sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 69: 58-61.
- [49] LOKMAN A, AROF H, HARUN S W, et al. Optical fiber relative humidity sensor based on inline Mach-Zehnder interferometer with ZnO nanowires coating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 16(2): 312-316.
- [50] FAN X, WANG Q, ZHOU M, et al. Humidity sensor based on a graphene oxide-coated few-mode fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24682-24692.
- [51] LIU S, MENG H, DENG S, et al. Fiber humidity sensor based on a graphene-coated core-offset Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2018, 2(3): 1-4.
- [52] ATHERTON K, DONG F, PIERCE S G, et al. Mach-Zehnder optical fiber interferometers for the detection of ultrasound[C]. *SPIE*, 2000.
- [53] ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in power transformer based on the michelson optical fiber interferometer[J]. *Proceedings of the CESS*, 2022, (21): 6452-6459.
- 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于 Michelson 光纤干涉的变压器局部放电超声信号检测技术[J]. *中国电机工程学报*, 2022, (21): 6452-6459.
- [54] ZHOU Wen. The high-temperature sensing characteristics of fiber Michelson interferometer and fiber cantilever beam[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.
- 周文. 迈克尔逊光纤传感器及悬臂梁光纤传感器的高温传感特性研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- [55] 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.
- [56] GANG T, HU M, QIAO X, 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.
- [57] FAN P, YAN W, LU P, et al. High sensitivity fiber-optic Michelson interferometric low-frequency acoustic sensor based on a gold diaphragm[J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25238-25249.
- [58] 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.
- [59] MARKOWSKI K, TURKIEWICZ J, OSUCH T. Optical microphone based on Sagnac interferometer with polarization maintaining optical fibers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8903: 89030Q.
- [60] 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.
- [61] ZHAO W, WANG F, WANG J, et al. A Sagnac-based interferometer with optimal polarization control for Lamb wave detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107325.
- [62] LI Zhigang. Research on all fiber Fabry Perot interferometric strain and ultrasonic sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of

- Technology, 2019.
- 李志岗. 全光纤 Fabry-Perot 干涉型应变与超声传感器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [63] SHAN Ning, ZHAO Yan, Design and experimental study of optical fiber F-P ultrasonic sensor[J]. *Sensors and Microsystems*, 2010, 29(11): 72-75.
单宁, 赵雁. 光纤 F-P 超声传感器设计实验研究[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(11): 72-75.
- [64] MA Guoming, ZHOU Hongyang, LIU Yunpeng, et al. Optical fiber ultrasonic detection technology and new multiplexing method for transformer partial discharge[J]. *High Voltage Technology*, 2020, 46(5): 768-1780.
马国明, 周宏扬, 刘云鹏, 等. 变压器局部放电光纤超声检测技术及新复用方法[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5): 768-1780.
- [65] GAO Chaofei, SONG Shu, TONG Zhongyu, et al. Localization of partial discharge in oil based on EFPI optical fiber ultrasonic sensor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(4): 90-95+101.
高超飞, 宋树, 童中宇, 等. 基于 EFPI 光纤超声传感器的油中局部放电定位[J]. *高压电器*, 2019, 55(4): 90-95+101.
- [66] LAI Bowen. Research on diaphragm EFPI fiber optic acoustic sensor and sensing system [D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.
赖博文. 膜片式 EFPI 光纤声波传感器及传感系统的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [67] ZHANG Wenlu. Research on seismic physical model imaging technology of diaphragm fiber Fabry Perot interferometric ultrasonic sensor[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
张雯露. 膜片式光纤法布里-珀罗干涉型超声传感器地震物理模型成像技术研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [68] ZHENG Qing. Research on ultrasonic detection method of transformer partial discharge based on optical fiber sensing[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016.
郑晴. 基于光纤传感的变压器局部放电超声检测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [69] WEI H, KRISHNASWAMY S. A daptive 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.
- [70] ZHANG W, LU P, NI W, et al. Gold-diaphragm based Fabry-Perot ultrasonic sensor for partial discharge detection and localization[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1-12.
- [71] WU Y, YU C, WU F, et al. A highly sensitive fiber-optic microphone based on graphene oxide membrane[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(19): 4344-4349.
- [72] KILIC O, DIGONNET M, KINO G, et al. External fibre Fabry-Perot acoustic sensor based on a photonic-crystal mirror[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(10): 3049.
- [73] ZHANG W, CHEN F, MA W, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a fringe visibility enhanced fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 11025-11033.
- [74] 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.
- [75] XIANG Z, DAI W, RAO W, et al. A gold diaphragm-based Fabry-Perot interferometer with a fiber-optic collimator for acoustic sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(16): 17882-17888.
- [76] NI W, 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.
- [77] FU X, LU P, ZHANG J, et al. Micromachined extrinsic Fabry-Pérot cavity for low-frequency acoustic wave sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24300-24310.
- [78] THATHACHARY S, HOWES JV, ASHKENAZI S. Polymer waveguides for improved sensitivity in fiber Fabry-Perot ultrasound detectors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(1): 43-50.
- [79] GUO J, YANG C. Highly stabilized phase-shifted fiber Bragg grating sensing system for ultrasonic detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 848-851.
- [80] ZHANG Ping. Performance research and application of ultrasonic sensing system based on fiber grating [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2021.
张萍. 基于光纤光栅超声传感系统性能研究与应用[D]. 桂林: 广西师范大学, 2021.
- [81] FU Qi. FBG ultrasonic detection mechanism and system realization based on fiber laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
付琦. 基于光纤激光器的 FBG 超声探测机理及系统实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [82] LI Yuan. Research on multi-point fiber laser ultrasonic energy conversion and adaptive FBG ultrasonic detection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
李苑. 多点式光纤激光超声换能与自适应 FBG 超声探测的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [83] WEBB D J, SUROWIEC J, SWEENEY M, et al. Miniature fiber optic ultrasonic probe[C]. *SPIE*, 1996, 2839: 76-80.
- [84] 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.
- [85] HU L, LIU G, ZHU Y, 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.

- [86] LIU W F, LI J G, CHANG H Y, et al. A new type of etched fiber grating hydrophone[C]. *Photonics*, 2022, 9(4): 255-259.
- [87] LI C, PENG X, LIU J, et al. D-shaped fiber Bragg grating ultrasonic hydrophone with enhanced sensitivity and bandwidth[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(9): 2100-2108.
- [88] 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.
- [89] GUAN B O, TAM H Y, LAUS T, CHAN H L. Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 17(1): 169-171.
- [90] LYUC, ZHANG S, FANG G, et al. Performance of dual-frequency ultrasound measurement based on DBR fiber laser hydrophone[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 266(1): 101-110.
- [91] TANAK S, YOKOSUKA H, TAKAHASHI N. Temperature-independent fiber Bragg grating underwater acoustic sensor array using incoherent light[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2006, 27(1): 50-52.
- [92] TANAKA S, SOMATOMO H, INAMOTO K, et al. Triple wavelength SOA-based fiber ring laser for use in wavelength-division multiplexed FBG vibration sensor array[C]. *19th International Conference on Optical Fibre Sensors, SPIE*, 2008, 7004: 77-80.
- [93] TANAKA S, INAMOTO K, YOKOSUKA H, et al. Multi-wavelength tunable fiber laser using SOA: application to fiber Bragg grating vibration sensor array[J]. *Sensors*, 2007: 411-414.
- [94] TANAKA S, YOKOSUKA H, INAMOTO K, et al. Wavelength division multiplexed FBG vibration sensor array: application to analysis of elastic-waves in metal rod[C]. *Optical Fiber Sensors*, Optica Publishing Group, 2006.
- [95] 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.
- [96] LIU G, HAM M. Multiplexing fiber-optic ultrasound sensors using laser intensity modulation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 751-754.
- [97] WANG Lin. Research on new swept frequency laser light source for OCT imaging and biomedical sensing [D]. Guangzhou: Jinan University, 2018.
王琳. 面向 OCT 成像和生物医学传感的新型扫频激光光源研究[D]. 广州:暨南大学, 2018.
- [98] SUN Qizhen, YANG Liuyang, XU Dongchen, et al. Technology and application progress of optical fiber ultrasonic transducer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1210001.
孙琪真, 杨留洋, 徐栋宸, 等. 光纤超声换能器技术及应用进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1210001.
- [99] SHI Jingming, ZHENG Di, PAN Wei, et al. Research on fiber grating ultrasonic sensor based on coupling cone structure and its nondestructive testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 53-58.
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): 53-58.
- [100] WANG Yuanyuan, MA Hongwei, ZHANG Guangming, et al. Research on ultrasonic nondestructive testing system based on Fiber Bragg grating[J]. *Modern Electronic Technology*, 2022, 45(9): 143-146.
王媛媛, 马宏伟, 张广明, 等. 基于光纤布拉格光栅的超声无损检测系统研究[J]. *现代电子技术*, 2022, 45(9): 143-146.
- [101] CHEN Xuefeng, YANG Zhibo, TIAN Shaohua, et al. Damage identification and health monitoring of composite structures[J]. *Vibration, Testing and Diagnosis*, 2018, 38(1): 1-10.
陈雪峰, 杨志勃, 田绍华, 等. 复合材料结构损伤识别与健康监测展望[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(01): 1-10.
- [102] SHI Rongbin, LIN Zhongqin, QIN Weiqi, et al. Local discharge acoustic emission detection and positioning technology based on active fiber grating array[J/OL]. *Proceedings of the CESS*, 2022. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220413.1148.014.html>.
史荣斌, 林仲钦, 秦炜淇, 等. 基于有源光纤光栅阵列的局部放电声发射检测与定位技术[J/OL]. *中国电机工程学报*: 2022. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220413.1148.014.html>.
- [103] LI Ridong. Research on cable partial discharge detection method based on optical fiber sensing technology[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2020.
李日东. 基于光纤传感技术的电缆局部放电检测方法研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2020.
- [104] WANG W, PU R, QIAO X, et al. Seismic-physical modeling using a micro quasi-Michelson fiber-optic interferometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 19(5): 1807-1812.
- [105] COOPER J K, LAWTON D C, MARGRAVE G F. The wedge model revisited: a physical modeling experiment[J]. *Geophysics*, 2010, 75(2): T15-T21.
- [106] WONG J, HALL K W, GALLANT E V, et al. Seismic physical modeling at the University of Calgary[M]. *Society of Exploration Geophysicists*, 2009: 2642-2646.
- [107] KIM D, SHIN S, CHUNG W, et al. Development of 3-axis precise positioning seismic physical modeling system for seismic imaging and data Processing[J]. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 2020: 24-34.

- [108] DING P B, GONG F, ZHANG F, et al. A physical model study of shale seismic responses and anisotropic inversion[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(4): 1059–1068.
- [109] WANG Q, LU Q, LIANG W, et al. Propagation characteristics of joint physical simulation of both electromagnetic wave and ultrasonic wave in fractured media model[C]. 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), IEEE, 2012: 933–936.
- [110] GUO J, XUE S, ZHAO Q, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19573–19580.
- [111] YANG X, SHAO Z, YIN H, et al. Ultrasonic microfiber sensor based on tapered multi-core fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 107987.
- [112] SHAO Z, ZHOU K, YIN H, et al. Advanced suspended-core fiber sensor for seismic physical modeling[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 16384–16395.
- [113] RONG Q, SHAO Z, YIN X, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using fiber Bragg grating Fabry-Perot probe[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 23(2): 223–228.
- [114] YIN H, SHAO Z, CHEN F, et al. Highly sensitive ultrasonic sensor based on polymer Bragg grating and its application for 3D imaging of seismic physical model[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 5294–5299.
- [115] LIU X, WANG W, RONG Q, et al. Highly sensitive photoacoustic imaging: a new strategy for ultrahigh spatial resolution seismic physical model imaging[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1–11.
- [116] JIN K, LIU X, LI P, et al. Improved laser-ultrasonic excitation for imaging of seismic physical modeling[J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(3): 1–8.
- [117] PENG Y, MA S, SHAO Z, et al. Multifunctional $\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ composite particles with photoacoustic and magnetocaloric properties[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(40): 22335–22345.
- [118] XU L, SHAO Z, PENG Y, et al. Laser ultrasonic excitation using graphene heat dissipation film for ultrasonic detection of seismic physical model[J]. *Vibroengineering Procedia*, 2022, 40: 89–95.

Research on Fiber-optic Ultrasonic Imaging of Seismic Physical Models (Invited)

SHAO Zhihua^{1,2}, YIN Huanhuan^{1,2}, WANG Ruohui^{1,2}, QIAO Xueguang^{1,2}

(1 School of Physics, Northwest University, Xi'an 710127, China)

(2 Engineering Research Center of Optical Fiber Well Logging Technology for Oil and Gas Resources, Universities of Shaanxi Province, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: The ultrasonic imaging of seismic physical model is an effective seismic simulation method for on-site seismic exploration. According to a certain simulation similarity ratio, the geological model of the field geological structure is constructed in the laboratory. The experiment of seismic physical model imaging has been widely used in oil and gas exploration, such as studying the basic regularity of wave propagation and the seismic response of typical geological structures, optimizing field observation systems and exploration methods, and verifying propagation theory and mathematical calculation methods. Because the ultrasonic signal transmitted in complex models is usually weak, it is necessary to employ a high-performance ultrasonic transducer to collect the echo signals. The traditional detection method usually adopts Piezoelectric Transducers (PZTs). The mechanical resonance of PZT determines its narrow-frequency response characteristics. In addition, in the application of array sensing, PZT has difficulties in signal demodulation and is also easy to be disturbed by electromagnetic environment.

In comparison, fiber-optic ultrasonic sensor can avoid most of the shortcomings of PZT. Fiber sensors have the advantages of small size, high sensitivity, wide-frequency response, anti-electromagnetic interference, etc. Therefore, the research on new fiber-optic ultrasonic sensors has very important technological significance and application value. At present, the development trend of fiber-optic ultrasonic sensors mainly focuses on high sensitivity, high spatial resolution, broadband response and other characteristics. The basic principle of fiber-optic ultrasonic sensors is the interaction between ultrasonic wave and optical fiber, causing changes in the intensity, phase, wavelength, polarization state of optical fiber transmission and reflection light. The ultrasonic information is obtained by demodulating the small changes in the above optical parameters. The demodulation methods include phase demodulation, intensity

demodulation, and optical frequency demodulation. Meanwhile, preparing new optical fiber ultrasonic sensing devices in terms of materials and processes, the signal-to-noise ratio of fiber-optic ultrasonic sensing can be further improved by integrating photoelectric conversion, electrical signal amplification, signal filtering, and other technologies into the signal demodulation system.

For ultrasonic echo acquisition, fiber-optic sensors have shown obvious advantages. For the excitation of ultrasonic wave source, laser ultrasound gradually emerges in ultrasonic detection. Compared with the traditional PZT, laser ultrasonic technology can excite the ultrasonic field on the surface of objects with different scales and shapes. The excited ultrasonic wave has the characteristics of wide-frequency band, multi-mode waves, high intensity and non-contact. The nanosecond pulse laser is irradiated on the photoacoustic functional material with high absorption, and the material absorbs heat to produce periodic expansion and contraction, thus generating ultrasonic waves. Based on the photoacoustic effect, a series of photoacoustic functional materials, such as noble metal nanoparticles, carbon nanotubes, graphene, and organic nanoparticles, have shown efficient photoacoustic properties. However, almost all photoacoustic functional materials are designed for biomedical applications. These photoacoustic materials need to have low toxicity, immunogenicity, high target affinity and specificity, and high biocompatibility. Coated on the surface of seismic physical models, the photoacoustic functional material can replace the conventional PZT emission source to achieve high-quality ultrasonic excitation. The material is required to have the characteristics of wide-band absorption, high thermoacoustic conversion efficiency, high laser damage threshold, low cost, easy extension in a large area, etc. Therefore, in order to meet the needs of ultrasonic imaging of seismic physical models, it is necessary to further develop efficient photoacoustic functional materials and laser excitation technology.

The two technologies of high-quality laser ultrasonic excitation and high-performance fiber-optic ultrasonic sensing can be combined to realize high-intensity excitation and high-fidelity sensing of broadband ultrasonic waves. All-optical pulse-echo imaging of seismic physical models can accurately extract the internal structure information of seismic physical models. In 1990, the French Petroleum Research Institute, a world-famous comprehensive oil, natural gas and chemical research institute, took the lead in proposing the optical ultrasonic imaging technology for seismic physical models. Pulsed laser was used to generate ultrasonic waves. Laser interferometer was employed to detect the vibration and sound signals in the models. Seismic physical models are made of resin, silicone rubber, paraffin, gypsum and other materials with weak photoacoustic properties. When the pulse laser is directly irradiated on the model, it is difficult to generate high-intensity ultrasonic waves and the receiving end adopts laser interferometer. However, laser interferometer have the disadvantages of high price, low sensitivity and inconvenient use. Therefore, there have been few reports on all-optical ultrasonic imaging technology of seismic physical models in recent years. For the in-lab detection of seismic physical models, the fiber characteristics of flexibility and multifunction make all-fiber ultrasonic imaging more and more concerned.

Throughout the development of fiber-optic technology in recent decades, fiber-optic acoustic sensors have made great breakthroughs in materials, structures and fabrication. Some have been successfully applied to industrial nondestructive testing, marine seismic exploration, and other fields. This paper mainly summarizes the sensing mechanism and development status of several typical fiber-optic ultrasonic sensors, such as fiber interference type and fiber Bragg grating type. The state-of-the-art of electroacoustic transducer, fiber-optic ultrasonic sensor and laser ultrasonic technology in ultrasonic imaging of seismic physical model are comparatively shown, and the existing scientific and technological problems and challenges are also deeply analyzed. By comprehensively discussing the new development of ultrasonic imaging research in seismic physical models, this paper reveals the new trends and opportunities of in-lab simulation technology, so as to improve the exploration ability and informatization level of oil and gas resources in China.

Key words: Seismic physical model; Fiber-optic ultrasonic sensor; Electro-acoustic transducers; Laser ultrasound; Ultrasonic imaging

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.3735