

水声换能器研究现状与发展

吴锐锋, 王一博, 胡童颖, 崔廷放

广州海洋地质调查局, 广东 广州

收稿日期: 2023年1月3日; 录用日期: 2023年3月22日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

水声换能器在现代海洋军事与海洋资源开发中有着举足轻重的地位。本文通过阐述水声换能器功能性材料技术、换能器、水听器技术取得的国内外领先成果和应用现状, 最后对我国水声换能器的发展动态谈些认识与展望。

关键词

水声换能器, 水听器技术, 发展动态

Progress and Development of Underwater Acoustic Transducer

Ruifeng Wu, Yibo Wang, Tongying Hu, Tingfang Cui

Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou Guangdong

Received: Jan. 3rd, 2023; accepted: Mar. 22nd, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

Underwater acoustic transducer plays a pivotal role in modern marine military and marine resource development. This paper expounds the leading achievements and application status of underwater acoustic transducer functional material technology, transducer and hydrophone technology at home and abroad, then give the development trends of underwater acoustic transducer.

Keywords

Underwater Acoustic Transducer, Hydrophone Technology, Development Trends

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当今世界各国积极发展海洋军事的战略中不难发现, 探测安静型、隐形化目标, 发展海洋装备从而加强海上防御能力, 都是不可或缺的一部分。然而, 随着科学技术的发展先进的材料、隐身技术、传感技术、信号处理技术使得潜艇作战和反潜作战变得越来越困难; 基于水声技术进行海上军事竞争、海洋研究、矿产资源调查与评估和现代航海安全保障等成为必不可少的手段之一。

水声换能器作为“水声设备耳目”能够发射或接收声波, 并完成声波所携带的信息和能量与电信号间的转换, 在海洋装备中得到广泛应用。水声换能器一次次的技术进步也是水声技术长足发展的重要前提和基础[1]。为了实现海军攻防和海洋资源调查与评估, 各国学者一方面加强水声物理和信号处理方法的基础研究, 另一方面加强水声换能器和基阵技术的研究, 重点研究新机理、新材料、新工艺及布阵技术, 从而提出了新结构, 改善和提升了水声换能器的综合技术性能。本文通过阐述水声换能器在功能性材料、换能器及水听器技术取得的国内外领先成果和应用现状, 最后, 对我国水声换能器的发展动态谈些认识与展望。

2. 水声换能器技术研究进展

水声换能器技术研究领域涉及物理学、力学、数学、材料学、电子学、化学及机械学等在内的多学科交叉和学科融合, 因此水声换能器的发展与其他基础学科关系密切, 并且各个关联学科的研究进展也成为水声换能器发展的制约因素[2]。理论上的不断创新正推动水声换能器技术逐步突破水下高效稳定信号传输难题, 特别是目前采用新型材料、新工艺布置、设计新结构实现了水声换能器综合技术性能的改善和提升。水声换能器技术创新的直接动力来自于军事和民用等领域对水声通信技术需求的提高[3]。经过数十年的发展与研究, 水声换能器技术逐渐进入系统性和全局性发展阶段。本文将从水声换能器功能性材料技术、水声换能器、水听器技术分别阐述。

2.1. 换能器功能性材料研究进展

1915年法国著名物理学家朗之万教授和俄国电气工程师希洛夫斯基采用电容发射器和碳粒接收器进行了水声实验, 研制成世界上第一台将水声技术和电子技术结合的声纳, 并很快应用一战。二战期间英美重点发展了主动式声纳, 使用磁致伸缩换能器和人工压电晶体换能器, 发射功率0.5~0.8千瓦, 频率为超声频段(20到30千赫), 主动探测距离为1到1.5海里, 被动探测距离为2~3海里[4]。二战以后, 新材料技术, 电子技术和计算技术的迅速发展大大推动了声纳技术的发展。60年代初出现一批新型声纳。70年代由于大规模集成电路和数字计算机进入声纳技术领域, 出现了全数字化声纳[5]。20世纪50年代至今, 锆钛酸铅压电陶瓷材料(PZT)、稀土超磁致伸缩材料(Terfenol-D)、弛豫铁电单晶(PMN-PT和PZN-PT)等典型材料得到广泛应用。

2.1.1. 弛豫铁电单晶材料

20世纪90年代压电单晶铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)与铌锌酸铅-钛酸铅(PZN-PT)被发现, 由于其具有超高的压电性能, 压电常量 d_{33} 达2000 pC/N, 机电耦合系数 k_{33} 达92%, 电致伸缩应变最大达1.7%, 显示了其在水声换能器方向上增大功率和展宽频率带宽的潜在优势, 在国际上引起人们对弛豫铁电单晶超高压电性能形成机理的研究热潮[6][7]。近些年逐渐发展了三元系铌钽酸铅-铌镁酸铅-钛酸铅

(PIN-PMN-PT)和锰掺杂铌钽酸铅 - 铈镁酸铅 - 钛酸铅(Mn:PIN-PMN-PT)压电单晶体材料, 进一步改善了高电场条件的工作特性[8]。目前美国 CTS 和 TRS 是国际上提供弛豫铁电单晶产品的主要公司, 国内单位主要以中国科学院上海硅酸盐研究所、西安交通大学、清华大学等为主。

相比于 PZT 陶瓷材料, 弛豫铁电单晶更适合于高效率、高灵敏度收发换能器的研制[9]。在海军攻防方面, 美国海军水下作战中心(NUWC)研究了 PMN-PT 弛豫铁电单晶体材料在电场和预应力作用下的特性, 认为其力学性能基本满足换能器预应力设计要求, 设计并研制出一种拼镶柱形换能器, 利用 PMN-PT 弛豫铁电单晶较高的 3-3 模, 在径向上产生伸缩振动, 获得较高频带的全向换能器; 利用 PMN-PT 和 PZT4 陶瓷、PIN-PMN-PT 及 Mn:PIN-PMN-PT 制作纵向水声换能器(Tonpilz 换能器), 通过对比更适用于大功率、高占空比的换能器应用中, 在最大声源下比 PMN-PT 的源水平提高 5 dB, 与 PZT4 换能器相比, 在谐振时源电平和功率处理能力相当, 可用带宽却增加 1 倍, 在谐振频率外的最大源电平提高 6 dB [10] [11]。国内企业中国船舶第 715 研究所、中国科学院声学研究所等单位在利用 PMN-PT 单晶, 发展单晶水声换能器方面也取得许多重要的进展。中国科学院声学研究所采用 PIN-PMN-PT 单晶和 PZT-4 压电陶瓷混合激励, 研制了外径 86 mm、长度 80 mm 的小尺寸换能器如图 1 所示, 该换能器实现了小尺寸、宽带(13~38 kHz)、高发送电压响应(144.9 dB)的优良特性[12]。



Figure 1. Relaxor ferroelectric single crystal/piezoelectric ceramic hybrid excitation transducer
图 1. 弛豫铁电单晶/压电陶瓷混合激励换能器

2.1.2. 稀土超磁致伸缩材料

稀土超磁致伸缩材料(Terfenol-D)是一种新型的磁致伸缩功能材料, 即便是在低磁场作用下产生的应变值也能高达 $(1500\sim 2000) \times 10^{-6}$, 比镍大 40~50 倍, 比 PZT 大 5~8 倍, 声速低、尺寸小, 居里点高, 因为其巨大的磁致伸缩系数, 被人们称为超磁致伸缩材料[13]。采用稀土超磁致伸缩材料制造的换能器其能量密度不仅是压电换能器的 10 倍, 工作距离是传统的压电换能器也是传统压电换能器的几十倍, 表 1 列出 Terfenol-D、Ni 及 PZT 材料的物理性能比较, 从表中可以很直观看出三种材料的优缺点[14]。

由于稀土超磁致伸缩材料物理性能优势, 在海防军工、海洋探测等领域被广泛应用于研制大功率、低频的声纳及发射水声换能器, 从而探测更远、更隐秘的舰艇。美国海军利用稀土超磁致伸缩材料制成声纳换能器并应用于潜艇, 日本学者 Wakiwaka 利用 Terfenol-D 材料制成声源信号最大达到 192 dB, 机电耦合系数达 0.73, 水下探测距离可至数千千米[15] [16]。国内学者已突破纵向振动换能器、弯张换能器和拼镶式换能器等关键技术, 基本形成工程应用能力。

2.1.3. 压电单晶复合材料

压电单晶复合材料作为新一代压电智能材料, 具有高静水压电系数、低特性阻抗、宽频带、机电耦合系数高等优势, 通过单晶的体积比灵活控制等特点使得其带宽、灵敏度、阻抗匹配和降低阵元内部交叉耦

合均优于单晶换能器[17]。目前,国内关于压电单晶复合材料在水声领域应用的研究多为 1-3 型及衍生类压电单晶复合材料制备的换能器,1-3 型压电单晶复合材料同时具备了弛豫铁电单晶和复合材料的优势。杭州应用声学研究所团队基于 1-3 型压电单晶复合材料设计并研制了高频宽带发射换能器,该换能器在 250~410 kHz 的频率之间发送电压起伏不超过 3 dB,工作带宽达到 160 kHz,最大发送电压响应达 178.4 dB [18]。

Table 1. Comparison of physical properties of Terfenol-D, Ni and PZT magnetostrictive materials
表 1. Terfenol-D、Ni 及 PZT 的磁致伸缩材料物理性能比较

	物理性能参数	Terfenol-D	Ni	PZT
磁弹性性能	饱和磁致伸缩系数(ppm)	1500~2000	-35	100~300
	机电耦合系数 k_{33}	0.7~0.75	0.3	0.5~0.6
	能量密度(KJ/m ³)	14~25	0.03	0.96~1.0
	能量转换率(%)	49~56	9	23~52
	响应时间(μ s)	小于 1		约 10
声学力学性能	弹性模量 E (GPa)	25~35	210	75
	声速 v (m/s)	1720	4950	3130
	密度(kg/m ³)	9.25		7.5
	抗拉强度(MPa)	28		76
	抗压强度(MPa)	700		
磁电热性能	对磁导率 μ_r	5~10		
	居里温度($^{\circ}$ C)	340~420	大于 500	200~400
	电阻率($\mu\Omega\cdot$ cm)	60		
	热膨胀系数 α	12	12.9	2.9

2.2. 水声换能器

随着现代静声技术的发展,船舶辐射噪声正以平均每年 0.5~1.0 dB 的速度降低如图 2 所示[19],目前最先进的潜艇辐射噪声水平已经接近甚至低于海洋噪声,而被动目标探测距离急剧下降,无法满足海军攻防需求。受人类海洋活动和海底地质运动的影响,海洋环境噪声尤其是低频噪声正以每年 0.2~0.3 dB 的速度增加,海洋水声场受海洋界面和水体介质以及风、涡、流的影响呈现出复杂的时空随机起伏、环境不确定、信道不确实、参数不确知的特点,致使水下目标远程探测具有相当的挑战性和艰巨性。针对不同场景,水声换能器结构也有所不同。

2.2.1. 常用水声换能器

目前常用的水声换能器有 Tonpilz 换能器、镶拼圆环换能器、弯张换能器和压电陶瓷弯曲振动盘等。经过多年技术的积累沉淀,我国能够设计并制造满足工程需要的各类换能器,水平与国外相当。

1) Tonpilz 换能器

Tonpilz 换能器主要由前辐射盖板、压电陶瓷、电极片、后盖板、预应力螺栓组成如图 3 所示,其具有功率容量大、电声效率高、易形成宽带、结构简单、耐静水压、便于成阵等优点,国内外经过几十年的发展研究,它的设计理论与制作工艺已经相当成熟,主要应用于潜艇主动探测、通讯声纳基阵、鱼雷

声制导集阵。目前研究热点主要集中在减小尺寸、降低频率及拓宽领域等方面，在该类换能器中使用最多的是多模多谐振技术，如匹配层技术、纵弯耦合技术、多激励技术和单端激励技术等。

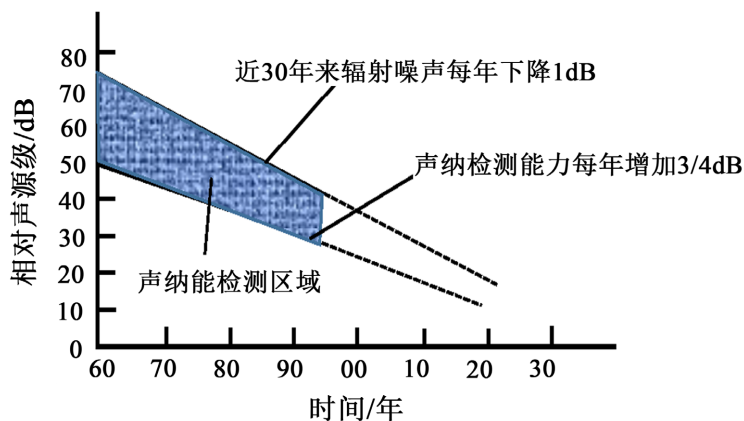


Figure 2. Submarine radiated noise and sonar detection capability
图 2. 潜艇辐射噪声和声纳检测能力

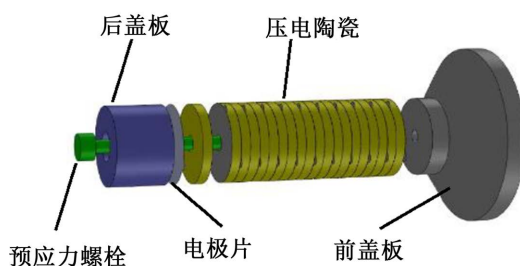


Figure 3. Tonpiliz transducer
图 3. Tonpiliz 换能器

2) 镶拼圆环换能器

压电陶瓷圆管内外表面铺设电极，激发圆管的径向振动，大尺寸圆管换能器需由压电陶瓷条镶拼而成。圆环换能器具有水平无指向性，通常用来作为低频、大功率及宽带水声发射声源，也可作为宽频带接收水听器，其中溢流式圆管换能器的内腔与外界环境相通，可以不受周围静水压的影响，适合在大深度工作，同时液腔振动可以使其在低频工作。

3) 弯张换能器

弯张换能器是一种典型的低频水声换能器，弯张换能器的概念始于 Hayes 1936 年的专利[20]。有限元法的广泛应用，很大程度上促进了弯张换能器的发展，弯张换能器工作方式是利用激励源的纵向伸缩振动激发壳体作弯曲振动，耦合成弯曲伸张振动模式，从而具有振幅放大效应。目前国内研究重点主要集中在采用深度补偿手段，从而提高弯张换能器的工作极限深度；使用新型驱动材料，提高声功率；采用非对称振动辐射，获得空间指向性等。

4) 弯曲圆盘换能器

弯曲圆盘换能器是一种小尺寸、低谐振的换能器，结构简单，易于成阵。该换能器中间是金属片，正反两面粘附着压电陶瓷圆片，利用压电陶瓷的厚度振动带动金属片的弯曲振动，从而实现低频发射。

2.2.2. 水听器技术

水听器作为水下必备的测试设备，探测水下声信号以及噪声声压变化并产生和声压成正比的电压输

出, 是被动声纳系统中的核心部分, 根据所用灵敏材料不同可以分为: 压电陶瓷水听器、光纤水听器、MENS 水听器、矢量水听器等。本小节主要阐述光纤水听器、MEN 水听器、矢量水听器。

1) 光纤水听器及基阵

光纤水听器是光纤传感器的一种。近年来, 随着光纤技术的发展, 光纤水听器发挥了越来越重要的作用, 相比于电子水听器, 光纤水听器可以实现干端与湿端的分离, 实现水下器件的无源化[21]。配合时分、空分、波分等技术, 光纤水听器还可以实现大规模的阵列复用[22]。光纤水听器最早应用于海上军事, 主要应用为: 全光纤水听器拖曳阵列全光纤海底声监视系统; 全光纤轻型潜艇和水面舰船共形水听器阵列; 超低频光纤梯度水听器; 海洋环境噪声及安静型潜艇噪声测量设备。英美国家最先开展此项技术的研究, 美国的海军研究实验室、海军水下装备中心、英国的 Plessey 国防研究分公司、海军系统分公司等均实现大规模全光纤水听器拖曳阵列、海底声监视系统等海军攻防装备。

我国光纤水听器的研究始于上世纪 90 年代, 国内研究比较多的光纤水听器通常采用迈克尔逊干涉仪, 该类型水听器分光于合光等分离器件是必不可少的, 从而增加了系统的复杂和制造成本, 何向阁[23]提出采用分布式光纤声波传感技术形成水听器阵列, 该类水听器具有较好的声压响应一致性, 声压灵敏度约为 $-157.8 \text{ dB ref rad/uPa}$, 该技术的湖上测试中可以清晰的采集到初至波以及续至波, 不仅为海上资源勘探技术提供一种新的技术方案, 也促进了我国水听器研发技术的发展。

2) 矢量水听器

矢量水听器是一种能够共点、同步、独立地测量声场标量和质点振速矢量各正交分量的声学传感器, 按照测量原理可分为压差式和同振式 2 种[24]。目前, 压差式矢量水听器由于对敏感元件要求较高、制作工艺复杂、灵敏度低、易受干扰等缺点逐渐淘汰于市场; 相反, 同振式矢量水听器具有性能可靠、灵敏度高以及低频指向性好等优点, 应用愈加广泛。近几年矢量水听器技术及其矢量信号处理技术取得快速进步, 已广泛应用于声纳系统的研制。在应用了新型压电单晶材料 PMNT 和 PZNT, 使得水听器体积减小、灵敏度提高、自噪声降低。矢量水听器主要应用于岸基阵、拖曳阵、舷侧阵等, 随着低频技术的进步, 低频矢量水听器还应用于海洋环境噪声测量、潜/浮标等系统。

3) MENS 水听器

随着微电子制造技术的快速发展, MENS 技术已应用于水听器技术中。美国国防先进计划研究局更是将 MENS 技术设置成先进技术领域的六大方向之一。作为军民两用的 MENS 技术, 在国内得到快速发展, 涌现出一批在高灵敏度、抗噪声、自定位及目标信息识别方面的技术成果[25], 水听器产品形式也从单一的硅阻式、硅电容式、压电和压电薄膜等形式发展为 AIN 压电陶瓷薄膜。

3. 水声换能器技术的展望

本文第 2 节介绍了水声换能器功能性材料技术、常用水声换能器、水听器技术等方面的研究进展, 本文未能详尽叙述我国水声换能器技术研究, 但也具有代表性, 基本描述我国水声换能器发展的现状。虽然, 我国在材料性能、工艺、结构等方面取得一定的成绩, 仍难以满足现代水声设备发展的需求, 仍需加强以下几方面的技术研究:

1) 提高材料与环境适应性研究。每种材料具有其特定的物理特性, 在不同作业环境中, 其特性的变化直接影响换能器及基阵的可靠性。如何获取其稳定性与环境间的关系研究亟待加强。

2) 加强新型材料的研究。水声换能器技术的突破取决于功能材料技术的突破, 典型的新型材料超磁致伸缩材料、弛豫铁单晶材料和压电复合材料由于其特定的性能优势, 在水声设备中具有广阔的应用前景。然而, 同一材料难以同时实现所有指标最优化, 所以, 为充分发挥新型材料的性能优势, 关键是要根据水声换能器的具体应用需求对材料的结构和性能进行设计与研究。

3) 加强不同领域间的合作。我国目前的水声换能器技术面向的领域主要集中在军事方面, 专利技术成果转化率低, 未形成产业化发展[26], 后续研究中应加强科研院所与军方、企业等之间的合作, 实现多方的协同创新, 从而有效推进水声换能器技术研究的深度和实用性。

4) 发展新型结构。根据材料特性探索新材料与新结构结合研究, 以此实现换能器技术由“跟跑”到“领跑”的跨越。

4. 结语

近几年, 随着材料科学技术、微电子技术、数字技术及其信息处理技术的发展, 水声信息系统在对信息的综合一、探测和数据处理的水平日益提升的同时, 对信息的发送和收集质量及其频带宽度等方面也有了较高的需求, 尤其是在一些特殊的应用领域, 超强功率的换能器得到快速发展。文中叙述仅是众多经典之作中的冰山一角, 涉猎内容难免局限片面, 总结深度不够, 希望能给大家研究提供一定的借鉴。

不同的应用领域对水声换能器的指标要求也大不相同, 如主动声呐远程探测及海底资源勘探应用中要求发射换能器具有低频大功率发射特性; 声呐校准系统中要求换能器具有超低频、超宽带发射特性; 水声通信领域中则要求水声换能器具有高效率、宽带、深水工作特性等。低频可以打破潜艇的隐身技术, 大功率可以探测更为深远距离的目标, 同时体积小, 质量轻, 可提高舰艇作战能力。所以如何开发出具备更低频、高接收灵敏度、宽带水声换能器成为一项重大的技术问题。

参考文献

- [1] 莫喜平. 水声换能器发展中的技术创新[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 1-12.
- [2] 莫喜平. 我国水声换能器技术研究进展与发展机遇[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 272-282.
- [3] 程恩, 袁飞, 苏为, 高春仙, 曾文俊, 孙海信, 胡晓毅. 水声通信技术研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50(2): 271-275.
- [4] Pentland, A.P. (1984) Fractal-Based Description of Natural Science. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6, 661-674. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1984.4767591>
- [5] 章毓晋. 图像分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] Powers, J.L., Moffett, M.B. and Nussbaum, F. (2000) Single Crystal Naval Transducer Development. *Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, Vol. 1, 351-354.
- [7] Luo, H.S., Xu, G.S., Wang, P.C., et al. (1999) Growth and Characterization of Relax or Ferroelectric PMNT Single Crystals. *Ferroelectrics*, 231, 97-102. <https://doi.org/10.1080/00150199908014518>
- [8] Luo, J., Taylor, S., Hackenberger, W., et al. (2013) Large Field Property Assessment of Mn:PIN-PMN-PT Crystals for High Power Transducers. *2013 Joint IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectric and Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/PFM)*, Prague, 21-25 July 2013, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISAF.2013.6748670>
- [9] Chang, K.C., Chan, H.L.W., et al. (2003) Single Crystal PMNPT/Epoxy 1-3 Composites for Ultrasonic Transducer Applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 50, 1177-1183. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2003.1235328>
- [10] Sammoura, F., Sheltorn, S., Akhbari, S., et al. (2014) A Two-Port Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer. *2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Chengdu, 12-15 August 2014. <https://doi.org/10.1109/ISAF.2014.6923004>
- [11] Sherlock, N.P. and Meyer, R.J. (2012) Modified Single Crystals for High-Power Underwater Projectors. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 59, 1285-1291. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2319>
- [12] 梁家宁, 莫喜平, 柴勇, 刘永平. 弛豫铁电单晶/压电陶瓷混合激励换能器[J]. 声学学报, 2022, 47(6): 757-764.
- [13] 高嘉伟, 黄文美, 王超. 超磁致伸缩材料叠堆结构动态涡流损耗模型及性能分析[J]. 微特电机, 2017, 45(8): 24-27, 36.
- [14] 陈志中. 超磁致伸缩材料特性及其换能器测试技术研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2020

-
- [15] 白娟. 稀土-铁材料磁致伸缩换能器的结构设计与特性分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2014
- [16] Wakiwaka, H., Aoki, K., Yoshikawa, T., *et al.* (1997) Maximum Output of a Low Frequency Sound Source Using Giant Magnetostrictive Material. *Journal of Alloys and Compounds*, **258**, 87-92. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00074-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00074-1)
- [17] 罗豪甦, 焦杰, 陈瑞, 朱荣峰, 张章, 徐嘉林, 赵静, 王西安, 林迪, 陈建伟, 狄文宁, 鲁丽, 朱莉莉. 弛豫铁电单晶的多功能特性及其器件应用[J]. *人工晶体学报*, 2021, 50(5): 783-802.
- [18] 白玮, 王佳荣, 王婷, 杜红亮, 李飞, 徐卓, 许欣然, 郑震宇. 基于 1-3 型压电单晶复合材料的高频宽带发射换能器[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(3): 556-562.
- [19] 李启虎. 第一讲进入 21 世纪的声呐技术[J]. *物理*, 2005, 35(5): 402-407.
- [20] Hayes, H.C. (1936) Sound Generating and Directing Apparatus. U.S. Patent 2,064,911.
- [21] Meng, Z., Chen, W., Wang, J.F., *et al.* (2021) Recent Progress in Fiber-Optic Hydrophone. *Photonic Sensors*, **11**, 109-122. <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0618-5>
- [22] Kirkendall, C.K. and Dandridge, A. (2004) Overview of High Performance Fibre-Optic Sensing. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **37**, R197-R216. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/18/R01>
- [23] 何向阁, 文鹏飞, 杨辉, 古利娟, 卢海龙, 张敏. 基于分布式光纤传感技术实现的小道距海上拖缆地震数据采集系统[J]. *石油物探*, 2022, 61(1): 70-77.
- [24] 孙贵青, 李启虎. 声矢量传感器研究进展[J]. *声学学报*, 2004, 29(6): 481-490.
- [25] 陈尚, 薛晨阳, 张斌珍, 等. 一种新型的 MEMS 单矢量水听器研究[J]. *兵工学报*, 2008, 29(6): 673-677.
- [26] 安然, 贾东曜. 专利视角下的水声换能器技术发展分析[J]. *电声技术*, 2022, 46(6): 41-43.