

激光与光电子学进展

分布反馈式光纤激光水听器探头封装及应用研究进展

黄俊斌^{1*}, 宋文章^{1,2}, 顾宏灿¹, 唐波³¹海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;²中国人民解放军 91388 部队, 广东 湛江 524002;³中国人民解放军 92578 部队, 北京 100161

摘要 分布反馈式光纤激光器水听器体积小、灵敏度高, 便于复用成阵和布放回收, 成为光纤水听器领域重要的一种技术路径。本文对分布反馈式光纤激光水听器国内外研究的探头封装结构及应用进行了综述, 根据封装结构的特点, 重点介绍了弯曲梁式、侧面压迫式、轴向拉压式三种主要的封装结构及其阵列应用。对国内外主要研究机构的研究指标进行分析, 对比了分布反馈式光纤激光水听器不同封装结构的优缺点, 并对分布反馈式光纤激光水听器阵列后续的技术发展进行了展望。

关键词 光纤光学; 探头封装; 分布反馈式光纤; 光纤激光水听器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220505

Research Progress on Packaging and Application of Distributed Feedback Fiber Laser Hydrophone Probe

Huang Junbin^{1*}, Song Wenzhang^{1,2}, Gu Hongcan¹, Tang Bo³¹Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;²91388 Troops, Chinese People's Liberation Army, Zhanjiang 524002, Guangdong, China;³92578 Troops, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100161, China

Abstract Distributed feedback fiber laser hydrophones are small in size, high in sensitivity, easy to be reused into arrays and recycled, which has become an important technical path in the field of fiber optic hydrophones. In this paper, the probe package structures and application of distributed feedback fiber laser hydrophones are reviewed. According to the characteristics of package structures, three main package structures and their array applications are introduced, which are bending beam type, side compression type and axial tension or compression type. By analyzing the research indexes of main research institutions at home and abroad, the advantages and disadvantages of different package structures of distributed feedback fiber laser hydrophones are compared, and the future development of distributed feedback fiber laser hydrophones array is prospected.

Key words fiber optics; sensor encapsulation; distributed feedback fiber; fiber laser hydrophone

1 引言

分布反馈式(DFB)光纤激光器在掺有稀土元素离子的光纤上刻写一段 π 相移有源光栅形成线性谐振腔, 可实现高功率、窄线宽的激光输出, 且激光器的谐振腔长度相对较短, 激光输出模式稳定, 在动态应变测量时, 通过非平衡干涉解调可以稳定获得较高的动态分辨率, 在传感领域的微动信号测量中优势显著。在

水声探测领域, DFB 光纤激光水听器具有体积小、灵敏度高、系统动态范围大、抗电磁干扰能力强以及能实现大规模复用、易于快速布放等优点, 特别适合作为小型水下平台的水声探测系统, 成为国内外水声探测领域竞相研究的热点。1995年, 美国海军研究实验室(NRL)构建了基于光纤激光器的传感系统进行动态应变测量, 当干涉仪非平衡长度为 96 m、光纤激光器谐振腔长度为 25 mm 时, 该系统在 7 kHz 单频点的动

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-03-04; 录用日期: 2022-03-14; 网络首发日期: 2022-03-24

基金项目: “十三五”装备预先研究项目

通信作者: *tsy98@163.com

态应变分辨率为 $5.6 \times 10^{-14} \text{ } \epsilon / \sqrt{\text{Hz}}^{[1]}$ 。2007 年, Cranch 等^[2]又在进一步研究中指出 DFB 光纤激光器的应变传感器灵敏度与干涉型光纤应变传感器相当, 但尺寸明显缩小, 这为将光纤激光传感器应用于水声探测领域提供了一条新的技术途径。

DFB 光纤激光水听器一般采用 DFB 光纤激光器作为探头, 为保证系统声响应的动态应变分辨率满足 0 级海况背景噪声下的探测需求, 同时对传感单元进行机械结构保护, 一般会对 DFB 光纤激光器进行探头封装, 以起到增敏与保护作用。DFB 光纤激光水听器探头的应用研究日趋成熟, 本文重点介绍了国内外 DFB 光纤激光水听器探头三种主要封装结构及其阵列应用, 并对 DFB 光纤激光水听器的后续应用进行了展望。

2 DFB 光纤激光水听器探头封装及应用

最早的研究中, DFB 光纤激光水听器探头主要通过 DFB 光纤激光器上涂覆柔顺涂层提高水听器的灵敏度。如 1999 年, 英国防卫研究局 (DERA) 的 Hill 等^[3]采用弹性聚合物对 DFB 光纤激光器进行封装, 在 1 kHz 频点可测得 $-68 \text{ dB re Pa} / \sqrt{\text{Hz}}$ 的声压信号, 声压灵敏度较裸纤状态下的 DFB 光纤激光器增加一个数量级, 这验证了将涂覆增敏方式应用于 DFB 光纤激光器的可行性。随着研究的不断深入, DFB 光纤激光水听器的探头逐渐由涂覆增敏转变为将声压影响转化为 DFB 光纤激光器轴向应变的机械传感机制, 显著提高了水听器的灵敏度并实现了探测频段可控。目前, 国内外常用的探头封装形式主要有弯曲梁式、侧面压迫式、轴向拉压式三种。

2.1 弯曲梁式封装

DFB 光纤激光水听器结构的封装重点在于同时实现 DFB 光纤激光器的声压增敏和加速度去敏功能。2005 年, 澳大利亚防务科技局 (DTSO) 的 Foster 等^[4]设计了一种薄板弯曲式封装结构的 DFB 光纤激光水听器探头, 如图 1 所示。这也是对 DFB 光纤激光水听器弯曲梁式探头首次较为全面的报道。该探头将一弯曲薄板通过四点支撑方式固定在水听器的封闭外壳内, 将 DFB 光纤激光器粘贴在薄板的一侧, 声压作用

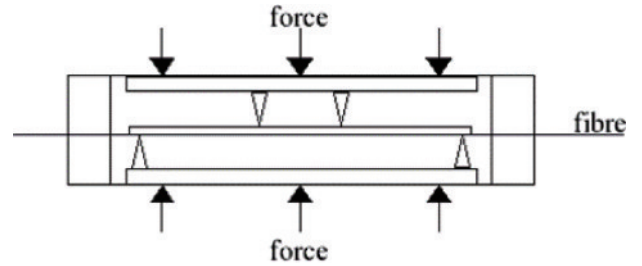


图 1 薄板弯曲式 DFB 光纤激光水听器^[4]

Fig. 1 Thin plate bending DFB fiber laser hydrophone^[4]

在承压面时会引起弯曲薄板发生变形, 使激光器产生拉伸应变, 从而实现对目标信号的探测。当水听器受到加速度激励作用时, 上下两个承压面变形方向一致, 中间弯曲薄板的形变量大幅度减小, 从而实现加速度去敏功能, 但该探头的声压及加速度灵敏度与干涉型光纤水听器还存在较大差距。

2008 年, DTSO 的 Goodman 等^[5-6]将一个柔性气囊与水听器相连, 设计了一种具有静压补偿功能的 DFB 光纤激光水听器, 如图 2 所示。该水听器对静压不敏感的水深达到 50 m, 且在 1 kHz 以内的平均声压灵敏度为 110 dB re Hz/Pa, 频响曲线波动幅度小于 $\pm 1 \text{ dB}$ 。之后, 该团队在 Jervis 海湾对该结构的 4 阵元水听器阵列进行海上试验, 表明对于 DFB 光纤激光水听器的研究已经进入工程试验阶段。为了进一步拓宽水听器的工作频带, 2011 年, Foster 等^[7-9]设计了一种结构紧凑的薄板弯曲梁式 DFB 光纤激光水听器探头, 如图 3 所示。



图 2 具有静压补偿功能的 DFB 光纤激光水听器^[5-6]

Fig. 2 DFB fiber laser hydrophone with static pressure compensation function^[5-6]

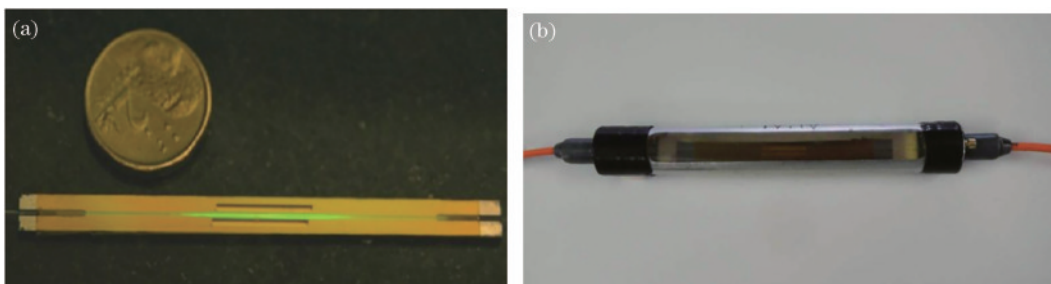


图 3 弯曲梁式紧凑结构的 DFB 光纤激光水听器探头。(a) 内部增敏结构; (b) 实物图^[7-9]

Fig. 3 DFB fiber laser hydrophone probe with curved beam compact structure. (a) Internal sensitization structure; (b) physical drawing^[7-9]

该水听器增敏元件弯曲梁的一阶流固耦合固有频率为 10 kHz, 频响曲线在 5 kHz 之前都较为平坦, 平均灵敏度为 105.5 dB re Hz/Pa。之后, 该团队将该水听器通过直径为纳米级别的毛细管组装到紧凑的弯曲梁结构中, 利用其自身的机械结构实现了静压自平衡, 并于 2013 年分别在 Adelaide 西部的海湾以及 St. Vincent 海湾完成了该结构 8 阵元水听器阵列的海上试验。

2016 年, 印度海军物理和海洋学实验室的 Rajesh 等^[10]研制了薄板弯曲梁式 DFB 光纤激光水听器探头, 通过背部设计的空气腔增加探头单元的灵敏度。该结构的 8 基元 DFB 光纤激光水听器阵列如图 4 所示, 在 4000 Hz 以下的中低频范围内水听器单元的灵敏度为 (-155 ± 5) dB re V/ μ Pa, 即 (81.4 ± 5) re Hz/Pa。

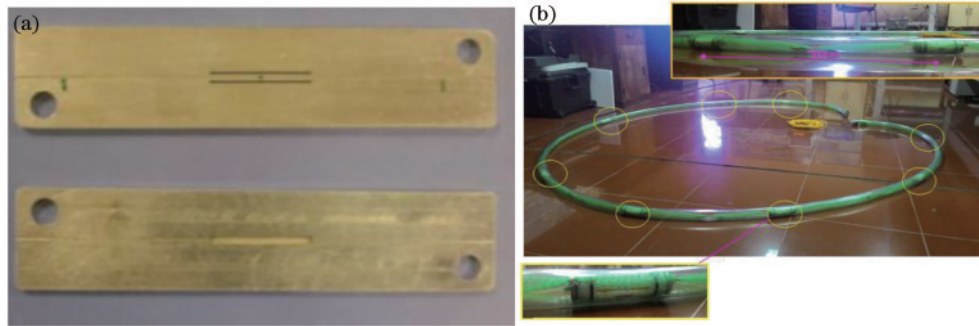


图 4 空气背腔 DFB 光纤激光水听器。(a) 内部增敏结构; (b) 8 阵元实物图^[10]

Fig. 4 DFB fiber laser hydrophone with air back cavity. (a) Internal sensitization structure; (b) physical drawing of 8 array elements^[10]

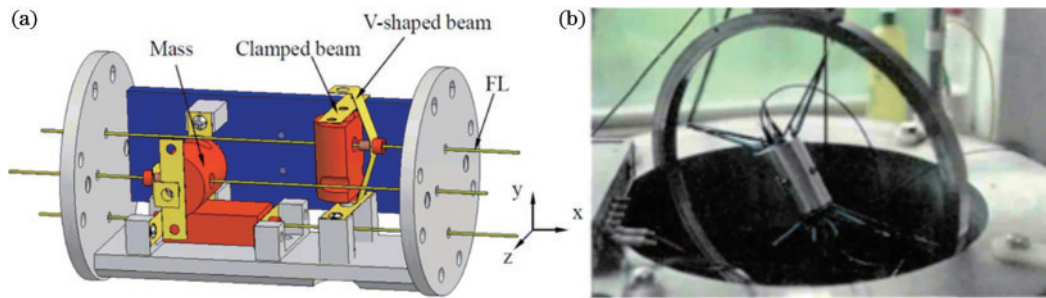


图 5 曲折梁三维 DFB 光纤激光水听器。(a) 内部结构图; (b) 实物图^[13]

Fig. 5 Zigzag beam three-dimensional DFB fiber laser hydrophone. (a) Internal structure drawing; (b) physical drawing^[13]

2017 年, 山东科学院激光研究所的 Zhang 等^[14]利用悬臂梁结构, 将三个 DFB 光纤激光器串联, 设计了

球形三元共振型矢量水听器, 单 DFB 激光器及其三维结构如图 6 所示。单 DFB 光纤激光器由悬臂弯曲梁

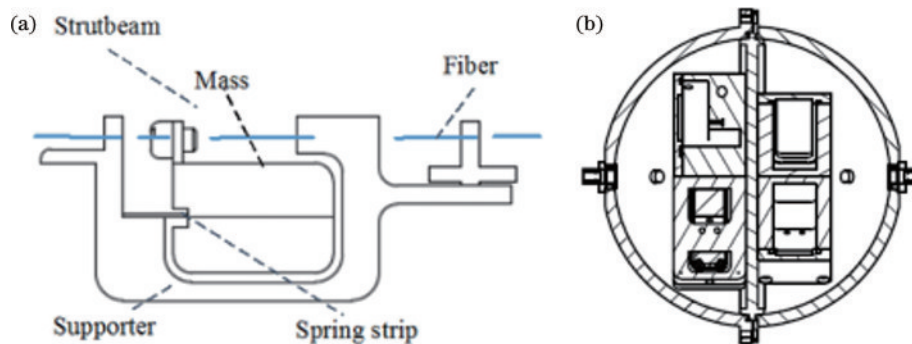


图 6 悬臂梁三维 DFB 光纤激光水听器。(a) 单 DFB 激光器结构; (b) 三维结构^[14]

Fig. 6 Cantilever beam three-dimensional DFB fiber laser hydrophone. (a) Single DFB laser structure; (b) three-dimensional structure^[14]

固定, 不锈钢质量块通过薄膜片固定在支架上作为惯性传感器, 在振动信号激励下, 通过质量块的弯曲带动光纤上的轴向应变, 三维结构的灵敏度约为 33 dB re pm/g, 频率响应在 5~300 Hz 范围内较为平坦, 具备良好的低频信号检测能力。

2.2 侧面压迫式封装

2010 年, 国防科技大学的马丽娜^[15]提出了一种金属和弹性材料混合封装的鼓状圆柱结构 DFB 光纤激光水听器, 如图 7 所示。该水听器的外壳为镂空金属

层和金属外包装的弹性材料构成的双层鼓状结构, 在声压作用下, 鼓状外壳发生形变, 拉动与其固连的光纤激光器产生轴向应变, 从而实现水声探测功能。实验结果表明, 在 80~2500 Hz 范围内, 该结构的平均声压灵敏度可达到 103 dB re Hz/Pa, 频响曲线的波动幅度小于 ±1.5 dB。其中, 水听器的增敏效果主要由鼓状圆柱的弯曲程度决定, 水听器的频响起伏主要由结构的对称性决定, 因此, 结构尺寸参数的一致性在保证每个阵元相幅一致的关键。

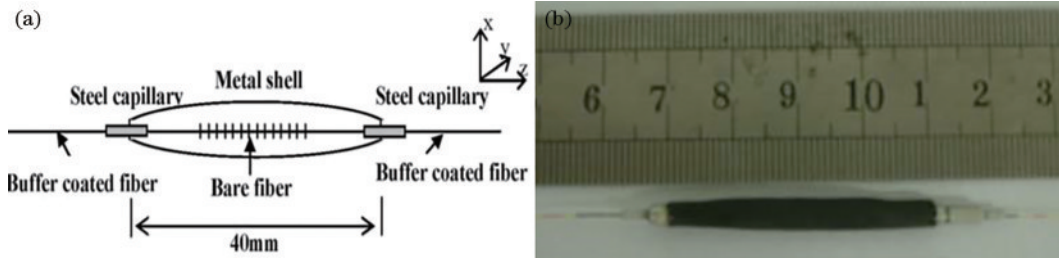


图 7 鼓状圆柱结构的 DFB 光纤激光水听器。(a) 结构图; (b) 实物图^[15]

Fig. 7 DFB fiber laser hydrophone with cylindrical drum structure. (a) Structural drawing; (b) physical drawing^[15]

山东科学院激光研究所长期开展了用聚合物灌注对 DFB 光纤激光器进行封装的研究。2013 年, Sun 等^[16]采用聚氨酯夹芯材料封装圆柱结构的 DFB 光纤激光水听器, 通过在圆柱内灌注聚合物封装 DFB 光纤激光水听器, 构建了 4 元水听器阵列系统, 在 20~2000 Hz

频段内水听器的频率响应为 (115 ± 3) dB re Hz/Pa, 如图 8 所示。2017 年, Li 等^[17]掌握短腔 DFB 光纤激光器的刻写技术, 在 Sun 等^[16]的封装结构基础上, 继续构建了 8 阵元水听器阵列, 在 10~10000 Hz 的宽频带上获得了同等程度的水听器灵敏度。

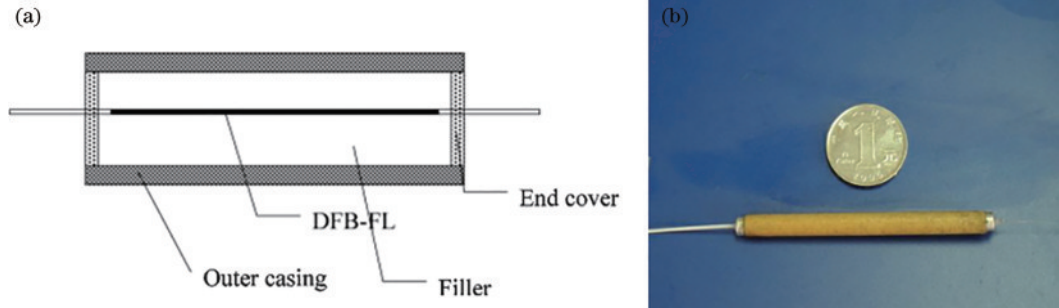


图 8 金属圆柱壳灌注的 DFB 光纤激光水听器。(a) 结构图; (b) 实物图^[16]

Fig. 8 DFB fiber laser hydrophone filled with metal cylindrical shell. (a) Structural drawing; (b) physical drawing^[16]

2017 年, 印度海军物理和海洋实验室的 Vivek 等^[18-19]采用聚合物外壳封装 DFB 光纤激光水听器, 其结构如图 9 所示。用钢管保护 DFB 光纤激光器避免聚合物直接接触 DFB 激光器, 防止聚合物在固化放热过程中由于自身和光纤热膨胀系数不同导致 DFB 光纤激光器产生不同的应变, 从而破坏光栅的相似性。聚合物外壳通过

浇注罐一侧注入, 同时在浇注罐的另一端出口吸入空气, 确保成型过程中没有气泡。通过水平施加调节的预应力确保 DFB 光纤激光器封装后的中心波长不会超出实际的复用窗口, 最终在 1000~7000 Hz 频段获得响应度平坦、灵敏度为 -155 dB re V/ μ Pa (81.4 re Hz/Pa) 的水听器, 且能通过减小带宽进一步提高灵敏度。

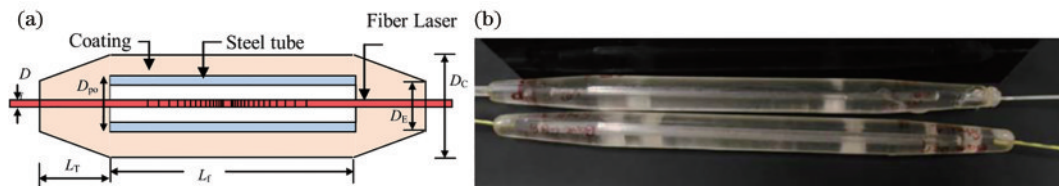


图 9 聚合物外壳 DFB 光纤激光水听器。(a) 结构图; (b) 实物图^[18-19]

Fig. 9 Polymer housing DFB fiber laser hydrophone. (a) Structural drawing; (b) physical drawing^[18-19]

2.3 轴向拉压式封装

相比前两种封装方式,轴向拉压式封装工艺成熟稳定,得到了人们更广泛的关注,研究内容也从探头增敏、频带拓宽等指标逐步向更全面的系统集成化发展。2008年,中科院半导体所的Zhang等^[20]首次提出了基于双膜片结构的DFB光纤激光水听器,其结构如图10

所示。该水听器的中心固定了一个硬核橡胶膜片作为水听器的增敏元件,理论分析表明,该水听器的声压灵敏度主要受膜片弹性模量和硬核直径的影响,利用低弹性模量的材料制作膜片,在1 kHz内水听器的声压灵敏度高达7 nm/MPa(119 dB re Hz/Pa),频响波动约为±3 dB。

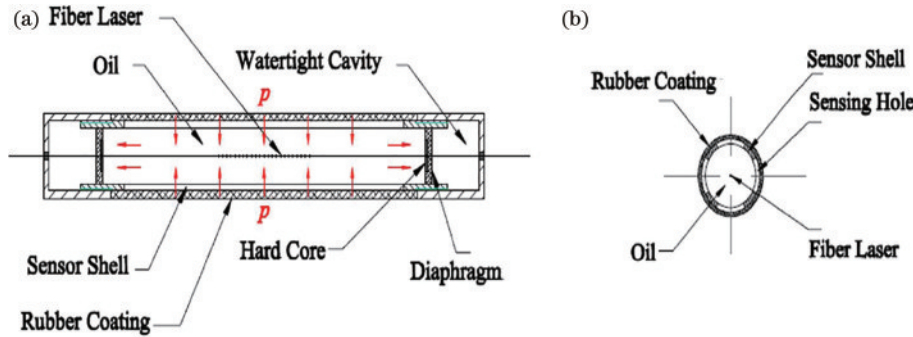


图 10 双膜片 DFB 光纤激光水听器。(a)正视图;(b)侧视图^[20]

Fig. 10 Double diaphragm DFB fiber laser hydrophone. (a) Front view; (b) side view^[20]

2009年,Zhang等^[21-22]利用黄铜膜片作为DFB光纤激光水听器的增敏元件,并通过在圆柱套筒中部开通孔实现了其静水压自补偿功能,如图11所示。作为一

种典型的压强与压差复合式传声器结构,该水听器的声压灵敏度达到了100 nm/MPa(142 dB re Hz/Pa),在1 kHz以内频响曲线的波动幅度小于±2 dB。

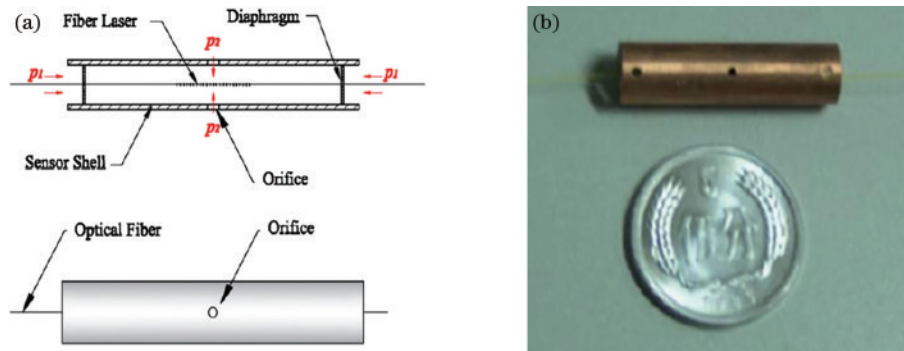


图 11 具有静压补偿功能的 DFB 光纤激光水听器。(a)结构图;(b)实物图^[21-22]

Fig. 11 DFB fiber laser hydrophone with static pressure compensation. (a) Structural drawing; (b) physical drawing^[21-22]

为解决水听器在不同环境下需要不同频响区间以及高频混叠问题,2011年,Zhang等^[23-24]基于电声类比理论分析了开孔方式对DFB光纤激光水听器频响性能的影响,并研制出具有低通滤波与带通滤波功能的

水听器结构,之后,在攻克水听器相幅一致性^[25]、阵元功率均衡以及水听器成缆工艺三方面内容后,进行了对应的湖上验证。其中,批量封装的DFB光纤激光水听器如图12(a)所示。在千岛湖对8元DFB光纤激光

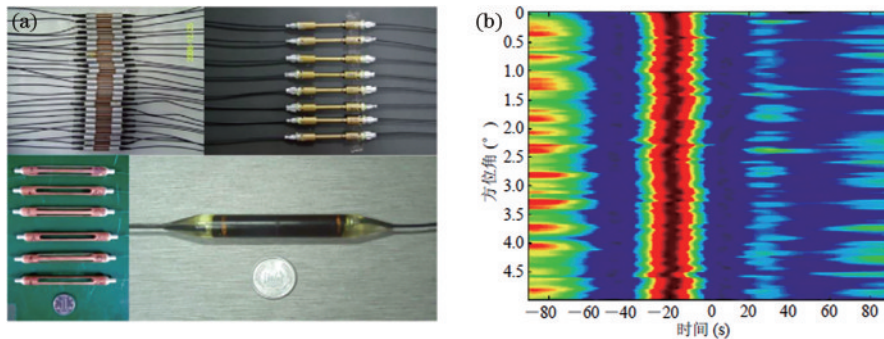


图 12 DFB 光纤激光水听器的应用。(a)批量封装实物图;(b)水听器阵列对目标的方位历程图^[26]

Fig. 12 Application of the DFB fiber laser hydrophone. (a) Batch packaging of physical drawings; (b) orientation history map of the hydrophone array to the target^[26]

水听器阵列开展了动态拖曳试验,在 4 节动态拖曳速度下,阵列能对目标形成稳定的波束指向,结果如图 12(b)所示^[26]。2013 年,Zhang 等^[27]通过不同航速下的拖曳试验研究了 DFB 光纤激光水听器拖缆的流噪声特性,为拖曳缆体的应用和改进提供了重要参考。

2012 年,中船重工 715 研究所的李东明等^[28-29]设计了一种高灵敏度的 DFB 光纤激光水听器,如图 13 所示。该水听器采用金属膜片增敏,在 100~1000 Hz 频响范围内,当干涉仪的非平衡长度为 50 m 时,水听器的平均声压灵敏度为 $-132.7 \text{ dB re rad}/\mu\text{Pa}$ ($103.6 \text{ dB re Hz}/\text{Pa}$),频响波动幅度小于 $\pm 0.7 \text{ dB}$ 。由于两端金属膜片对称的抗加速度结构设计,水听器的加速度灵敏度可达 $-20 \text{ dB re rad}/g$ 以下,通过在 DFB 光纤激光器两端施加预应力可使水听器的出射激

光中心波长产生预先漂移,耐静水压能力达到 2 MPa。

2013 年,法国泰利斯公司水下系统部的 Launay 等^[30-32]提出了一种对温度与静压都不敏感的 DFB 光纤激光水听器,具体结构如图 14 所示。在 5~8000 Hz 范围内该结构的平均声压灵敏度为 $105 \text{ dB re Hz}/\text{Pa}$,频响曲线的波动幅度小于 $\pm 2.5 \text{ dB}$,通过套筒上的开口以及膜片与套筒之间的悬空侧壁分别实现静压与温度补偿功能,该结构水听器的实测静压与温度灵敏度分别为 $0.6 \text{ pm}/\text{bar}$ 和 $-6.6 \text{ pm}/\text{C}$,且声压灵敏度不随静压以及温度的变化而变化。其中, $1 \text{ bar}=100 \text{ kPa}$ 。基于该结构的水听器设计了 12 元声学面板阵列,用于监视沿海地区的水下监测,这是首次在机械结构上实现温度补偿的 DFB 光纤激光水听器并构建对应的声学面板天线阵列。

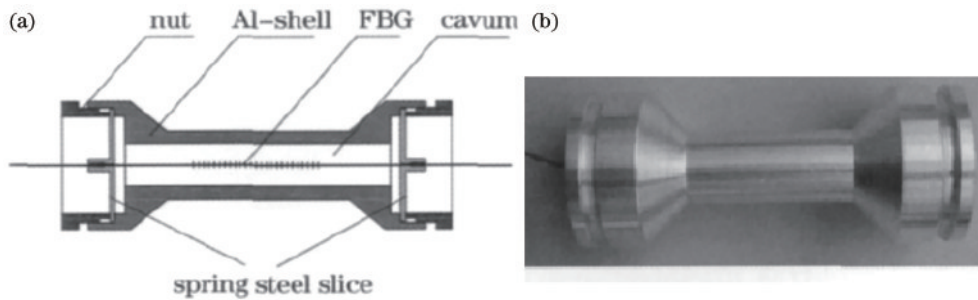
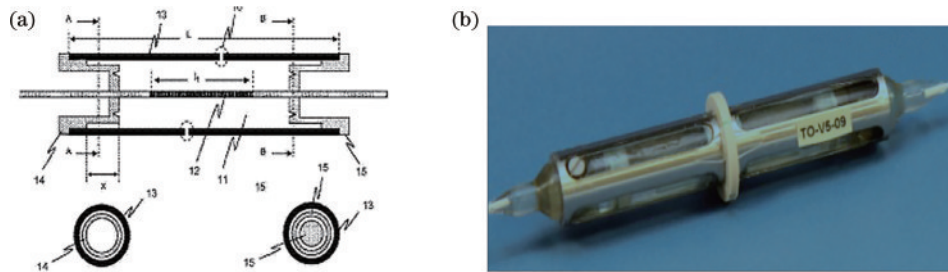


图 13 加速度抵消型 DFB 光纤激光水听器。(a)结构图;(b)实物图^[29]

Fig. 13 DFB fiber laser hydrophone with acceleration cancellation type. (a) Structural drawing; (b) physical drawing^[29]



(c)

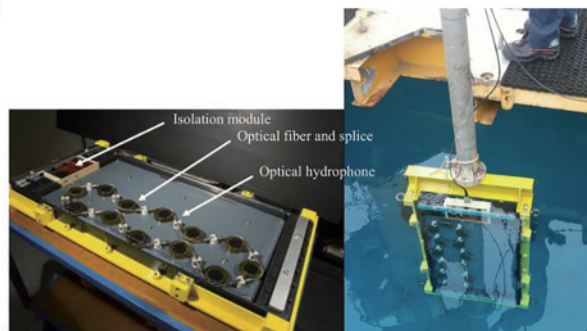


图 14 静压和温度补偿结构的 DFB 光纤激光水听器及天线阵列。(a)结构图;(b)实物图;(c)天线阵列^[30-32]

Fig. 14 DFB fiber laser hydrophone and antenna array with static pressure and temperature compensation structure. (a) Structure drawing; (b) physical drawing; (c) antenna array^[30-32]

2013 年,新加坡国立大学的 Chandrika 等^[33-34]提出了一种可实现静压补偿功能的金属膜片结构 DFB 光纤激光水听器,如图 15 所示。该水听器以滑块室形式

将静压补偿结构集成到水听器内部,与其他水听器不同,该结构水听器封装完毕后可实时调整 DFB 光纤激光器两端施加的预应力大小,将激光器的谐振频率调

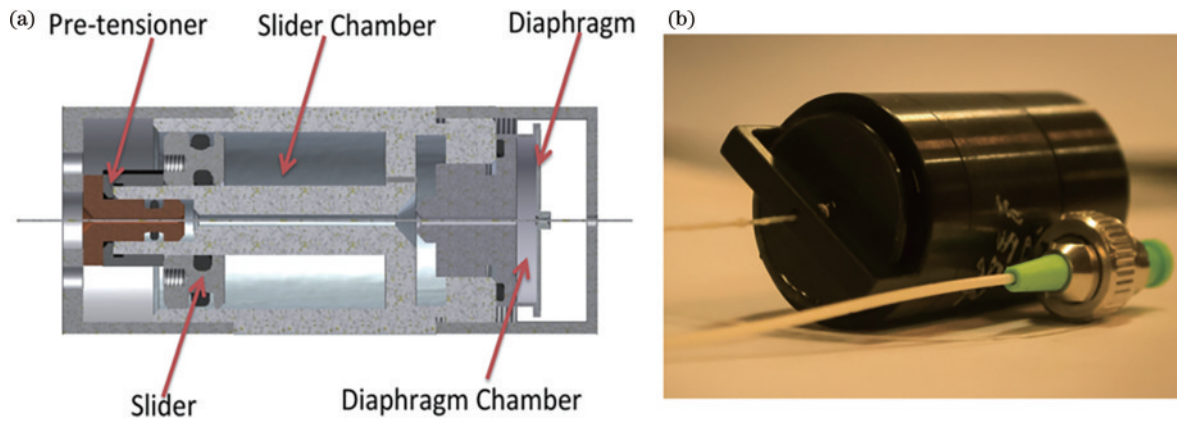


图 15 压力补偿结构的DFB光纤激光水听器。(a)结构图;(b)实物图^[33]

Fig. 15 DFB fiber laser hydrophone with pressure compensation structure. (a) Structure drawing; (b) physical drawing^[33]

节到水听器的工作频段外,最终使水听器在 10~5000 Hz 范围内获得 (-158 ± 2.5) dB re rad/ μ Pa (112.5 ± 2.5 dB re Hz/Pa) 的频响性能,并于 2014 年在理论、仿真以及实验上对该结构水听器成缆后的流噪声进行了全面分析,对 DFB 光纤激光水听器在拖曳阵中的工程化应用具有重要意义。

2012 年,Zhang 等^[35-36]报道了 DFB 光纤激光水听器和 DFB 光纤激光加速度计共同组成的微地震监测

仪,其结构如图 16 所示。其中,DFB 光纤激光水听器、DFB 光纤激光加速度计均为膜片式轴向拉压结构:在 20~1000 Hz 范围内水听器具有平坦的声压灵敏度,优于 -140 dB re pm/ μ Pa;在 10~200 Hz 范围内加速度计具有平坦的加速度灵敏度,优于 40 dB re pm/g。该微地震监测仪在云南普洱地区的 FLS 深井地震监测现场实验和云南大印店湖底搭建框架的水下实验中均可有效检测微地震信号。

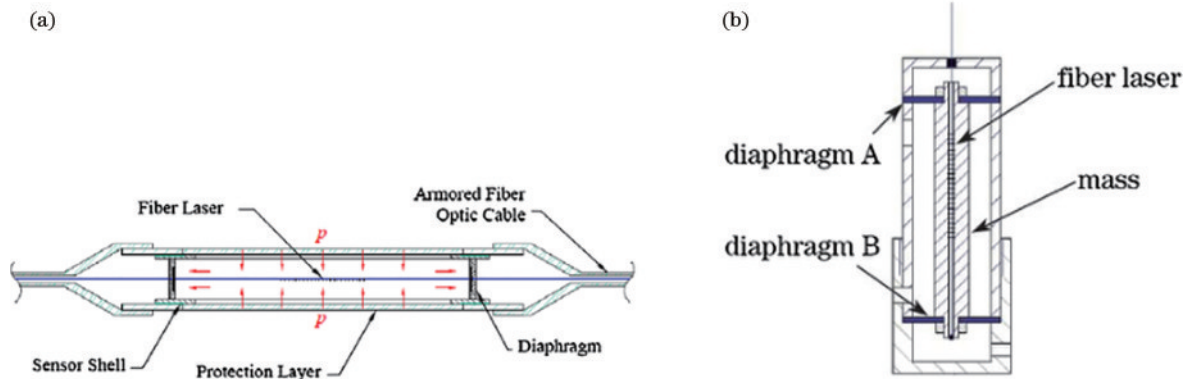


图 16 DFB 光纤激光微地震仪的结构。(a)DFB 光纤激光水听器;(b)DFB 光纤激光加速度计^[35]

Fig. 16 Structure of the DFB fiber laser microseismometer. (a) DFB fiber laser hydrophone; (b) DFB fiber laser accelerometer^[35]

2018 年,北京航天控制仪器研究所的张海岩等^[37]采用聚氨酯橡胶、金属框架对 DFB 光纤激光器进行封装,通过参数优化最终在 100~2000 Hz 范围内制作了直径

为 6 mm、长度为 55 mm、灵敏度为 -132 dB re rad/ μ Pa (104.4 dB re Hz/Pa),频率响应波动在 ± 2 dB 以内的超小型水听器单元,其结构与封装实物如图 17 所示。

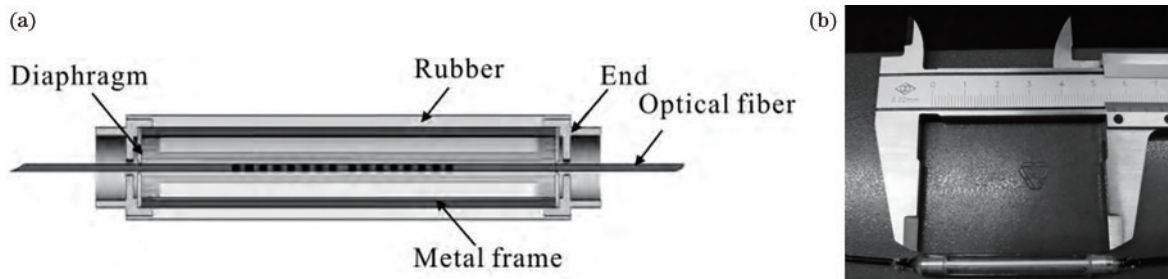


图 17 超小型 DFB 光纤激光水听器。(a)结构图;(b)实物图^[37]

Fig. 17 Ultra-fine DFB fiber laser hydrophone. (a) Structure drawing; (b) physical drawing^[37]

2019年,张发祥等^[38]针对微孔型静压补偿结构使灵敏度降低或响应特性大幅波动的特点,提出将毛细管和弹性腔结合起来,形成一个具有静压均衡功能且能改善响应的水听器,展示了新引入的补偿体在改善响应中的作用,分析了补偿体弹性对灵敏度和响应度的影响,如图18所示。测试结果表明,该水听器在40~4000 Hz带宽内具有 9×10^{-3} pm/Pa (120 dB re Hz/Pa)的平坦压力灵敏度,在0~3 MPa测量范围内的静压灵敏度为 11×10^{-6} pm/Pa。

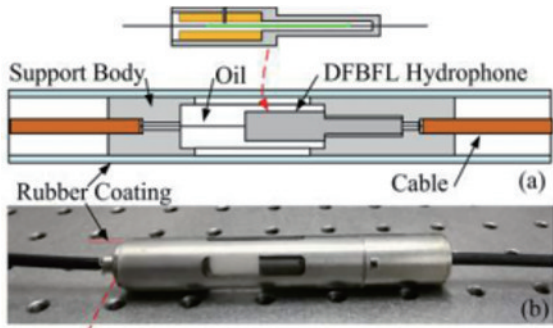


图18 耐静压高灵敏度补偿DFB光纤激光水听器^[38]

Fig. 18 Static pressure resistant DFB fiber laser hydrophone with high sensitivity compensation^[38]

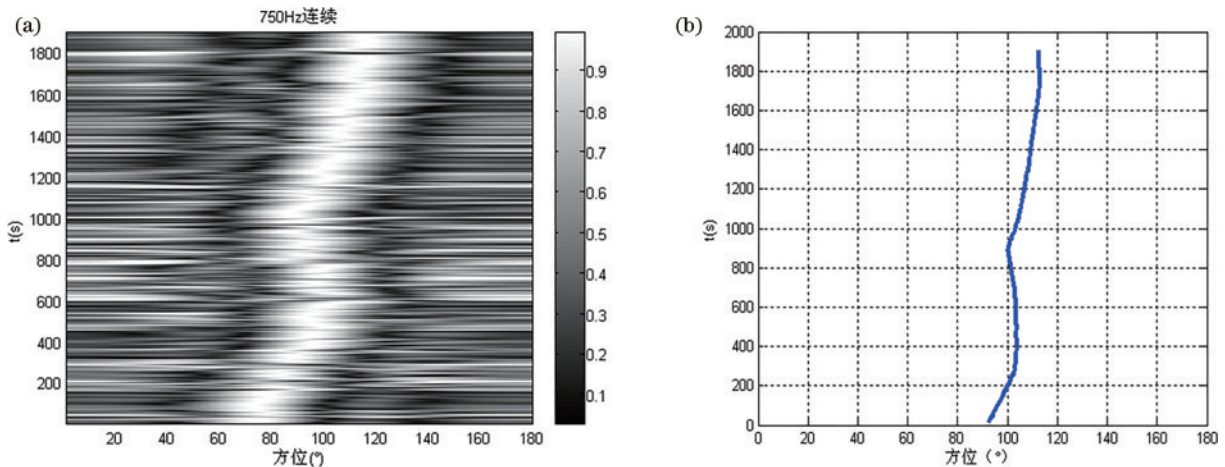


图19 DFB光纤激光水听器4元阵列的湖上试验结果。(a)目标方位历程图;(b)GPS定位^[45]

Fig. 19 Results of the lake test of the 4-element array of DFB fiber laser hydrophones. (a) Target orientation history map; (b) GPS positioning^[45]

为了进一步推动DFB光纤激光水听器的工程化应用,2016年,唐波等^[46]对拖曳阵用聚氨酯拉伸式DFB光纤激光水听器进行了较为全面的综合分析,通过研究聚氨酯物性参数与水听器动态响应之间的定量关系对聚氨酯增敏材料进行了优化制备。采用对称式设计抵消探头的加速度响应,并通过电声类比法对探头的结构进行优化,最终设计的聚氨酯轴向拉伸式DFB光纤激光水听器结构如图20(a)所示^[47-48],其批量封装实物图如图20(b)所示。在10~2000 Hz频段该水听器灵敏度的平均值约为 -142.7 dB re rad/ μ Pa (87.7 re Hz/Pa),加速度灵敏度小于 1.2 dB re rad/g,

3 本团队DFB光纤激光水听器探头封装及应用的研究

2007年,海军工程大学的黄俊斌等^[39]就开始研究DFB光纤激光水听器的传感机理,并用研制的4元拖曳阵于2006年完成湖上试验,初步验证了该技术路线的可行性。之后,初步探索设计了弯曲梁式、侧面压迫式2种不同结构的DFB光纤激光水听器,虽然增敏效果可观,但封装工艺不稳定、声压频响的波动幅度较大,且未得到进一步的发展与应用^[40-41]。

2009年,谭波等^[42-44]对轴向拉压式封装结构展开了研究,设计的轴向拉伸开孔式DFB光纤激光水听器在20~800 Hz频率范围内的平均声压灵敏度约为 -131 dB re rad/ μ Pa (99.4 dB re Hz/Pa),且波动幅度不高于 ± 1.5 dB。以该结构水听器为阵元,Gu等^[45]在国内首次研制出4元固态缆结构且缆径仅为16 mm的DFB光纤激光水听器拖曳线列阵,并于2009年成功进行了湖上静态和动态拖曳实验(最高拖曳速度为16节),如图19所示。实验结果表明,在静态和动态拖曳状态下,该拖曳阵都能发现目标并进行正确跟踪,跟踪波束瀑布图与GPS轨迹完全一致。

频响曲线较平坦,波动幅度在 ± 2 dB内^[49]。

在上述研究的基础上,本课题组对DFB光纤激光水听器的成缆工艺进行优化,成功研制了缆径为16 mm的32元DFB光纤激光水听器拖曳细线阵并进行了湖试验证,其结构如图21(a)所示。湖试结果表明,拖曳速度为4~18节时,阵列动态波束成形结果稳定,目标方位估计准确,动态拖曳下对单频信号、宽带信号波束成形的主瓣宽度分别约为 4.4° 、 2.7° ,波束宽度较细。当拖曳速度为6节时,拖曳阵的动态方位估计如图21(b)所示^[49]。

为了拓展DFB光纤激光水听器的应用范围,本课

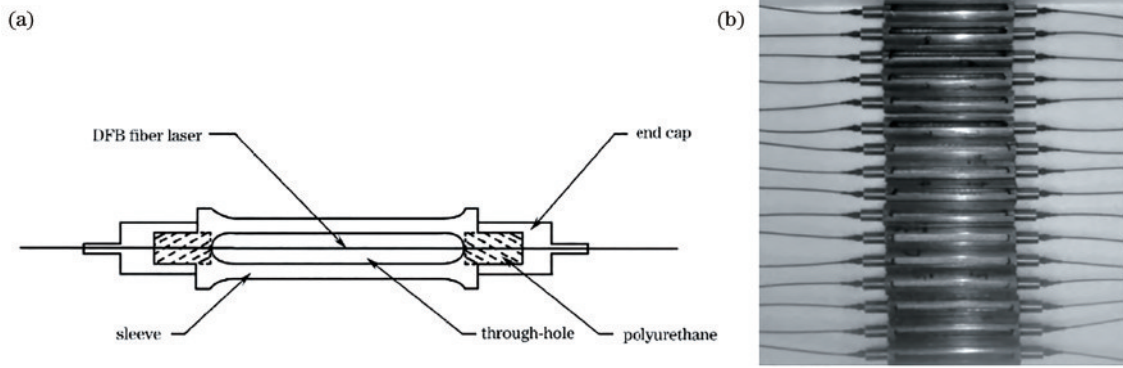


图 20 用于拖曳阵的DFB光纤激光水听器。(a)结构图;(b)批量封装实物^[48-49]

Fig. 20 DFB fiber laser hydrophone for towed array. (a) Structural drawing; (b) batch packaging of physical objects^[48-49]

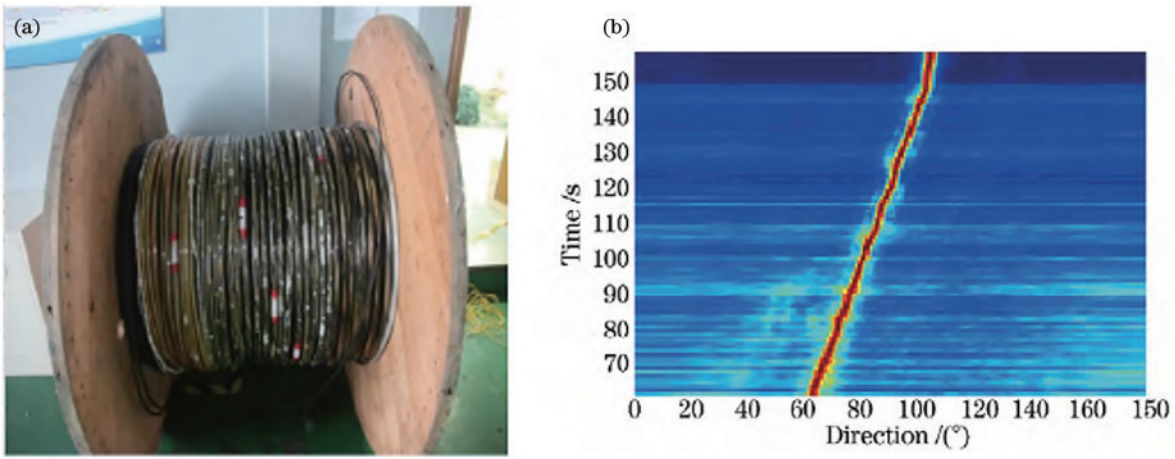


图 21 DFB 光纤激光在水听器中的应用。(a)32元DFB光纤激光水听器拖曳阵;(b)拖曳阵的动态方位估计^[49]

Fig. 21 Application of DFB fiber laser in hydrophone. (a) 32-element DFB fiber laser hydrophone towed array; (b) dynamic orientation estimation of the towed array^[49]

课题组同步研究了舷侧阵用膜片拉伸式DFB光纤激光水听器。2016年,唐波等^[50]对膜片拉伸式DFB光纤激光水听器进行了深入研究,通过研究膜片结构对水听器频响特性的影响,对T字型膜片进行了尺寸优化,采用对称式探头结构进行加速度去敏设计,并通过电声类比法优化探头结构^[51-52]。同时,深入分析了光纤施加预应力、结构流固耦合效应等干扰因素,对探头结构进行了抗干扰设计^[53-54]。最终设计的双膜片轴向拉伸式DFB光纤激光水听器结构如图22(a)所示,其批量封装实物图如图22(b)所示。在2500~10000 Hz中高频段该

水听器灵敏度的平均值约为 $-136.9 \text{ dB re rad}/\mu\text{Pa}$ ($93.5 \text{ re Hz}/\text{Pa}$),加速度灵敏度小于 $-28 \text{ dB re rad}/g$,频响曲线十分平坦,波动幅度在 $\pm 0.5 \text{ dB}$ 内^[55]。

在上述研究的基础上,本课题组设计了小尺度DFB光纤激光水听器舷侧阵结构,如图23(a)所示^[55]。对DFB光纤激光水听器、声障板和密封层进行了一体化设计,形成大面积、小厚度的舷侧阵共形模块,通过时分、波分联合复用组成64元舷侧阵列并进行了湖上静态实验。结果表明,舷侧阵波束形成稳定,目标方位估计正确,精度较高,舷侧阵实际的指向性如图23(b)所示^[56]。

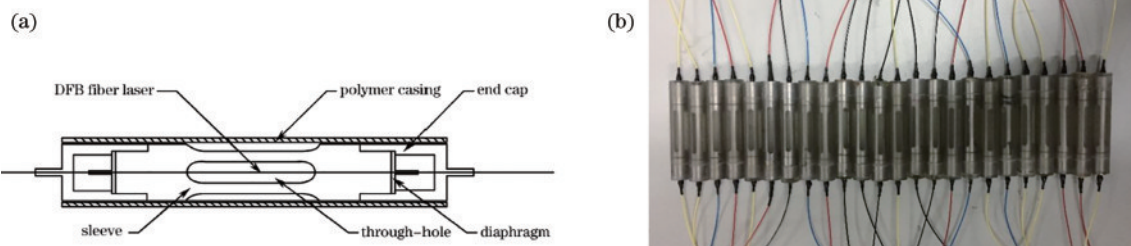


图 22 用于舷侧阵的DFB光纤激光水听器。(a)结构图;(b)批量封装实物^[55]

Fig. 22 DFB fiber laser hydrophone for flank array. (a) Structural drawing; (b) physical drawing of batch packaging^[55]

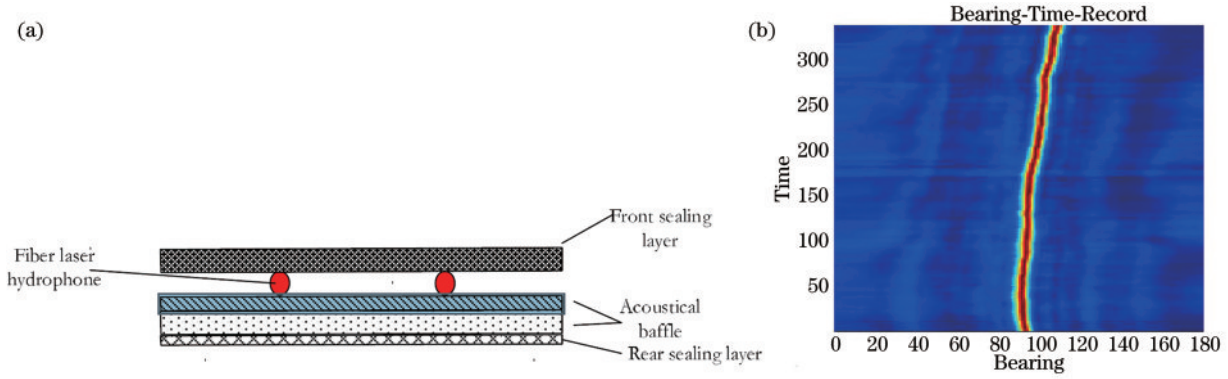


图 23 DFB 光纤激光水听器在舷侧阵中的应用。(a) 舷侧阵结构^[55]; (b) 舷侧阵的指向性^[56]

Fig. 23 Application of DFB fiber laser hydrophone in side array. (a) Structure of side array^[55]; (b) directivity of side array^[56]

4 DFB 光纤激光水听器的总结

综上所述,对于DFB光纤激光水听器的研究,不同研究机构的开始时间、封装方式、研究侧重、应用背景等都不同。对DFB光纤激光水听器的性能评价主要包括声压(加速度)灵敏度、工作带宽、频响起伏、尺寸、阵元规模数、最小可探测声压等参数。因此,对国内外DFB光纤激光水听器探头封装及应用的最新成果进行了归纳梳理,如表1所示。其中, f 为频率, B 为带宽波动幅度, L 、 W 、 H 分别为结构的长、宽、高, O 为结构的外径, N 为阵元数, L 为最低声压检测线。对于DFB光纤激光水听器,常用的灵敏度指标有频率-声压灵敏度(单位为dB re Hz/Pa)、相位-声压灵敏度(单位为dB re rad/ μ Pa),为了对比不同研究机构DFB光纤激光水听器的性能,将不同的声压灵敏度单位统一换算为频率-声压灵敏度(其中,CAS和LISD研制的水听器灵敏度为加速度灵敏度,其余水听器的灵敏度均为频率-

声压灵敏度)。可以发现,对于DFB光纤激光水听器封装技术,三种常见的封装方式各有优劣。其中:侧面压迫式封装结构的工艺较为简单,常采用灌注的聚氨酯作为增敏材料,但聚氨酯作为有机物需多组分混合使用^[46],难以精确控制水听器自身的特性,频响波动相对较大,且在灌注聚氨酯过程中(如聚氨酯直接接触DFB光纤激光器)两种材料的热膨胀系数不同,探头一体化后易破坏有源光栅自身结构的相似性,进而影响DFB光纤激光器的出光稳定性;弯曲梁式封装结构的频响性能良好且应用广泛,可设计为传统的声压水听器或新型低频矢量水听器,但弯曲梁式封装结构的加工精度要求较高(澳大利亚研制的弯曲梁式封装结构用于静压平衡的毛细管直径为纳米量级),封装工艺难度较大;轴向拉压式结构水听器的一致性较好,封装工艺简单可靠,是水听器增敏的一种更优选择。目前,相关领域的研究机构中,多数研究单位选择了轴向拉压式封装技术路线。

表 1 国内外DFB光纤激光水听器的性能对比

Table 1 Performance comparison of DFB fiber laser hydrophones at home and abroad

Type	Institutions	Sensitivity	f /Hz	B /dB	Size/mm	N	L	Ref.
Bending beam	Australia	105.5	100-5000	<1	$L=70, W=5, H=2$	8	0	[7-9]
	India	81.4	<4000	<5	$O=32, L=80$	8	-	[10]
	CAS	>30	20-200	-	$O=45, L=83$	1	-	[13]
	LISD	33	5-300	-	$O=10$	1	-	[14]
Lateral compression	GKD	103	80-2500	<1.5	$O=11, H=40$	1	-	[15]
	LISD	115	10-10000	<3	$O=5, L=50$	8	0	[17]
	India	81.4	1000-6000	<3	$O=5, L=93$	1	-	[18-19]
Axial tension or compression	715	103.6	100-1000	<0.7	$O=22$	1	-	[28-29]
	France	105	5-8000	<2.5	$O=12, L=105$	12	0-0.5	[30-32]
	Singapore	112.5	10-5000	<2.5	$O=20, L=55$	1	0	[33]
	BIACD	104.4	100-2000	<2	$O=6, L=55$	1	-	[37]
	LISD	120	40-4000	-	$O=7.2, L=90$	1	0	[38]
	HG	87.7	10-2000	<2	$O=13, L=95$	32	-	[46-49]
	HG	93.5	2500-10000	<0.5	$O=12, L=72$	64	-	[50-56]
CAS	-	-	-	-	64	-	[26]	

对于工作频带而言,前期研制的DFB光纤激光水听器工作频段主要集中在100~2000 Hz低频段,随着研究的不断深入,水听器的工作频带也逐渐向甚低频、中高频扩展^[57-68]。目前,最高的工作频带可达10 kHz,这在强指向性、高分辨率应用场合中仍然受到限制,后续,DFB光纤激光水听器的工作频带还需进一步向高频拓宽。在阵元规模上,2013年,Souto^[57]报道了直径为25 mm的32元光纤拖曳细列阵,并在Jervis海湾进行了拖曳阵的演示验证。2015年,张文涛等^[26]研制了64元DFB光纤激光水听器阵列,阵列外径小于30 mm,单元灵敏度优于-140 dB re pm/ μ Pa,本底噪声小于55 dB re 1 μ Pa/(Hz)^{1/2}@1 kHz。2017年和2021年,海军工程大学的唐波等^[49, 55]分别研制了32元DFB光纤激光水听器拖曳细线阵和64元小尺度DFB光纤激光水听器舷侧阵,通过对应的湖上实验,验证了阵列良好的水声探测能力。为进一步提高水下目标的高精度探测能力,还需关注阵列系统的水声探测性能,阵元规模也应进一步扩大。

目前,常见的光纤水听器主要有无源型水听器和有源型水听器两种。无源型水听器的灵敏度高、自噪声低、抗干扰能力强,在国际上得到了广泛应用。有源型DFB光纤激光水听器的单元结构尺寸更小,且DFB光纤激光器具有窄线宽的光学优势,易获得更好的性能或以更小的探头体积获得更高的灵敏度。但有源型DFB光纤激光水听器在光路复用时,容易受到泵浦功率不均衡、旁瓣反射、瑞利散射等因素的影响,导致光路噪声增加,阵列性能恶化^[65],这限制了DFB光纤激光水听器规模的进一步扩展。光纤水听器常以最小可探测声压达到或低于0级海况作为评价系统性能的重要依据,多家研究机构报道的DFB光纤激光水听器系统性能达到了0级海况,但随着阵元数目的增加,复用光路更加复杂,对应的光路噪声增加,最小可探测声压达到0级海况的难度也相应提高^[49, 55-56]。为进一步提高系统性能,后续需加强DFB光纤激光水听器解调光路中系统噪声的抑制研究。同时,光路的系统噪声与DFB光纤激光器光刻技术的工艺水平密切相关,且光刻技术的质量、稳定性对封装后不同阵元一致性的影响比较明显,因此,性能更优异的DFB光纤激光器光刻技术也有待进一步发展^[66-67]。

为了更好地应对水下复杂多变的环境,扩展DFB光纤激光水听器的应用场景,在DFB光纤激光水听器探头封装技术的研究中,需兼顾探头的耐静压、抗加速度、温度补偿等方面的性能,目前,常用的DFB光纤激光水听器探头通过静压平衡的结构设计,可适应浅海海域几十米至几百米深的应用范围。对于无源干涉型光纤水听器,挪威的PGS地球物理公司、国防科技大学、中国电子科技集团公司第二十三研究所、武汉神州普惠公司等分别设计了不同结构的耐静压干涉型光纤水听器探头,可满足深海环境数千米的水下环

境^[64, 68-70],而DFB光纤激光水听器常为压差式结构,对静压平衡的补偿会在一定程度上降低自身的灵敏度^[71],满足深海使用条件的DFB光纤激光水听器高灵敏度探头还有待进一步研究。

DFB光纤激光器作为有源光栅器件,对压力、加速度、温度等外部信息交叉敏感,均会引起光栅中心波长的变化。对于DFB光纤激光水听器阵列,其自身的抗加速度性能是其在水下运动状态下获取高信噪比声压信号的重要保证。可通过设计对称结构的DFB光纤激光水听器探头进行加速度去敏,理论上加速度产生的惯性力作为共模信号被自动抵消,而声压信号作为差分信号被放大输出^[47],可同时有效实现声压增敏和加速度去敏,但受加工精度的限制,难以保证探头结构的完全对称,水听器的抗加速度性能还有待进一步优化。当DFB光纤激光水听器的工作温度变化时,光纤与探头材料的热膨胀系数不同,可引起光栅的中心波长漂移,在探头结构设计中预留微空间抵消温度变化^[30]或利用有机材料的热膨胀效应均可进行温度补偿^[72]。除此之外,DFB光纤激光器在超声医学^[73]、地球物理^[74]、声发射检测与定位^[75]等微弱信号检测领域,光纤激光器技术分辨率高,技术优势明显,均有着广阔的应用前景。

5 结 论

本文对DFB光纤激光水听器国内外研究的探头封装结构及应用进行了综述,根据封装结构的特点,重点介绍了弯曲梁式、侧面压迫式、轴向拉压式三种主要的封装结构及其阵列应用。对国内外主要研究机构的研究指标进行分析,对比了DFB光纤激光水听器不同封装结构的优缺点,并对DFB光纤激光水听器阵列后续的技术发展进行了展望。后续研究中,满足最小可探测声压达到0级海况,能应对水下复杂工作环境的大规模高性能DFB光纤激光水听器阵列还有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Koo K P, Kersey A D. Bragg grating-based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1243-1249.
- [2] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Comparative analysis of the DFB fiber laser and fiber-optic interferometric strain sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6619: 392-395.
- [3] Hill D J, Nash P J, Jackson D A. A fiber laser hydrophone array[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3860: 1-12.
- [4] Foster S, Tikhomirov A, Milnes M, et al. A fiber laser hydrophone[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5855: 627-630.
- [5] Goodman S, Tikhomirov A, Foster S. Pressure

- compensated distributed feedback fibre laser hydrophone [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7004: 320-323.
- [6] Goodman S, Foster S, van Velzen J, et al. Field demonstration of a DFB fibre laser hydrophone seabed array in Jervis Bay, Australia[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 667-670.
- [7] Foster S, Tikhomirov A, van Velzen J. Towards a high performance fiber laser hydrophone[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1335-1342.
- [8] Foster S, Tikhomirov A, Harrison J, et al. Field demonstration of an eight-element fiber laser hydrophone array[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 57-60.
- [9] Foster S, Tikhomirov A, Harrison J, et al. Demonstration of an advanced fibre laser hydrophone array in Gulf St Vincent[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 277-280.
- [10] Rajesh R. An eight element hydrophone array using DFB fiber laser with bender bar packaging[C]//13th International Conference on Fiber Optics and Photonics, December 4-8, 2016, Kharagpur, India. Washington, D. C.: OSA, 2016: Th3A.52.
- [11] 马睿, 张文涛, 李学成, 等. 细长型光纤激光矢量水听器设计与仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 463-466, 491.
Ma R, Zhang W T, Li X C, et al. Design and simulation of slim fiber laser vector hydrophone[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 463-466, 491.
- [12] Ma R, Zhang W T, Li F. Two-axis slim fiber laser vector hydrophone[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(6): 335-337.
- [13] Zhang W T, Ma R, Li F. High performance ultra thin fiber laser vector hydrophone[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1196-1200.
- [14] Zhang X L, Zhang F X, Jiang S D, et al. Short cavity DFB fiber laser based vector hydrophone for low frequency signal detection[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(4): 325-328.
- [15] 马丽娜. 光纤激光水听器技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
Ma L N. Fiber laser hydrophone[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [16] Sun Z H, Min L, Zhang X L, et al. High performance four-element DFB fiber laser hydrophone array system [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8561: 856107.
- [17] Li M, Sun Z H, Zhang X L, et al. Development of high sensitivity eight-element multiplexed fiber laser acoustic pressure hydrophone array and interrogation system[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(3): 253-260.
- [18] Vivek K, Rajesh R, Sreehari C V, et al. A new approach of large diameter polymer-coated fiber laser hydrophone[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(19): 4097-4104.
- [19] Vivek K, Rajesh R, Sreehari C V, et al. An improved polymer shell encapsulated fiber laser hydrophone[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(2): 589-595.
- [20] Zhang W T, Liu Y L, Li F, et al. Fiber laser hydrophone based on double diaphragms: theory and experiment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(10): 1349-1352.
- [21] Zhang W T, Zhang F X, Li F, et al. Pressure-gradient fiber laser hydrophone[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 550-553.
- [22] Zhang W T, Zhang F X, Li F, et al. Investigation on a pressure-gradient fiber laser hydrophone[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(9): 094037.
- [23] Zhang F X, Zhang W T, Li F, et al. DFB fiber laser hydrophone with an acoustic low-pass filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(17): 1264-1266.
- [24] Zhang F X, Zhang W T, Li F, et al. DFB fiber laser hydrophone with band-pass response[J]. Optics Letters, 2011, 36(22): 4320-4322.
- [25] 宋晓燕, 张文涛, 何俊, 等. 分布反馈光纤激光水听器相位一致性的测试方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 310-314.
Song X Y, Zhang W T, He J, et al. Experiment on the phase congruency of distributed feedback optical fiber laser hydrophones[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 310-314.
- [26] 张文涛, 李芳. 光纤激光水听器研究进展[J]. 集成技术, 2015, 4(6): 1-14.
Zhang W T, Li F. Recent progresses in fiber laser hydrophone[J]. Journal of Integration Technology, 2015, 4(6): 1-14.
- [27] Zhang W T, Huang W Z, Luo Y B, et al. Field test of the flow noise of fiber laser hydrophone array[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 1386-1389.
- [28] 李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 高灵敏度加速度抵消型分布反馈有源光纤光栅水听器研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305005.
Li D M, Chen J, Ge H L, et al. Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0305005.
- [29] 李东明. 干涉型光纤光栅水听器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Li D M. Research on key technology interferometric hydrophone of fiber Bragg grating[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [30] Launay F X, Lardat R, Bouffaron R, et al. Static pressure and temperature compensated wideband fiber laser hydrophone[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8794: 83-87.
- [31] Launay F X, Bouffaron R, Lardat R, et al. Acoustic antenna based on fiber laser hydrophones[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 125-128.
- [32] Launay F X, Doisy M, Lardat R, et al. All-optical hydrophone insensitive to temperature and to static pressure: US20140036635[P/OL]. (2014-02-06) [2022-01-03]. <https://www.freepatentsonline.com/y2014/0036635.html>.
- [33] Chandrika U K, Pallayil V, Lim K M, et al. Pressure compensated fiber laser hydrophone: modeling and experimentation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(4): 2710-2718.
- [34] Kuttan Chandrika U, Pallayil V, Lim K M, et al. Flow

- noise response of a diaphragm based fibre laser hydrophone array[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 91: 235-242.
- [35] Zhang W T, Huang W Z, Li F. Earthquake monitoring using fiber laser borehole seismometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 8421B5.
- [36] Zhang W T, Wang Z G, Huang W Z, et al. Fiber laser sensors for micro seismic monitoring[J]. *Measurement*, 2016, 79: 203-210.
- [37] 张海岩, 李振, 赵晨, 等. 封装对超细型DFB光纤激光水听器性能的影响(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0903002.
- Zhang H Y, Li Z, Zhao C, et al. Effect of encapsulation on the performance of ultrafine DFB fiber laser hydrophone(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0903002.
- [38] Zhang F X, Jiang S D, Zhang X L, et al. Ultra-thin fiber laser hydrophone with static pressure equalization and improved response[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(24): 1968-1970.
- [39] 黄俊斌, 顾宏灿, 谭波, 等. 光纤光栅水听器拖曳线列阵湖上动态拖曳试验研究[J]. *鱼雷技术*, 2007, 15(2): 45-47.
- Huang J B, Gu H C, Tan B, et al. Experimental study on the fiber grating hydrophone towing array via dynamical towing in the lake[J]. *Torpedo Technology*, 2007, 15(2): 45-47.
- [40] 谭波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 一种曲伸式DFB光纤激光水听器探头的研究[J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(4): 91-96.
- Tan B, Huang J B, Gu H C, et al. A bending-tension style DFB fiber laser hydrophone unit[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2008, 20(4): 91-96.
- [41] 谭波, 余勃彪, 黄俊斌. 增敏罐封装光纤光栅水听器的动态特性研究[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(10): 1382-1386.
- Tan B, Yu B B, Huang J B. A study on the dynamical characteristics of fiber grating hydrophone encapsulated with the enhancing sensitivity pot[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(10): 1382-1386.
- [42] 谭波, 黄俊斌, 何琳, 等. 分布反馈式光纤激光器的动态特性[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1832-1838.
- Tan B, Huang J B, He L, et al. Dynamical characteristics of distributed feedback fiber laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8): 1832-1838.
- [43] Tan B, Huang J B. Design about a novel encapsulation structure of DFB fiber laser hydrophones[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9233: 191-197.
- [44] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 光纤光栅水听器探头封装技术研究进展[J]. *光通信技术*, 2017, 41(1): 45-48.
- Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Research progress of fiber grating hydrophone probe encapsulation technology [J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41(1): 45-48.
- [45] Gu H C, Huang J B, Yu H B. A 4-element fiber laser hydrophone towed linear array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9297: 92972Y.
- [46] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 应用于拖曳线列阵的分布反馈式光纤激光水听器[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0505005.
- Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Distributed feedback fiber laser hydrophone used in towed line arrays[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0505005.
- [47] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿. 低加速度灵敏度的分布反馈式光纤激光水听器研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0310001.
- Tang B, Huang J B, Gu H C. Low acceleration sensitivity DFB fiber laser hydrophone[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0310001.
- [48] 唐波, 孟荻, 黄俊斌. 聚氨酯端面拉伸式光纤激光水听器的声压灵敏度频响特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 330-336.
- Tang B, Meng D, Huang J B. Sound pressure sensitivity frequency response of polyurethane end surface pulling fiber laser hydrophone[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 330-336.
- [49] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水听器拖曳线列阵实验研究[J]. *光子学报*, 2017, 46(4): 0406004.
- Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Experimental research on DFB fiber laser hydrophone towed line array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0406004.
- [50] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 应用于舷侧阵的分布反馈式光纤激光水听器研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0810002.
- Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Distributed feedback fiber laser hydrophone used in flank array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0810002.
- [51] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 带加速度补偿的DFB光纤激光水听器[J]. *光子学报*, 2017, 46(5): 0506003.
- Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. DFB fiber laser hydrophone with acceleration compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(5): 0506003.
- [52] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水听器的声压灵敏度频率响应特性[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0406001.
- Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Frequency response characteristics of sound pressure sensitivity of distributed feedback fiber laser hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0406001.
- [53] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. DFB光纤激光水听器预应力理论与实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0305005.
- Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. Prestressing force in DFB fiber laser hydrophone: theory and experiment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0305005.
- [54] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 基于流固耦合作用的分布反馈式光纤激光水听器[J]. *光子学报*, 2017, 46(2): 0206004.
- Tang B, Huang J B, Gu H C, et al. DFB fiber laser hydrophone based on fluid-structure interaction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(2): 0206004.
- [55] Gu H C, Huang J B, Yao G F, et al. A 64-element fiber laser hydrophone flank array[J]. *Proceedings of SPIE*,

- 2021, 11763: 117639G.
- [56] Huang J B, Gu H C, Tang B, et al. 64-element fiber laser sensing system with interferometric interrogation[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9686: 404-409.
- [57] Souto F. Fibre optic towed array: the high tech compact solution for naval warfare[J]. Annual Conference of the Australian Acoustical Society 2013, Acoustics 2013: Science, Technology and Amenity, 2013: 297-301.
- [58] Kirkendall C, Cole J H, Tveten A B. Progress in fiber optic acoustic and seismic sensing[C]//Proceedings of 18th International Conference on Optical Fiber Sensing (OFS18), October 23-27, 2006, Cancun, Mexico. Washington, D.C.: OSA, 2006: ThB1.
- [59] Kirkendall C. Fiber optic acoustic sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8421: 177-182.
- [60] Hill D, Nash P. Fiber-optic hydrophone array for acoustic surveillance in the littoral[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5780: 1-10.
- [61] 运朝青, 胡正良, 胡永明. 细线拖曳声纳研究进展[J]. 半导体光电, 2012, 33(5): 618-623.
Yun Z Q, Hu Z L, Hu Y M. Research progresses of thin line towed array sonar[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(5): 618-623.
- [62] 郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1106003.
Guo Z, Gao K, Yang H, et al. 20-mm-diameter interferometric hydrophone towed array based on fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106003.
- [63] Lu B, Wu B Y, Gu J F, et al. Distributed optical fiber hydrophone based on Φ -OTDR and its field test[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 3147-3162.
- [64] 孟洲, 陈伟, 王建飞, 等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306009.
Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306009.
- [65] 毛欣, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水听器阵列研究进展[J]. 光通信技术, 2017, 41(8): 21-24.
Mao X, Huang J B, Gu H C, et al. Overview of distributed feedback fiber laser hydrophone array[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(8): 21-24.
- [66] Tikhomirov A, Kolodin A, Harrison J, et al. Batch imprinting of DFB fiber lasers for underwater sensing using excimer KrF laser[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11367: 175-180.
- [67] Foster S B, Cranch G A, Harrison J, et al. Distributed feedback fiber laser strain sensor technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3514-3530.
- [68] R.A.P. 费尔尼霍夫. 水听器: CN104932019B[P]. 2019-06-21.
Peregrin F R A. Hydrophone: CN104932019B[P]. 2019-06-21.
- [69] 王俊, 陈开, 唐靖, 等. 芯轴式干涉型光纤水听器深海探头的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2019(4): 14-16, 27.
Wang J, Chen K, Tang J, et al. Development of deep-sea detector of the mandrel interferometric optical fiber hydrophone[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2019(4): 14-16, 27.
- [70] 申和平, 张橙, 靳湧涛. 一种深海高灵敏度光纤水听器: CN111947766A[P]. 2020-11-17.
Shen H P, Zhang C, Jin Y T. Deep-sea high-sensitivity optical fiber hydrophone: CN111947766A[P]. 2020-11-17.
- [71] 陆祈祯, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 一种耐静压分布反馈式光纤激光水听器探头设计[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 428-434.
Lu Q Z, Huang J B, Gu H C, et al. Design of resistant static pressure probe for DFB fiber laser hydrophone[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(2): 428-434.
- [72] 李雪宾, 张鑫, 简家文. 带有温度补偿的高灵敏度光纤布喇格光栅水听器[J]. 光通信技术, 2020, 44(4): 26-29.
Li X B, Zhang X, Jian J W. High sensitivity fiber Bragg grating hydrophone with temperature compensation[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(4): 26-29.
- [73] Wang H, Guo X, Gao J Y, et al. A fiber DBR laser based vector hydrophone for ultrasonic medical applications[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9522: 95220A.
- [74] Wang Z G, Zhang W T, Huang W Z, et al. A fiber optic accelerometer - magnetometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(9): 1732-1737.
- [75] Miao S, Zhang W T, Song Y, et al. High-resolution random fiber laser acoustic emission sensor[J]. Optics Express, 2020, 28(9): 12699-12708.