

光纤激光水听器研究进展

张文涛 李 芳

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘 要 文章介绍了光纤激光水听器的基本原理, 国内外光纤激光水听器的研究进展以及发展趋势, 同时, 详细介绍了 2005 年以来中国科学院半导体研究所在光纤激光水听器技术方面的研究工作, 包含了标量水听器技术、矢量水听器技术、水听器阵列技术、外场实验及行业应用等。目前, 课题组光纤激光水听器声压灵敏度优于一 140 dB re 1 pm/ μ Pa, 频响区间 20~2000 Hz, 拖曳阵列外径小于 30 mm, 阵元数目 64。我国的光纤激光水听器阵列技术正处于从实验室走向应用的重要阶段, 开展好实用化研究是当务之急。

关键词 光纤激光器; 水听器; 阵列; 拖曳

中图分类号 TB 565 **文献标志码** A

Recent Progresses in Fiber Laser Hydrophone

ZHANG Wentao LI Fang

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract In this paper, the principle of fiber laser hydrophone was presented, and the development of fiber laser hydrophone was described. Researches on fiber laser hydrophone technology of our group were reviewed. It contains technologies on fiber laser hydrophone, fiber laser vector hydrophone, hydrophone array, field tests and application areas. The static pressure sensitivity of fiber laser hydrophone is better than -140 dB re 1 pm/ μ Pa, from 20 Hz to 2000 Hz. The diameter of towed array is thinner than 30 mm, and the number of its elements is up to 64. Fiber laser hydrophone technology is coming into application from laboratory. We believe that the researches on practical application are of great importance.

Keywords fiber laser; hydrophone; array; towed

1 引 言

声波是人类已知的唯一能在海水中远距离传

输的能量形式^[1]。水听器(Hydrophone)是利用在海洋中传播的声波作为信息载体对水下目标进行探测以及实现水下导航、测量和通信的一类传感器。由于水下军事防务上的要求和人类开发利用

收稿日期: 2015-08-04 修回日期: 2015-09-25

基金项目: 国家 863 计划课题(2013AA09A413, 2014AA093406); 中国科学院重大仪器研制项目(ZDYZ2012-1-08-03)

作者简介: 张文涛(通讯作者), 博士, 项目研究员, 硕士研究生导师, 研究方向为光纤传感技术, E-mail: zhangwt@semi.ac.cn; 李芳, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 研究方向为光纤传感技术及光电子及信号处理技术。

海洋资源的迫切需要,水听器技术得到空前的发展。传统的水听器包括电动式、电容式、压电式、驻极体式,等等。

20世纪70年代以来,伴随着光导纤维及光纤通信技术的发展,光纤水听器逐渐成为新一代的水声探测传感器^[2]。与传统水听器相比,其最大优点是对电磁干扰的天然免疫能力。此外,光纤水听器还具有噪声水平低、动态范围大、水下无电、稳定性和可靠性高、易于组成大规模阵列等优点^[3]。现有的光纤水听器包括光强度型、干涉型、偏振型、光栅型等。其中,光纤激光水听器(Fiber Laser Hydrophone, FLH)就是一种光栅型水听器,但由于它的传感元件光纤激光器(又称有源光纤光栅)相比于无源光纤光栅具有高功率和极窄线宽的特点,配合上基于光纤干涉技术的解调方法,它的微弱信号探测能力相比于普通的无源光纤光栅水听器可以提高几个数量级。

压电式水听器和干涉式光纤水听器是目前应用最广泛的水声探测器件。与干涉式光纤水听器相比,压电式水听器技术更加成熟,结构和制作工艺更简单,大规模生产时一致性可以得到相对较好的控制。但是,防漏电、耐高温、长距离传输、动态范围大则是光纤水听器最大的优势。尤其在一些特殊领域(例如高温高压的深井油气勘探领域)有着比压电水听器更为广阔的应用前景。与干涉式光纤水听器相比,光纤激光水听器的最大优势在于易复用,即“串联即成阵”。同时,受弯曲半径影响,干涉式光纤水听器的体积较大,水听器直径通常大于1 cm。而由于光纤激光型水听器结构简单,传感单元仅为一根光纤的尺寸,光纤激光水听器外径可细至4~6 mm。当然,受光纤激光器本身弦振动及系统1/f噪声影响,加速度响应较大、低频段噪声相对较高是目前光纤激光型水听器存在的主要问题之一,有待进一步摸索和改进。

2 光纤激光水听器基本原理

2.1 光纤激光器及光纤激光水听器原理

分布式反馈(Distributed Feed-Back, DFB)光纤激光器是通过在有源光纤上刻写 π 相移光栅进而形成的,其常见制作原理如图1所示。采用高压载氢方法进行有源光纤的增敏,利用248 nm的准分子激光器配合相位掩模板采用遮挡法进行光纤激光器的制作。通过耦合模理论和仿真分析可以得到光纤激光器的 π 相移区、有源区介质参数、激光器温度分布对光纤激光器噪声特性的影响。激光的制作工艺参数主要包括准分子激光器的光强、曝光时间、写入栅区的长度、有源区掺杂浓度、耦合系数等。激光器实物如图2所示。通过工艺参数的控制,光纤激光器的线宽可以控制在10 kHz以内。图3为通过外差法测试激光器的线宽,约为3 kHz。

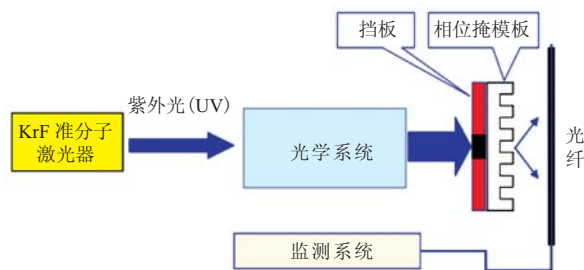


图1 光纤激光器制备原理图

Fig. 1 The schematic of manufacturing DFB fiber laser



图2 光纤激光器实物图

Fig. 2 DFB fiber laser

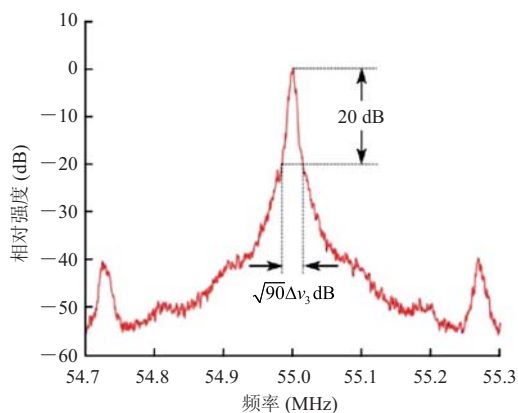


图3 光纤激光器线宽测试结果

Fig. 3 Line width of DFB fiber laser

每一根制作好的光纤激光器都具有特定的输出中心波长。输出中心波长会因光纤激光器受到的外界作用而发生变化, 例如温度、应力、压力等。当声压作用在光纤激光器上时会引起光纤径向及轴向应力, 从而导致输出中心波长的变化, 通过检测中心波长的变化可以还原水声信号, 这就是光纤激光水听器的原理。早期的光纤激光水听器就是直接利用裸露的光纤激光器感受水声

压, 后来经过不断发展, 灵敏度和频响特性逐渐优化, 光纤激光水听器走向实用。

2.2 光纤激光水听器系统

一个完整的光纤激光水听器系统除了包括置于水环境中的光纤激光传感器探头, 还包括船载或放在岸上的光纤激光解调设备, 通常被分别称为“湿端”和“干端”, 二者之间通过光缆连接。在湿端部分, 由于光纤激光器具有波长编码特性, 不同中心波长的光纤激光器可以被封装成不同的水听器单元, 然后串联形成水听器阵列。这样, 就可以仅通过一根光纤同时传输若干光纤水听器采集到的水声信息。在干端部分, 泵浦源模块为光纤激光器串提供泵浦光, 反射回来的光信号先经过非平衡光纤干涉仪进行干涉, 经过密集型波分解复用器将不同波长的光信号分开进入光电探测器阵列, 通过模数转换及特定的解调算法, 承载在光信号中的水声信息就被还原出来了。一个典型的基于相位产生载波 (PGC) 技术的光纤水听器系统如图 4 所示。

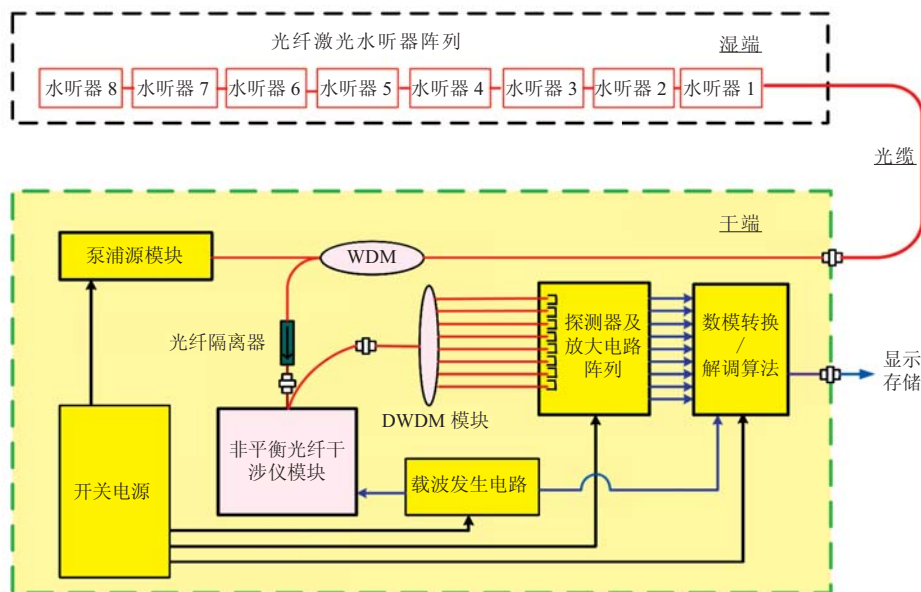


图4 光纤激光水听器系统

Fig. 4 Fiber laser hydrophone system

3 国内外研究进展与趋势

湿端部分的水听器探头作为系统的最前端,其灵敏度、频率响应、稳定性、抗加速度性能等决定了系统能否在复杂的水下环境中探测到有效的水声信号。水听器设计及制造水平,对光纤激光水听器技术最终能否实用化至关重要。许多国家的研究人员都对其进行了深入研究。

国外主要的光纤激光水听器研究单位包括美国海军实验室(NRL)、英国防卫研究局(DERA)、瑞典国防科研机构(FOI)、澳大利亚国防科技组织(DSTO)等,部分研究成果已经成品化,在军事、海洋勘探等领域得到应用。

早在 1992 年,美国海军实验室 Kersey 等^[4]利用臂长差很短的低相干马赫-曾德干涉仪解调 FBG,这种波长-相位转换的方法为高分辨率的光纤激光解调提供了可行的技术途径。1993 年,他们使用该方法对窄线宽的光纤激光器进行解调,获得了高达 $7 \times 10^{-8} \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}} @ 7 \text{ kHz}$ 的波长分辨率^[5]。此后,他们研究用于应变传感器的 4 元光纤激光传感器^[6],为光纤激光水听器的发展提供重要参考。

1999 年,英国国防研究局的 Hill 等^[7]将光纤激光器用作水听器,并分别采用了裸的光纤激光器和弹性材料涂敷的光纤激光器进行水声信号检测。涂敷材料长度为 200 mm,直径为 5 mm。虽然在本次实验中,涂敷的光纤激光器灵敏度相比裸的光纤激光器没有显著提高,但是频率响应更加平坦。2005 年,在第 17 届光纤传感会议上,Hill 等^[8]报道了 4 元光纤激光水听器阵列的海试。

自 2000 年起,瑞典国防科研机构开展了一系列关于光纤激光水听器的研究,目的在于开发一种便于布放的轻型拖曳声纳。为了增加光纤激光水听器的灵敏度,以达到与海洋噪声相当的探测水平,FOI 设计了一种活塞结构的光

纤激光水听器^[9],它的应变/压力灵敏度可以达到 $1.17 \times 10^{-8} \text{ 1/Pa}$,共振频率高于 3 kHz。2005 年,FOI 在 Bjurshagen 开展了基于 4 波长 DFB 光纤激光水听器的海上拖曳实验^[10],并对阵列的流噪声特性进行了测试。

2002 年,澳大利亚国防科技组织(DSTO)与泰雷斯水下系统(Thales Underwater System)公司达成协议,合作深入开发光纤水听器技术,将该技术用于防卫及商用系统。2005 年,DSTO 的 Foster 等^[11]提出了一种机械支撑的光纤激光水听器结构。随后为了进一步适应水下工作环境的静压强,Goodman 等^[12]对该结构进行了改进,通过引入弹性气囊来实现静压平衡。2009 年报道了四基元光纤水听器海试情况^[13],水听器尺寸为 $8 \text{ mm} \times 73 \text{ mm}$,装配后为 $13 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$,用臂差为 30 m 的干涉仪解调得到声压灵敏度为 $-140 \text{ dB re } 1 \text{ pm}/\mu\text{Pa}$ 。该水听器系统的噪声水平与零级海况相当,工作深度大于 30 m,可以成功探测到目标航迹^[14]。2010 年,泰雷斯 Bedwell 等^[15]对光纤激光水听器的透射谱、噪声压、声压灵敏度频响特性、温度特性等进行了细致地研究,传感器一致性是走向应用化的必要途径,同时报道了以 8 元光纤激光水听器为基的拖曳阵列。

澳大利亚新南威尔士大学在光纤激光水听器方面也进行了较多的研究工作^[16,17]。2010 年,Asrul 等报道了增敏的复合腔光纤激光水听器(CCFL),利用了 CCFL 固有的非线性相位条件实现增敏。它由 3 个 FBG 串联构成两个不同长度的腔,一个腔产生响应,就能实现增敏。理论估计,其增敏效果与普通的相比提升 40 dB。实验验证,与普通的相比提升了 14 dB。

在干端的解调技术方面,为了实现高精度的水声探测,一般采用基于光纤干涉仪的方法。这样,对于光纤激光水听器的解调,基本上完全可以采用干涉式水听器的解调技术。所不同的是,

对于光纤激光水听器, 激光器(光源)在湿端, 而光纤干涉仪在干端; 而干涉式光纤水听器恰好相反。基于干涉仪的解调方法主要有相位跟踪法^[5]、外差法^[8]、相位产生载波法^[17]、基于 3×3 耦合器的解调方法等, 波长分辨率可高达 $10^{-7} \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。

在我国, 光纤激光水听器技术主要集中在 2000 年以后, 典型的研制单位包括中国科学院半导体研究所、国防科学技术大学、海军工程大学、山东省科学院激光研究所等, 山东大学、浙江大学、暨南大学等也开展了相关的基础研究工作。现阶段我国大多数研制单位在探头技术及复用技术的基础研究中倾注更多精力。

2009 年, 国防科技大学马丽娜等^[18]报道了平坦频响和高声压灵敏度的 DFB 光纤激光水听器结构。其方案是在裸光纤激光器外套金属壳和聚合物层, 用来感受声压, 两端固定在毛细管上。它的声压灵敏度高达 $102.77 \text{ dB re } 1 \text{ Hz/Pa}$, 2.5 kHz 内频响平坦, 起伏少于 1.5 dB 。

海军工程大学谭波等^[19,20]报道了分布反馈光纤激光水听器封装结构的设计。针对水声探测时频响曲线起伏较大的问题, 设计了一种开孔套管式封装结构、夹层式水听器结构等。通过对 DFB 激光器的封装, 使其张紧后被聚氨酯固定于开孔套筒的中心轴线上, 利用开孔套管的保护作用以及施加于光纤激光器两端的拉力来抑制水声探测过程中频响曲线的起伏。试验结果显示, 光纤激光水听器在 $20 \sim 800 \text{ Hz}$ 的声压灵敏度达到 $-140 \text{ dB re } 1 \text{ pm}/\mu\text{Pa}$ 左右, 灵敏度起伏不高于 $\pm 1.5 \text{ dB}$ 。

2012 年, 山东省科学院 Sun 等^[21]对光纤激光器进行封装, 并研制了基于波分复用的 4 元 DFB 光纤激光水听器阵列。此阵列平坦的声压响应为 $115 \pm 3 \text{ dB re } 1 \text{ Hz/Pa}$, 频率范围 $20 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$ 。

综上所述, 光纤激光水听器技术经过二十年的发展, 逐渐走向成熟, 从实验室基础研究逐渐

扩展为应用研究, 并且开展了有针对性的水下应用试验。一方面, 我们看到了光纤激光水听器有着独特的优势, 相关的应用研究必然会得到更广泛的关注, 有着广阔的应用前景。另一方面, 随着研究的深入, 更多的问题接踵而至, 如系统的稳定性、大规模复用、抗环境干扰等, 成为目前亟待解决的问题。总体来讲, 我国的光纤激光水听器技术发展水平与国际知名的团队相比, 尚有五至十年的差距, 开展好实用化研究是当务之急。

4 中国科学院半导体研究所研究进展

中国科学院半导体研究所在光纤激光水听器基础理论和应用方面都开展了深入的研究, 具体内容涉及分布式反馈光纤激光器的研制、解调技术、水听器的封装技术、阵列技术等多个方面, 完成多次外场试验, 部分研究成果成功转化进军、民领域的行业应用。下面, 本文将总结 2005 年以来中国科学院半导体研究所有关光纤激光水听器相关技术的研究工作, 主要包含声压式水听器技术、矢量水听器技术、水听器阵列技术、外场实验及行业应用等。

4.1 光纤激光声压式水听器

早期的水听器都是感测声场的声压(标量)的, 这其中涉及两项关键技术, 增敏和频响控制。从结构上讲, 对光纤激光水听器而言, 最简单、直接的声压感测方式就是将裸露的光纤激光器直接置于声场之中。声压沿着径向直接作用于光纤, 根据虎克定律, 光纤会产生轴向变形。但是这种传感方式的灵敏度极低。因此, 最先提出了裸光纤激光器包覆有机弹性材料的增敏方式^[7]。这种增敏方法可以极大地增加受压面积, 从而提高传感器的灵敏度。但是涂覆材料的一致性难以保证, 且涂覆半径不能无限制的增加。因此如何进一步提高灵敏度成为该项研究的热点。2008 年, 张文涛等^[22,23]首

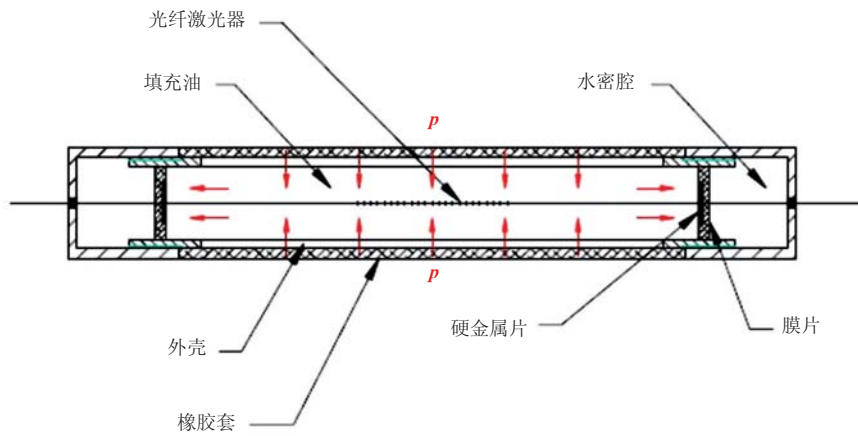


图5 双膜片光纤激光水听器

Fig. 5 Double diaphragm-based fiber laser hydrophone

次提出了基于双膜片结构的光纤激光水听器。如图5和图6所示，光纤激光器的两端分别固定在两个膜片中心，当外界声压通过透声橡胶传入传感器壳体，会同时使得两个膜片反向变形，进而拉伸光纤激光器产生增敏应变。这种增敏方式直接利用声压产生光纤的轴向应变，不再需要通过涂覆材料的泊松效应传递，因此灵敏度有了极大的提高。起初制成的传感器获得 $-163 \text{ dB re } 1 \text{ pm}/\mu\text{Pa}$ 的灵敏度；后续通过参数调整及不断地改进，目前水听器在 $20 \sim 2\,000 \text{ Hz}$ 频响宽度内，灵敏度达 $-140 \text{ dB re } 1 \text{ pm}/\mu\text{Pa}$ 。



图6 光纤激光水听器实物图

Fig. 6 Photo of fiber laser hydrophone

频响控制是声压式水听器的另一项关键技术，这是由于应用于不同环境的水听器需要相应

的频响区间、光纤水听器需要解决抗高频混叠问题、水听器的一致性与频响控制密切相关。机械法频响控制是一种从根本上改善频响的方法，具有成本低、信噪比高的特点。2011年，Zhang等^[24]提出了一种具有低通滤波能力的光纤激光水听器。如图7所示，它是在膜片式光纤激光水听器基础上添加了声低通滤波结构实现的频响变换，利用电声理论可以对传感器的频响行为给出详细解释。

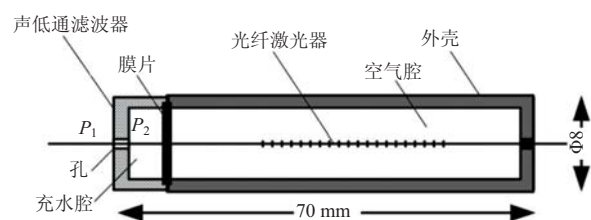


图7 具有低通滤波特点的光纤激光水听器

Fig. 7 Fiber laser hydrophone with an acoustic low-pass filter

同年，通过对声学共振腔的改进设计，Zhang等^[25]提出了具有带通滤波功能的光纤激光水听器(图8)，这在水听器领域具有很大的实用价值。如图9所示，它的频率响应具有明显的带通滤波特点，可以在 $100 \sim 400 \text{ Hz}$ 形成平坦的响应。

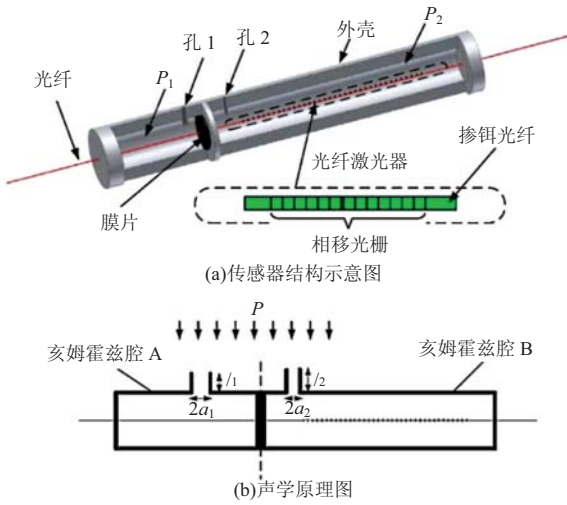


图 8 具有带通滤波特点的光纤激光水听器

Fig. 8 Fiber laser hydrophone with an acoustic band-pass filter

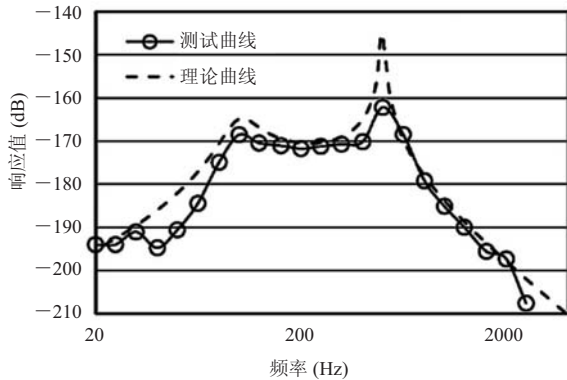


图 9 带通光纤激光水听器频响结果

Fig. 9 Frequency response of a band-pass fiber laser hydrophone

4.2 光纤激光矢量水听器

声场除了声压大小的标量信息, 还包括声矢量信息, 即声压梯度、质点振速、质点加速度等, 可以探测这些声矢量参数的水听器统称为矢量水听器。矢量水听器的重要应用之一就是低频目标定位。军事上, 随着目标频率的降低, 所要求的声压水听器阵列尺寸会急剧增大, 当目标频率为 10 Hz 以下时, 用到的标量水听器阵列就须长达数百米甚至上千米。尤其在浅海探测时, 地

形和水深的限制下阵列尺寸越大就会给工程带来越大的困难。矢量水听器具有单元定向、线阵列定位的特点, 在水声工程领域具有良好的应用前景, 是 20 世纪 80 年代以来水声领域的研究热点之一。

中国科学院半导体研究所主要开展了基于光纤激光器的同振型质点加速度矢量水听器的研究。通过光纤激光加速度计来测量声场中质点的振动加速度。采用适当的悬挂系统使矢量水听器在声场中与质点保持“同振”。2011 年, 马睿等^[26,27]先后报道了基于“V”型曲折梁结构的二维细长型光纤激光矢量水听器(图 10)。基于“V”型曲折梁的高灵敏度换能结构, 根据弹性力学与振动理论给出了该结构的灵敏度和谐振频率, 并与现有的一些结构进行了对比, 归纳出影响灵敏度与谐振频率的关键因素, 探讨了在不降低谐振频率的前提下提高灵敏度的方法。建立了该曲折梁结构的三维有限元仿真模型。由仿真得出, 该结构的光纤激光矢量水听器在 250 Hz 的谐振频率下可达 81.3 pm/g 的灵敏度。二维矢量水听器的实验测试结果显示, 它在 x、y 两个方向上获得的加速度灵敏度分别为 39.2 pm/g 和 53.2 pm/g, 指向性响应超过 20 dB。

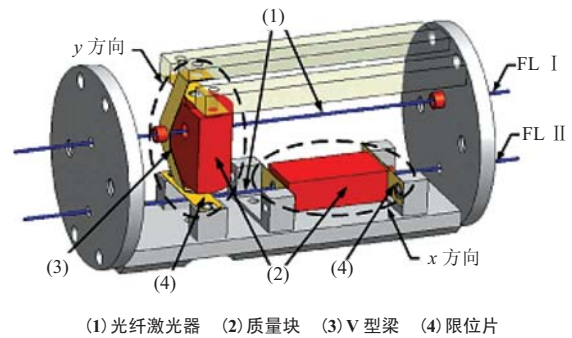


图 10 二维光纤激光矢量水听器结构

Fig. 10 The structure of two axis fiber laser vector hydrophone

2012 年, Zhang 等^[28]首次详细报道了三维细长型光纤激光矢量水听器, 如图 11 所示。外径

小于 5 cm, 通过对各矢量方向的测试, 该传感器的指向性响应超过 30 dB(图 12)。此种结构传感器具有细长型、光路简单、易成阵、指向性好等优点, 具有较高的实用价值。

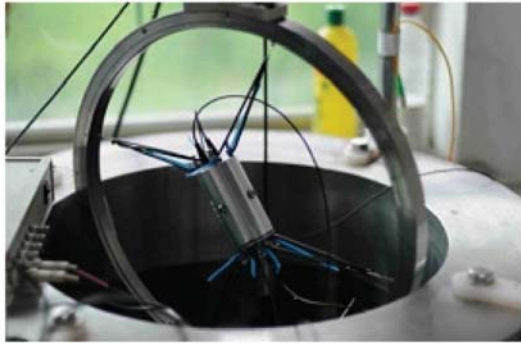


图 11 三维光纤激光矢量水听器

Fig. 11 Three axis fiber laser vector hydrophone

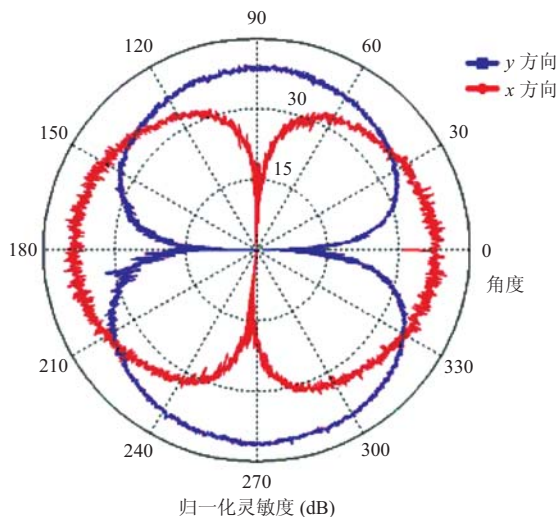


图 12 矢量水听器周向指向性测试结果(x和y方向)

Fig. 12 Directivity test results of x axis and y axis of fiber vector hydrophone

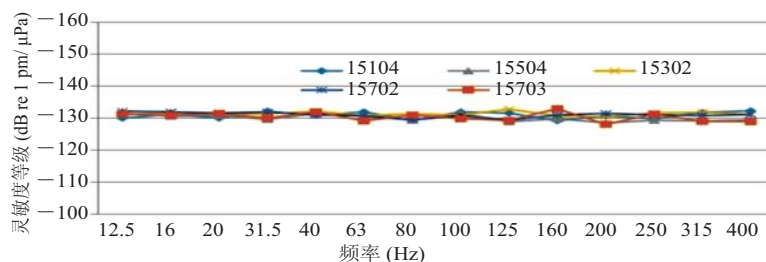


图 14 同一批次光纤激光水听器频率响应

Fig. 14 Frequency responses of a batch of fiber laser hydrophones

4.3 光纤激光水听器阵列技术

2007年起, 半导体研究所课题组逐渐开展光纤激光水听器(标量)阵列技术的研究, 主要围绕三个方面进行: 水听器的一致性; 阵列的功率均衡问题; 光纤激光水听器的成阵工艺。首要攻克的难题是传感器频响一致性及相位一致性控制。进行了大批量的封装试验(图 13), 经过多次的结构优化和封装工艺的不断改善, 目前的光纤激光水听器小批量(20支)灵敏度差异小于 3 dB, 单支水听器自身频响优于 ± 1.5 dB(图 14), 相频一致性优于 5° , 单支水听器自身同频点相位长期稳定性优于 2° (图 15)。



图 13 光纤激光水听器批量封装

Fig. 13 Batches of manufactured fiber laser hydrophones

功率均衡是光纤激光水听器阵列技术中独有的一个关键技术。对于干涉式光纤水听器阵列, 每个水听器的光功率可以通过分束器的耦合比来控制。但是对于光纤激光器阵列而言, 每个激光器离泵浦光源的远近不同, 获得的泵浦光能量

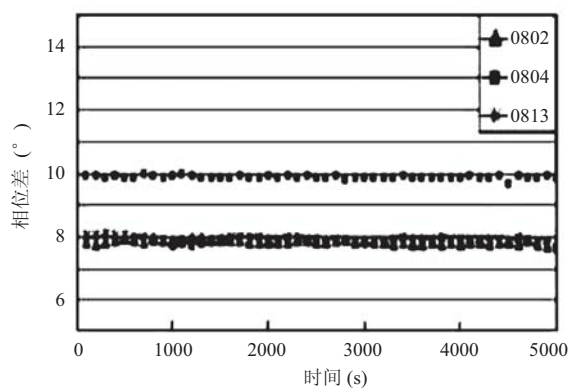


图 15 光纤激光水听器相频响应测试结果

Fig. 15 Phase frequency responses of fiber laser hydrophones

不同, 因此激光功率也会有差异, 这就会影响单根光纤串联水听器的数目。早在 2008 年, 课题组就实现了 16 元光纤激光器的串联复用。然而, 要想制成光纤激光水听器阵缆, 功率均衡是重要的评价指标之一。由于光纤激光器制作工艺的差异性、传感器封装过程中光功率损耗的随机性, 以及次序匹配、熔接损耗等因素影响, 随机串联的 8 元光纤激光水听器阵列的最大功率差异可达到 15~20 dB。过大的光功率差异对解调结果的准确度及各通道动态范围是有影响的。所以, 通过长期对光纤激光器制作工艺、光纤水听器封装工艺及串联熔接工艺的摸索和改进, 现制成 8 元光纤激光水听器阵缆最大功率差异小于 5 dB (图 16), 这样的功率差异性在实际应用中就几乎没有影响了。

一个光纤激光水听器湿端缆结构通常包括水声传感段及前后减振段, 如图 17 所示。水听器

设置在水声传感段, 外套为 PU 管, 内部利用支撑件等间距固定水听器。缆内充油, 一则为了保障透声性, 二则调整缆密度与水密度近似。水声传感段前后分别设有前减振段和后减振段, 防止水听器阵缆在拖曳过程中的大幅抖动, 保障水声传感段平直滑行。

目前, 课题组已经研制的光纤激光水听器阵列为 64 元, 道间距 1~5 m, 阵列外径小于 30 mm, 阵列噪声小于 55 dB (ref: $1 \mu\text{Pa} / \sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ kHz}$)。

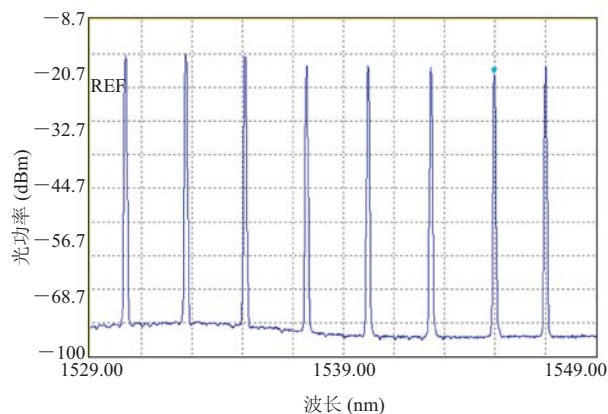


图 16 8 元光纤激光水听器阵缆激光光谱

Fig. 16 Spectrum of 8-element fiber laser hydrophone array

4.4 光纤激光水听器及阵列外场试验

2009 年, 半导体研究所联合中国科学院声学研究所浙江千岛湖进行了 8 元阵光纤激光水听器阵与 16 元压电水听器阵的对比湖试^[29]。湖试包括静态测试与拖曳测试。在静态测试中, 光纤激光水听器阵列与压电水听器阵列 (道间距均为 1 m) 并排放置, 水下声源距离阵列 3 km, 测试结果如图 18 所示。对于同一信号的测试结果, 光纤

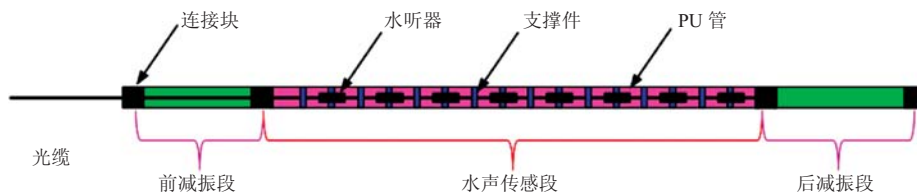


图 17 光纤激光水听器阵缆结构原理图

Fig. 17 Schematic of fiber laser hydrophone array

水听器获得更优的功率谱密度,更平坦的噪声频响,更高的信噪比。

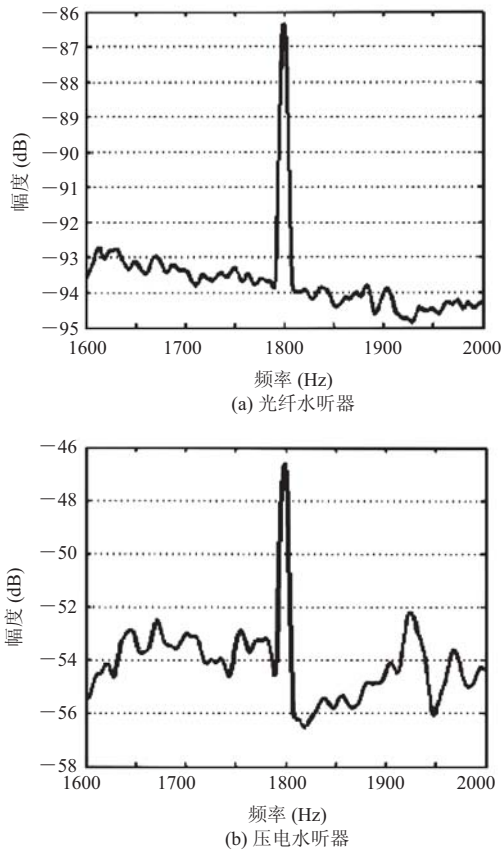


图 18 光纤水听器和压电水听器的功率谱密度

Fig. 18 The power spectral densities of fiber hydrophone and piezoelectric hydrophone

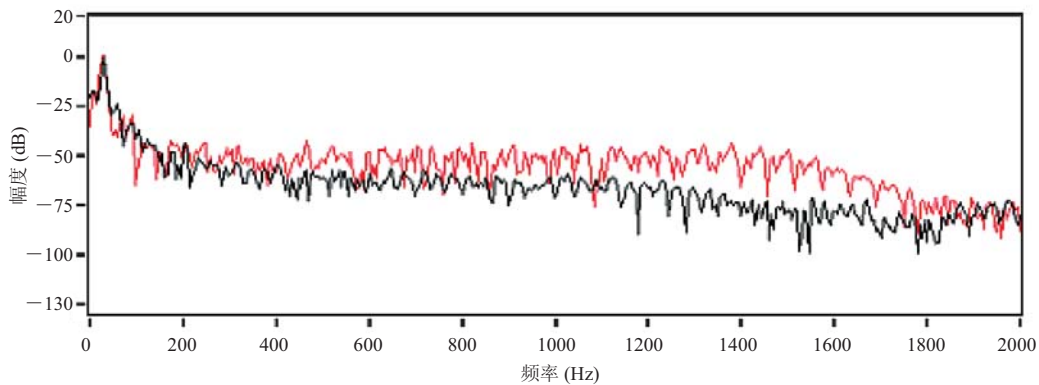


图 20 光纤激光水听器阵列流噪声响应

Fig. 20 The flow noise of towed fiber laser hydrophone array

在拖曳试验中,利用光纤激光水听器阵列对声源进行判向。图 19 为光纤激光水听器阵列在 4 节拖曳速度下的方位历程图,可以看出,获得的方位判向较为清晰。

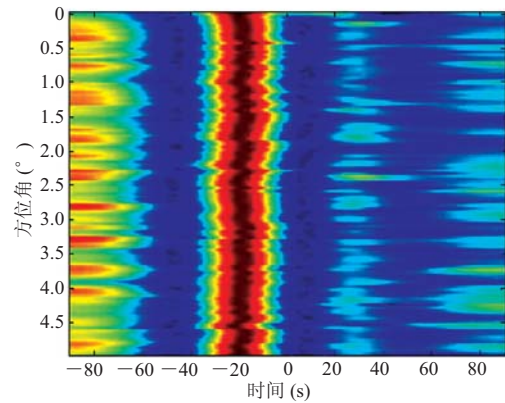


图 19 光纤激光水听器阵列在 4 节拖曳速度下的方位历程图

Fig. 19 Time-bearing tracks with fiber laser hydrophone array

2013 年,为研究光纤水听器阵列的流噪声特性,再次在浙江千岛湖进行了不同航速下的拖曳测试^[30]。试验获得了清晰的流噪声响应,为拖曳阵列的应用和改进提供了重要参考。如图 20 所示,黑色线数据为水下静止时的频率响应谱,红色线数据为 3 节速度下的拖曳响应。

2013 年和 2014 年,先后两次搭乘南海海洋研究所“实验 2 号”科考船,分别在南海海域

对 4 元光纤激光水听器阵缆和 8 元光纤激光水听器阵缆进行了海上测试, 获得了宝贵的试验结果(图 21 和图 22)。



图 21 2013 年 4 元阵缆海上试验

Fig. 21 Sea trial of 4-element fiber laser hydrophone in 2013

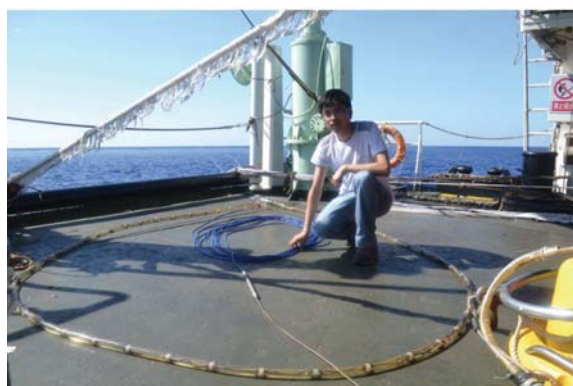


图 22 2014 年 8 元阵缆海上试验

Fig. 22 Sea trial of 8-element fiber laser hydrophone in 2014

4.5 行业应用

在石油勘探领域, 光纤激光水听器可以应用于地震波 P 波的监测, 经过特殊封装后可制成光纤激光检波器。其无漏电、耐高温、耐高压、长距离传输的优势在井下石油勘探(如垂直地震剖面)中尤为突出。2010 年, 课题组在辽河油田进行了光纤激光检波器的 3 000 m 油井测试^[31,32]。试验采用 4 元光纤激光检波器列, 与石油行业传统的动圈式电学传感器同时下井对比(图 23)。在 1 250 m 井深光纤激光检波器和动圈式检波器同

时探测到了地震波信号。通过 5~40 Hz 带通滤波, 可以看出, 光纤检波器比动圈式检波器具有更高的相位一致性和清晰度(图 24)。目前, 课题组已经成功研制了 16 元光纤激光检波器(道间距 10 m, 可定制)并在油气勘探行业中得到应用。



图 23 辽河油田井下试验照片

Fig. 23 Photograph of field test site in Liaohe oil field

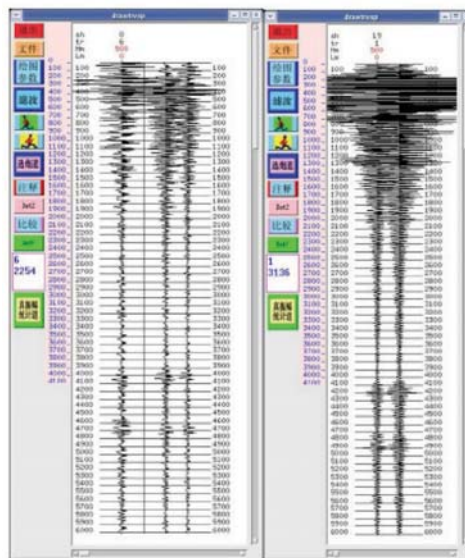


图 24 光纤激光检波器(左)和动圈式检波器(右)测试结果

Fig. 24 Testing results of fiber laser geophones (left) and moving-coil geophones (right)

在地震监测领域, 可将光纤激光水听器集成到光纤激光地震仪中, 在液体介质下可用作 P 波的监测或者地声分量的监测。事实上, 通过改变光纤激光器的封装方式, 光纤激光传感器也可用于 S 波的监测。2011 年, 课题组在云南省普洱市

进行了钻孔地震试验^[33]。研制的光纤激光地震仪包含有地震分量、地声分量，与电学地震仪同时下井对比(图 25)，下井深度 400 m。下井后的第二天就捕获到了当地思茅地区里氏 1.2 级地震，



图 25 光纤钻孔地震仪下井照片

Fig. 25 Photograph of putting fiber bore-hole seismograph down

如图 26，可明显看出光纤激光地震仪的信噪比优于电学传感器。

5 结 论

本文阐述了光纤激光水听器的基本原理，介绍了国内外光纤激光水听器的研究进展以及发展趋势，同时，详细列举了 2005 年以来中国科学院半导体研究所在光纤激光水听器技术方面的研究工作。未来的十至二十年是光纤激光水听器阵列技术从实验室走向应用的重要阶段，世界范围内的竞争重点将转移到如何大规模提高阵元数量，如何解决百公里级的长距离传输问题，如何降低干端系统复杂度，以期在实用中得到更高的目标分辨能力。石油勘探、地震监测等已经被证实是光纤激光水听器技术的优势领域。随着研究

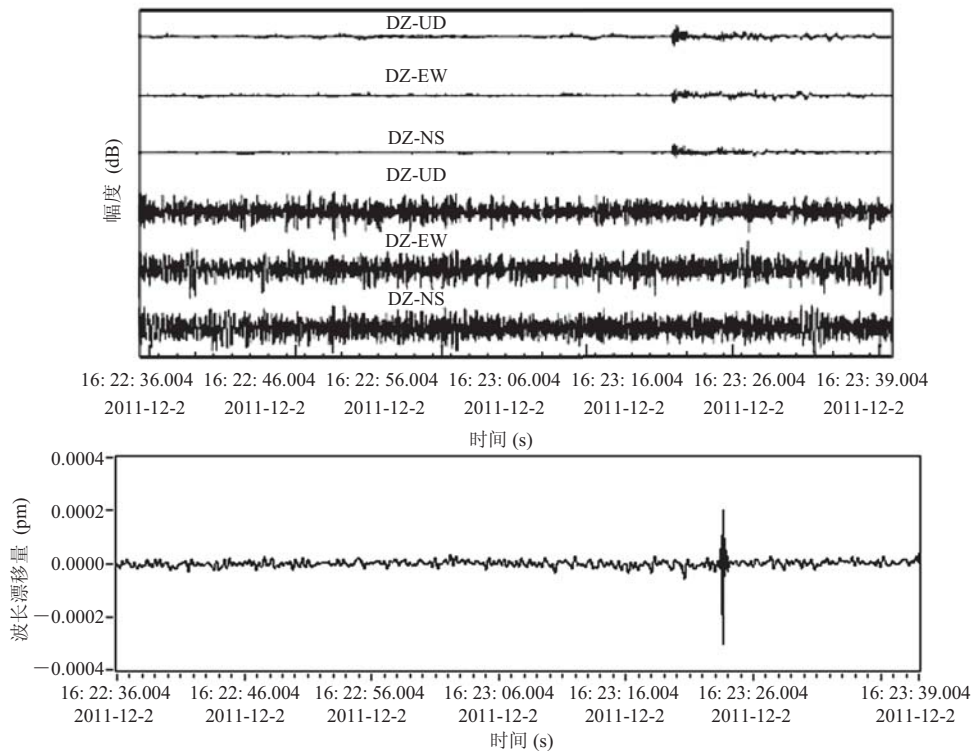


图 26 电学地震仪(上)和光纤激光地震仪(下)记录结果

Fig. 26 The recorded data of electronic seismometer (up) and FLS (down)

的进一步深入、工程化技术进一步成熟, 光纤激光水听器必将在更多合适的领域中发挥作用。

6 致 谢

感谢中国科学院知识创新工程(2005IS01、KGCX2-YW-113、ISCAS2008T05), 中国科学院装备研制项目(YZ200901), 国家 863 计划(2007AA03Z415、2009AA11Z212、2013AA09A413), 国家自然科学基金(41074128、61077059), 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2012-1-08)的支持。特别感谢中国科学院半导体研究所刘育梁研究员在光纤激光水听器方面的前瞻布局。感谢半导体研究所光电系统实验室光纤传感课题组的研究人员多年来在光纤激光水听器方向的共同努力, 他们中的很多人已经离开了半导体研究所, 但正是所有人的创新和努力才取得了本文中的成果。他们是: 刘丽辉、王永杰、肖浩、徐团伟、齐龙舟、吴悦峰、何俊、冯磊、张发祥、王延、马睿、宋晓燕、王林、于源、黄稳柱、武健、罗英波、王兆刚(排名不分先后)。感谢王兆刚对本文的整理和编辑。

参 考 文 献

- [1] 余华兵, 孙长瑜, 李启虎. 第四讲探潜先锋-拖曳线列阵声纳 [J]. 物理, 2006, 35(5): 420-423.
- [2] Bucaro JA, Dardy HD, Carome EF, et al. Fiber optic hydrophone [J]. The Journal of the Acoustic Society of America, 1977, 62(5): 1302-1304.
- [3] Lasky M, Doolittle RD, Simmons BD, et al. Recent progresses in towed hydrophone array research [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 374-387.
- [4] Kersey AD, Berkoff TA, Morey WW. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. Electronics Letters, 1992, 28(3): 236-238.
- [5] Koo KP, Kersey AD. Fiber laser sensor with ultrahigh strain resolution using interferometric interrogation [J]. Electronics Letters, 1995, 31(14): 1180-1182.
- [6] Koo KP, Kersey AD. Noise and cross talk of a 4-element serial fiber laser sensor array [C] // OFC'96, 1996: 266-267.
- [7] Hill DJ, Nash PJ, Hawker SD, et al. Progress toward an ultra thin optical hydrophone array [C] // European Workshop on Optical Fiber Sensors. International Society for Optics and Photonics, 1998: 301-304.
- [8] Hill DJ, Hodder B, De Freitas J, et al. DFB fibre-laser sensor developments [C] // 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2005: 904.
- [9] Hansen LV, Kullander F. Modeling of hydrophone based on a DFB fiber laser [J]. XXI ICTAM, 2004, 4: 15-21.
- [10] Kullander F, Vahlberg C, Andersson M. Fiber Laser Based Slap Sonar 2006 [M]. Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2006.
- [11] Foster S, Tikhomirov A, Van Velzen J. Towards a high performance fiber laser hydrophone [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1335-1342.
- [12] Goodman S, Tikhomirov A, Foster S. Pressure compensated distributed feedback fiber laser hydrophone [C] // 19th International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2008: 700426.
- [13] Goodman S, Foster S, Van Velzen J, et al. Field demonstration of a DFB fiber laser hydrophone seabed array in Jervis Bay, Australia [C] // 20th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2009: 75034L.
- [14] Goodman S, Tikhomirov A, Foster S. Pressure compensated distributed feedback fiber laser hydrophone [C] // 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, 2008: 700426.
- [15] Bedwell IR, Jones DR. Fiber laser sensor hydrophone performance [C] // Oceans 2010 IEEE-Sydney, 2010: 1-5.
- [16] Azmi AI, Sen D, Peng GD. Sensitivity enhancement

- in composite cavity fiber laser hydrophone [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(12): 1544-1850.
- [17] Azmi AI, Leung I, Chen XB, et al. Fiber laser based hydrophone systems [J]. *Photonics Sensors*, 2011, 1(3): 210-221.
- [18] Ma L, Hu YM, Luo Hong, et al. DFB fiber laser hydrophone with flat frequency response and enhanced acoustic pressure sensitivity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(17): 1280-1282.
- [19] 谭波, 黄俊斌. 分布反馈光纤激光水听器封装结构的设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1691-1695.
- [20] 谭波, 严平, 黄俊斌. 夹层式光纤激光水听器探头优化设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(2): 024120.
- [21] Sun ZH, Min L, Zhang XL, et al. High performance four-element DFB fiber laser hydrophone array system [C] // *Advanced Sensor Systems and Applications V*, 2012: 856107.
- [22] Zhang WT, Li F, Liu YL, et al. Ultrathin FBG pressure sensor with enhanced responsivity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(19): 1553-1555.
- [23] Zhang WT, Liu YL, Li F, et al. Fiber laser hydrophone based on double diaphragms: theory and experiment [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(10): 1349-1352.
- [24] Zhang FX, Zhang WT, Li F, et al. DFB fiber laser hydrophone with an acoustic low-pass filter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(17): 1264-1266.
- [25] Zhang FX, Zhang WT, Li F, et al. DFB fiber laser hydrophone with band-pass response [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4320-4322.
- [26] 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.
- [27] Ma R, Zhang WT, Li F. Two-axis slim fiber laser vector hydrophone [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(6): 335-337.
- [28] Zhang WT, Ma R, Li F. High performance ultrathin fiber laser vector hydrophone [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1196-1200.
- [29] 杨光, 张祥, 李淑秋, 等. 压电水听器线阵与 DFB 光纤水听器线阵的分析 [J]. *声学技术*, 2011, 30(3): 294-299.
- [30] Zhang WT, Huang WZ, Luo YB, et al. Field test of the flow noise of fiber laser hydrophone array [C] // *23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2014: 91579P.
- [31] Zhang WT, Li F, Liu YL. Field test of an in-well fiber laser seismic system [J]. *Sensor Letters*, 2012, 10(7): 1414-1417.
- [32] Zhang WT, Li F, Liu YL. Field test of an in-well fiber laser geophone array [C] // *22nd International Conference on Optical Fiber Sensor*, 2012: 84212B.
- [33] Zhang WT, Huang WZ, Wu J, et al. Deep-well seismic monitoring based on fiber laser seismometer [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(S2): 22802.