

# 用于水升华器监测的光纤声振动传感器研究

赵 鹏<sup>1</sup> 刘铁根<sup>1</sup> 江俊峰<sup>1\*</sup> 张景川<sup>2</sup> 刘 琨<sup>1</sup> 王 双<sup>1</sup> 尹金德<sup>1</sup> 宋璐瑶<sup>1</sup> 吴 凡<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电子信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)  
(<sup>2</sup> 北京卫星环境工程研究所, 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100049)

**摘要** 针对水升华器工作监测要求, 基于 Fabry-Perot 干涉微腔研制了一种光纤声振动传感器。将耐低温聚合物薄膜材料以周边拉伸固定的方式制作成超薄膜片, 膜片厚度为 1.2  $\mu\text{m}$ , 作为探测声振动信息的敏感部件和干涉微腔的反射面。传感器灵敏度达到 93 mV/Pa, 线性度为 99.8%, 在 1~20 kHz 范围内具有较平坦的频率响应。利用设计的光纤声振动传感器在空间环境模拟器中进行了水升华器监测实验, 结果表明该传感器在温度为 77 K 的空间冷黑环境中可以存活, 能够实时探测到水升华器喷冰故障所产生的声振动信号。

**关键词** 传感器; 光纤法布里-珀罗传感器; 声振动; 水升华器

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0106003

## Fiber Optic Acoustic Vibration Sensor for the Monitoring of Water Sublimator

Zhao Peng<sup>1</sup> Liu Tiegen<sup>1</sup> Jiang Junfeng<sup>1</sup> Zhang Jingchuan<sup>2</sup> Liu Kun<sup>1</sup>  
Wang Shuang<sup>1</sup> Yin Jinde<sup>1</sup> Song Luyao<sup>1</sup> Wu Fan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>2</sup> Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Key Laboratory, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100049, China

**Abstract** For the monitoring requirements of water sublimator, a fiber optic acoustic vibration sensor is developed based on the Fabry-Perot interference microcavity. The low temperature resistant polymer film material is used to make a ultra-thin diaphragm by stretching around as the sensitive components to detect acoustic vibration information and reflecting surface of interference microcavity. The diaphragm is 1.2  $\mu\text{m}$  in thickness. The sensitivity of system is 93 mV/Pa, and the linearity is up to 99.8%. A relatively flat frequency response is achieved from 1 kHz to 20 kHz. The monitoring experiment of water sublimator in the space environment simulator show that the sensor can survive in space environment where the temperature is below 77 K, and detect the real-time acoustic vibration signals generated by spewing ice when the water sublimator is going wrong.

**Key words** sensors; fiber Fabry-Perot sensor; acoustic vibration; water sublimator

**OCIS codes** 060.2370; 120.2230; 050.2230

## 1 引 言

水升华器是舱外航天服热控系统的主要部件, 用以排散舱外活动时航天员新陈代谢所产生的热

量<sup>[1]</sup>。水升华器工作中若出现喷冰现象, 则可能堵塞输送水蒸气的通道, 造成热控系统故障, 无法调节温度、压力和湿度。由于关系到航天员的生命安全

**收稿日期**: 2013-07-05; **收到修改稿日期**: 2013-08-09

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(11004150, 61227011, 61108070)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、天津市科技支撑计划(11ZCKFGX01900)、天津市自然科学基金(13JCYBJC162000)

**作者简介**: 赵 鹏(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhaopengwork000@gmail.com

**导师简介**: 刘铁根(1955—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤传感技术、光电检测技术、嵌入式图像检测技术等方面的研究。

E-mail: tgliu@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn

保障,且工作过程复杂,因此监测水升华器的工作状态,有助于对其内部工作过程进行分析判断,提高其可靠性。水升华器的工作状态可以从声振动的方式判断,然而由于航天冷黑环境、空间电磁辐射严重,传统电学传感器难以满足要求。光纤传感器具有抗电磁干扰、体积小、灵敏度高优点,非常适合应用于航天等特殊环境<sup>[2-5]</sup>。

研究人员在光纤声振动传感方法和应用方面开展了大量研究。Li 等<sup>[6]</sup>对反射光强耦合型光纤麦克风进行了理论模型分析;许秉时等<sup>[7]</sup>采用双光纤反射光强耦合结构的光纤声传感器进行声波隔体探测;Sun 等<sup>[8]</sup>研究了一种多模-单模-多模结构的光强耦合型光纤声振动传感器;曹家年等<sup>[9]</sup>基于 Mach-Zehnder 干涉结构进行光纤水听器研究;吴艳群等<sup>[10]</sup>研究了基于 Michelson 干涉结构的光纤矢量水听器;王永杰等<sup>[11]</sup>基于 Michelson 干涉仪原理研究了用于直升机探测的光纤声传感器;Trinidad-García 等<sup>[12]</sup>基于 Sagnac 干涉仪结构研究了声振动引起的光纤双折射规律变化;李东明等<sup>[13-14]</sup>基于光

纤光栅研究了一种加速度抵消型光纤光栅水听器,并且进行了增敏结构的研究。基于法布里-珀罗(F-P)干涉结构,Wang 等<sup>[15]</sup>研究了用于光声光谱测量的传感器,Konle 等<sup>[16]</sup>研究了一种采用铝箔和不锈钢箔作为膜片用于燃烧室热声探测的光纤麦克风;Akkaya 等<sup>[17]</sup>设计了具有光子晶体结构的硅膜片,提高了传感器灵敏度和热稳定性。但目前针对航天低温工作环境下的光纤声振动传感研究较少,基于 F-P 干涉结构的光纤声振动传感器灵敏度高、结构简单,本文针对水升华器工作过程和工作环境,研制了一种基于 F-P 干涉微腔结构的光纤声振动传感器,可用于在航天冷黑环境下监测水升华器的工作状态。

## 2 光纤声振动传感器

### 2.1 工作原理

水升华器工作时喷冰所产生的声振动具有强度小、变化快的特点,针对这一需求所设计的膜片式光纤 F-P 声振动传感器结构如图 1 所示。

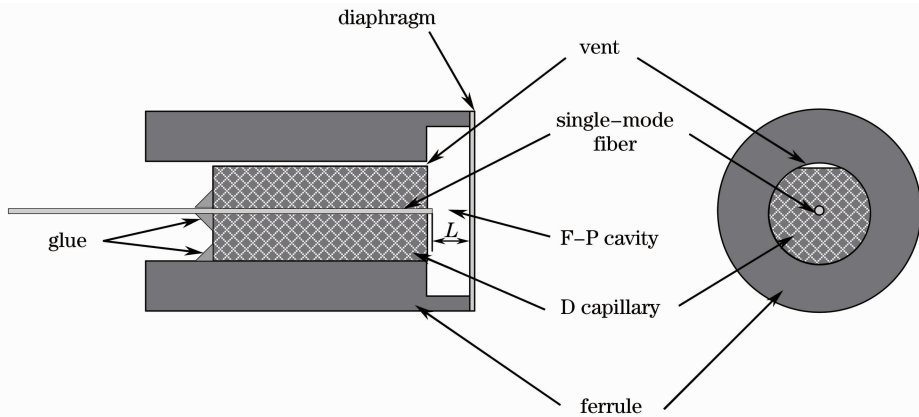


图 1 光纤声振动传感器结构

Fig. 1 Configuration of fiber acoustic vibration sensor

使用石英套管和 D 型毛细管作为传感器主体,套管与 D 型毛细管中间构成一个垂直通气孔,将微腔与外界环境连通,用以平衡微腔内外压强,避免腔内的封闭气体造成阻尼影响。超薄膜片与单模光纤垂直端面构成了腔长为  $L$  的 F-P 微腔结构,利用超薄膜片感受声振动信号,并转化成 F-P 微腔腔长变化信号,实现对水升华器工作状态的监测。由于界面反射率低,F-P 多光束干涉可近似为双光束干涉:

$$I_0 = 2R \left( 1 - \cos \frac{4\pi L}{\lambda} \right) I_i, \quad (1)$$

式中  $I_i$  为入射光的光强, $I_0$  为传感器反射输出的信号光强, $R$  为界面反射率, $L$  为 F-P 微腔腔长, $\lambda$  为

入射光的中心波长。

解调时采用中心波长为 1550 nm 的窄线宽光源,采用干涉-强度解调的方式,通过确定初始腔长使传感器工作在(1)式所决定的线性区,从而根据腔长  $L$  与输出光强  $I_0$  的线性关系快速直观地得到声振动信息。

### 2.2 超薄膜片的振动特性

超薄膜片作为光纤声振动传感器的敏感部件,直接影响到传感器的性能。超薄膜片采用周边拉伸固定方式,如图 2 所示,将超薄膜片近似看作刚性薄板进行分析。

在均匀声压  $P \cos \omega t$  的作用下,超薄膜片将做

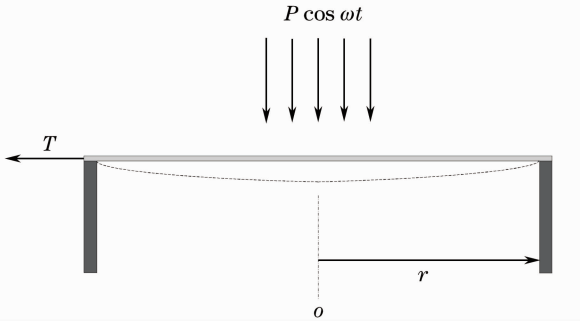


图2 周边拉伸式超薄膜片

Fig. 2 Ultra-thin diaphragm by stretching around

受迫振动,其幅度响应可表示为

$$A = \frac{P}{\sigma} [(\omega_0^2 - \omega_f^2)^2 + 4\omega_f^2 \epsilon^2]^{-1/2}, \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为膜片材料的面密度,  $\omega_0$  为膜片的固有振动频率,  $\omega_f$  为声振动源频率,  $\epsilon$  为阻尼系数。

由(2)式可知,选取面密度较小的材料可获得较大的形变量,提高传感器分辨率。当振动源频率  $\omega_f = \sqrt{\omega_0^2 - 2\epsilon^2}$  时,膜片产生共振。若环境阻尼很小,可忽略不计,则谐振频率为  $\omega_f = \omega_0$ 。

膜片的固有谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{2.4}{r} \sqrt{\frac{T}{\sigma}}, \quad (3)$$

式中  $r$  为膜片有效半径,  $T$  为膜片拉伸预张力。固有谐振频率可通过膜片半径、膜片预张力和材料面密度调节。

声振动频率范围一般在 10 kHz 以下,而为了保证探测到的振动信息无失真传递,需要在测量频率范围内保证一个较为平坦的频率响应,因此需要将膜片的谐振频率设置在测量频率上限的 3~5 倍。为了得到良好的信号分辨率和平坦的频率响应,同时满足航天器冷黑工作环境的要求,选取一种在液氮温度(77 K)下仍有良好机械性能的聚合物薄膜,其面密度仅为 1.62 g/m<sup>2</sup>。依据(3)式,图 3 显示了采用该材料的聚合物膜片谐振频率随拉伸预张力和半径变化。

当预张力  $T$  很小时,膜片退化为周边固定式,此时谐振频率低,即使膜片半径取值为 1 mm,谐振频率点仍在 20 kHz 以下,理想测量频率上限仅为 7 kHz。为进一步提高谐振频率点,只能继续减小膜片半径,但膜片受压形变量将会随之大幅减小,即传感器信号分辨率降低,给微弱声振动信号的拾取带来困难。而随着预张力的增大,谐振频率点位置将有很好的改善。因此,将聚合物薄膜施加一定预

张力固定,不仅可以获得较高的理想谐振频率位置,而且能使光纤声振动传感器微型化,同时保证了传感器良好的信号分辨率。

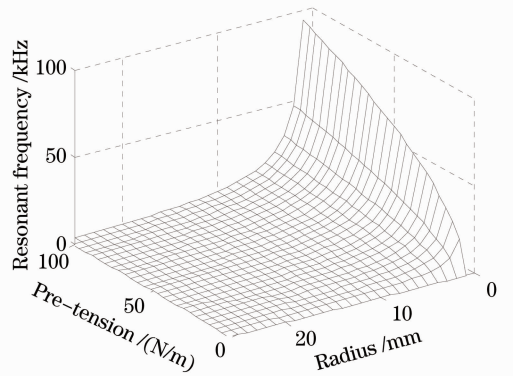


图3 膜片谐振频率随半径和预张力的变化

Fig. 3 Resonant frequency of diaphragm versus radius and pre-tension

### 3 光纤声振动传感器的实验结果

#### 3.1 光纤声振动传感器性能测试

实验中制作的光纤声振动传感器如图 4 所示,选取膜片的半径为 1.4 mm,厚度为 1.2 μm。采用扬声器、分贝计和专业测量麦克风对光纤声振动传感器进行性能测试,扬声器采用信号发生器驱动作为声振动信号源,分贝计和专业测量麦克风 E302 作为标准接收设备,与光纤声振动传感器的测试结果进行对比。

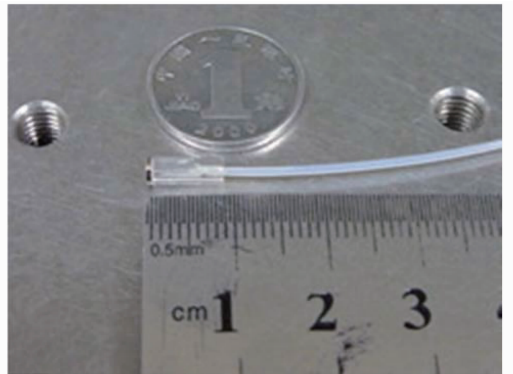


图4 光纤声振动传感器实物图

Fig. 4 Fiber acoustic vibration sensor photo

图 5(a)显示传感器输出信号归一化波形与信号源波形具有很好的一致性,为便于观察波形,将信号源波形向上平移 0.5。图 5(b)是传感器在频率为 1 kHz 声振动源下的幅值响应测试结果,灵敏度  $S$  达到 93.10 mV/Pa,线性度  $R$  为 99.8%。利用信号发生器驱动扬声器发生扫频声振动信号,扫频信号是频率随时间线性连续变化的测试信号,由于扬声

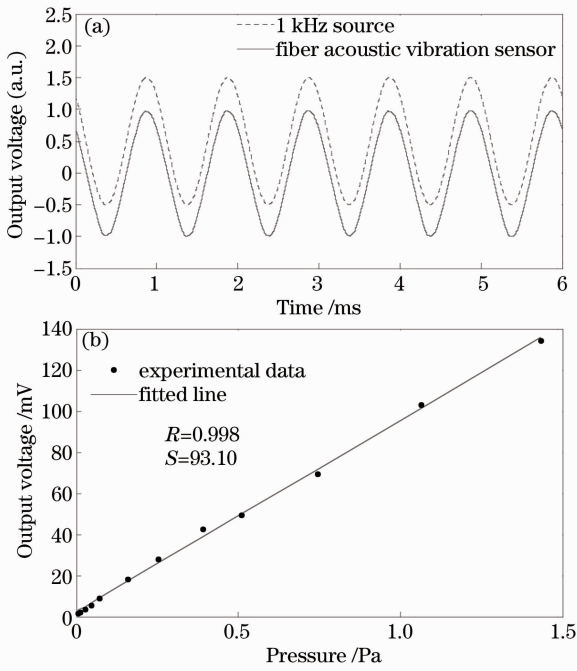


图 5 (a) 传感器信号输出归一化波形与信号源归一化波形对比; (b) 1 kHz 信号下传感器幅度响应

Fig. 5 (a) Comparison between the waveform of the fiber acoustic vibration sensor and the normalized waveform of signal source; (b) amplitude response of the fiber acoustic vibration sensor at 1 kHz

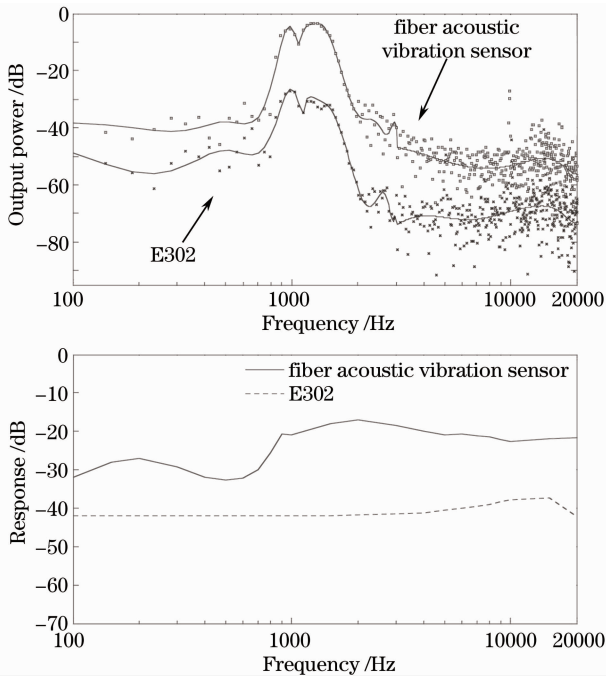


图 6 (a) 光纤声振动传感器与 E302 对扫频信号的归一化响应; (b) 拟合频率响应曲线与 E302 曲线对比

Fig. 6 (a) Frequency sweep signal normalized response of the fiber acoustic vibration sensor and E302; (b) fitted frequency response of the fiber acoustic vibration sensor compared with E302

度将有不同程度的衰减。图 6(a)反映了光纤声振动传感器与 E302 接收扫频信号的实际响应,为便于观察波形,将 E302 曲线向下平移 25 dB。可见两条曲线趋势较为一致,不同频率区间的输出幅度有差异,反映出实际接收到的扫频信号的频率特性,因此,需要采用具有标准频响的专业测量麦克风 E302 对声振动源进行频响校正。将光纤声振动传感器和专业测量麦克风 E302 放置在同一位置,使用校正后的声振动源进行频率响应测试,图 6(b)显示了光纤声振动传感器的拟合频率响应曲线和专业测量麦克风 E302 使用手册中提供的频响曲线,光纤声振动传感器在 1~20 kHz 范围内,其频率响应较为平坦,幅度波动在  $\pm 2$  dB 以内,而 100~800 Hz 的低频区域较高频区域衰减较大,其原因可能是由于所设计的垂直通孔带来的影响,对此将在以后的研究中进一步探索。因此所设计的光纤声振动传感器在 1~20 kHz 的频率范围内可用于声振动信号探测。

### 3.2 水升华器工作状态监测实验

图 7 是水升华器工作状态监测实验的现场示意图。将光纤声振动传感器放置在靠近水升华器排气通道出口的位置,作为对比,在附近安装了辅助摄像机进行视频观察和记录。装有光纤声振动传感器的水升华器置于空间环境模拟器中,空间环境模拟器将内部空气抽出,并将温度逐步降至 77 K 以下,用以模拟真实的空间冷黑环境。在较长时间的真空、极低温环境中,光纤声振动传感器性能没有见到明显变化,可以在该环境中正常工作。

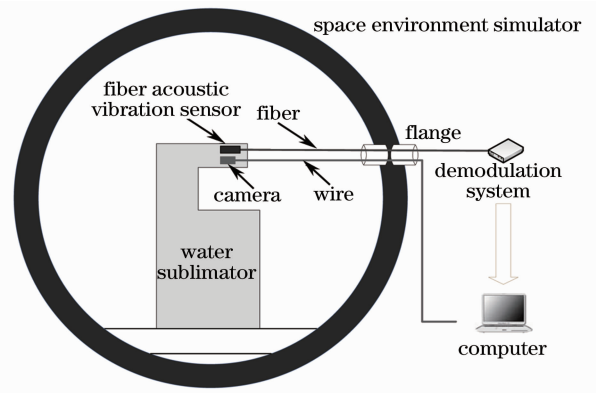


图 7 实验示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the experiment

在水升华器测试实验进行过程中,光纤声振动传感器准确监测到了喷冰现象,并且与辅助摄像机拍摄到的结果完全符合。图 8(a)展示了一段时长为 1 min 的监测结果,可见在水升华器工作状态出现问题时,光纤声振动传感器准确地探测到了振动



信号,且信号随喷冰的强度及密集度发生变化;图8(b)为单个振动信号的频谱,可见所采集的声振动信号为多频率成分,且在频域分布比较分散,在3~17 kHz之间出现了多个能量峰值,这一特征也有助于判断水升华器发生喷冰故障。

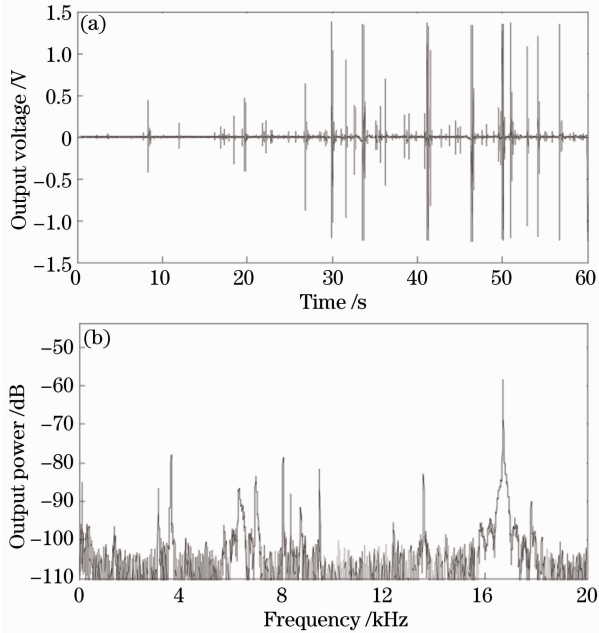


图8 (a)喷冰时声振动信号及(b)单个振动信号频谱

Fig. 8 (a) Acoustic vibration signal caused by spewing ice and (b) power spectrum of single acoustic vibration signal

## 4 结 论

针对水升华器工作监测要求,采用耐低温聚合物薄膜材料制作了光纤声振动传感器。薄膜材料采用周边拉伸固定方式形成光纤声振动传感器的膜片,传感器灵敏度为93 mV/Pa,线性度为99.8%,在1~20 kHz具有较平坦的频率响应。将该传感器用于水升华器实验,准确地监测到喷冰故障信息,验证了传感器的有效性。本文研究为航天设备工作状态监测和测试提供了新技术手段。

## 参 考 文 献

- Li Sen, Ren Jianxun. Numerical simulation and analysis on the working process of water sublimator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(2): 291-294.  
李森,任建勋.水升华器工作过程的数值模拟与分析[J].工程热物理学报,2011,32(2):291-294.
- Shan Ning, Shi Yikai, Liu Xia. Detecting crack of aircraft engine blade based on optical fiber F-P sensor [J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(3): 206-207.  
单宁,史仪凯,刘霞.光纤法-珀传感器在飞机发动机叶片裂纹检测中的应用[J].无损检测,2009,31(3):206-207.
- Liu Tiegeng, Liu Kun, Jiang Junfeng, et al.. Partial latest progress of fiber sensing techniques in Tianjin University [J].

- Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(3): 1-6.  
刘铁根,刘琨,江俊峰,等.天津大学光纤传感技术研究部分最新进展[J].光电工程,2010,37(3):1-6.
- Wen Yenyuan, Wen Jianxiang, Pang Fufei, et al.. All single-mode fiber Fabry-Perot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005001.  
王文轅,文建湘,庞拂飞,等.飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器[J].中国激光,2012,39(10):1005001.
- Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun, et al.. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105004.  
张晓丽,梁大开,芦吉云,等.高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计[J].中国激光,2011,38(1):0105004.
- R Li, N Madamopoulos, W Xiao. Influence of membrane surface shape change on the performance characteristics of a fiber optic microphone [J]. Appl Opt, 2010, 49(35): 6660-6667.
- Xu Bingshi, Xiao Wen. Research of acoustic sounding sensors over obstructs based on reflective intensity modulated fiber-optic sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2508-2512.  
许秉时,肖文.基于强度型光纤传感器的声波隔体探测关键技术研究[J].光学学报,2010,30(9):2508-2512.
- A Sun, Z Wu, C Wan, et al.. All-fiber optic acoustic sensor based on multimode-single mode-multimode structure [J]. Optik, 2012, 123(13): 1138-1139.
- Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou, et al.. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic-hydrophone using phase generated carrier techniques [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(11): 1536-1540.  
曹家年,张立昆,李绪友,等.干涉型光纤水听器相位载波调制及解调方案研究[J].光学学报,1999,19(11):1536-1540.
- Wu Yanqun, Luo Hong, Hu Zhengliang, et al.. Adaptive cancellation of background noise of fiber optic vector sensor system [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0305004.  
吴艳群,罗洪,胡正良,等.光纤矢量水听器系统本底噪声的自适应抵消[J].中国激光,2011,38(3):0305004.
- Wang Yongjie, Li Fang, Xiao Hao, et al.. Fiber optic sound sensor based on Michelson interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 38(5): 1114-1117.  
王永杰,李芳,肖浩,等. Michelson干涉仪式光纤空气声传感器[J].光子学报,2010,38(5):1114-1117.
- G Trinidad-Garcia, E Molina-Flores, J A Dávila-Pintle, et al.. Acoustic detector all fiber optics using Sagnac interferometer as modulator of index changes of fiber high birefringence [J]. Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, 2011, 2(1): 8-13.
- Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang, et al.. Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305005.  
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 Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang, et al.. Water sound sensor using the optical fiber grating sensitivity enhanced through side pressure and end surface pulling [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0506001.  
李东明,陈军,葛辉良,等.侧面压迫式及端面拉伸式增敏光纤光栅水声传感器[J].光学学报,2012,32(5):0506001.
- Q Wang, J Wang, L Li, et al.. An all-optical photoacoustic spectrometer for trace gas detection [J]. Sensor Actuat B: Chemi, 2011, 153(1): 214-218.
- H J Konle, C O Pascherit, I Röhle. A fiber-optical microphone based on a Fabry-Perot interferometer applied for thermo-acoustic measurements [J]. Meas Sci & Technol, 2010, 21(1): 015302.
- O C Akkaya, O Kilic, M J F Digonnet, et al.. High-sensitivity thermally stable acoustic fiber sensor [C]. Sensors, 2010 IEEE, 2010. 1148-1151.