

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

李东明^{1,2} 陈 军¹ 葛辉良² 张自丽²

(¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

²杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310012

摘要 研究了高灵敏度抗加速度型分布反馈(DFB)有源光纤光栅水听器。采用 $\lambda/4$ 相移型掺铒光纤光栅构成DFB激光器,输出窄线宽激光,利用弹性膜片增敏方法封装有源光纤布拉格光栅,构成了高灵敏度有源光纤光栅水听器,并以两边对称的弹性膜片构成封装结构来抵消轴向加速度干扰,提高水听器在运动情况下的检测能力,并通过结构的优化大大提高了光纤光栅水听器的耐静水压能力。研究结果表明水听器在100~1000 Hz频率范围内声-相位灵敏度达到 -132.7 ± 0.7 dB(0 dB=1 rad/ μ Pa),加速度灵敏度可做到 -20 dB(0 dB=1 rad/g)以下,耐静水压可达2 MPa。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;分布式反馈光纤激光;水听器;增敏

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0305005

Research of High Sensitivity and Anti-Acceleration of DFB Active Fiber Grating Hydrophone

Li Dongming^{1,2} Chen Jun¹ Ge Huiliang² Zhang Zili²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² Hangzhou Applied Acoustics Institute, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

Abstract The active fiber grating hydrophone with high sensitivity and anti-acceleration is investigated. The $\lambda/4$ phase-shift Er^{3+} -doped fiber grating is used as a distributed feedback Bragg (DFB) narrow linewidth laser. Casing this active fiber Bragg grating (FBG) element with the elastic slice to enhance sensitivity the high sensitivity hydrophone sensor is constructed. Afterward, the ability of the detection to hydrophone motion is enhanced by using the both sides symmetrical elastic slices to encapsulate the disturber of the axile acceleration. And then, the capability of resisty resting water pressure is promoted via strustural optimization. In a frequency range of 100~1000 Hz the sound-phase sensitivity reached -132.7 ± 0.7 dB (0 dB=1 rad/ μ Pa). The acceleration sensitivity is under -20 dB (0 dB=1 rad/g). The resisting resting water pressure capability is up-to 2 MPa.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; distributed feedback Bragg fiber laser; hydrophone; sensitivity enhancement

OCIS codes 060.2770; 060.2370; 060.3735; 060.3788

1 引 言

以光纤布拉格光栅(FBG)作为传感元件的传感

器具有体积小、抗环境干扰强、便于组网等优点,由于其对应力、温度、振动、声压等物理量的敏感性,已

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2011-12-08

基金项目: 声纳科技重点实验室基金(9140C2401080802)资助课题。

作者简介: 李东明(1979—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事光纤水声传感技术方面的研究。

E-mail: lidongming715@163.com

导师简介: 陈 军(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事激光,非线性光学及光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

经在桥梁建筑、矿山油田、水下声探测等诸多领域得到广泛应用^[1~12]。光纤光栅水听器是近年来水声工程应用中的研究热点,它具有体积小、抗电磁干扰、便于复用等优点,尤其适用于细线型拖曳声纳的工程研制^[13]。在光纤光栅水听器的实际工程应用中,对其声灵敏度、轴向抗加速度性能、耐静水压性能都有较高要求。因此,研究高灵敏度又兼具抗加速度、耐静水压的光纤光栅水听器是光纤光栅传感器研究中的一个重要课题。

高灵敏度光纤光栅水听器的实现方式可从两方面入手,一方面降低光纤光栅返回激光线宽以提高解调干涉仪的检测分辨率,从而提高系统对声波的敏感性;另一方面,由于裸光纤光栅对声压极其不敏感,需对光纤光栅进行结构增敏,提高传感探头本身对声波的敏感性。本文将这两方面进行有效结合,采用 $\lambda/4$ 相移型掺铒光纤光栅构成分布反馈光纤激光器(DFB FL),其输出的窄线宽激光具有极长的相干长度,可使解调干涉仪的光程差在大于50 m时仍能保持良好的信噪比;其次,利用弹性膜片增敏结构对光纤光栅水听器进行声压增敏,在实验室内进行灵敏度测试的结果表明,该光纤光栅水听器可以在100~1000 Hz的声频段内获得 -132.7 ± 0.7 dB ($0 \text{ dB} = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$)的高声压-相位灵敏度。

在阵列拖曳过程中,往往会产生轴向振动,因此要求水听器具备抗加速度干扰性能,通常的解决思路是在振动方向上尽量保持光纤光栅不被拉伸或压缩,本文提出利用左右对称放置的弹性增敏膜片来

实现轴向振动的抵消,并通过对膜片半径、厚度的力学计算,有效提高其耐压性能。通过对实际结构中弹性膜片特性参数的优化设计,获得了大于2 MPa的耐压能力,同时对水听器的抗加速度性能进行了对比实验,实验结果表明对称增敏结构的加速度抵消能力可达20 dB以上,加速度灵敏度降低至 -20 dB ($0 \text{ dB} = 1 \text{ rad}/\text{g}$)以下。

2 DFB有源光纤光栅水听器传感原理

图1(a)给出了DFB有源光纤光栅的结构示意图。该结构是在掺铒光纤上刻蚀了具有 $\lambda/4$ 相移的光纤布拉格光栅,形成了分布反馈光纤激光器。由于该有源相移光纤光栅在其反射峰1550 nm处存在一个线宽为兆赫兹量级的窄带透射峰[图1(b)],由这种相移光栅构成的分布反馈式激光谐振腔将输出窄线宽的激光振荡^[14]。当980 nm抽运光入射到该光纤光栅中时,在多个纵模的模式竞争中,中心波长符合光栅透射峰的纵模将获得竞争优势,由此DFB FL将输出线宽为千赫兹量级的单纵模窄线宽激光。这一单纵模的输出特性为探测水声信号提供了极高的灵敏度。当该DFB FL在水中受到声压作用下发生变形时,其光栅栅距、折射率和相移点位置等都会发生变化,从而致使其反射谱发生相应的变化,相应的窄带透射峰变化造成DFB FL辐射激光的波长发生变化。测量这一变化,将反映出相应的水声压力特性。

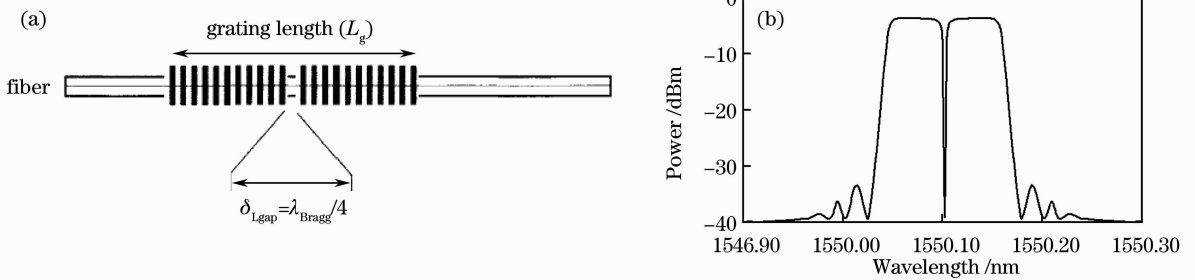


图1 (a) $\lambda/4$ 相移光纤光栅波导结构示意图; (b) $\lambda/4$ 相移光纤光栅的反射光谱

Fig. 1 (a) Scheme of $\lambda/4$ phase-shift fiber Bragg grating; (b) reflective spectrum of $\lambda/4$ phase-shift fiber Bragg grating

2.1 声压与反射波长变化关系计算

设由光纤DFB FL发出的激光中心波长为 λ_B ,外界压力或拉力作用下,会改变光栅周期和相移点的位置,从而使光纤光栅发出的DFB激光中心波长也发生相应变化,其波长变化量与应变间的线性关系可表示为^[15]

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\epsilon, \quad (1)$$

式中 $P_e = n^2[p_{12} - (p_{11} - p_{12})\nu]/2$ 称之为有效光弹系数,其中 p_{11} 和 p_{12} 为光纤芯和包层的弹光系数,即弹光矩阵中相应的元,在此假设纤芯和包层的弹光系数相等, ν 为光纤泊松比。对于熔石英光纤, $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.16$ ^[16]。由弹性力学知,外力引起的各向同性应力在裸光栅中产生的轴向应变量为

$$\epsilon = -P(1 - 2\nu)/E, \quad (2)$$

式中 E 为光纤光栅杨氏模量, P 为声压。(1)式和(2)式联立可得光纤光栅中心反射波长的相对变化与声压关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -(1 - P_c)(1 - 2\nu) \frac{P}{E}. \quad (3)$$

当传感光栅周围声压 P 变化时, 传感光栅中心反射波长发生相应改变, 通过实时检测中心反射波长偏移量 $\Delta\lambda_B$, 即可获得声压 P 变化的信息。

2.2 实验系统

研究中应用 $\lambda/4$ 相移型有源光纤光栅(掺铒)构成光纤光栅水听器传感系统, 系统构成如图 2 所示。980 nm 抽运光经过 980/1550 波分复用器(WDM)

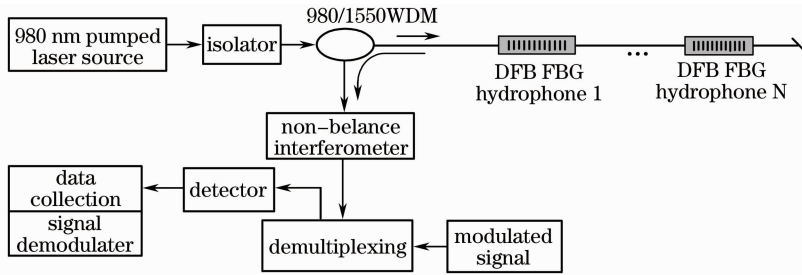


图 2 DFB 光纤光栅水听器传感系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of DFB fiber grating hydrophone system

2.3 信号接收和检测

在系统中, 水听器在声压作用下中心波长会发生相应的漂移, 经非平衡干涉仪后将转换为干涉仪的相位变化。干涉仪的输出光强 I 与光栅反射波长 λ 的关系为

$$I(\lambda_B) = A\{1 + V\cos[\phi(\lambda_B) + \phi_0]\}, \quad (4)$$

式中 A 为输入光的强度参数, ϕ_0 为干涉仪的初始相位偏置, $\phi(\lambda_B)$ 是与输入波长有关的相位项, 可以表示为 $\phi(\lambda_B) = 2\pi nd/\lambda_B$, nd 为非平衡干涉仪两光纤臂之间的光程差(OPD)。当在光栅上施加动态应变时, 产生的反射波长变化为 $\Delta\lambda_B$, 在相位项中相应的变化为

$$\Delta\phi(\lambda_B) = 2\pi nd \Delta\lambda_B/\lambda_B^2. \quad (5)$$

将(1)式、(2)式及光纤杨氏模量等参数代入(5)式可以得到相位变化与光栅应变变量及干涉仪光程差之间的相互关系为

$$\Delta\phi(\lambda_B) = 4.9nd\epsilon/\lambda_B. \quad (6)$$

由(6)式可知相位变化与光纤光栅轴向应变大小、非平衡干涉仪的 OPD 成正比, 因此对光纤光栅轴向应变变量进行增敏或增大干涉仪 OPD 均可提高水听器的声压-相位灵敏度。

实验中选取澳大利亚 Redfern 公司的掺铒 $\lambda/4$

的 980 nm 端口输送到有源光纤光栅之内, 经抽运后的相移型有源光纤光栅产生中心波长在 1550 nm 附近的窄线宽激光(具体波长值由光纤光栅相移点透射峰决定)。经过第一个水听器后 980 nm 的抽运光仅有少部分被吸收, 透过光栅的抽运光传播到后续串联的水听器, 继续抽运。能量足够的同一束抽运光可同时抽运多个不同中心波长的有源光纤光栅, 这种机理为组成 DFB 有源光纤光栅水听器复用阵列提供可能性。水听器输出的 1550 nm 激光沿后向传输经 WDM 的 1550 nm 端口输入非平衡干涉仪进行波长变化检测, 解调出干涉仪相位变化即可得到水下声波信息。

相移有源光纤光栅, 其中心波长为 1550.12 nm, 输出光功率大于 $100 \mu\text{W}$, 抽运后出光线宽 $\Delta\lambda_B$ 窄于 $1.6 \times 10^{-8} \text{ nm}$ (折算成光频为 2 kHz), 根据相干长度 l_c 表达式

$$l_c = n\lambda_B^2/(2\Delta\lambda_B), \quad (7)$$

可知该有源光栅发射激光的相干长度为 100 km, 因此在采用非平衡迈克尔孙干涉仪对光纤光栅的波长变化进行解调时, 干涉仪的光程差可在 100 km 之内选择。由(6)式、(7)式可知有源光栅出光线宽越窄干涉仪光程差选择范围越大, 其声压-相位灵敏度越高。为使干涉信号具备良好信噪比, 实验取干涉仪两臂之差为 25 m, 换算成光程差 $nd = 73 \text{ m}$ 。通过光电转换器将干涉光信号转化为电信号, 电信号经 NI9812 数据采集卡采集到计算机, 并运用 PGC (Phase-Generated-Carrier) 解调算法^[17] 对干涉仪进行相位解调, 获得与声信号对应的相位交变信号。

3 水听器封装研究

3.1 增 敏

光纤光栅本身受压面积非常小, 因此在压力作用下应变变量很小, 欲得到较高的灵敏度, 需对光纤光栅水听器进行增敏。采用金属弹性片端面拉伸式增

敏方式实现水听器增敏,其原理是将光纤光栅两端固定于弹性较好、面积较大的弹性膜片上,利用膜片随声压的振动拉伸光纤光栅,使光纤中的光栅间距随之变化,如图 3 所示。本方案中采用高弹性弹簧钢片作为增敏弹性片,光纤光栅与弹簧钢片之间采用硬铝帽进行固定,弹性片边缘与硬铝外壳之间采用环氧树脂胶进行粘接密封,并用螺母固定确保弹性片与外壳的刚性连接,整个壳体内部空间完全密封。外壳最大外径为 22 mm,弹性片支撑处内径为 16 mm,因此弹性片的有效可利用半径为 8 mm。

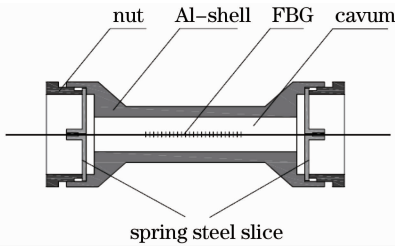


图 3 弹性膜片端面增敏结构

Fig. 3 Slice end surface enhanced sensitivity construction

结构中光纤光栅处于预拉紧状态,膜片中心点在声压载荷作用下的挠度对应光纤光栅的应变。根据弹性力学理论,周边简支的弹性膜片,其在均布载荷的作用下,中心点处的挠度(轴向位移量)表达式为

$$w = \frac{Pa^4}{64D} = \frac{3Pa^4(1-\nu^2)}{16Et^3}, \quad (8)$$

式中 t 为膜片厚度, a 为膜片半径, $D = Et^3/[12(1-\nu^2)]$ 为圆形薄片的弯曲刚度, E 为膜片杨氏模量, ν

计算结果显示,在片厚度为 0.45 mm 的情况下,该传感器的一阶谐振频率为 6575 Hz,二阶谐振频率为 19769 Hz,设计值可以满足工作频段的要求。在此基础上计算了声压幅值 1 Pa 平面波激励下膜片中心点的位移响应(即光栅的拉伸量)。计算结果如图 5 所示。

为膜片泊松比。计算中取样品参数为 $E = 216 \text{ GPa}$, $\nu = 0.28$, $a = 0.008 \text{ m}$, $t = 0.45 \times 10^{-3} \text{ m}$,将参数代入(8)式计算得到每个圆片中心点在单位声压作用下的挠度为 $3.6 \times 10^{-11} \text{ m}$,封装在两弹性膜片之间的光纤光栅总长度为 $L = 65 \text{ mm}$,因此光纤光栅应变量为 $\epsilon = 2w/L = 1.11 \times 10^{-9}$,将该应变代入(6)式可得在单位声压下的相移为 0.256 rad。

声学中对光纤水听器声压-相位灵敏度值规定为:在 $1 \mu\text{Pa}$ 下的水听器相位偏移量为 1 rad 时灵敏度为 0 dB,根据上述计算,所得的光纤光栅水听器声压-相位灵敏度理论计算值为

$$M_p = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\Delta\phi}{P} \right) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{0.256}{10^6} \right) = -131.8 \text{ dB}(\text{rad}/\mu\text{Pa}). \quad (9)$$

为验证上述解析计算结果的可靠性,采用了 ANSYS 结构分析软件对结构进行建模分析,并计算该结构在不同频率下的频率响应特性。该弹性片与壳体之间为简支连接,ANSYS 下计算所得结构的振动模态分析结果如图 4 所示。

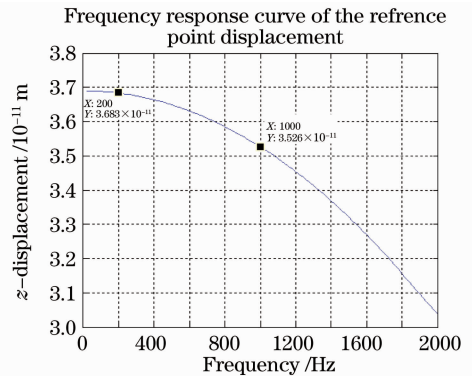


图 5 声压作用下膜片中心点轴向位移幅值响应及谐振响应曲线

Fig. 5 Longitudinal displacement responsibility in slice center point under the sound pressure

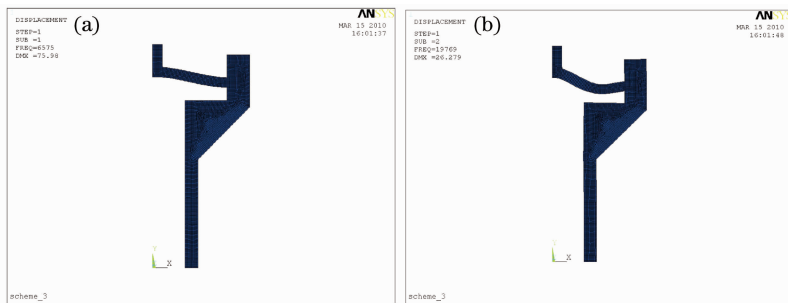


图 4 弹簧钢片端面增敏谐振频率 ANSYS 计算结果。(a) 1 阶振型;(b) 2 阶振型

Fig. 4 ANSYS calculated resonant frequency for end surface enhanced sensitivity using spring steel slice.

(a) First order resonance; (b) second order resonance

由图 5 可知 1 Pa 声压作用下, 1 kHz 频点单弹性片中心点的位移幅值为 3.5×10^{-11} m, 发生在光纤光栅上的应变量为 $\epsilon = 2 \times 3.5 \times 10^{-11} / (65 \times 10^{-3}) = 1.08 \times 10^{-9}$, 由(6)式可知, 该应变变量所产生的光纤光栅波长变化而引起的干涉仪相位变化为 0.25 rad, 对应的声压-相位灵敏度为

$$M_p = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\Delta\phi}{P} \right) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{0.25}{10^6} \right) = -132.04 \text{ dB}(\text{rad}/\mu\text{Pa}). \quad (10)$$

解析法计算和有限元分析结果对比可知, 两者吻合情况较好, 理论计算对设计具有指导意义。图 6 示出了实际封装的传感器。

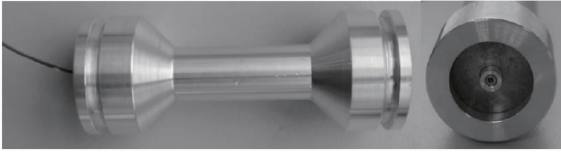


图 6 弹簧钢片封装光纤光栅水听器实物图片
Fig. 6 Spring steel slice encapsulant fiber grating hydrophone

对所封装的传感器样品进行了灵敏度测试, 用振动液体腔产生声驻波场, 将标准压电水听器和光纤光栅水听器放入振动液柱, 使两者的声中心处于同一水平面。标准水听器灵敏度为 -199 dB, 实验时标准水听器与测量放大器配合使用, 设光纤光栅传感器输出电压为 V_h , 标准压电水听器输出电压为 V_z , 测量放大器放大量为 C_L , 则光纤光栅水声传感器灵敏度为: $M = 20 \lg(V_h/V_z) + C_L - 199$ 。所得到的光纤光栅水听器和标准压电水听器输出电压值通过数据采集卡输入到计算机中, 通过软件进行对比计算。

图 7 为 500 Hz 单频声信号作用下光纤光栅水听器的测试图像, 图 7(a) 为光纤光栅水听器返回光经过非平衡干涉仪后的干涉光信号, 图 7(b) 采用

PGC 解调算法解调后所得到的声信号时域波形, 图 7(c) 为声信号频谱。从图 7 中可以看出光纤光栅水听器所探测到的声信号保真度良好, 信噪比较高。

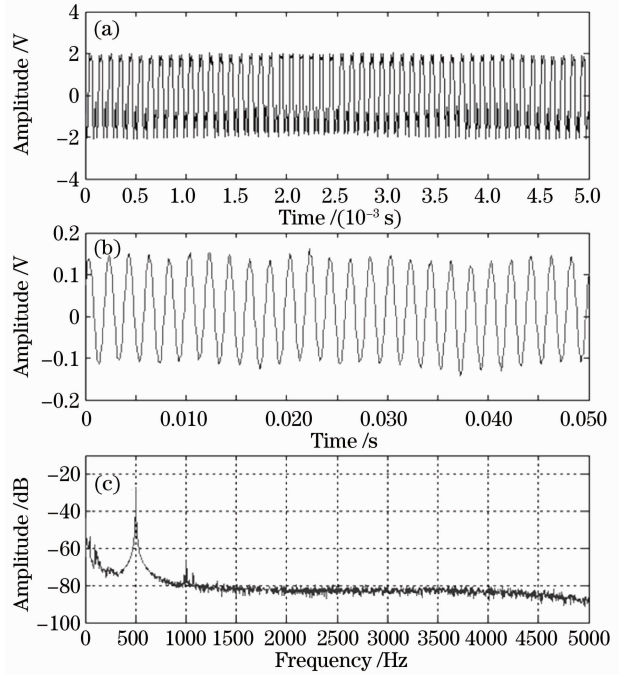


图 7 光纤光栅水听器在 500 Hz 声信号下的测试图像。
(a) 干涉光信号; (b) 声信号时域波形; (c) 声信号频谱图
Fig. 7 Sensitivity curve fiber grating hydrophone detector at 500 Hz sound signal. (a) Interferometric signal; (b) demodulated signal; (c) spectrum of demodulated

对该光纤光栅水听器的声压-相位灵敏度在 100~1000 Hz 内的各频点进行了测试, 测试数据记录如表 1 所示。测试结果显示, 该传感器的灵敏度为 -132.7 dB, 灵敏度带内起伏达到了 ± 0.7 dB 以内。实验结果与(9)式、(10)式中理论计算的结果吻合较好。

表 1 光纤光栅水听器灵敏度测试结果

Table 1 Measured results of sensitivity of fiber grating hydrophone

Frequency /Hz	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Sound-phase sensitivity /dB	-133.1	-133.0	-133.0	-133.0	-133.1	-133.1	-132.9	-132.0	-133.2	-133.3
Wave of sensitivity /dB	± 0.7									

3.2 抗加速度

通常拖曳型水听器在使用时会因轴向加速度产生振动噪声, 对水听器的使用产生不利影响。在设计时需对结构进行优化, 抵抗加速度带来的噪声影响。本文采用了一种两边对称的抗加速度结构, 其抗加速度原理如图 8 所示。图 8(a) 为使用单端弹

性膜片封装的光纤光栅水听器, 在加速度作用下左侧弹性片发生形变(图中虚线所示), 右侧光栅因刚性壳体相连未发生变形, 此时结构无抗加速度功能; 图 8(b) 为两端弹性膜片对称封装结构, 在加速度作用下位于结构两侧的双弹性片向同一方向变形, 在弹性片完全一致的理想情况下, 两弹性片的形变量

将完全相同,故光纤光栅在此情况下伸长量为零,波长将不发生变化,从而起到抗加速度的作用。

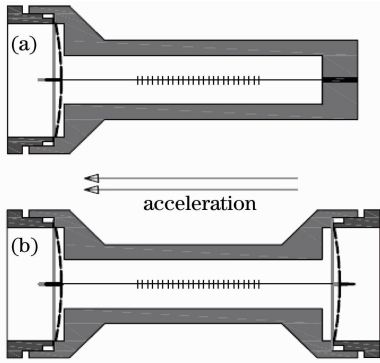


图 8 抗加速度原理示意图。(a)单端弹性膜片封装的结构;(b)双端弹性膜片对称封装结构

Fig. 8 Schematic diagram of anti-acceleration principle.

(a) Single slice structure; (b) double slice structure

根据上述原理所研制的样品在实验室完成了抗加速度性能测试,将两种光纤光栅水听器和标准加速度计同时安装于振动台上,用信号源和功放激励振动台在不同频率下进行振动,将光纤光栅水听器

表 2 光纤光栅水听器加速度灵敏度测试结果

Table 2 Measured results of acceleration sensitivity of fiber grating hydrophone

Frequency /Hz	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Acceleration sensitivity of single slice /dB	-11.7	-13.5	-11.9	-12.1	-11.8	-11.3	-10.9	-10.9	-10.7	-8.9
Acceleration sensitivity of double slice /dB	-21.9	-32.9	-32.9	-39.2	-32.3	-28.1	-26.5	-25.8	-24.7	-29.9
Meliorated quantity /dB	10.2	19.4	21	27	20.5	16.8	15.6	14.9	14	21

4 结 论

采用 $\lambda/4$ 相移型有源光纤光栅(掺铒分布反馈激光器)构成了有源光纤光栅水听器,在 980 nm 激光抽运下水听器本身发出单纵模激光,出光功率大于 $100 \mu\text{W}$ 。同时采用弹性片端面增敏方式对光纤光栅进行增敏以获得高灵敏度性能,在 $100\sim 1000$ Hz 频率内灵敏度为 -132.7 ± 0.7 dB。在进行水听器灵敏度研究的同时,还对光纤光栅水听器的抗加速度性能进行了研究,采用加速度抵消型结构完成水听器抗加速度设计,实验室内测试结果表明抵消型结构较未抵消型结构在抗加速度性能上具备明显优势,水听器样品的加速度灵敏度在所有频点均小于一 20 dB。最后,对光纤光栅水听器样品的耐压性能进行了计算和测试,所设计的水听器样品耐静水压能力达到 2 MPa 以上。

所测得的振动信号与标准加速度计所得信号进行对比,得到每个水听器在单位加速度 g 下的相移,即水听器的加速度灵敏度(单位为 dB, $0 \text{ dB}=1 \text{ rad/g}$),加速度灵敏度的测试结果记录于表 2。从测试结果看,双端弹性片结构在抗加速度上具有明显优势,较单端弹性片结构有 $10\sim 27$ dB 的改善。

3.3 耐压性能

根据(8)式可计算出所设计水听器在静水压下光纤光栅的应变变量 ϵ ,再利用(1)式可计算出光纤光栅的波长漂移 $\Delta\lambda_B$,计算结果为在 2 MPa 静水压下光纤光栅中心波长漂移量为 1.34 nm,在制作水听器样品时,光纤光栅上所施加的预应力使光纤光栅中心波长漂移量为 1.5 nm,因此水听器在静水压 2 MPa 下仍有 0.16 nm 的波长预漂移余量,光纤光栅仍处于拉紧状态,在声压下依然可以正常工作。在实验室内利用压力罐对样品进行了静水压测试,在 2 MPa 下光纤光栅水听器所发出的 DFB 激光出光性能良好,功率未发生明显变化。因此认为该水听器耐压能力为 2 MPa,达到工程应用的要求。

参 考 文 献

- 1 D. J. Hill, P. J. Nash, D. A. Jackson *et al.*. A fiber laser hydrophone array[C]. *SPIE*, 1999, **3860**: 55~66
- 2 C. R. Giles. Lightwave applications of fiber Bragg gratings[J]. *Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1391~1404
- 3 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 4 T. K. Gangopadhyay. Prospects for fibre Bragg gratings and fabry-perot interferometers in fibre-optic vibration sensing[J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2004, **113**(1): 20~38
- 5 B. Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**(2): 57~79
- 6 A. Iadicicco, A. Cusano, A. Cutolo *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2004, **16**(4): 1149~1151
- 7 X. D. Wu, C. Schmidt-Hattenberger, K. Krüger *et al.*. Temperature-controlled fiber Bragg grating dynamic strain detection system[J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2005, **119**(1): 68~74
- 8 Chen Zhemin, Chen Jun, Wu Xiaodong *et al.*. Real time measure of resonance frequency based on the fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1231~1234
陈哲敏, 陈 军, 吴晓冬等. 基于布拉格光纤光栅谐振频率的实时测量[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1231~1234

- 9 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 157~162
- 10 Xiong Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian *et al.*. Research on optical current transformer based on the fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 949~953
熊燕玲, 赵洪, 张剑等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 949~953
- 11 Wu Yonghong, Qu Wenjun, Shao Changjiang *et al.*. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2067~2070
吴永红, 屈文俊, 邵长江等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2067~2070
- 12 Li Kuo, Zhou Zhen'an, Liu Aichun *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 249~251
李阔, 周振安, 刘爱春等. 一种高温下高灵敏度光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 249~251
- 13 Scott Foster, Alexei Tikhomirov, Mark Milnes. A fiber laser hydrophone array[C]. *SPIE*, 2005, **5855**: 627~630
- 14 J. T. Kringleboth, J. L. Archambault, L. Reekie *et al.*. Er³⁺: Yb³⁺-codoped fiber distributed-feedback laser[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24): 2101~2103
- 15 P. S. Russell, J. L. Archambault, L. K. Reekie. Fiber gratings[J]. *Physics World*, 1993, **10**: 41~46
- 16 Zhang Zijia. Theory and Sensor Technology of Fiber Grating [M]. Beijing: Science Press, 2009. 116
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 116
- 17 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): 1536~1539
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): 1536~1539

栏目编辑: 谢婧