

· 光电器件与材料 ·

## 光纤 MEMS 低频声传感特性研究

周达华<sup>1</sup>, 宗思光<sup>1</sup>, 蒋冰莉<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033; 2. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430054)

**摘要:** 光纤微机械电子系统(MEMS)传感器是MEMS微加工技术与微光学技术相结合发展的新型传感器, 具有微型化、强抗电磁干扰、易集成、易阵列化、低成本、高可靠性等优点。针对低频声场测量需要, 研究了光纤MEMS测声理论, 建立了法布里-珀罗(F-P)干涉测声的理论模型, 设计并制作了光纤MEMS低频声传感器样品。实测表明, 光纤MEMS性能可满足对4~5 000 Hz频段对声波的高灵敏测量。

**关键词:** 微机械电子系统(MEMS); 光纤; 低频声传感器

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)06-0051-04

## Research on Sensing Characteristics of Low-frequency Acoustic of Optical Fiber MEMS

ZHOU Da-hua<sup>1</sup>, ZONG Si-guang<sup>1</sup>, JIANG Bing-li<sup>2</sup>

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Hubei Provincial Seismological Office, Wuhan 430054, China)

**Abstract:** Optical fiber MEMS sensor is a new sensor combined with MEMS micromachining and micro-optics technology, which has the advantages of miniaturization, strong anti-electromagnetic interference, ease of integration, easy to form array, low cost and high reliability. According to the need of low-frequency acoustic field measurements, the acoustic measurement theory of optical fiber MEMS is researched. The theoretical model of Fabry-Perot (F-P) interference measurement acoustic is built. And low-frequency acoustic sensor samples of optical fiber MEMS are designed and manufactured. The test result shows that the performance of optical fiber MEMS can meet high sensitivity acoustic measurement requirement in the band of 4 ~5 000 Hz.

**Key words:** micro-electromechanical system (MEMS); optical fiber; low-frequency acoustic sensor

目前, 声传感器的发展正与MEMS技术结合, 趋向微型化过程。而随着光纤传感技术开始应用于声波探测, 声传感器可以应用于对器件性能和适应能力要求更高的许多特殊环境<sup>[1-3]</sup>。MEMS工艺和光纤传感技术与声传感技术三者相结合, 演变出了MEMS光纤声传感器这个新的研究领域, 成为当前研究的热点之一。

基于MEMS工艺加工的光纤传声器, 结合了光纤传感和MEMS硅微传声器的优点。虽然其目前造价高, 测量手段与装置较复杂, 真正实用的器件不多。但由于具有先天良好的电磁免疫和环境适应性能, 以及微型化、易集成等诸多优点, 受到各方的广泛关

注, 目前在一些特殊环境, 如高压变电、医疗成像、复杂现场等应用中的声/振动信号探测和识别方面有着非常重要的应用前景<sup>[4-8]</sup>。

针对低频声场测量需要, 研究了光纤MEMS测声机理, 设计并制作了光纤MEMS低频声传感器样品, 实测表明, 该传感器具有良好的频带响应, 可满足低频声场的测量需要<sup>[9-13]</sup>。

### 1 光纤MEMS测声原理

微机械电子系统(MEMS)与光纤传感技术的结合给声传感器的设计和研制带来了全新的发展方向

收稿日期: 2012-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51109217)

作者简介: 周达华(1980-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电子技术、声传感技术。

——MEMS 光纤声传感器。光纤 MEMS 声传感器主要基于法布里-珀罗(F-P)干涉原理,在光纤端面 and MEMS 硅敏感膜之间形成 F-P 腔,通过硅敏感膜感知声压力变化,并把声信号转化为硅敏感膜挠度变化值,通过激光法布里-珀罗(F-P)干涉原理检测硅敏感膜挠度的变化,最后输出声信号的压力值,如图1所示。

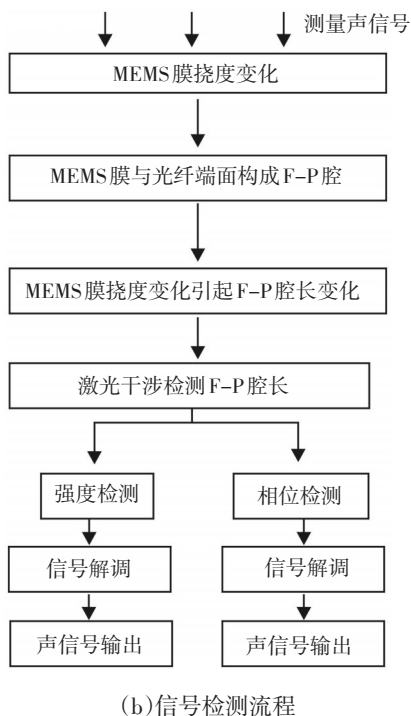
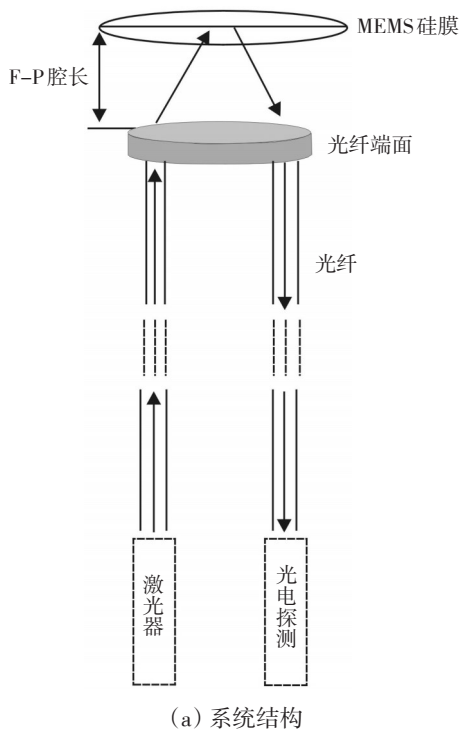


图1 光纤 MEMS 测声原理

光纤 MEMS 声传感器的 MEMS 硅膜和入射/接收光纤构成了一个高精度的声换能器,它是微机电系统(MEMS)技术、光学干涉技术为基础,主要是对反射膜的设计和加工:膜的尺寸、应力、涂层材料、厚度、纹理等。通过对换能器的设计,可以对声频振动的带宽、振动幅度进行控制,激光干涉及光电接收可以对振动膜的极微小位移进行测量,目前采用 F-P 相位检测技术,其位移测量精度可以达到纳米量级。

影响检测灵敏度的因素主要有:反射膜的振动特性、光斑的光强分布均匀性、光纤端面与反射膜的垂直保证、端面和反射膜各个面之间的散射损耗等。另外还要考虑到光纤中光受到光线或外界其他因素的影响,产生的强度变化。主要手段可以选用适当的光源,如近红外波段、交流调制光信号、增益控制、温度补偿等。激光法布里-珀罗(F-P)干涉信号解调主要有强度解调与相位解调两大类。强度解调一般利用单色光源,根据强度变化求解出腔长;而相位解调则是应用宽带光源或是波长可调谐光源,通过相位变化求出腔长。

该光纤 MEMS 低频声传感器具有如下特点:①前端是无源的。换能器提取的声音信息通过光缆传输到后端,光缆对信号的衰减比电缆小。②前端及传输线没有半导体元件,不受电磁场的影响,即可以在强磁场环境下工作。③光纤 MEMS 传声系统的灵敏度、动态范围、带宽、自噪声等将优于普通声传感系统。④体积小,保密性强。

法布里-珀罗干涉仪由两个平行光学镜面组成,当激光束入射进入干涉仪后,光束在两个端面内多次反射和透射后形成了多束反射光和透射光,这些光束互相叠加形成干涉。图2表示了法布里-珀罗干涉仪的原理图。如图2所示,法布里-珀罗腔的腔长为 $h$ 、入射镜面的反射系数为 $r_1$ 、反射镜面的反射率为 $r_2$ ,有光强为 $I_i$ 的入射光以角度 $\theta_i$ 入射到法布里-珀罗腔中,通过入射镜面后发生折射,折射角为 $\theta_r$ ,光在两个镜面间传输,一部分光通过反射镜面透射出来,透射光强为 $I_t$ ,另一部分光通过入射镜面反射出法布

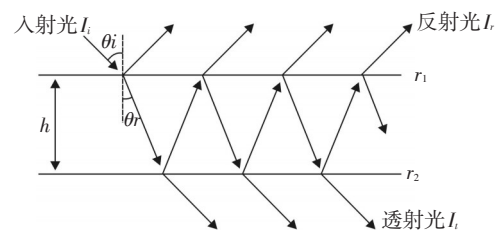


图2 法布里-珀罗干涉示意图

里-珀罗腔,反射光强为 $I_r$ ,反射光强为 $I_i$ 可表示为

$$I_r = \frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \phi}{1 + (r_1r_2)^2 - 2r_1r_2 \cos \phi} I_i \quad (1)$$

式中, $\phi$ 为相位差,它与法布里-珀罗腔的腔长 $h$ 之间有

$$\phi = \frac{4\pi nh}{\lambda} \cos \theta_r \quad (2)$$

式中, $\lambda$ 为入射波长; $n$ 为法布里-珀罗腔中介质的折射率。从式(1)和式(2)可以看出,相位差与腔长呈正比关系,反射光强与相位差呈周期变化关系。

## 2 低频声传感头部的的设计

光纤 MEMS 低频声传感器头部的的设计主要包括对 MEMS 低频声传感器头部的总体设计、微机械敏感薄膜的设计、法布里-珀罗腔的设计,其中对法布里-珀罗腔的设计包括腔长的确定和反射面系数的选择。

### 2.1 光纤 MEMS 传感器设计

低频光纤声传感器的设计目标是:响应频率范围:20 Hz~2 kHz,最大承受的声压级为 120 dB SPL。其中声压级以符号 SPL 表示,其定义为

$$SPL = 20 \lg \frac{p_e}{p_{ref}} (\text{dB}) \quad (3)$$

式中, $p_e$ 为待测声压的有效值; $p_{ref}$ 为参考声压。在空气中,参考声压 $p_{ref}$ 一般取为 $2 \times 10^{-5}$  Pa。由以上频率响应范围的定义,最大声压为 120 dB,则待测声压的最大有效值 $p_e$ 为 20 Pa。

考虑到 MEMS 低频声传感器今后是需要组网和远距离探测的,因此,选择适用于光纤通信的光源,选择使用了波长 $\lambda$ 为 1 550 nm 的单波长激光光源。MEMS 低频声传感器的传感头部主要由微机械敏感薄膜、单光纤准直器、单模光纤和毛细玻璃管组成。传感头部总体结构如图 3 所示。

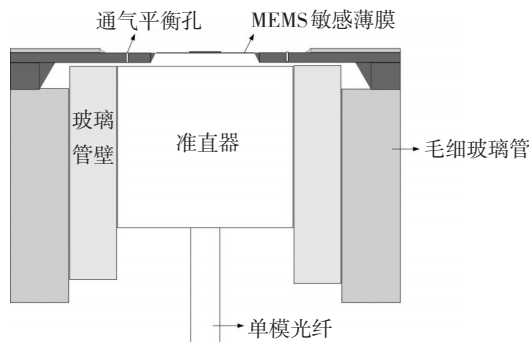


图3 光纤 MEMS 低频声传感器头部总体结构图

如图 3 所示,在 MEMS 低频声传感器传感头部中,通过毛细玻璃管将微机械敏感薄膜和单光纤准直器固定,并使薄膜与准直器的端面之间平行构成法布里-珀罗腔。单波长激光束通过准直器垂直入射到微机械敏感薄膜上,光束在准直器端面和敏感薄膜间多次反射形成干涉,反射光又垂直入射进入准直器中。在声场作用下,微机械敏感薄膜产生与声场一致的振动,从而使得薄膜与准直器端面之间的距离发生改变,即改变了法布里-珀罗腔的腔长,使得反射光强发生改变。通过对反射光强变化的探测,从而达到对声波的探测。

结合法布里-珀罗腔的光学模型和对凸台薄膜的机械和声学特性的研究,微机械敏感薄膜的参数设计需要考虑以下几个方面的影响和限制条件:(1)选用的激光波长 $\lambda$ 为 1 550 nm,要保证探测结果的唯一性和单调性,在最大声压级时,敏感薄膜的最大形变量不能大于 $\lambda/8$ ,即敏感薄膜的中心最大挠度的静态灵敏度 $9.6875 \times 10^{-9}$  mV/Pa,但也不宜过小。(2)需要考虑到单模光纤的光斑直径约为 340  $\mu\text{m}$ ,则反射面的直径不能小于光斑直径。(3)为了防止微机械敏感薄膜因共振而导致破损,敏感薄膜的一阶谐振频率要高于探测最高频率的 3 倍,即敏感薄膜的一阶自振频率要大于 6 000 Hz。(4)根据有凸台薄板的辐射阻抗特性,凸台半径与薄板的半径最佳比为 0.38。(5)从微机械制造的工艺角度考虑,薄膜的区域不宜太大。

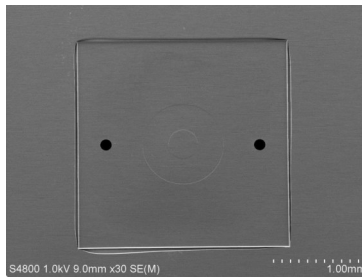
综合考虑以上因素,微机械薄膜的各个参数设计如下:薄膜的半径为 0.5 mm,厚度为 1.5  $\mu\text{m}$ ;凸台的半径为 0.18 mm,厚度为 3  $\mu\text{m}$ 。采用硅来制作微机械敏感薄膜,硅的材料参数如下:硅的密度为 2 300  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;杨氏模量为 $1.7 \times 10^{11}$ ;泊松比为 0.3;硅的屈服强度为 $7.0 \times 10^9$  N/ $\text{m}^2$ 。

### 2.2 设计结果

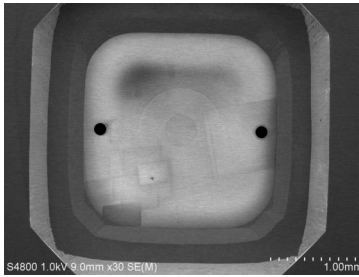
通过以上工艺制作的完整 MEMS 声传感器的敏感薄膜器件的正面薄膜的扫描电镜图如图 4a 所示,其背面腔体在扫描电镜下的照片如图 4b 所示。封装后的 MEMS 低频声传感器头部如图 5 所示。

## 3 样品性能测试

为验证光纤 MEMS 低频声传感器的响应灵敏度、响应带宽和自噪声性能,采用同点、同时对比测量法



(a) 正面图



(b) 背面图

图4 MEMS声传感器膜片



图5 MEMS低频声传感器传感头部

对传感器性能进行了测试。测量采用的参考标准传感器为丹麦 B&K 传感器,灵敏度为 54.32 mV/Pa,带宽为 10 Hz~5 kHz,自噪声约 17 dB。测量结果:光纤次声传感器的响应灵敏度约为标准 BK 传声器的 4 倍,约为 200 mV/Pa,受实验条件(声扩音器不能发出 3 Hz 以下声信号)制约,未测 4 Hz 以下频带声响应,该传感器在 4 Hz~5 kHz 具有很好的频带响应。

(上接第 50 页)

- [7] YANG Xiu-feng, ZHAO Chun-liu. The characteristics of fiber slanted gratings in multimode fiber[J]. Optics Communications, 2004, 229: 161-165.
- [8] John Grunwald, Tel Aviv. Metalization of optical fibers. US, 2003 / 0173226 A1[P]. 2003-09-18.
- [9] 卫云鹤. 石英光纤化学镀镍技术研究[D]. 成都: 电子科技大学,

## 4 结 论

对光纤 MEMS 测声进行了理论分析,设计并制作了光纤 MEMS 低频声传感器样品,实测数据表明,该传感器具有良好的低频响应,可满足远距离对低频声场的高灵敏测量需要,并可推广至众多声场测量领域。

## 参考文献

- [1] 葛益娴,王鸣. 基于相位解调的光纤 MEMS 压力传感器[J]. 功能材料与器件学报, 2008, 14(2):472-475.
- [2] 陈丽洁. 微型矢量水听器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [3] 孙淑珍. 基于 MEMS 的矢量水听器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [4] 蒋永梁,徐海英,黄晋竹. 光纤麦克风的理论和实验研究[J]. 传感器技术学报, 2004(4):713-719.
- [5] 宋东,章侃,王彦文,等. 基于 MEMS 传感器的飞行姿态指示系统[J]. 测控技术, 2009, 28(3):1-4.
- [6] 秦勇,臧希喆,王晓宇,等. 基于 MEMS 惯性传感器的机器人姿态检测系统的研究[J]. 传感器技术学报, 2007(2):32-36.
- [7] 王占平,唐小宏,王亚非,等. 基于 MEMS 加速度计的飞行器姿态识别技术研究[J]. 压电与声光, 2007(4):136-139.
- [8] 苏君,王占平. 基于 MEMS 加速度传感器的倾角仪设计方法[J]. 实验科学与技术, 2006(12):112-114.
- [9] 陈华伟. 低空目标声测无源定向理论于算法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [10] 王华明,张强,胡章伟,等. AS350B2 直升机飞行噪声的试验研究[J]. 声学学报, 2003, 28(2):177-181.
- [11] 肖峰,李惠昌. 声、武器和测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [12] 李启. 直升机尾桨噪声预测方法的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [13] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [10] 迟兰州,张声峰,何为. 石英光纤表面镀镍钴合金工艺研究[J]. 1998, 17(4): 7-15.
- [11] 杨春,骆飞,王玲,等. 一种光纤表面化学镀镍方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(4): 408-410.