

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.002

银薄膜结构的高灵敏度 Fabry-Perot 光纤声压传感器

刘 彬, 刘 欢, 林 杰, 金 鹏

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 150001 哈尔滨)

摘 要: 为改善膜片式 Fabry-Perot 光纤声压传感器中悬空薄膜的平整度, 提高其检测微弱声压的能力, 提出一种大面积银薄膜转移加工方法. 采用磁控溅射沉积银薄膜, 利用基于正性光刻胶的牺牲层工艺进行转移贴合. 银薄膜直径为 2.5 mm, 厚度为 130 nm. 实验结果表明: 银薄膜薄膜表面平整度 $< 20\ \mu\text{m}$; 加工得到的声压传感器在 0.1~3.0 kHz 频带范围内具有一致的频响特性, 在 1 kHz 处的声压灵敏度为 $-158\ \text{dB}$ (参考值 $1\ \text{V}/\mu\text{Pa}$). 在 0.001~1.250 Pa 声压范围内, 传感器输出响应与入射声压之间具有良好的线性关系; 最小可探测声压为 $419\ \mu\text{Pa} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$. 所提出的加工方法可有效改善薄膜的平整性, 并具有良好的工艺性和可重复性; 加工得到的传感器适应于高灵敏度微弱声压探测工作.

关键词: Fabry-Perot; 光纤传感器; 银薄膜; 高灵敏度; 声压检测

中图分类号: TB512 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2016)03-0011-04

High sensitivity Fabry-Perot fiber acoustic pressure sensor based on large area silver diaphragm

LIU Bin, LIU Huan, LIN Jie, JIN Peng

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: In order to improve the flatness of the diaphragm and the ability of the diaphragm-based Fabry-Perot fiber acoustics sensor to detect weak acoustics signal, a large area silver diaphragm was fabricated by sputtered. The diaphragm was then transferred to the sensor head with a sacrifice layer. The diaphragm is as thin as 130 nm, while its diameter is 2.5 mm. Experimental result demonstrate that the flatness of the diaphragm is less than $20\ \mu\text{m}$. The fabricated sensor's sensitivity is about $-158\ \text{dB}$ (re $1\ \text{V}/\mu\text{Pa}$) with a high linear pressure response range of 0.001~1.250 Pa. The noise equivalent acoustic signal level of $419\ \mu\text{Pa} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$ at 1 kHz. The sensor exhibits a flat frequency response in the range of 0.1 kHz to 3 kHz. The diaphragm's flatness is improved by the proposed method and the fabricated sensor is suitable to be useful for highly sensitive measurement of the weak pressure and sound field.

Keywords: Fabry-Perot; fiber sensor; silver diaphragm; high sensitivity; acoustic measurement

非本征型膜片式 Fabry-Perot 干涉式光纤声压传感器(EFPI)由于具有较高的测量精度、较小的尺寸和较强的抗干扰能力而受到了越来越多的关注^[1-2]. 由切割得到的光纤端面 and 声压敏感膜片构成 Fabry-Perot(FP)腔的两个反射镜. 薄膜在外力作用下发生振动, 从而导致 FP 腔的反射率发生变化. 通过检测这种变化可以得到外界声压的信息. 因此, 声压敏感膜片的设计与加工决定传感器的整体性能指标. 石英薄膜^[3-5]、硅薄膜^[6]、石墨烯薄膜^[7-8]、金属银薄膜^[9-11]等材料均被人们广泛研究. 石英薄膜由于和光

纤、毛细管等材料的热膨胀系数相一致, 具有很好的温度特性. 但由于受到材料内应力的限制, 很难利用传统的机械加工方法得到大面积的石英薄膜和硅薄膜^[5]. 目前最薄的石英薄膜厚度为 320 nm, 采用电弧放电工艺加工, 但是膜片直径小于光纤直径, 不适于作为微弱声压检测^[5]. 石墨烯材料虽然可以达到单原子层的厚度, 利用多层石墨烯加工得到的光纤 FP 声压传感器的灵敏度可以达到 $1\ 100\ \text{nm}/\text{kPa}$, 但是石墨烯的光学反射率较低, 且转移贴合工艺不成熟^[7]. 时金辉等利用化学电镀工艺加工得到纳米级的金属银薄膜, 并将其用作压力敏感薄膜, 得到的压力灵敏度为 $160\ \text{nm}/\text{Pa}$, 但由于加工得到的银薄膜表面起伏较大, 其结果不具有可重复性^[9-10]. 本文提出一种基于大面积银薄膜的高灵敏度非本征 Fabry-Perot 干涉

收稿日期: 2015-11-24.

作者简介: 刘 彬(1987—), 男, 博士研究生;
金 鹏(1972—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 金 鹏, p.jin@hit.edu.cn.

式光纤声压传感器. 利用磁控溅射方法加工得到银薄膜, 并利用基于牺牲层工艺的转移贴合技术将薄膜贴合至玻璃石英管的端面处. 该方法具有简单、成本低、可重复等优势. 加工得到的薄膜具有平整性高. 得到的传感器灵敏度高, 适应于高灵敏度低频声压探测工作.

1 传感器的设计与加工

图 1 为所设计的光纤传感器结构, 利用固定在玻璃套管上的银薄膜作为声压敏感元件; 玻璃套管的内径为 2.5 mm, 单模光纤固定在外径为 2.5 mm 的陶瓷插芯上, 并研磨平整, 光纤端面和银薄膜组成 FP 腔.

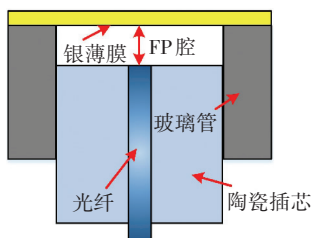


图 1 传感器结构

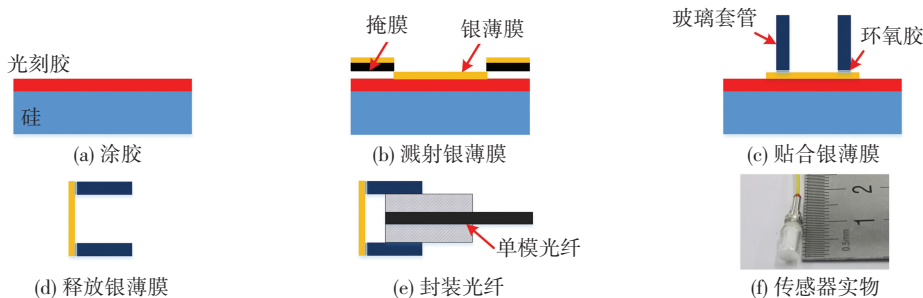


图 2 传感器加工工艺流程

2 传感器结构表征

2.1 银薄膜平整度表征

利用商用共焦显微镜 (奥林巴斯, OLS 3000) 对转移后的银薄膜表面平整度进行了测试. 图 3 为薄膜的表面轮廓图, 测试面积为 2.56 mm×2.56 mm, 薄膜的表面起伏高度用不同的颜色表示. 从图 3 中可以得出表面平整度小于 20 μm, 转移得到的银薄膜具有很好的平整性. 表明该加工方法具有良好的工艺性和可行性, 有助于传感器的大规模加工.

2.2 传感器反射谱表征

多光束干涉的反射光强为

$$I_0 = \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta} I_{in}. \quad (1)$$

其中: $\delta = 4\pi nl/\lambda$ 为相邻光束的光程差; R_1 、 R_2 分别为两个反射面的反射率; n 为 FP 腔中介质的折射率, 对于空气腔而言, $n = 1$; l 为 FP 腔的腔长; λ 为入射光波长; I_{in} 为入射光功率; I_0 为反射光功率.

传感器的加工工艺流程如图 2 所示, 具体步骤:

1) 利用标准 RCA 清洗工艺对硅片进行清洗, 并旋涂一层正性光刻胶作为牺牲层. 光刻胶的厚度大约为 1 μm, 如图 2(a) 所示. 2) 利用真空磁控溅射工艺, 在光刻胶表面沉积一层厚度为 130 nm 厚的银薄膜. 溅射时在光刻胶表面放置一个由方形通孔阵列组成的掩膜, 用于控制沉积银薄膜的形状, 方孔的边长为 5 mm, 方孔阵列的周期长度为 5.5 mm, 通过控制沉积时间实现对薄膜厚度精确的控制, 如图 2(b) 所示. 3) 在石英套筒端面涂覆一层厚度为 1 μm 的环氧胶 (353ND) 后, 将其贴合在银薄膜表面. 放置在 60 ℃ 的热烘板固化 2 h. 所用石英套筒内径为 2.5 mm. 涂覆环氧胶的工艺与文献中类似, 如图 2(c) 所示. 4) 利用丙酮将正性光刻胶溶解, 得到悬空的银薄膜, 如图 2(d) 所示. 5) 将光纤插入玻璃套管中完成 FP 传感器的封装, 封装过程中利用光谱分析仪 (YOKOGAWA AQ6370C) 实时监测 FP 腔腔长, 如图 2(e) 所示. 6) 加工得到的传感器实物图如图 2(f) 所示.

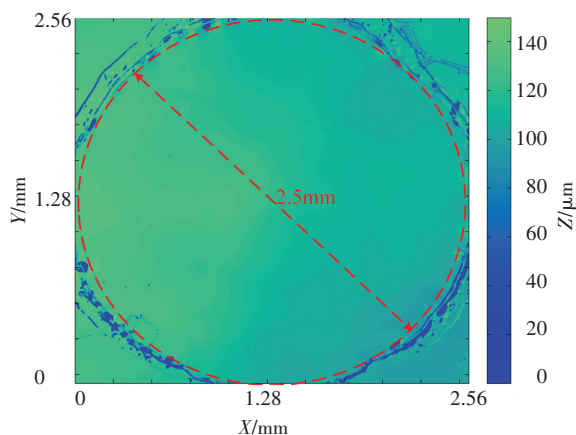


图 3 银薄膜表面平整性测量

由于切割得到的光纤端面的反射率最高为 3.6%, 因此, 多光束干涉会退化成双光束干涉, 其表达式为

$$I_0 = [(R_1 + R_2) - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta] I_{in}. \quad (2)$$

由式(2)可知, 传感器的灵敏度随着反射率的增加而增加. 加工得到的传感器反射谱如图 4 所示. 干涉条纹对比度大约为 25 dB. 在干涉条纹中, 相邻

两个波峰(谷)之间的光程差为入射光波长的整数倍,可得 FP 腔腔长为

$$L = \lambda_1 \lambda_2 / 2(\lambda_1 - \lambda_2).$$
 (3)

其中 λ_1 、 λ_2 分别为干涉谱上相邻的两个波峰(或者相邻的两个波谷)的波长. 取 $\lambda_1 = 1\,548.612\text{ nm}$, $\lambda_2 = 1\,551.772\text{ nm}$, 计算得到腔长 $L = 380.24\text{ }\mu\text{m}$.

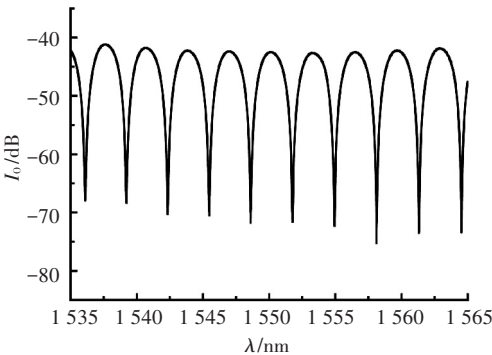


图4 封装得到 EFPI 的干涉谱

3 传感器声学性能测试

3.1 测试装置

采用如图 5 所示装置对传感器进行测试:在标准静音室中,将自制 EFPI 声压传感器与标准传声器(B&K4192)在声源声线两侧对称的位置,保证两个探头上接收到的声场完全一样. 利用信号发生器控制声源的频率和声压. 标准传声器(B&K 4192)的输出信号经过前置放大器(B&K 2690)后,经声压处理系统处理,得到入射声压的频率和幅值.

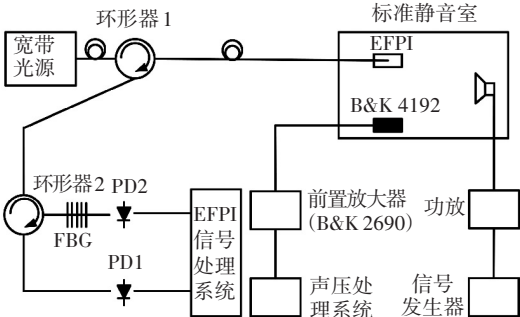


图5 声压测试实验装置

本文采用自补偿式强度解调方案进行传感器的解调^[12-13]. C 波段的 ASE 宽带光源经过环形器 1 照射 EFPI 声压传感器,其返回光再经过环形器 2 照射光纤布拉格光栅(FBG). 选用的 FBG 中心波长为 $1\,550\text{ nm}$, 3 dB 带宽为 0.2 nm , 反射率为 99% . FBG 的反射光经环形器 2 后利用光电接收器(PD1)进行采集,其透射光利用光电接收器(PD2)进行采集. 利用数据采集卡采集光电探测器的输出后,利用信号处理系统对采集型号进行处理,得到 EFPI 传感器的输出信号的频率和幅值. 利用标准传声器的输

出结果作为参考值,从而得到自制 EFPI 传感器的灵敏度. 实验中通过调整 FBG 的工作温度控制其中心波长,使工作点保持在干涉谱的正交点上.

已知对于光谱宽度为 $\Delta\lambda$, 中心波长为 λ_0 的光源,其相干长度 L_c 计算公式为

$$L_c = \lambda_0^2 / \Delta\lambda.$$
 (4)

计算得到测量光的相干长度为 12 mm , 远大于封装得到的 FP 腔长;而参考光的相干长度为 $60\text{ }\mu\text{m}$. FBG 的反射光信号中不仅包含了待测信号,同时包含了光源涨落、光纤扰动等噪声;而 FBG 的透射光值只包含光源涨落、光纤扰动等噪声信息. 因此,利用 FBG 的透射光信号作为参考信号,即可消除测量信号中的噪声信息. 从而提高系统的抗干扰能力.

3.2 传感器性能表征

固定声音频率为 1 kHz , 将声压幅值 P_{in} 从 1 mPa 逐渐增至 1.25 Pa , 得到测试探头的输出响应 U_{out} 如图 6 所示. 由于测试声压幅值跨度较大,且集中在 0.1 Pa 以下,故利用对数坐标对结果进行说明. 拟合结果表明该膜片的形变对入射声压幅值具有良好的线性响应,线性相关度为 0.998 . 计算得到的声压灵敏度为 12.21 mV/Pa 或 -158.26 dB (参考值 $1\text{ V}/\mu\text{Pa}$).

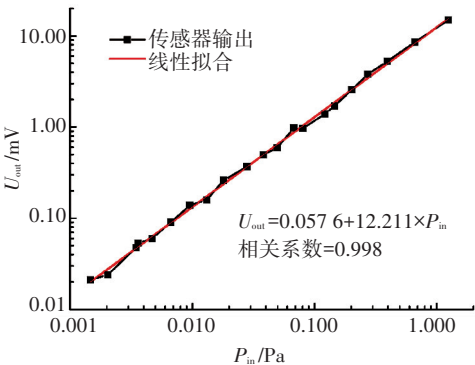


图6 EFPI 传感器声压响应测试结果

控制声源的频率 F_{in} 从 100 Hz 逐渐变化值 15 kHz , 得到传感器的频响特性曲线,结果如图 7 所示. 结果表明,EFPI 传感器在 $0.1\sim3.0\text{ kHz}$ 之间具有相对一致的灵敏度 S , 灵敏度为 -158 dB (参考值 $1\text{ V}/\mu\text{Pa}$). 该传感器适应于低频段的声压探测工作.

图 8 为当输入声压信号为频率 1 kHz , 声压 5.93 mPa 时,传感器输出信号的功率谱密度图. 系统具有 -47.5 dBm 的本底噪声,输出信号的信噪比为 20 dB . 传感器的最小可探测声压 M_{DP} 为

$$M_{DP} = \frac{P_{in}}{10^{R_{SN}/20} \times \sqrt{\Delta f}}.$$
 (5)

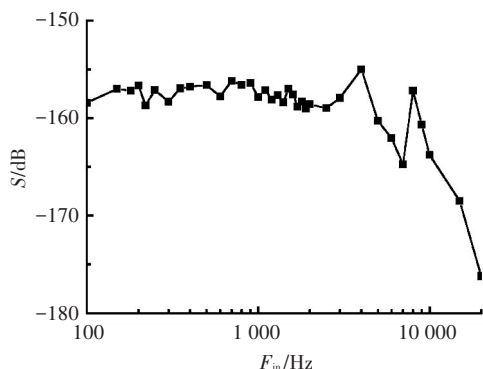


图 7 EFPI 传感器频响特性测试结果

其中: P_{in} 为输入声压, R_{SN} 为信噪比, Δf 为数据采集系统的频谱分辨率, 本实验中频谱分辨率为 2 Hz. 计算得到的最小可探测声压为 $419 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{-0.5}$. 该结果小于文献[7]中的结果 ($60 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{-0.5}$). 从图 8 中可以看出, 传感器的噪声在 $<500 \text{ Hz}$ 时为 $1/f$ 噪声, 在 $>500 \text{ Hz}$ 时为白噪声. 这表明传感器的噪声主要为光电噪声, 可以通过增加探测光的功率来降低光电噪声^[14]. 因此, 该传感器的最小可探测声压值可以进一步减小.

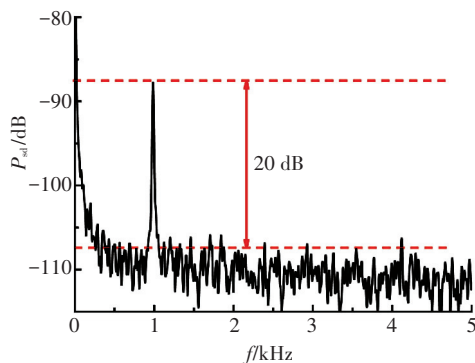


图 8 EFPI 传感器输出信号功率谱密度

4 结 论

1) 提出一种大面积银薄膜转移加工方法. 采用磁控溅射的方法加工银薄膜, 并利用基于牺牲层工艺的转移工艺进行转移封装. 加工得到银薄膜直径为 2.5 mm, 厚度为 130 nm. 薄膜表面平整度 $>20 \mu\text{m}$.

2) 加工得到的膜片式 FP 光纤声压传感器在 0.1~3.0 kHz 频带内具有一致的频响特性, 在 1 kHz 处的声压灵敏度为 -158 dB (参考值 $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$). 在 0.001~1.250 Pa 声压范围内, 传感器输出响应与入射声压之间具有良好的线性关系; 其最小可探测声压为 $419 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{-0.5}$.

3) 提出的加工方法可有效改善薄膜的平整性, 具有良好的工艺性和可重复性, 有助于传感器的大规模加工. 加工得到的传感器灵敏度高, 适应于低频微弱声压探测工作.

参考文献

- [1] RAO Yunjiang. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2006, 12(3): 227-237.
- [2] JO W, AKKAYA O C, SOLGAARD O, et al. Miniature fiber acoustic sensors using a photonic-crystal membrane [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 785-792.
- [3] XU Juncheng, WANG Xingwei, COOPER K L, et al. Miniature all-silica fiber optic pressure and acoustic sensors [J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3269-3271.
- [4] WANG Xingwei, XU Juncheng, ZHU Yizheng, et al. All-fused-silica miniature optical fiber tip pressure sensor [J]. Optics Letters, 2006, 31(7): 885-887.
- [5] LIAO Changrui, LIU Shen, XU Lei, et al. Sub-micron silica diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot interferometer for pressure measurement [J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2827-2830.
- [6] PANG Cheng, BAE H, GUPTA A, et al. MEMS Fabry-Perot sensor interrogated by optical system-on-a-chip for simultaneous pressure and temperature sensing [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 21829-21839.
- [7] MA Jun, XUAN Haifeng, HO H, et al. Fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm [J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2013, 25(10): 932-935.
- [8] MA Jun, JIN Wei, HO H, et al. High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm [J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2493-2495.
- [9] XU Feng, SHI Jinhui, GONG Kui, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm [J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2838-2840.
- [10] XU Feng, REN Dongxu, SHI Xiaodong, et al. High-sensitivity Fabry-Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm [J]. Optics Letters, 2012, 37(2): 133-135.
- [11] GUO Fawen, FINK T, HAN Ming, et al. High-sensitivity, high-frequency extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-tip sensor based on a thin silver diaphragm [J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1505-1507.
- [12] ZHANG Guiju, YU Qingxu, SONG Shide. An investigation of interference/intensity demodulated fiber-optic Fabry-Perot cavity sensor [J]. Sens Actuator A: Phys, 2004, 116(1): 33-38.
- [13] WANG Anbo, XIAO Hai, WANG J, et al. Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors [J]. J Lightwave Technol, 2001, 19(10): 1495-1501.
- [14] KIRKENDALL C K, DANDRIDGE A. Overview of high performance fibre-optic sensing [J]. J Phys D: Appl Phys, 2004, 37(18): 197-216. (编辑 魏希柱)