

基于非本征型 Fabry-Perot 干涉仪的膜片式光纤麦克风

丁文慧, 蔺博*

(中国电子科技集团公司 电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 传统声波传感器的有源性严重制约了其在强电磁场干扰、易燃易爆等特殊复杂环境中的应用, 而光纤声传感器具有抗电磁干扰、体积小和灵敏度高等优点。提出了一种膜片式光纤麦克风, 利用延展性较好的镍金属膜片作为传感薄膜, 构成非本征型 Fabry-Perot 干涉仪。利用静态工作点方法对声音信号进行解调, 测试其传感性能。实验结果表明: 该光纤麦克风具有灵敏度高、信噪比大、线性度高以及低频响应平坦的特点。

关键词: 光纤麦克风; 镍金属膜片; 非本征型 Fabry-Perot 干涉仪

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)08-0035-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Diaphragm fiber-optic microphone based on extrinsic Fabry-Perot interferometer

DING Wenhui, LIN Bo*

(China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: The activeness of the traditional sound wave sensor seriously restricts the application in special complex environment such as strong electromagnetic interference, flammability and explosion. The fiber acoustic sensor has the advantages of anti-electromagnetic interference, small volume and high sensitivity. In this paper, a diaphragm-type fiber-optic microphone is proposed, which uses a nickel-metal diaphragm with good ductility as a sensing film to form an extrinsic Fabry-Perot interferometer. The sound signal is demodulated by the static working point method to test its sensing performance. The experimental results show that the fiber-optic microphone has the characteristics of high sensitivity, large signal-to-noise ratio, high linearity and flat low-frequency response, which can be used for low-frequency sound signal measurement.

Key words: fiber-optic microphone; nickel-metal diaphragm; extrinsic Fabry-Perot interferometer

0 引言

目前, 传统电子式声传感器由于有源特性, 不适合在强电磁场干扰、易燃易爆等特殊复杂环境中应用^[1,2], 除此之外, 电子式声传感器还会产生弱电模拟信号, 不适合远距离传输。

20 世纪 90 年代以来, 出现的光纤麦克风是一种新型的光纤声传感器^[3,4], 它是利用外界声压引起的光

纤内传输光参数的变化, 通过对声调制的光信号的检测和解调, 达到还原声音信号的目的。光纤声传感器具有抗电磁干扰、体积小、结构简单、灵敏度高和频带宽等优点, 特别适用于强电磁干扰、易燃易爆等恶劣环境。目前, 比较常见的光纤麦克风有反射式强度型和干涉型。干涉型光纤声传感器与强度型光纤声传感器相比, 具有更高的灵敏度, 可以监听到更微弱的声音震动, 捕获更多的敏感声音信息, 且具有较强的抗环境干扰能力, 不同环境下使用均可保证一定的声音还原准确度^[5]。2003 年, Bing Yu 等人提出一种利用全石英构成的膜片式光纤声波传感器^[6], 其灵敏度可达到 0.0035 nm/Pa, 并成功应用于变压器局部放电监测以及涡轮机风扇健康监测中。2010 年, Holger J Konle 等人^[7]提出了基于 Fabry-Perot 干涉的光纤麦克风, 对麦克风探头进行了良好的封装, 能最高在 1400 K 的

收稿日期: 2019-06-05。

基金项目: 国家重点研发计划项目(批准号: 2016YFC0800500)资助。

作者简介: 丁文慧(1987-), 女, 博士, 毕业于北京理工大学, 现为中国电子科技集团公司电子科学研究院工程师, 主要从事光纤传感器设计及其解调技术的研究, 包括光纤高温传感器、光纤麦克风和白光干涉等方面, 参与国家重点研发计划项目研究。

* 通信作者: 蔺博(E-mail: linb278@163.com)。



高温下用于热声测量。2013 年, 香港理工大学的靳伟等人提出了基于多层石墨烯薄膜的 Fabry-Perot 干涉型声传感器^[8], 其灵敏度为 1100 nm/(kPa), 可用于 0.2~22 kHz 频率范围内的声音监测。2016 年, 华中科技大学的吴锋等人提出了一种基于 3×3 耦合器相位解调的光纤声音传感器^[9], 该系统可以准确有效地还原出设计带宽内的声音信号, 适用于电磁恶劣等应急环境中。为了进一步提高传感器声压测量的灵敏度, 本文提出一种体积小的膜片式光纤麦克风。

1 传感器理论分析

膜片式光纤声波传感器通过声-光-电转换实现声波的测量, 包括声波-膜片机械振动转换、膜片机械振动-干涉光强度转换和光信号-电信号转换 3 个环节, 其中声波-膜片机械振动转换是实现声波信号探测的关键环节^[10]。膜片的频响特性对声波传感器的性能起着至关重要的作用。本文提出的光纤麦克风是一种膜片式光纤 Fabry-Perot 干涉传感器, 其结构如图 1 所示。

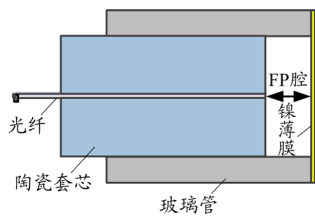


图 1 光纤麦克风原理图

对于周边固定半径为 r 的圆形膜片, 其固有频率为^[10]:

$$f_{nm} = \omega_{nm} / 2\pi = \frac{\varphi_{nm}^2}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} = \frac{\varphi_{nm}^2}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}} \frac{h}{r^2} \quad (1)$$

其中, φ_{nm} 是与膜片的振动模式相关的常数, 当计算最低固有频率时, $\varphi_{00}=3.196$; E 是膜片材料的杨氏模量; ρ 是膜片的质量密度; μ 是膜片材料的泊松比; h 是膜片厚度; r 为膜片有效半径。由式(1)可以看出, 对于某一材料的膜片, 其固有频率与膜片厚度成正比, 与膜片有效半径的平方成反比。以镍膜片为例, 其质量密度为 7.8 g/cm³, 泊松比为 0.3, 杨氏模量为 210 GPa, 由此可得, 其最低固有频率可以表达为:

$$f_{00} = 2.5526 \times 10^9 h / r^2 \text{ (Hz)} \quad (2)$$

其中, h 和 r 的单位为微米。

2 光纤麦克风的制作

本文提出的光纤麦克风是基于非本征型 Fabry-Perot 干涉 (EFPI) 的, 其工作原理为: 当外界声波压力作用到金属膜片上时会导致其发生形变, 使得 Fabry-Perot 腔的腔长发生变化, 通过解调传感头返回的干涉

强度实现对外界待测声波的测量。该传感器利用固定在玻璃套管上的镍薄膜作为声压敏感元件, 能够实现较高灵敏度的测量。实验中, 我们首先利用化学电镀工艺加工得到 10 μm 厚的金属镍薄膜, 将其固定在内径为 7 mm 的玻璃管上。然后, 将单模光纤固定在陶瓷插芯上, 尾端用环氧树脂粘牢, 并用抛光机将光纤端面 and 陶瓷插芯进行抛光处理, 从而大大地提高了光纤端面的反射率。最后, 将光纤麦克风的各部分按照图 1 进行装配, 并用环氧树脂进行粘合, 光纤端面和膜片的距离约为 300 μm。根据式(2)可计算出, 该光纤麦克风的最低固有频率为 2084 Hz。

当白光光源入射到光纤麦克风时, 一部分光在光纤端面发生菲涅尔反射, 另一部分光则继续在空气中传播, 传输至膜片内壁时, 发生反射并由光纤接收。

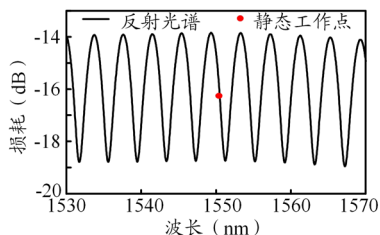


图 2 光纤麦克风的反射光谱图和静态工作点

2 束反射光发生干涉

构成非本征型 Fabry-Perot, 我们用光谱仪 (AQ6370D, Yokogawa) 对反射光谱进行了采集, 如图 2 所示。干涉条纹对比度约为 5 dB, 通过峰峰值法计算得到 EFPI 腔长为 303 μm, 与设计值 300 μm 十分接近。

3 传感器的实验和讨论

本文采用静态工作点解调法对声音信号进行解调, 其原理示意图如图 3 所示。分布式反馈 (DFB) 激光器发出的光经隔离器和耦合器注入到光纤麦克风, 光纤麦克风反射的信号经耦合器后由光电二极管转化为电信号, 经采集卡采集后传输至电脑。静态工作点解调时, 需要将激光器的波长调整至 EFPI 反射光谱的线性工作区。当光纤麦克风接收到声音信号时, 膜片发生振动, 使 EFPI 的腔长发生变化, 进而导致反射光谱发生左右漂移、反射的激光功率发生变化, 从而解调出声音信号。可通过控制 DFB 激光器的工作温度

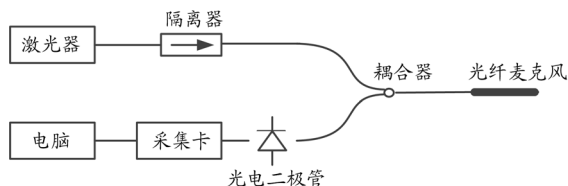


图 3 光纤麦克风的解调原理图

对其进行精确调整。实验中, 我们选取 1550.5 nm 作为静态工作点, 如图 2 中红点所示。

本文对该光纤麦克风的性能进行了测试, 过程如下:

①测试光纤麦克风的声压响应。选用信号发生器驱动的喇叭声音源, 可实现声音信号的频率和振幅的调整, 取信号发生器调至最大强度 1。未加入声音信号时, 将静态工作点接收到的信号调整至 1.0 V。实验中, 我们将声音信号调整为 1000 Hz, 喇叭声音源的信号发生器调整到最大强度的一半处, 即声音强度为 0.5 归一化声压强度, 解调得到的声音时域信号如图 4 所示, 声音信号振幅大小一致。其快速傅里叶变换 (FFT) 频谱图如图 5 所示, FFT 得到的中心频率为 1000 Hz, 与声音源信号频率一致, 信号强度约为 45 dB, 信噪比较高。

②进行声压响应测试。测试中, 我们保持声音源的频率为 1000 Hz 不变, 将声音源的信号发生器强度以 1/16 为间隔, 将归一化声压强度从 0 逐渐提升至 1, 光纤麦克风的声压响应如图 6 所示。我们对实验数据进行了线性拟合, 得到 $y=185.92x+3.52$, 其 R^2 因子达到 0.99973, 表明该光纤麦克风具有良好的线性声压响应度。

③进行频响应测试。调整信号发生器的频率, 以 100 Hz 为间隔, 从 100~2500 Hz 进行了频响应测试, 如图 7 所示。在不同频率下, 调整声音源的强度为 0.5 归一化强度。实验数据表明: 光纤麦克风的共振频率为 2021 Hz, 与理论分析值 2084 Hz 一致。实验中, 在共振频率附近, 容易超出传感器静态工作点附近的线性区域。由于在实验测量的频率范围内, 声压强度保

持良好线性响应度, 因此可以采用修正系数进行修正。我们减小了声音源的强度, 并在得到的振幅上乘以响应的修正系数, 以得到等效的声压强度。例如, 如果使用声压强度 $A (A < 0.5 \text{ 归一化强度})$ 测量, 修正系数可以表示为 $k=0.5/A$, 那么在测量结果中, 需要对声压测量程序得到的振幅乘以 k 。实验结果表明: 低于 1500 Hz 频段, 响应度较为平坦, 可用于声音测量。

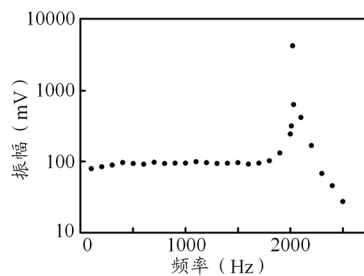


图 7 光纤麦克风的频响应

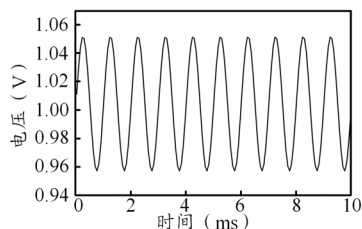


图 4 解调出的时域信号

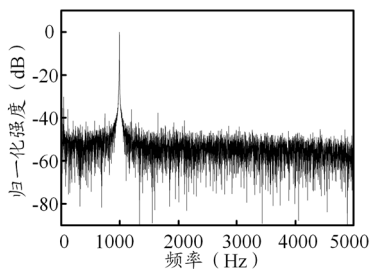


图 5 解调出的频谱图

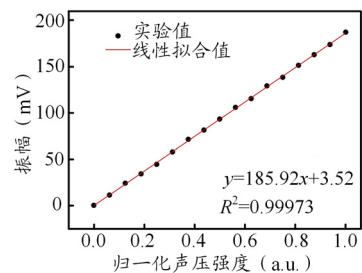


图 6 光纤麦克风的声压响应

4 结束语

本文介绍了一种基于 EFPI 结构的光纤麦克风, 它采用镍金属膜片作为换能器, 将声音信号转化为 EFPI 腔长的变化进行测量和解调。该光纤麦克风的信噪比较高, 具有良好的线性声压响应度, 且低频范围内频率响应度较为平坦, 可以用于测量低频声音信号。

参考文献:

- [1] 李文革, 赵凌云. 常用传感器的分类、结构及工作原理[J]. 科技信息, 2006, 3: 47-47.
- [2] 许晓昕. 基于 MEMS 技术的光纤声传感器研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海微系统与信息技术研究所), 2007.
- [3] 徐海英, 蒋永梁, 王丽, 等. 光纤麦克风传感探头的设计研究[J]. 传感技术学报, 2004, 17(4): 716-719.
- [4] 林晓艳, 梁艺军, 苑立波. 光纤 microphone 的理论与实验研究[J]. 物理与工程, 2000(1): 30-32.
- [5] 王野, 范伟, 黄伟庆, 等. 浅谈光纤声传感器窃听与防护技术[J]. 保密科学技术, 2015(2): 29-33.
- [6] YU B, KIM D W, DENG J, et al. Fiber Fabry-Perot Sensors for Detection of Partial Discharges in Power Transformers [J]. Applied Optics, 2003, 42(16): 3241-3250.
- [7] KONLE H J, PASCHEREIT C O, RHLE I. A fiber-optical microphone based on a Fabry - Perot interferometer applied for thermo-acoustic measurements [J]. Measurement Science & Technology, 2010, 21(1): 209-213.
- [8] MA J, XUAN H, HO H L, et al. Fiber-Optic Fabry - Pé rot Acoustic Sensor With Multilayer Graphene Diaphragm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 932-935.
- [9] 吴锋, 吴柏昆, 余文志, 等. 基于 3x3 耦合器相位解调的光纤声音传感器设计[J]. 激光技术, 2016, 40(1): 64-67.
- [10] 王巧云. 光纤法布里—珀罗声波传感器及其应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.