

◇ 研究报告 ◇

强度解调的 F-P 干涉型光纤传声器

王坤博[†] 周瑜 刘超 马宁 魏晓村

(中国电子科技集团公司第三研究所 北京 100015)

摘要 F-P 干涉型光纤传声器具有灵敏度高、结构简单、抗电磁干扰等优势, 论文针对基于强度解调的 F-P 干涉型光纤传声器展开研究。采用多光束干涉理论建立了系统光学模型, 采用薄板小挠度弯曲理论建立了传声器振膜的声学模型, 在此基础上得到传声器灵敏度的表达式。通过理论分析和仿真, 得到了敏感单元结构参数对传声器灵敏度和响应频率的影响关系, 并对 F-P 敏感结构的腔长和端面反射率进行了优化设计。应用厚度为 3 μm 的镍膜, 研制出光纤传声器样机, 测得其灵敏度为 268 mV/Pa、频响特性为 ± 3 dB@50 Hz~4 kHz, 可应用于恶劣环境下的声音传感。

关键词 传声器, F-P 干涉型, 光纤传感

中图分类号: TN641 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)05-0438-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.05.010

The F-P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation

WANG Kunbo ZHOU Yu LIU Chao MA Ning WEI Xiaocun

(No.3 Research Institute, CETC, Beijing 100015, China)

Abstract The F-P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation was analyzed in this paper, which has the advantages of high sensitivity, simple structure and anti-electromagnetic interference. The sensitivity expression of the fiber optic microphone was obtained, by applying the multi beams interference in the optical model of the fiber optic microphone and using the small deflection bending theory of thin plate in the acoustic model of the diaphragm. Through the simulation, the influence of the structure parameters to the sensitivity and working frequencies was achieved, and the cavity length and the reflectivity of the F-P interferometer were optimized. When the fiber optic microphone was fabricated with 3 μm thick nickel film, the tested sensitivity was 268 mV/Pa and the frequency response was ± 3 dB@50 Hz~4 kHz, which could be used for acoustic sensing under severe environment.

Key words Microphone, F-P interferometer, Fiber optic sensing

2017-02-15 收稿; 2017-07-21 定稿

作者简介: 王坤博(1984-), 女, 河北保定人, 博士, 工程师, 研究方向: 光纤传感和声传感技术。

[†] 通讯作者 E-mail: wangkunbo_4@163.com

1 引言

光纤传声器作为一种新型声音传感器,具有探测端无源、抗电磁干扰、损耗低、耐腐蚀、安全可靠等特点^[1],适用于强电磁干扰、高温高湿、远距离传输等特殊环境下的声音传感。国外从上世纪70年代开始光纤传声器的研究,主要技术方案包含强度型^[2]、光纤光栅型^[3]和法布里珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉型。与强度型和光纤光栅型传声器相比,基于F-P干涉原理的光纤传声器具有灵敏度高、结构简单、易于加工等优势。F-P干涉型光纤传声器的信号解调方法主要包含强度解调和相位载波解调两种。美国佛吉尼亚理工大学的王安波课题组研制出基于强度解调的F-P干涉型光纤传声器样机^[4],测得其灵敏度在高于30 kHz的声信号作用下为6 mV/Pa。天津大学研制的基于强度解调的光纤F-P干涉型传声器^[5],灵敏度为93 mV/Pa,频率范围覆盖1 kHz~20 kHz。中科院声学研究所采用相位载波解调方法研制出F-P干涉型传声器^[6],得到在1 kHz~4 kHz范围内的平均灵敏度为100 mV/Pa。对比两种解调方案,基于相位载波解调的方法要求光源具有波长连续可调的功能,且需要额外的数字电路进行算法的优化,增加了系统复杂性和器件成本。基于强度解调的方法对光源要求较低,只需要简单的模拟电路就可以实现,结构简单,成本较低。

本文针对基于强度解调的F-P干涉型光纤传声器展开研究。首先从干涉理论出发,推导得出F-P干涉腔的传递函数;结合薄板小挠度弯曲理论,得到传声器的灵敏度表达式;在此基础上,对传声器进行了优化设计,为基于强度解调的F-P干涉型传声器的研究奠定了理论基础。应用镍薄膜和光纤元件研制出F-P干涉型光纤传声器样机,进行了灵敏度和频率响应特性的测试,得到其灵敏度为268 mV/Pa,工作频率范围为50 Hz~4 kHz。

2 基于强度解调的F-P干涉型光纤传声器结构

基于强度解调的F-P干涉型光纤传声器结构如图1所示。主要由光源、光电探测器、环形器、声光敏感元件、光源驱动电路和信号处理电路组成。光源在驱动电路的控制下,输出稳定的窄谱激光光

束,经由光纤环形器连接F-P干涉型声光敏感元件。经由F-P腔返回的光通过环形器,输入到光电探测器,将光信号转换为电信号,经由信号处理电路进行滤波放大和输出。其中声光敏感元件如图1放大后图所示,由超薄振膜和光纤垂直端面组成。超薄振膜用于感受声信号,因此采用灵敏度高、频响特性好的薄膜;光纤通过结构件固定,保证光纤端面与振膜面较好的平行度,降低光功率损耗。外界无声信号作用时,基于F-P腔的声光敏感元件输出为周期性的谐振曲线。选取其中一段线性区作为工作区域,线性区中心点作为工作点,当外界有声信号作用时,F-P腔长发生变化,谐振曲线偏移,工作点处的光强发生变化,通过检测光强的变化量,可得到声音信息。

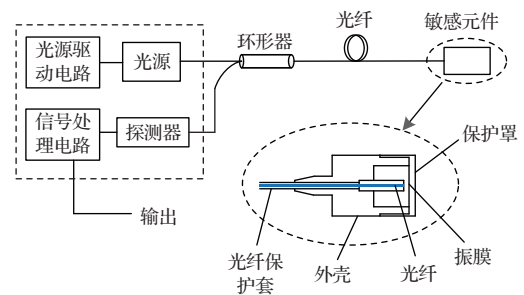


图1 基于强度解调的F-P干涉型光纤传声器结构示意图

Fig. 1 Configuration of F-P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation

3 模型建立与仿真

3.1 光学模型建立

光源发出单一波长的光,经由光纤环形器后到达F-P干涉型敏感元件。入射光从光纤芯传输到光纤端面,一部分光反射回光纤,另一部分光透过空气到达振膜表面;振膜表面反射的光部分到达光纤,在光纤端面发生反射与透射,透射光再进行传输、反射等。光束在F-P腔内经过多次反射与透射,最后形成多光束在光纤端面处发生干涉,形成干涉波形。无声音信号作用时,光纤端面和振膜组成标准的F-P腔;当有声音信号作用振膜时,振膜中心发生扰动而周边固定,导致振膜发生形变,呈圆弧状。由于形变量为几十nm,相对于振膜尺寸(直径十几个mm)来说非常微小,在光纤芯径尺寸(9 μm)范围内,可近似为两平行面组成的F-P腔,因此,可应

用多光束干涉理论来分析。当光纤端面反射率较小时,可近似为双光束干涉。

光纤传声器所用光源为窄谱激光器,本文所涉及的F-P干涉腔腔长较小,光谱宽度较大,因此可以忽略激光光束对干涉输出的影响^[7]。由光纤端面和振膜反射面组成的F-P腔,其干涉光谱输出表达式为^[8]

$$I_r = \alpha I_0 \frac{R_1 + \eta^2 R_2 - 2\eta\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n_0 L/\lambda)}{1 + \eta^2 R_1 R_2 - 2\eta\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n_0 L/\lambda)}, \quad (1)$$

其中, λ 为光波长, R_1 和 R_2 分别为光纤端面反射率和振膜端面反射率, $n_0 = 1$ 为空气腔的折射率, α 为光路损耗(从光源经由F-P腔到达探测器), L 为F-P腔有效腔长, I_0 为初始光强, η 为光纤端面与振膜间的光耦合效率。由于光纤具有一定的发散角度,因此发射端面与接收端面距离越大,接收端面处的光束直径越大,耦合到光纤的光功率越小,当光纤端面与振膜平行时,耦合效率可表示为^[9]

$$\eta = \frac{1}{1 + [2\lambda_0 L / (2\pi n_0 w^2)]^2}, \quad (2)$$

其中, w 为单模光纤的光斑大小。

由公式(1)可以得到F-P的光谱宽度FSR,即两谐振峰或谐振谷之间的间距为

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{2L}. \quad (3)$$

当光纤端面反射率 R_1 较小时,近似双光束干涉的表达式为

$$I = \alpha I_0 \left[R_1 + \eta^2 R_2 - 2\eta\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n_0 L}{\lambda}\right) \right]. \quad (4)$$

由式(1)可以得知,F-P腔输出为周期性的谐振曲线,其质量特性由干涉条纹可见度表征:

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

其中, I_{\max} 和 I_{\min} 为干涉波形的最大值和最小值,带入公式(1)得到

$$\gamma = \frac{2\eta\sqrt{R_1 R_2} (1 - R_1) (1 - \eta^2 R_2)}{(R_1 + \eta^2 R_2) (1 + \eta^2 R_1 R_2) - 4\eta^2 R_1 R_2}. \quad (6)$$

明显看出,干涉条纹可见度由两端面反射率和耦合效率决定,而耦合效率由腔长决定,因此通过优化选择端面反射率和腔长大小,可得到较优的干涉条纹可见度。

根据公式(1)可以得到F-P干涉腔的输出谐振谱如图2曲线所示,基于强度解调的光纤传声器其工作区域选取曲线的上升沿或下降沿。以上升沿为例,在无外界声信号作用时,激光器输出光对应上升沿的中心点。声音信号为周期性的正弦波,声压改变F-P腔长,使得谐振曲线左右偏移,则激光器输出光对应谐振曲线的不同点,从而得到不同强度的输出信号,通过解调输出信号,可还原声信号。从图2可以看出,为了实现对声信号的有效还原,要求工作区域具有较高的线性度,若线性度不好,则解调后的信号不是标准的正弦波;此外,谐振曲线斜率越大,输出灵敏度越大。因此在设计过程中,首先需要保证谐振曲线较高的线性度,其次考虑较大的曲线斜率。

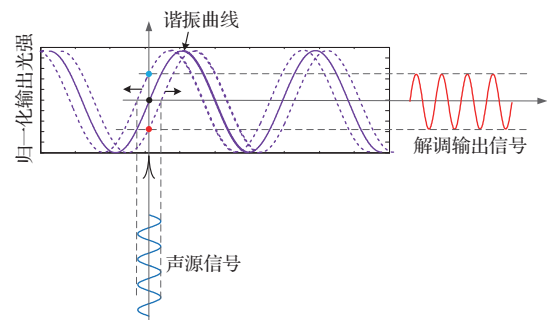


图2 基于强度解调的F-P干涉型光纤传声器工作原理

Fig. 2 Principle of F-P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation

仿真得到不同反射率下归一化输出光强与腔长的关系,如图3所示。其中, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, R_1 和 R_2 分别取为(0.4, 0.4)(0.04, 0.85)和(0.04, 0.04)。由图3可以看出,随着腔长增大,归一化输出光强逐渐变小,与公式(2)相符;反射率越大,相同腔长的归一化输出光强越强。将 $20 \mu\text{m}$ 腔长和 $60 \mu\text{m}$ 腔长处波形进行放大,如图4所示。由图4可以看出,当腔长较小时,F-P干涉腔输出特性受端面反射率影响较大,反射率高的曲线不再是正弦形状,中心工作点处线性度变差;反射率低的线性度较好,然而斜率较低,功率损耗较大。随着腔长增大,即使在端面反射率较大的条件下,干涉输出也类似正弦,中心工作点处具有较好的线性度。

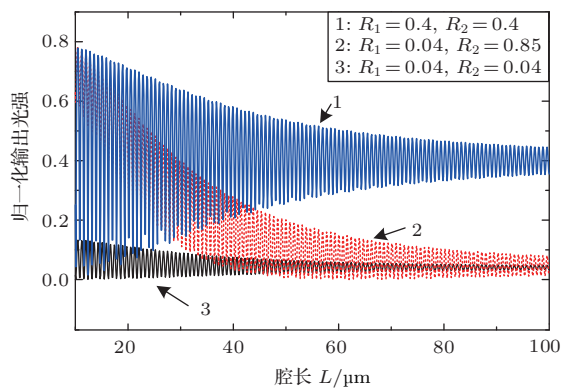
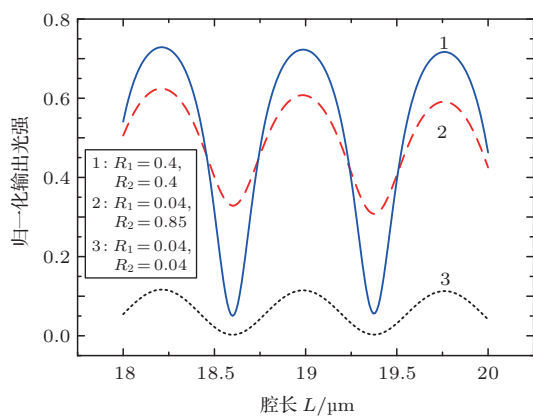
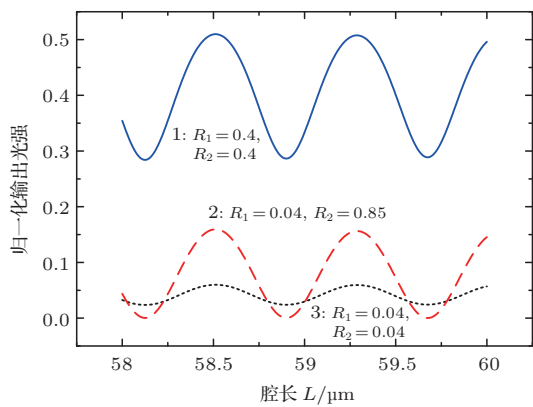


图3 不同反射率对应的谐振曲线

Fig. 3 Resonance curves with different reflectivity



(a) 腔长为 20 μm



(b) 腔长为 60 μm

图4 腔长为 20 μm 和 60 μm 处的谐振曲线

Fig. 4 Resonance curves with cavity length of 20 μm and 60 μm

图5给出了不同反射率下干涉条纹可见度与腔长的关系。由图5可以看出，当两端面反射率相同时，腔长越小，干涉条纹可见度越大；随着腔长增大，条纹可见度急剧下降。当两端面反射率不同时，干涉条纹可见度随着腔长增大先变大后变小，存在最佳腔长，使得干涉条纹可见度最高。

实际过程中，未经镀膜的光纤端面反射率约为0.04，镍膜的反射率为0.68，镀金后的反射率可达0.85。根据图5仿真结果得出，对应最高干涉条纹可见度的最优腔长为61.6 μm。然而考虑到尽可能提高工作点的线性度，腔长选择需大于等于最优腔长。初步设计腔长为100 μm，此时干涉条纹可见度约为70%。将以上参数带入公式(1)，仿真得到F-P干涉曲线如图6(a)所示，对应的斜率曲线如图6(b)所示，

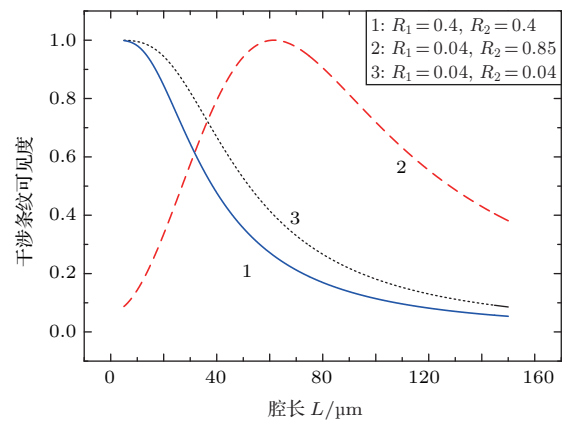
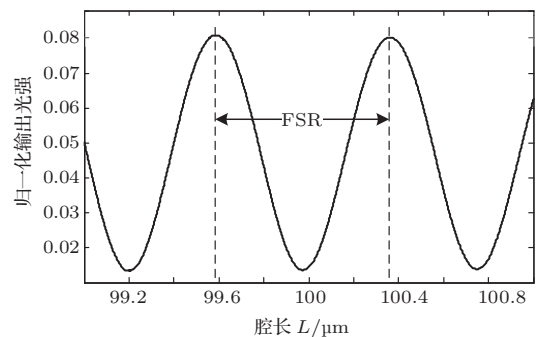
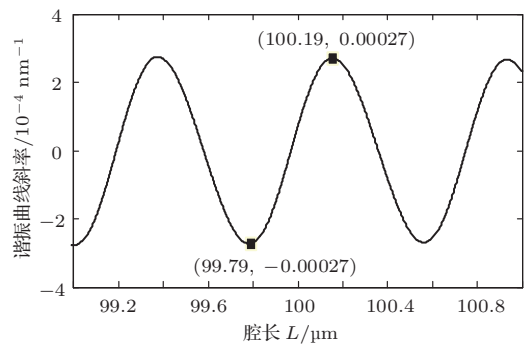


图5 不同反射率对应的干涉条纹可见度

Fig. 5 Fringe visibility for different reflectance



(a) F-P干涉曲线



(b) 斜率曲线

图6 腔长 100 μm 的F-P干涉曲线及斜率

Fig. 6 Resonance curves and the slope of F-P interference with cavity length of 100 μm

最大斜率为 0.00027 nm^{-1} ，即在输入功率为 $200 \mu\text{W}$ 前提下，对应斜率为 $0.054 \mu\text{W}/\text{nm}$ 。

3.2 振膜特性分析

F-P干涉型光纤传声器通过振膜接收声振动信号，因此振膜特性对传声器的灵敏度和频率响应特性起决定性作用。为了精确控制谐振频率，保证传声器的一致性，采用周边拉伸薄膜，薄膜的谐振频率和机械灵敏度由薄膜边缘拉力、薄膜厚度和尺寸决定。膜的形变属于弹性力学范畴问题，当形变量小于厚度的30%时，可以按照薄板小挠度弯曲理论来处理^[10]。

在均匀声压 $P = P_0 \cos(\omega t)$ 作用下，薄膜做受迫振动，其幅度响应可表示为^[11]

$$Y = A \cos(\omega t - \delta), \quad (7)$$

其中， Y 为挠度幅值大小， $\omega = 2\pi f$ ， f 为声信号频率，振幅 A 为

$$A = \frac{P_0}{\sigma} [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2]^{-1/2}, \quad (8)$$

当薄膜谐振时， A 最大，令 $\frac{\partial A}{\partial \omega} = 0$ ，得到谐振角频率 $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\xi^2}$ 。其中 P_0 为压力， ω_0 为膜片固有振动角频率， $\sigma = \rho h$ 为膜片材料的面密度， ρ 为膜片材料的体密度， h 为膜片厚度。 $2\xi = \eta/\sigma$ ， η 为空气的粘滞系数。若环境阻尼很小， ξ 可忽略不计，则谐振角频率为 $\omega_r = \omega_0$ 。

薄膜的固有频率为

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{2.4}{2\pi R} \sqrt{\frac{T}{\sigma}}, \quad (9)$$

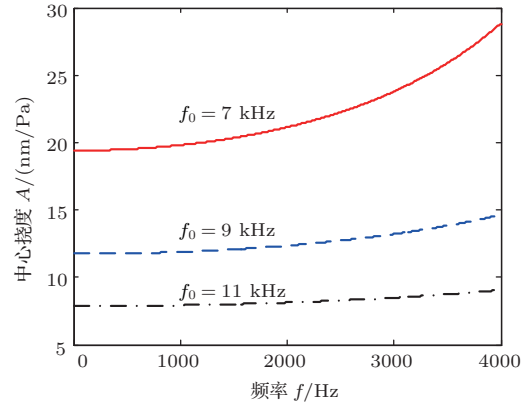
其中， T 为薄膜边缘受到的拉力， R 为振膜半径。由公式(9)可以看出，薄膜边缘拉力越大，直径越小，固有频率越高，对应传声器的一阶谐振频率越大，传声器的频响范围越宽。

基于金属镍膜的声振动特性仿真结果如图7所示，其中金属镍膜的体密度为 $8880 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，直径为 12.7 mm 。从图7可以看出，随着谐振频率增大，振膜的中心挠度变小，机械灵敏度下降。谐振频率 7 kHz 的振膜机械灵敏度(1 kHz处)为谐振频率 11 kHz 振膜的3倍。随着振膜厚度减小，机械灵敏度增大，然而从公式(9)可以看出，振膜厚度越小，面密度越大，谐振频率变小，工作范围变窄。在设计过程中需均衡考虑谐振频率和机械灵敏度，在保证灵敏度满足要求的情况下，尽可能拓宽工作频率。

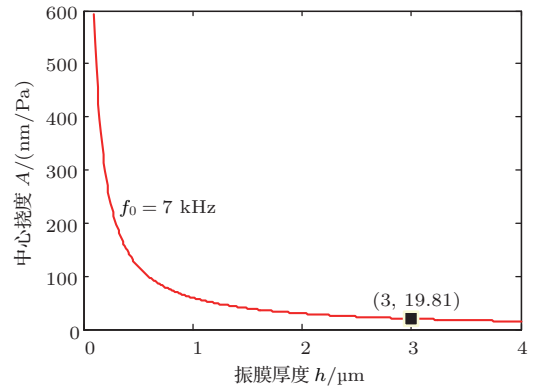
经过光电探测器、跨阻电路和放大电路后的电信号输出可以表示为

$$V_{\text{out}} = I \cdot N_e \cdot R_{\text{PD}} \cdot K, \quad (10)$$

其中， N_e 为光电探测器的转换效率，一般可以达到 $0.95 \text{ A}/\text{W}$ ， R_{PD} 为跨阻大小， K 为放大电路倍数。



(a) 不同谐振频率时，中心挠度随工作频率的变化关系



(b) 谐振频率为 7 kHz ，工作频率为 1 kHz 时，中心挠度随振膜厚度的变化关系

图7 基于金属镍膜的声振动特性仿真

Fig. 7 Simulation of acoustic vibration based on the nickel film

将公式(8)带入公式(10)，得到传声器的灵敏度表达式为

$$\begin{aligned} S_a &= \frac{dV}{dP} = \frac{dI}{dL} \cdot \frac{dA}{dP} \cdot N_e \cdot R_{\text{PD}} \cdot K \\ &= \frac{dI}{dL} \cdot \frac{1}{\sigma} [(\omega_0^2 - 4\pi^2 f^2)^2 + 16\pi^2 \xi^2 f^2]^{-1/2} \\ &\quad \cdot N_e \cdot R_{\text{PD}} \cdot K, \end{aligned} \quad (11)$$

其中， dI/dL 为F-P腔谐振曲线的斜率，由于谐振曲线的表达式是非规则的，因此其斜率信息通过仿真获得。在实际计算过程中，首先仿真得到F-P腔的谐振曲线，通过软件求导的方式，得到曲线斜率，再

带入公式(11),得到灵敏度的最终值。由公式(11)可以看出,传声器的灵敏度主要受到F-P腔谐振曲线斜率、谐振频率以及电路放大倍数的影响。由前面分析得出,F-P腔谐振曲线斜率是通过优化F-P谐振腔的两端面反射率和腔长来确定;传声器的谐振频率主要受到振膜结构参数的影响,谐振频率越大,工作频率范围越宽;电路放大倍数可进行相应调节来实现所需求的灵敏度大小。

实验过程中,选择镍膜厚度为 $3\ \mu\text{m}$,直径 $12.7\ \text{mm}$,谐振频率为 $7\ \text{kHz}$,通过公式(8)计算得到膜片中心点的机械灵敏度为 $19.81\ \text{nm}/\text{Pa}$ 。结合图6(b)所示的曲线斜率值,当跨阻选择 $100\ \text{k}\Omega$,放大倍数为3时,得到理论灵敏度为 $305\ \text{mV}/\text{Pa}$ 。

4 传声器测试

为了验证理论计算的准确性,采用金属镍膜和光纤微结构研制出F-P干涉型敏感元件,如图8所示。金属外壳边缘采用内外环结构对薄膜产生一定拉力,通过调节内外环的相对位置改变薄膜受力大小,从而改善谐振频率。F-P腔长通过超薄垫片进行调节,微调精度可达 $0.5\ \mu\text{m}$ 。实验过程中,通过宽谱光源和环形器连接敏感元件,用光谱仪测得F-P干涉光谱曲线如图9所示。由图9可以看出,谐振曲线的周期为 $\text{FSR} = 10.7\ \text{nm}$,由公式(3)可得到腔长大小约为 $111\ \mu\text{m}$,带入公式(1)得到理论仿真曲线,可以看出测试光谱与理论仿真结果具有较好的匹配度。



图8 F-P干涉型敏感元件

Fig. 8 Photo of F-P interferometric cavity

为了测试传声器的声学性能,搭建了如图10所示的实验平台。整个实验在消声室中进行,使得环境对声信号的影响降到最小。将标准传声器与F-P

敏感元件并排放置,B&K Pulse分析仪控制音响发出 $50\ \text{Hz}\sim 4\ \text{kHz}$ 的声音信号,由于敏感元件较小,可以等效成声音到达两个敏感端的幅值和频率是一样的。其中的标准传声器采用B&K 4190驻极体传声器,灵敏度为 $50\ \text{mV}/\text{Pa}$ 。采用对比法测试得到光纤传声器的频响曲线如图11所示。图11(a)所示为标准传声器和光纤传声器同时接收音响信号时,输出的频率响应曲线($0\ \text{dB} = 25\ \text{V}/\text{Pa}$),由图11(a)可以看出,同一声音信号作用下两个传声器的响应趋势是相近的,且光纤传声器的灵敏度明显高于标准传声器。若用标准传声器对音响的输出进行校准,可得到光纤传声器在标准声信号作用下的响应曲线($0\ \text{dB} = 50\ \text{kV}/\text{Pa}$),如图11(b)所示。由图11(b)可以看出,在 $50\ \text{Hz}\sim 4\ \text{kHz}$ 范围内,F-P干涉型光纤传声器具有较好的平坦度。在 $1\ \text{kHz}$ 处,得到灵敏度为 $268\ \text{mV}/\text{Pa}$,比理论值稍低,其原因可能在于,在调试过程中,工作点很难调节到灵敏度最大点处。

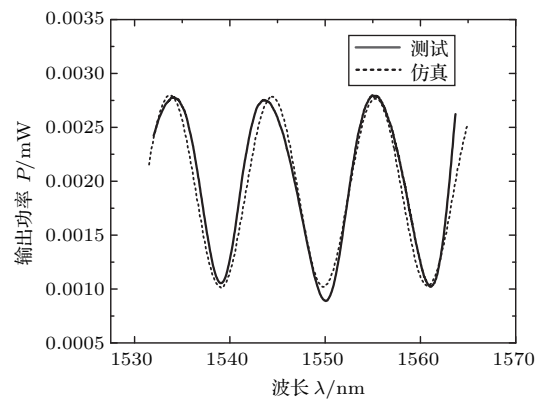


图9 F-P干涉腔测试曲线

Fig. 9 Tested curve of F-P interferometric cavity

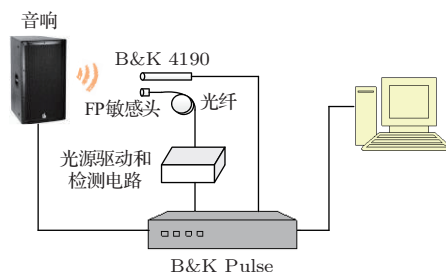
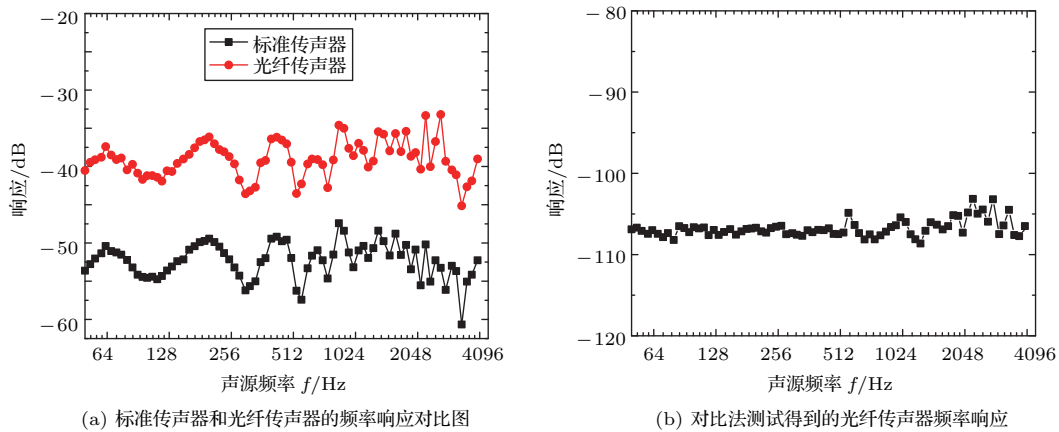


图10 声学性能测试实验平台

Fig. 10 Experimental platform of acoustic performance



(a) 标准传声器和光纤传声器的频率响应对比图

(b) 对比法测试得到的光纤传声器频率响应

图 11 光纤传声器频率响应测试曲线

Fig. 11 The tested frequency response of the fiber microphone

5 结论

本文针对基于强度解调的F-P干涉型光纤传声器展开研究。首先对光学模型和声学模型分别开展理论分析和仿真,得到了传声器灵敏度表达式,对振膜尺寸和腔长等参数进行了优化设计;之后研制了基于强度解调的F-P干涉型光纤传声器样机,并与国际上标准传声器进行了测试对比,得到其频响特性为 ± 3 dB@50 Hz~4 kHz,灵敏度高达268 mV/Pa,适用于强电磁环境下的声音传感。

参 考 文 献

- [1] 于胜云,何宁. 光纤传感器及在窃听技术中的应用[J]. 广西物理, 2006, 27(3): 31-33.
YU Shengyun, HE Ning. Optical fiber sensor and the application in hacking techniques[J]. Guangxi Wuli, 2006, 27(3): 31-33.
- [2] OPTO Acoustics LTD. Optimic™ Microphones—The leading wave in passive fiber optic microphones[EB/OL]. [2017-01-15]. <http://www.optoacoustics.com/industrial/optimic-microphones>.
- [3] IIDA T, NAKAMURA K, UEHA S. A microphone array using fiber Bragg gratings[C]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002, 102: 239-242.
- [4] DENG J. Development of novel optical fiber interferometric sensors with high sensitivity for acoustic emission detection[D]. USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [5] 赵鹏,刘铁根,江俊峰,等. 用于水升华器监测的光纤声振动传感器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0106003.
ZHAO Peng, LIU Tiegen, JIANG Junfeng, et al. Fiber optic acoustic vibration sensor for the monitoring of water sublimator[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0106003.
- [6] 索智群,何庆,邓越,等. 相位载波硅微光纤传声器的研究[J]. 声学技术, 2010, 29(6): 464-465.
SUO Zhiqun, HE Qing, DENG Yue, et al. Research on silicon micro-machined fiber-optic microphone with phase-generated-carrier modulation[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(6): 464-465.
- [7] NING Y N, GRATTAN K T V, PALMER A W. Fiber-optic interferometric systems using low-coherence light sources[J]. Sensor and Actuators A Physical, 1992, 30(3): 180-192.
- [8] 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.
- [9] SAGRARIO D, MEAD P. Axial and angular displacement fiber-optic sensor[J]. Applied Optics, 1998, 37(28): 6748-6754.
- [10] GIOVANNI M D. Flat and corrugated diaphragm design handbook[M]. New York, Basel: MareelDekker: CRC, 1982.
- [11] 欧阳毅,郑虎鸣. 微小振幅的圆形振膜的受迫振动[J]. 电声技术, 2004, (1): 7-8, 11.
OUYANG Yi, ZHENG Huming. Forced vibration of circular membrane with mini-amplitude[J]. Elementary Electroacoustics, 2004, (1): 7-8, 11.