

基于强度调制的光纤声传感器设计研究

余贵水, 李晓龙, 宗思光

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:在假设发送光纤出射端的光强分布为高斯分布的基础上,提出了一种新型强度调制型光纤声传感器模型。该模型根据单模光纤准直器的耦合特性理论,结合四周固支圆平微机电系统(MEMS)反射膜片,并使用GRIN lens 光学透镜实现光强度的调制。仿真结果表明,通过选择合适的调制参数可使光纤声传感器的探测灵敏度较传统强度调制模型有数量级的提高。

关键词:微机电系统(MEMS);调制;传感器;耦合

中图分类号:TN918.11

文献标识码:A

Design of Optical Fiber Acoustic Sensor Based on the Intensity Modulation

YU Guishui, LI Xiaolong, ZONG Siguang

(Institute of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A new intensity modulated optic fiber acoustic sensor model has been proposed based on the assumption that the distribution of the light intensity from transmission fiber is Gaussian distribution. The model is based on single-mode fiber collimator coupling characteristics theory, contains clamped circular flat MEMS membrane, and uses GRIN lens to realize the modulation of light intensity. The simulation results show that through choosing proper modulation parameters the sensitivity of the sensor can improve in orders of magnitude than that of the conventional intensity modulation model.

Key words: MEMS; modulation; sensor; coupling

0 引言

在上世纪70年代初出现低损耗光纤后,光纤在通信技术中就可用于长距离的传播。但光纤不仅可以作为光波的传输媒质,还可根据光波的特征参量结合敏感元器件来探测各种物理量。与传统的声传感器相比,光纤声传感器具有明显的优势,它具有抗电磁干扰,灵敏度高,耐高温,质量小,测量对象广,对被测介质影响小的特点,特别适用于超长距离或恶劣环境下使用^[1-2]。反射式光纤声传感器突出特点是技术简单,性能可靠,价格低,因此在实际中得到了广泛的应用。

传统的反射式强度调制型传感器模型通常由两根光纤组成,一根光纤作为传光光纤把光传送到反射体,另一根作为接收光纤接收到反射光传到探测器。检测到的光强取决于反射体和探头间的距离及传光光纤与接收光纤间的排列方式^[3-6]。通过调整虽能使灵敏度得到一定的提高,但基本上还是在相

同的数量级上。另外,针对强度调制型光纤传感器的测量精度受光源波动、光电探测器、光纤及其他组成器件特性变化影响较大的问题,一些学者也提出了各自的解决方法^[7],但也是基于传统的反射式强度调制型传感器模型,因而仅对灵敏度的稳定性起到了一定的作用。

这里为提高传统反射强度调制型光纤麦克风(RIM-FOM)的灵敏度,基于现有模型结构的分析,提出了一种新的不同于传统结构^[8]的光纤声传感器模型,该模型使用了基于GRIN lens的单模光纤准直器和四周固支的微机电系统(MEMS)薄膜片,通过分析其相关参数的变化来对灵敏度进行研究。仿真结果表明这里提出的模型能有效提高传统光纤声传感器的探测灵敏度。

1 MEMS弹性膜片设计分析

对四周固支的平膜片,假设最大挠度小于1/3厚度,采用小挠度理论;压力均匀作用于平膜片表面

收稿日期:2013-07-11

作者简介:余贵水(1966-),男,江西上饶市鄱阳县人,副教授,硕士生,主要从事信号与信息处理的研究。

的前提下平膜片的挠度^[9]定义为

$$\tilde{\omega} = \frac{3p(1-\mu^2)}{16Eh^3}(t^2 - r^2)^2 \quad (1)$$

平膜片的最低自振荡频率为

$$f_0 = \frac{10.17h}{2\pi t^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\mu^2)\rho}} \quad (2)$$

切向应力

$$\sigma_t = \frac{3p}{8h^2}[t^2(1+\mu) - r^2(1+3\mu)] \quad (3)$$

式中: P 为均布压力; h 为平膜片的厚度; t 为膜片半径; r 为膜片任意部位半径; μ 为膜片材料的泊松比; E 为膜片材料的弹性模量; ρ 为膜片材料的密度。

MEMS 平膜片是刻蚀在硅基上, 采用微加工技术制作, 具有高度平整性和均匀表面。MEMS 压力传感器主要由四周固支平膜片、光纤准直器、单模光纤、玻璃管等构成。图 1 为 MEMS 膜片结构的轮廓图。

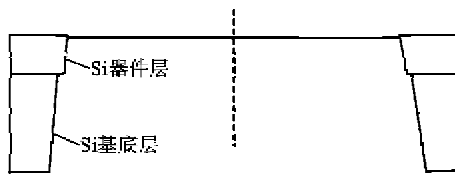


图 1 MEMS 结构示意图

在膜片边缘($r=t$)处, 切向应力达到最大值:

$$\sigma_{ta} = \frac{3pt^2}{4h^2} \quad (4)$$

对于厚 $7 \mu\text{m}$, 半径 2.35 mm 的圆平膜片, 代入式(4), 计算可得膜片在承受 $4.6 \times 10^4 \text{ Pa}$ 均匀压力的情况下, 膜片边缘处所承受的压力为 3.9 GPa 。

由于 3.9 GPa 为膜片边缘所能承受的最大压力, 且一般情况下, 膜片所承受的均匀压力小于 $4.6 \times 10^4 \text{ Pa}$, 所以取厚为 $7 \mu\text{m}$, 半径为 2.35 mm 的膜片一般不易出现破裂的情况。图 2 为有限元仿真结果。由图可见, 数值计算和有限元仿真结果一致, 即膜片的取值符合实际情况。

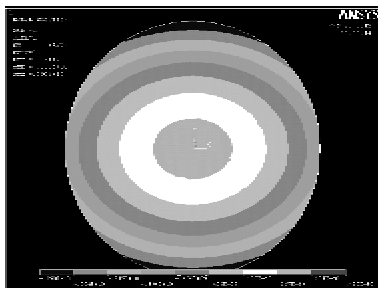


图 2 厚 $7 \mu\text{m}$, 半径 2.35 mm 的四周固支 MEMS 平膜片的压力分布图

当施加变化的压力作用在固支的 MEMS 薄膜片上时, 薄膜的挠度会发生相应的改变, 这将导致单模光纤准直器和 MEMS 膜片间的相对位置变化。而这种改变会直接导致单模光纤准直器发生耦合损耗。

当入射光强保持恒定时, 通过检测接收光纤的耦合变化, 除可得灵敏度外, 还可推知作用于膜片表面的声压, 原理如图 3 所示。

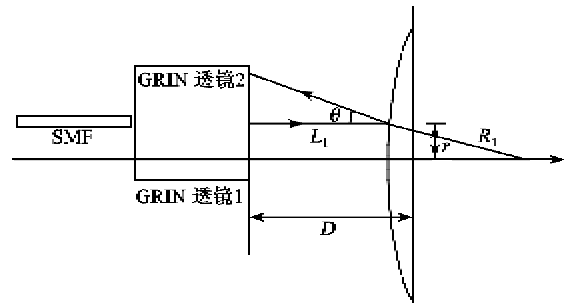


图 3 G-LENS 光纤传感探头

2 GRIN lens 高斯耦合损耗分析

这里采用 G-LENS 透镜作为准直透镜。其传输矩阵表示为

$$A_1 = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A}Z) & \frac{\sin(\sqrt{A}Z)}{n_0 \sqrt{A}} \\ -n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A}Z) & \cos(\sqrt{A}Z) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: Z 为 G-LENS 长度; $\sqrt{A}$ 为 G-LENS 聚焦常数。G-LENS 射出的高斯光束的模场半径为 $\omega(z)$, 曲率半径为 $R(z)$, 由 ABCD 定律有

$$\frac{1}{\omega^2(z)} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im} \left(\frac{1}{q_2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{1}{q_1} = -i \frac{\lambda}{\pi \omega_0^2} \quad (7)$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{c+d(1/q_1)}{a+b(1/q_1)} \quad (8)$$

$$\frac{1}{R(z)} = \text{Re} \left(\frac{1}{q_2} \right) \quad (9)$$

式中: λ 为真空中的波长; ω_0 为单模光纤经过 G-LENS 后的出射端的高斯光束模场半径。

G-LENS 出射端高斯光束强度矢量在 x 方向的分量 $E_x^{[10-11]}$ 可表示为

$$E_x(x, y, z) = E_1 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \times \exp \left\{ -i[kz - \gamma(z)] - r^2 \left[\frac{1}{\omega^2(z)} + i \frac{k}{2R(z)} \right] \right\} \quad (10)$$

均匀介质的透射矩阵 $A_2 = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $L_1 = D - \frac{3p(1-\mu^2)}{16Eh^3}(t^2 - r^2)^2$ 为 G-LENS 透镜出射光线端面到膜片的距离, D 为 G-LENS 透镜出射光线端面到膜片未受力时所在平衡位置的距离; 球面反射镜反射矩阵 $A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix}$, R_1 为球面反射镜的曲率半径, 有 $R_1 = r/\sin(\theta/2)$ 成立; $A_4 = \begin{bmatrix} 1 & L_1/\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $L_1/\cos\theta$ 为膜片反射光到 G-LENS 透镜端面的距离。设 G-LENS 透镜出射光线坐标为 (r_1, θ_1) , G-LENS 透镜接收光线坐标为 (r_2, θ_2) , 应用 **ABCD** 矩阵定律, 有

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = A_4 A_3 A_2 \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

在接收端, 高斯光束模场半径 $\omega(z')$ 和曲率半径 $R(z')$ 分别满足

$$\frac{1}{\omega^2(z')} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im}\left(\frac{1}{q_3}\right) \quad (12)$$

$$\frac{1}{R(z')} = \text{Re}\left(\frac{1}{q_3}\right) \quad (13)$$

$$\frac{1}{q_3} = \frac{c_1 + d_1(1 + q_2)}{a_1 + b_1(1/q_2)} \quad (14)$$

忽略时间因子 $\exp(i\omega t)$ 的影响, 接收端高斯光强度矢量在 x' 方向的分量 $E_{x'}$ 可表示为

$$E_{x'}(x', y', z') = E_1 \frac{\omega_T}{\omega(z')} \times \exp\left\{-i[kz' - \eta(z')] - r'^2 \left[\frac{1}{\omega^2(z')} + i \frac{k}{2R(z')} \right]\right\} \quad (15)$$

图 4 为直角系下两准直坐标示意图。

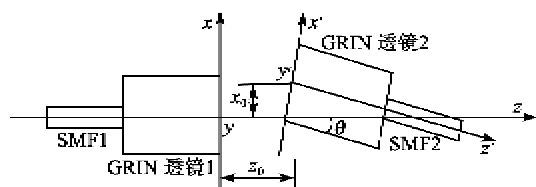


图 4 直角系下两准直坐标示意图

$$x = x' \cos \theta - z' \sin \theta + X_0 \quad (16)$$

$$z = x' \sin \theta + z' \cos \theta + Z_0 \quad (17)$$

$$y = y' \quad (18)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 = (x' \cos \theta - z' \sin \theta + X_0)^2 + y'^2 \quad (19)$$

式中: X_0, Y_0 分别为两 G-LENS 透镜的轴间距离和间隔距离; θ 为 G-LENS 透镜的轴间夹角。

由于声压的作用使得周边固支圆形平膜片发生位移, 从而影响到两 G-LENS 之间的 X_0, Z_0, θ 参数的变化, 导致耦合效率发生改变。由以上讨论可知 $Z_0 = L_1 + L_1/\cos\theta$, $X_0 = r_2 - r_1$, $\theta = |\theta_2| - |\theta_1|$ 。

两高斯光束耦合效率可表示为

$$\eta_c = \frac{2}{\pi E_1^2 \omega_T^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_x(x, y, z) \big|_{z=0} \times E_x^*(x', y', z') \big|_{z=0} dx' dy' \quad (20)$$

通过计算即可求得耦合效率随膜片位移(压力)的改变。

3 仿真分析

单模光纤模场半径为 $4.65 \mu\text{m}$, 折射率为 1.5916, G-LENS 聚焦常数 $\sqrt{A} = 0.327 \text{ mm}^{-1}$ 。入射光波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 膜片的泊松比 $\mu = 0.3$, 厚为 h , 半径为 t , 膜片弹性模量 $E = 1.7 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。G-LENS 长为 3.5 mm , 焦距作为透镜与膜片的初始间隔定为 1.4 mm , G-LENS 出射光束距膜片轴心为 L 。

分别讨论 3 种情况下的光强耦合理论仿真曲线:

1) 图 5 为固定压力为 5 Pa 、膜片半径为 2.35 mm , 膜片厚度取不同值时的耦合损耗曲线。

2) 图 6 为固定压力为 5 Pa 、膜片厚度为 $4.75 \mu\text{m}$, 膜片半径取不同的值时的耦合损耗曲线。

3) 图 7 为固定膜片半径为 2.35 mm 、厚度为 $4.75 \mu\text{m}$, 膜片不同位移时的耦合损耗曲线。

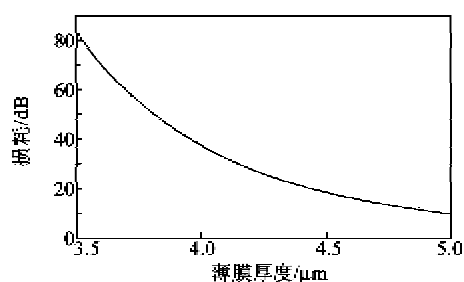


图 5 膜片厚度变化时对应耦合损耗曲线

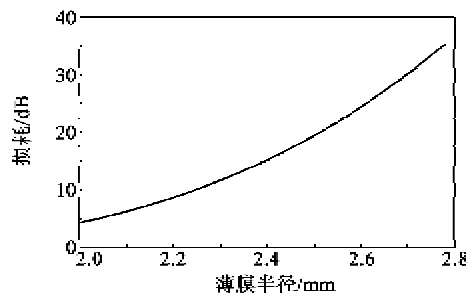


图 6 膜片半径变化时对应耦合损耗曲线

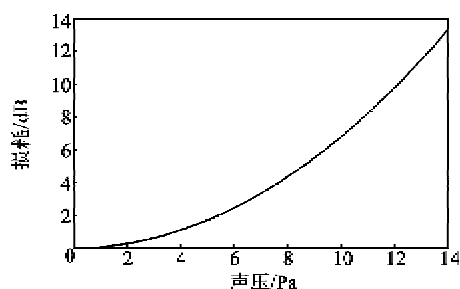


图7 声压变化时对应耦合损耗曲线

由图5~7可看出,在给定声压的情况下,准直器耦合损失幅度的变化即灵敏度与膜片的半径成正比,与膜片的厚度成反比;而在给定膜片大小尺寸的情况下,准直器耦合损失幅度的变化与膜片所受到的外界声压成正比关系。

4 结束语

本文提出了一种包括单光纤准直器和MEMS反射薄膜的光纤声传感器模型。在采用强度调制法的基础上,利用G-LENS作为准直器件,并应用高斯光场的耦合理论,主要对光纤声传感器的探测灵敏度进行研究。结果表明,这里引起的调制参数变化主要是由于MEMS膜片因外界压力作用导致反射角度的变化引起,这与以前因薄膜纵向位移变化引起的调制参数变化有所不同。本文分析了相关参数导致的探测灵敏度的变化。仿真结果显示了本文提出的模型能使光纤声传感器的灵敏度相比以前强度调制有数量级的提高。

参考文献:

- [1] 陈安健. 光纤传感器及其应用[J]. 传感器世界, 1999, 11(2): 25-28.
- [2] 王俊. 新型反射式光纤位移传感系统的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003(2): 34-35.
- [3] 张奕林, 余建荣, 廖延彪, 等. 光纤压力传感器探头的设计[J]. 传感技术学报, 2002, 13(5): 477-479.
- [4] 李亚非. 一种反射式光纤传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(10): 1097-1100.
- [5] ZHANG Hongyu, YAO Shengli, MI Lei. Theoretical analysis of sensing probe in fiber microphone[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 812-814.
- [6] MIAO Changzong, XU Haiying, LIN Changsheng, et al. Experimental research on characteristics of fiber-optic acoustic sensor[J]. Journal of Transduction Technology, 2006, 19(3): 818-820.
- [7] JU Z H, LI Y S, LEI M. Theoretical analysis of sensing probe in fiber microphone[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 812-814.
- [8] 金晓丹, 廖延彪. 强度调制型光纤传感器的补偿技术[J]. 光学学报, 1996, 16(7): 1002-1005.
- [9] YUN W Q. Study on fiber optic fabry-perot acoustic sensor and its application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [10] YUAN S F, NABEEL A R. General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lense[J]. Applied Optics, 1999, 38(15): 3214-3222.
- [11] GILSDORF R W, PALAIS J C. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses[J]. Appl Opt, 1994, 33: 3440-3445.

《压电与声光》广告免费咨询卡

姓名: _____ 职务: _____ 职称: _____ 单位: _____

地址: _____ 邮编: _____ 电话: _____

您对本刊 _____ 年 _____ 期的 ☐ 彩色 ☐ 黑白 ☐ 刊花广告

_____ 公司(厂家) _____ 产品/技术感兴趣

希望: ☐ 索取公司资料 ☐ 索取产品资料 ☐ 询问价格 ☐ 建立业务联系 ☐ 其他 _____

请将卡片寄往(或传真):《压电与声光》编辑部 读者服务部

通讯地址: 重庆南坪 2513 信箱(400060) 电话: 023-62919570 传真: 023-62805284

复印有效