

MEMS 双光纤位移声传感器设计与分析

李晓龙¹, 王江安¹, 吴亚明²

- (1. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033;
2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 提出了一种新型强度调制型光纤传感器的理论模型。该模型使用单模光纤, 讨论了光在准直透镜中的传播规律, 利用光学透镜的准直作用, 即矩阵光学原理和高斯耦合理论实现光强调制。强度型光纤传感器采用微电机系统 MEMS 结构的压力振动膜片拾取振动位移, 通过分析施加在膜片上压力的变化及膜片尺寸得到影响双光纤位移传感器灵敏度的相关参数。仿真结果表明: 合理的选择参数可以使传感器的灵敏度在不增加结构复杂性的前提下较传统方法有 10^3 量级的提高。

关键词: MEMS; 调制; 传感器

中图分类号: TN918.11 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)09-2505-05

Design and analysis of the MEMS dual fiber optic displacement acoustic sensor

Li Xiaolong¹, Wang Jiangan¹, Wu Yaming²

- (1. Electronic Engineering Institute Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Shanghai Institute of Micro-system and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: A new intensity modulated optic microphone theory model was introduced. Single-mode optical fiber here was used to realize collimation of beam. The propagation law in collimation lens was discussed, and light intensity modulation using matrix optical principle and Gaussian coupling theory was realized. The system contains MEMS pressure vibration membrane to pick up vibration displacement. Through the analysis of membrane size and the change of pressure, the related parameters about the sensitivity of fiber optic displacement sensor could be acquired. Simulation results show that the proper choice of parameters can make the sensitivity of sensor improve in orders of 10^3 magnitude than traditional light intensity modulated methods in condition of no increasing the complexity of structure.

Key words: MEMS; modulation; sensor

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(51109217)

作者简介: 李晓龙(1985-), 男, 博士, 主要从事水下声光通信方面的研究。Email: lxl_3515@126.com

0 引言

光纤传感技术是 20 世纪后期迅速发展起来的一项新技术^[1-2], 光纤声压传感器与传统的声压传感器相比, 具有灵敏度高、抗高温、防电磁干扰、耐水性好、安全性高等特点, 适合在恶劣环境下使用。传统的反射式光纤传感器由于技术简单、性能可靠等优点在实际应用中范围非常广泛。张奕林^[3]等在 2002 年探讨过光纤压力传感器探头的设计和计算, 徐海英^[4]等在 2004 年采用了 Y 形单根多模反射式光纤传感探头的结构, 对声压中的光纤传感器进行研究。采用反射式光强调制形式, 虽然可以避免透射式光强调制方式因探头结构复杂导致的响应速度慢的问题, 提高其灵敏度, 但相比干涉型光纤声压传感器, 灵敏度就差了好几个数量级。但干涉型光纤声压传感器由于在解调设施上的复杂性, 又限制了其在实际中的应用。

文中通过应用单模光纤准直器的耦合损耗理论对光纤传感探头进行设计。仿真结果表明: 采用这种模型设计的光纤传感探头, 不仅可避免干涉型光强调制方式因解调结构复杂导致的实际应用难的问题, 还可提高反射式光强调制型光纤传感器的探测灵敏度。

1 光学耦合原理

在自由空间光纤元器件中, 单模和多模光纤的尾纤常用来制作光纤准直器, 这是由于两个光纤准直器之间有一个较大的可允许的距离并且有很低的损耗。

一般来讲, 对于多模光纤准直器的耦合损耗可以通过计算两个准直器的输出光束重叠面积来实现。而对于单模光纤准直器, 应使用近似高斯场的方法计算耦合损耗。单模光纤准直器之间轴向距离、纵向距离、角度以及光斑尺寸的失配均会导致耦合效率的变化。

固定 MEMS 弹性膜片, 当压力作用于膜片时, 膜片将产生挠度, 则单模光纤准直器尾部与膜片之间的位置也将随之改变。这种改变将直接导致 SMF 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就可以得到作用于膜片表面的压力及膜片的位移量, 原理如图 1 所示。

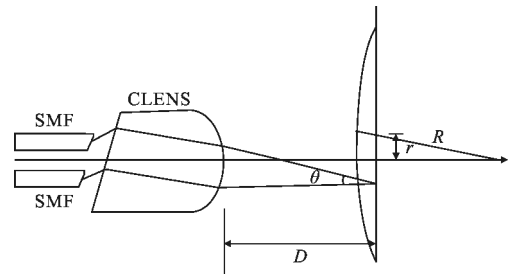


图 1 反射式双光纤传感探头

Fig.1 Double optical fiber sensing reflective probe

2 MEMS 弹性膜片引起的 SMF 准直器耦合损耗分析

2.1 MEMS 弹性膜片设计分析

膜片形变属于弹性力学范畴, 对周边固支圆形平膜片, 在设计计算中可采用以下假设: 平膜片的最大挠度不大于厚度, 采用小挠度理论; 压力均匀作用于平膜片表面。

由弹性力学原理^[5]知, 当均匀压力 P 垂直作用在厚度平膜片上时, 膜片将产生弯曲形变 Y , 在小挠度形变下, 膜片的形变方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dY}{dr} \right) \right) \right) = \frac{P}{D_1} \quad (1)$$

式中: $D_1 = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ 为膜片的抗弯强度; E 为膜片材料的杨氏模量; μ 为膜片材料的泊松比。

对于均匀作用于平膜片的表面压力 P , 通过对公式(1)的积分获得通解表达式

$$Y = \frac{1}{4} c_1 r^2 (\ln r - 1) + \frac{1}{4} c_2 r^2 + c_3 \ln r + c_4 + \frac{Pr^4}{64D_1} \quad (2)$$

式中: c_1, c_2, c_3, c_4 为积分常数, 由圆形膜片的中心和边界条件决定。对周边固支, 半径为 R , 膜片厚度为 h 的圆形平膜片, 其边界条件可表示为: $Y|_{r=R} = 0$, $\partial Y / \partial r|_{r=R} = 0$, $Y|_{r=0}$ 为有限值, 将边界条件带入式可得平膜片挠度为: $Y = \frac{3P(1-\mu^2)}{16Eh^3} (R^2 - r^2)^2$; 中心处最大挠度为: $Y = \frac{3P(1-\mu^2)}{16Eh^3} R^4$ 。其中, P 为均匀压力; r 为膜片任意部位的半径。

2.2 MEMS 头部结构设计

MEMS 膜片是指在 Si 基底上进行刻蚀, 利用微加工技术进行制作。MEMS 声传感器的传感头部主要由四周固支微机械敏感薄膜、双光纤^[6]准直器器件、单模光纤、玻璃管等构成。图 2 是从正面说明该结构特点。

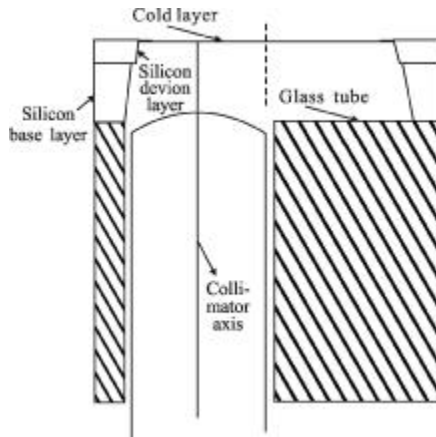


图 2 MEMS 头部结构示意图
Fig.2 MEMS head structure diagram

2.3 插入损耗原理分析

这里采用 C-LENS 透镜作为准直透镜。其传输矩阵表示为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_c/n \\ (1-n)/R & 1+(1-n)L_c/nR \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: L_c 为 C-LENS 透镜长度; R 为 C-LENS 透镜曲率半径。由高斯光束的 ABCD 定律可知, 单模光纤经过 C-LENS 透镜后的出射光束模场半径 $\omega(z)$, 曲率半径 $R(z)$ 应分别满足:

$$\frac{1}{\omega^2(z)} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im} \left\{ \frac{1}{q_2} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{1}{R(z)} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{q_2} \right\} \quad (5)$$

式中: $\frac{1}{q_2} = \frac{c+d}{a+b} \left(\frac{1}{q_1} \right)$, 其中 $\frac{1}{q_1} = -i - \frac{\lambda}{\pi \omega_0^2}$, λ 为入射光波长, ω_0 为单模光纤出射端高斯光束模场半径。

C-LENS 透镜出射端高斯光束强度矢量在 x 方向的分量 E_x 可表示^[7]为:

$$E_x(x, y, z) = E_1 \frac{\omega_r}{\omega(z)} \cdot \exp \left\{ -i[kz - \eta(z)] - r^2 \left[\frac{1}{\omega^2(z)} + i \frac{k}{2R(z)} \right] \right\} \quad (6)$$

又均匀介质的透射矩阵为: $A_2 = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $L_1 = D - \frac{3P(1-\mu^2)}{16Eh^3} (R^2 - r^2)^2$ 为 C-LENS 透镜出射光线端面到

膜片的距离; 球面反射镜反射矩阵 $A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix}$, R_1

为球面反射镜的曲率半径, 有关系式 $R_1 = r/\sin(\theta/2)$ 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 C-LENS 透镜端面的距离。

设 C-LENS 透镜出射光线坐标为 r_1, θ_1 , C-LENS 透镜接收光线坐标为 r_2, θ_2 , 则有关系式:

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = A_4 A_3 A_2 \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

C-LENS 透镜接收端高斯光束模场半径 $\omega(z')$, 曲率半径 $R(z')$ 分别满足:

$$\frac{1}{\omega^2(z')} = -\frac{\pi}{\lambda} \text{Im} \left\{ \frac{1}{q_3} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{1}{R(z')} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{q_3} \right\} \quad (9)$$

式中: $\frac{1}{q_3}$ 满足关系式 $\frac{1}{q_3} = \frac{c_1+d_1}{a_1+b_1} \left(\frac{1}{q_2} \right)$ 。

C-LENS 透镜接收到的有效等价高斯光束强度矢量在 x' 方向的分量 $E_{x'}$ 可表示为:

$$E_{x'}(x', y', z') = E_1 \frac{\omega_r}{\omega(z')} \cdot$$

$$\exp \left\{ -i[kz' - \eta(z')] - r'^2 \left[\frac{1}{\omega^2(z')} + i \frac{k}{2R(z')} \right] \right\} \quad (10)$$

通过图 3 可以看到两个直角坐标系之间的关系为:

$$x = x' \cos\theta - z' \sin\theta + X_0 \quad (11)$$

$$z = z' \sin\theta + z' \cos\theta + Z_0 \quad (12)$$

$$y = y' \quad (13)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 = (x' \cos\theta - z' \sin\theta + X_0)^2 + y'^2 \quad (14)$$

式中: X_0 为两 C-LENS 透镜的轴间距离; Z_0 为两 C-LENS 透镜的间隔距离; θ 为 C-LENS 透镜的轴间夹角。

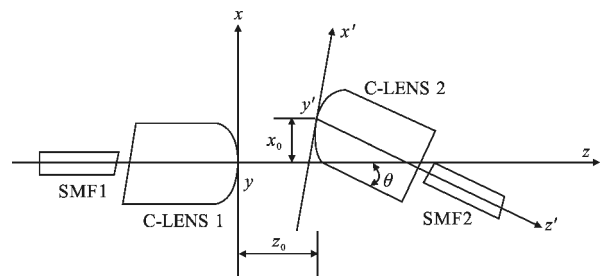


图 3 直角系下两准直坐标示意图

Fig.3 Side view of two fiber collimators in two rectangular system

由于压力的存在使得周边固支圆形平膜片发生位移, 从而影响到两 C-LENS 透镜之间的 X_0, Z_0, θ

参量的变化,导致耦合效率发生改变。由以上讨论可知 $Z_0=L_1+L_1/\cos\theta$, $X_0=r_2-r_1$, $\theta=|\theta_2|$ 。

两高斯光束耦合效率^[8]可表示为:

$$\eta_c = \frac{2}{\pi E_1 \omega_T^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_x(x, y, z)|_{z=0} \times E_x^*(x', y', z')|_{z=0} dx' dy' \quad (15)$$

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

这里选取焦距为 1.4 mm 的 C-LENS 透镜,并作为透镜与膜片的初始间隔。C-LENS 透镜出射光束距其中心处 $h_1 \mu\text{m}$, 距离膜片轴心为 $r \mu\text{m}$ 。C-LENS 透镜折射率为 1.7447, 曲率半径为 1.8 mm, C-LENS 透镜长度选为 3.5 mm。入射光波长为 1.55 μm 。单模光纤出射端高斯光束模场半径为 4.65 μm , 膜片与 C-LENS 透镜中间的空气折射率为 1。膜片材料的弹性模量 $E=1.7 \times 10^{11} \text{ P}$, 膜片材料泊松比 $\mu=0.3$, 膜片厚度为 h , 膜片半径为 R_1 。

一定的声压值会导致膜片各个位置出现不同形变,使这些位置反射到 C-LENS 镜面上的光强耦合损耗也随之发生变化。图 4 所示为声压值在 10 Pa、膜片厚度与半径一定时距离膜片中心不同位置处的光强耦合损耗曲线。横坐标为膜片中心与透镜轴心的距离 L , 纵坐标为对应的光强耦合损耗值:

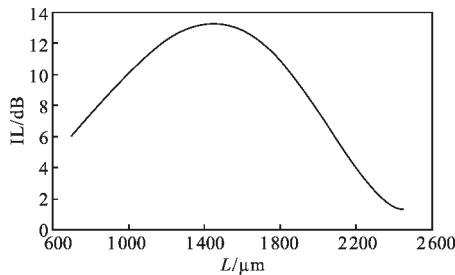


图 4 膜片中心距透镜轴心变化时对应耦合损耗曲线

Fig.4 Coupling loss curve corresponding the change in distance between membrane center and C-LENS axis

下面在选取合适的距离 L 后, 分别讨论三种情况下的光强耦合理论仿真曲线:

(1) 固定压力为 10 Pa、膜片半径 2.35 mm, 膜片厚度取不同值时的耦合损耗曲线, 如图 5 所示。

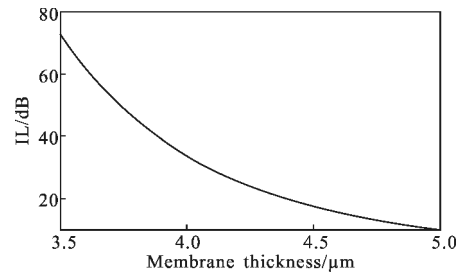


图 5 膜片厚度变化时对应耦合损耗曲线

Fig.5 Coupling loss curve corresponding the change in membrane thickness

(2) 固定压力为 10 Pa、膜片厚度为 4.75 μm , 膜片半径取不同的值时的耦合损耗曲线, 如图 6 所示。

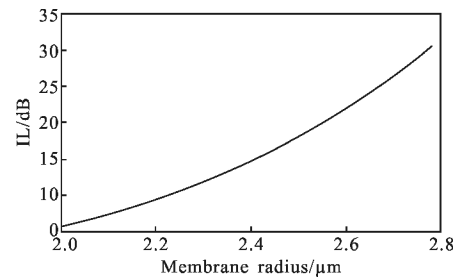


图 6 膜片半径变化时对应耦合损耗曲线

Fig.6 Coupling loss curve corresponding the change in radius

(3) 固定膜片半径为 2.35 mm、厚度为 4.75 μm , 作用在膜片上的压力取不同值时的耦合损耗曲线, 如图 7(a)所示, 同样的膜片参数下, 作用在膜片上的压力取不同的值时所导致的膜片挠度的变化与耦合损耗之间的关系, 如图 7(b)所示。

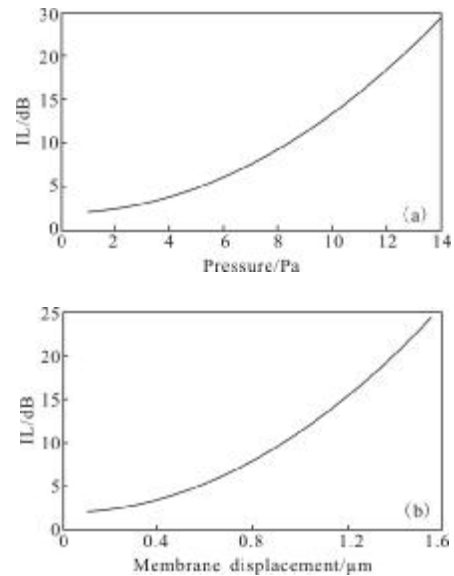


图 7 声压和膜片挠度变化时对应耦合损耗曲线

Fig.7 Coupling loss curve corresponding the change in sound pressure and membrane displacement

从仿真结果可以看出,在给定压力情况下,准直器耦合损失幅度即灵敏度与膜片半径成正比,与膜片厚度成反比;在给定膜片尺寸情况下,准直器耦合损失幅度与膜片所受压力成正比。因此,通过选择合适的膜片尺寸,可以调整光纤压力探头灵敏度。这种方法得到的灵敏度比传统意义上的强度解调有成数量级的提高。

4 结论

文中在采用强度调制方法的基础上,通过膜片尺寸及压力的不同参数代入,对光纤探头压力探测灵敏度进行分析。这里使用单模光纤,在单模光纤与膜片之间利用 C-LENS 透镜作为准直器件。

文中算法在能够接近干涉灵敏度的前提下,使得解调更易实现。仿真结果表明,文中提出的算法^[9-10]能使光纤探头探测压力灵敏度较传统反射式强度解调算法^[7-8]有 10^3 量级的提高。

参考文献:

- [1] Grattan KT V, Sun Dr T. Fiber optic sensor technology: an overview [J]. *Sensors and Actuators* 2000, 82(1-3): 40-61.
- [2] Li Fang, He Jun, Xu Tuanwei, et al. Fiber laser sensing technology and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, (6): 1025-1032
- [3] Zhang Yilin, Yu Jianrong, Liao Yanbiao, et al. The design of optic fiber pressure Sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(5): 43-459.
- [4] Xu Haiying, Jiang Yongliang, Wang Li, et al. Design and research on the sensing probe of fiber-optic microphone [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2004, 17(4): 716-719. (in Chinese)
- [5] Wang Qiaoyun. Study on fiber optic fabry-perot acoustic sensor and its application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] Cui Jiwen, Tan Jiubin, Liu Yang. Measurement of micro-hole with high aspect ratio based on double optical fiber coupling [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, (1): 106-109.
- [7] Yuan Shifu, N A Riza. General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3214-3222.
- [8] Oswald Wallner, Winzer P J, Leeb W R. Alignment tolerances for plane-wave to single-mode fiber coupling and their mitigation by use of pigtailed collimators [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(4): 637-643.
- [9] Li Rui, Xiao Wen, Yap Dong, et al. Experimental system research of fiber acoustic sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 131-134. (in Chinese)
- [10] Buchade P B, Shaligram A D. Influence of fiber geometry on the performance of two-fiber displacement sensor [J]. *Sensors and Actuators A(S0924-4247)*, 2007, 136(1): 199-204.